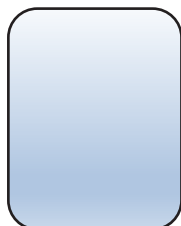


بررسی عملکرد مصالح FRP در تقویت خمشی پنل‌های بتن پارچه‌ای



محمد فیاض

استادیار، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه جامع امام حسین



علی طاهری

کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه جامع امام حسین عضو
حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

بتن پارچه‌ای یک کامپوزیت تشکیل شده از پارچه اسپیسر^۱ سه بعدی است که از طریق جای گیری و آغشته نمودن آن با مواد سیمانی ساخته و پس از هیدراته شدن، سخت می گردد و یک لایه بتنی نازک، بادوام، ضد آب و مقاوم در برابر آتش را ایجاد می کند. از این ماده بتنی برای کاربردهای مختلفی از جمله ساخت سازه های سریع الاحداث، لاینینگ کانال ها، پایدارسازی و تثبیت ترانشه ها، دیواره مخازن و ساخت سنگرهای دفاعی استفاده می گردد. از مزیت های اصلی بتن پارچه ای آن است که می توان آن را با سرعت بالا، حداقل تجهیزات و در جبهه های کار پیچیده مورد استفاده قرار داد. با این حال، بتن پارچه ای دارای کاستی هایی در خواص مکانیکی خود و به طور خاص در مقاومت خمشی خود می باشد. که استفاده از ماده را با محدودیت هایی مواجهه می سازد. در مقابل کامپوزیت تقویت شده با الیاف (FRP) دارای مزایای فراوانی چون وزن سبک، استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی مناسب، تغییر شکل پلاستیک بالا و مقاومت در برابر خستگی می باشد، به همین سبب امروزه از مصالح FRP به طور گسترده ای جهت بهبود مقاومت خمشی سازه ها و مقاوم سازی آن ها استفاده می گردد. در همین راستا این پژوهش به بررسی استفاده از مصالح کامپوزیتی FRP در تقویت خمشی بتن پارچه ای می پردازد. در این بررسی از الیاف های شیشه (GFRP) و کولار (AFRP) در تعداد لایه های مختلف و نیز ترکیبات این الیاف ها با یک دیگر در دو تنوع تار و پود، تحت بار خمشی جهت تقویت بتن پارچه ای استفاده گردیده است، که نتایج حاصل از آن نشان می دهد تقویت بتن پارچه ای با مصالح FRP می تواند به طور موثری بر ارتقاء استحکام خمشی بتن پارچه ای موثر باشد، به نحوی که استفاده از الایه الیاف شیشه و کولار به ترتیب سبب افزایش ۴/۶۴ و ۶/۵۹ برابری مقاومت خمشی پنل های بتن پارچه ای نسبت به حالت فاقد تقویت گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن پارچه ای، مقاومت خمشی، تقویت، الیاف شیشه (GFRP)، الیاف کولار (AFRP).

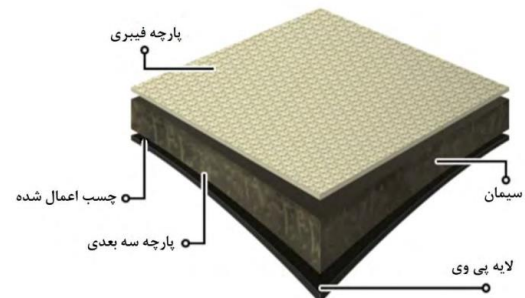
۱- پارچه های اسپیسر منسوجاتی هستند که از ترکیب دو لایه پارچه حلقوی مجزا که توسط نخ های مونوفیلament به یکدیگر متصل شده اند ساخته و تولید می گردد. پارچه اسپیسر یکی از اجزا تشکیل دهنده بتن پارچه ای است که جهت تامین انعطاف پذیری محصول و جلوگیری از رشد ترک در کامپوزیت بتن پارچه ای مورد استفاده قرار می گیرد.

بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی با مصرف بیش از ۱۳ میلیارد تن در سال جایگاه ویژه‌ای را در ساخت انواع سازه‌ها در جهان را دارا می‌باشد [۱]. به عبارت دیگر بتن ساخته شده از سیمان پرتلند پر مصرف‌ترین نوع مصالح ساختمانی است که در پروژه‌های عمرانی در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. دلایل این پیشگامی بتن متعدد است و از مهمترین آن‌ها می‌توان به اقتصادی بودن بتن، در دسترس بودن اجزای تشکیل‌دهنده آن نسبت به سایر مصالح ساختمانی، خواص مهندسی مطلوب، دوام بالا و شکل‌پذیری مناسب آن اشاره نمود. همچنین متنوع بودن و تطابق‌پذیری بتن با سازه‌های مختلف و هزینه نگهداری اندک آن در طول عمر بهره‌برداری از سازه را می‌توان از دیگر دلایل استفاده گسترده از این ماده ساختمانی دانست [۳]. از سوی دیگر بتن در میان سایر مصالح ساختمانی تنها ماده‌ای است که با استفاده از مواد قابل دسترس محلی در هر پروژه ساخته می‌شود و لذا چنانچه مصالح و اجزا تشکیل‌دهنده بتن و عمل‌آوری آن به نحو مطلوب و متناسب با شرایط بهره‌برداری مورد نظر، صورت‌پذیرفته باشد، این فرآیند غیراستاندارد و ناقص در تولید بتن موجب عدم دستیابی به اهداف مورد نظر در طراحی سازه بتنی می‌گردد. همین امر پژوهشگران و محققین حوزه بتن را بر آن داشت تا با ایجاد تغییراتی در این ماده ساختمانی ضمن حفظ خاصیت بتن بر کارایی، کیفیت و دوام آن بیفزایند و از این رو امروزه تغییرات گسترده و قابل‌توجهی را در خصوص

مقاومت، عمل‌آوری، کنترل کیفیت و دوام این ماده ساختمانی شاهد هستیم.

در سالیان اخیر با ایجاد تغییرات و ابتکارات نوآورانه، محصولات جدیدی در حوزه سازه‌های بتنی ارائه گردیده است. از جمله این ابتکارات می‌توان به بتن پارچه‌ای که نوع خاص و جدیدی از این مصالح ساختمانی می‌باشد اشاره نمود. بتن پارچه‌ای یک محصول کامپوزیتی انعطاف‌پذیر متشکل از پارچه های سه بعدی آغشته به پودر سیمان است که در صورت پاشیده شدن آب بر روی سطح آن، در مدت زمان کوتاهی (بسته به نوع سیمان مصرفی متفاوت است) سخت‌شده و لایه‌ای نازک، بادوام، ضد آب و مقاوم در برابر آتش ایجاد می‌کند [۴]. بتن پارچه‌ای اولین بار در سال ۲۰۰۵ میلادی توسط بروین و کراوفورد ارائه گردید. این محصول امروزه صنعتی سازی گردیده و کشورهای مختلفی اقدام به تولید این محصول نموده‌اند. با توجه به اینکه شرکت Concrete Canvas نخستین بار اقدام به تولید صنعتی این محصول نمود امروزه نیز این محصول با همین نام، بتن CC معرفی می‌گردد. [۵]. همان طور که در شکل ۱ ارائه گردیده است، این محصول از پارچه‌ای ژئوسنتتیک تشکیل شده است که شامل سطح رویی، پارچه‌ی سه بعدی پر شده با مواد سیمانی خشک با فرمولاسیونی خاص و یک لایه PVC در زیر آن تشکیل گردیده است. عمل‌آوری این محصول از دو طریق اسپری نمودن آب و یا غوطه‌ور شدن کامل در آب صورت می‌گیرد و پس از هیدراتاسیون آن و در مدت ۲۴ ساعت به حدود نهایت مقاومت خود خواهد رسید [۶]. سرعت اجرا بتن پارچه‌ای در

مقایسه با بتن معمولی ۱۰ برابر سریع تر است. این محصول به صورت رول شده تولید و در ضخامت های ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلی متروبا عرض ۱۱۰ تا ۲۲۰ سانتی متر و با طول های متفاوت تولید می گردد.



شکل ۱- اجزای تشکیل دهنده بتن پارچه ای (CC)

بتن پارچه ای دارای مزایایی فراوانی همچون نصب سریع، اجرای آسان، دوام بالا، سازگاری با محیط زیست، مقاومت در برابر حملات مواد شیمیایی و خوردگی و همچنین هزینه تمام شده پایین می باشد. از این محصول می توان در تثبیت خاک ها و ترانشه ها، ترمیم و تقویت دیواره ها و گابیون ها، لاینینگ کانال ها، خروجی مخازن و سرریزها، پد پالگرد، دیواره مخازن و پالایشگاه ها و نیز ساخت پناهگاه ها و سنگرهای سریع الاحداث استفاده نمود [۷]. با وجود چشم انداز بسیار گسترده ای استفاده از بتن پارچه ای به خصوص در کاربردهای آن در ساخت سازه های سریع الاحداث، پناهگاه ها و سنگر ها، و همچنین مخازن و پالایشگاه ها، این متریال دارای ضعف هایی در خواص مکانیکی خود از جمله مقاومت خمشی خود می باشد؛ که موجب محدودیت و ایجاد چالش هایی در استفاده از این محصول ارزشمند می گردد. [۸] لذا و با توجه به ضعف های موجود در بتن پارچه ای ارتقاء، مقاوم سازی و بهبود خواص مکانیکی این متریال به منظور استفاده گسترده تر و با خواص بهتر

به خصوص در کاربردهای نظامی و دفاعی این محصول با هدف حفظ جان افراد و تجهیزات و امکانات یک ضرورت قلمداد می گردد. بتن پارچه ای یک ماده کامپوزیتی است که از ماتریس سیمان و پارچه اسپیسر سه بعدی تشکیل شده است و لذا عملکرد بتن پارچه ای تابع خواص ماتریس سیمانی، مقاومت پارچه اسپیسر سه بعدی و اتصال و یکپارچگی میان آن ها می باشد. ماتریس سیمان به عنوان جز برابر بتن پارچه ای، شامل ویژگی های سیمان، کیفیت پرکنندگی پارچه و مواد افزودنی موجود در سیمان می باشد که نقش به سزایی در عملکرد بتن پارچه ای در برابر بارگذاری های مکانیکی و دینامیکی این محصول دارد [۹]. به علاوه خواص، کسر حجمی و الگوی هندسی پارچه اسپیسر نیز تأثیر مهمی بر خواص و ویژگی های کامپوزیت دارد. بر همین اساس روش ها و رویکردهای تقویت بتن پارچه ای در برابر بارهای مکانیکی نیز به طور عمده مبتنی بر همین دوحوزه می باشد. علاوه بر آنکه استفاده از تقویت کننده های خارجی و مصالح کامپوزیت FRP نیز به سبب وزن سبک، استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی، تغییر شکل پلاستیک بالا و مقاومت در برابر خستگی می تواند به طور موثری کاستی های استحکام و مقاومت در برابر نفوذ ضعیف بتن پارچه ای را جبران نماید. در ادامه تعدادی از مهم ترین پژوهش های صورت گرفته با هدف ارتقاء خواص مکانیکی بتن پارچه ای ارائه می گردد.

یپ و همکاران [۱۰]، به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی پارچه های اسپیسر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می دهد هم نفوذپذیری هوا و هم

هدایت حرارتی ارتباط نزدیکی با تراکم پارچه دارند. به علاوه خواص خواص فشرده سازی و مقاومت فشاری نیز بسیار به نوع نخ اسپیسر و آرایش نخ مورد استفاده در پارچه اسپیسر بستگی دارد. همچنین مشخص گردید خواص خمشی پارچه اسپیسر نیز ارتباط نزدیکی با نوع پارچه، ساختار، نوع نخ و چگالی آن دارد، در حالی که خواص کششی به نوع پارچه و نوع نخ اسپیسر وابسته می باشد بنابراین، انتخاب دقیق پارچه اسپیسر با توجه به کاربرد مورد نظر آن از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. هو و همکاران [۱۱]، به بررسی و شبیه سازی رفتار پارچه اسپیسر سه بعدی و عوامل موثر بر تغییر شکل فشاری آن پرداختند. آنان در بررسی از روش های عددی برای تحلیل مکانیسم فشرده سازی پارچه اسپیسر سه بعدی بر اساس ویژگی های ساختاری آن و تحلیل عملکرد فشاری پارچه اسپیسر را مورد استفاده قرار دادند. نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان می دهد فرآیند تولید و پس از تولید پارچه می تواند به طور قابل ملاحظه ای ساختار پارچه اسپیسر سه بعدی را موثر باشد. وانگ و همکاران [۱۲]، به بررسی اثر تقویتی و ارتقا خواص مکانیکی فوم ها و ملات های سیمانی با استفاده از پارچه مشبک ساندویچی سه بعدی (WLSF) پرداختند. پارچه سه بعدی مورد استفاده شامل منسوجی بافته شده است که دو صفحه پارچه ای در دو طرف آن به وسیله نخ های اتصال دهنده آن ها را به هم متصل می کند. در این مطالعه با استفاده از پارچه WLSF ظرفیت خمشی کامپوزیت تولید شده، نسبت به نمونه مسلح نشده چهار برابر شده است؛ و همچنین استفاده از

پارچه و شیوه تهیه مناسب سبب گردیده تا خیز بیشتری توسط کامپوزیت تحمل و رفتار کلی کامپوزیت نیز شکل پذیرتر گردد. بائو^۱ و همکاران [۱۳]، مکانیزیم و نحوه تأثیر پنج نوع سیمان مورد استفاده، به عنوان ماتریس سیمانی بتن پارچه ای (یعنی سیمان منیزیم- فسفات، سیمان کلسیم سولفو-آلومینات، سیمان منیزیم - کلرید، سیمان با آلومینا بالا و سیمان پرتلند) را بر روی مقاومت فشاری بتن پارچه ای مورد مطالعه قرار دادند. گوئو^۲ و همکاران [۱۴] نیز کاربرد سیمان منیزیم فسفات را به عنوان ماتریس در بتن پارچه ای بررسی کرد و به استحکام نسبتاً بالایی دست یافت. با این وجود، نمونه ها نسبت به هالوژنه شدن، شوره زدن و سفت شدن (گیرش نهایی) بیش از حد سریع و حساس بودند و همچنین تهیه و کنترل شاخص های مواد اولیه مشکل بود. با توجه به چگالی ظاهری پایین قبل و بعد از سفت شدن (گیرش نهایی) و تخلخل بالای بتن پارچه ای تجاری، کائو^۳ و همکاران نیز طی پژوهشی، به بررسی اصلاح سیمان پرداختند و سیمان پرتلند، سیمان فسفات پتاسیم منیزیم و سیمان سولفات-آلومینیوم^۴ را آزمایش کردند. با توجه به قابلیت افزایش حجم انیدریت، کائو [۱۵] اثرات قبل از افزودن انیدریت را نیز مقایسه کرد و پارچه الیاف ۱۰۰ درصد پلی استری را به کار برد. با

¹ Bao B

² Guo Y

³ Cao P

⁴ sulfate-aluminum cement

طرفه نانولوله کربنی (CNT) اصلاح شده، با وزن مولکولی بالا پلی اتیلن (UHMWPE) به جای PVC در قسمت زیرین نمونه‌ها استفاده نمودند. ژانگ و همکاران [۱۹]، به منظور بهبود خواص مکانیکی بتن پارچه‌ای استفاده از ورق‌های FRP را بر روی بتن پارچه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در بتن پارچه‌ای پس از تقویت با کامپوزیت تقویت شده با الیاف خارجی (FRP)، بهبودهای قابل توجهی در استحکام کششی، خمشی آن ایجاد گردیده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از الایه الیاف آرامیدی (کولار) سبب ارتقاء خواص مکانیکی بتن پارچه‌ای از جمله مقاومت کششی و خمشی آن می‌گردد. در سال ۲۰۲۱، جیانگ‌انگ نیو^۶ و همکاران [۲۰]، به بررسی تأثیر شکل مقطع ستون‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی بتن پارچه‌ای تقویت شده (مسلح) با الیاف کربن پرداختند. در این مطالعه، از بتن پارچه‌ای و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) برای تقویت ستون‌هایی با سطح مقطع مربع، هشت ضلعی، دایره‌ای و بیضی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از بتن پارچه‌ای و الیاف کربن به طور محسوسی سبب افزایش مقاومت فشاری ستون‌ها می‌گردد، به علاوه استفاده از بتن پارچه‌ای بر روی نمونه‌های فشاری تقویت شده با الیاف کربن، شکل پذیری ستون را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد و تا حدی نیز ظرفیت باربری آن را افزایش

می‌دهد. همان‌طور که اشاره گردید بتن پارچه‌ای علی‌رغم مزایای فراوان خود دارای ضعف‌هایی در خواص مکانیکی و به طور خاص مقاومت خمشی خود می‌باشد، در مقابل مصالح کامپوزیت تقویت شده با الیاف (FRP) دارای مزایای فراوانی از جمله، وزن سبک، استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی، تغییر شکل پلاستیک بالا و مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. لذا این پژوهش به بررسی اثر تقویتی مصالح FRP بر ارتقاء مقاومت و عملکرد خمشی بتن پارچه‌ای می‌پردازد. در این پژوهش از دو نوع الیاف شیشه و آرامید (کولار) جهت تقویت بتن پارچه‌ای استفاده شده است تا ضمن بررسی نحوه تأثیر و عملکرد الیاف‌های شیشه و آرامید (کولار) در تعداد لایه‌های مختلف و همچنین طرح‌های ترکیبی این ۲ الیاف، ارتقاء مقاومت خمشی و شکل پذیری این متریال در تقویت با مصالح FRP مورد بررسی قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

همان‌طور که اشاره گردید بتن پارچه‌ای از دو جز اصلی پارچه اسپیسر سه بعدی، مخلوط سیمانی به همراه لایه آب‌بند کننده PVC تشکیل شده است. به عبارت دیگر بتن پارچه‌ای شامل یک پارچه اسپیسر سه بعدی است که با یک مخلوط سیمانی خشک با فرمول خاص آغشته و پر شده است. و همچنین یک پوشش PVC در پشت نمونه نیز موجب ضد آب شدن نمونه و جلوگیری از بیرون ریختن سیمان از داخل حفرات پارچه اسپیسر می‌شود. در این پژوهش در ساخت تمامی نمونه‌های بتن پارچه‌ای مورد بررسی، از پارچه اسپیسر سه-

^۶ Jiangang Niu

همچنین نمونه صنعتی تولید داخل، از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان تهران، به عنوان مخلوط سیمانی در ساخت نمونه‌های بتن پارچه‌ای استفاده شده است، که ویژگی‌های و نحوه ترکیبات موجود در آن در جداول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲ مورد استفاده

ویژگی	استاندارد مربوطه	مقدار
میزان نرمی بدست‌آمده تست بلین	ASTMC204	$2800 \text{ cm}^2/\text{gr}$
زمان گیرش	ASTMC82	اولیه (دقیقه) ۱۴۰
		ثانویه (دقیقه) ۲۱۰
مقاومت فشاری	ASTMC109	۳ روزه 20 kg/cm^2
		۷ روزه 28 kg/cm^2
		۲۸ روزه 38 kg/cm^2

مواد مرکب FRP از دو جز اصلی تشکیل گردیده‌اند که عبارتند از: الیاف تقویت کننده و ماتریس پلیمری یا ماده زمینه. استفاده از الیاف، در مصالح FRP سبب استحکام بخشی و مقاومت ماده کامپوزیتی در برابر تنش‌های اعمالی می‌گردد. ماده زمینه نیز الیاف تقویت کننده را به یکدیگر و سطح مورد تقویت متصل می‌کند و به مواد FRP، شکل و استحکام می‌بخشند. در یک کامپوزیت FRP الیاف به عنوان عضو باربر اصلی محسوب می‌گردد در حالی که ماتریس زمینه آن‌ها در محل و آرایش مطلوب نگه‌داشته است و به عنوان یک محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می‌کند به علاوه آن‌ها را از آسیب‌های محیطی در اثر افزایش دما یا رطوبت حفظ می‌کند در این پژوهش از دو نوع الیاف شیشه (GFRP) و کولار (AFRP) در طرح‌های ۱ و ۳ لایه به صورت تک الیاف و طرح‌های ترکیبی ۲ و ۳ لایه این دو الیاف، به منظور تقویت خمشی پنل‌های بتن

بعدی بافت شده با نخ‌های پلی اتیلن ترفتالات (PET) استفاده شده است. ویژگی‌های نخ پارچه اسپیسر PET مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن پارچه‌ای مطابق با جدول ۱ می‌باشد. پارچه‌های اسپیسر ترکیبی از دو لایه پارچه حلقوی مجزا هستند. که توسط نخ‌های مونوفیلانمنت مطابق به یکدیگر متصل شده‌اند. پارچه اسپیسر مورد استفاده در بتن پارچه‌ای دارای یک وجه متراکم و یک وجه مش مانند می‌باشد و در فضای میان این دو دو لایه پارچه نخ‌های اسپیسر قرار گرفته‌اند که این دو لایه را به یکدیگر وصل کرده‌اند.

برای بافت این نوع پارچه از نخ‌های باریک و نازکی استفاده شده است تا محصول دارای انعطاف مناسبی باشد. در جدول ۱ ویژگی‌های پارچه اسپیسر مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن پارچه‌ای آورده شده است. در واقع هدف استفاده از پارچه اسپیسر در بتن پارچه‌ای، شکل‌پذیری بتن پارچه‌ای و ممانعت از رشد ترک‌های کششی و خمشی در پنل‌های بتن پارچه‌ای می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات پارچه اسپیسر

نوع پارچه	عرض (Cm)	ضخامت (mm)	مقدار تراکم نخ پارچه اسپیسر ($1/\text{cm}^2$)
اسپیسر PET	۱۱۰	۱۳	۷۰

دومین جز تشکیل دهنده بتن پارچه‌ای فاز سیمان آن می‌باشد. در بتن پارچه‌ای سیمان نقشی حیاتی داشته و به عنوان عامل مقاومتی در بتن پارچه‌ای می‌باشد به عبارت دیگر تقریباً تمام خواص مقاومتی بتن پارچه‌ای اعم از خواص مکانیکی از جمله خمش آن تا حد زیادی به سیمان به کار رفته در بتن پارچه‌ای بستگی دارد. که ماده را سخت و جامد می‌کند و آن را از یک پارچه انعطاف پذیر به یک لایه بتن بادوام تبدیل می‌کند. در این بررسی به منظور انطباق و مقایسه بهتر نتایج با پژوهش‌های گذشته و

پارچه‌ای استفاده شده است. الیاف شیشه مورد استفاده از نوع الیاف شیشه ۲۰۰ گرمی ریزبافت Plain، از نوع E-glass، استفاده شده است با تراکم ۱۰۰ درصد، ساخت کشور چین و تهیه شده از شرکت ایران کامپوزیت استفاده گردیده است. همچنین الیاف کولار مورد استفاده نیز از نوع الیاف کولار ۴۹، ۲۰۰ گرمی و به صورت بافت Plain، ساخت کشور چین و تهیه شده از شرکت ایران کامپوزیت می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه و کولار مورد استفاده در تقویت‌های بتن پارچه‌ای در جدول ۳ ارائه گردیده است. در این پژوهش از رزین اپوکسی LR۶۳۰ تولید شرکت ایران کامپوزیت به عنوان ماتریس زمینه، جهت اتصال ورق‌های FRP شیشه و کولار به سطح بتن پارچه‌ای استفاده شده است. که خواص آن در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی مصالح FRP مورد استفاده

نوع	دانسیته (Kg/m^3)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
شیشه	۲۱۰۰	۲۸۰۰	۷۲
آرامید (کولار)	۱۴۷۹	۳۷۹۲	۱۳۰
رزین اپوکسی	۱۱۵۰	۶۲	۳/۵۱

۲-۲- نحوه ساخت نمونه‌های بتن پارچه‌ای

برای ساخت نمونه‌های بتن پارچه‌ای ابتدا پنل‌های پارچه اسپیسر در ابعاد 30×30 سانتی متر آماده گردید، سپس سیمان پرتلند تیپ ۲ از وجه مش‌دار (پشتی)

پارچه اسپیسر به درون پارچه ریخته شد. از آنجا که از آنجا که مقاومت بتن پارچه‌ای در برابر بارهای مکانیکی تا حدود زیادی وابسته به فاز سیمانی بتن

پارچه‌ای می‌باشد مخلوط سیمان می‌بایستی در سرتاسر پارچه اسپیسر به صورت یکنواخت و همگن توزیع گردد. به همین دلیل استفاده از میز لرزان مکانیکی در حین ریختن مخلوط سیمانی به داخل خفرات پارچه اسپیسر ضروری می‌باشد، تا همه سطح پارچه به صورت همگن و یکنواخت به سیمان آغشته گردد. سپس لایه پی‌وی سی آغشته به چسب هات‌ملت که پیش‌تر در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شده و حالت کاملاً روان و نرمی دارد به جهت آب‌بند کردن نمونه‌ها و جلوگیری از بیرون ریختن مواد سیمانی موجود در پارچه اسپیسر بر روی و وجه پشتی نمونه‌ها چسبانده می‌شود. نمونه‌ای از پنل‌های ساخته شده در شکل ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۲- پنل ساخته شده بتن پارچه‌ای پیش از اسپری نمودن آب رسانی و عمل آوری

پس از گیرش و خشک شدن چسب و اتصال ورقه پی‌وی سی به بتن پارچه‌ای، پنل‌های بتن پارچه‌ای از وجه رویی خود (پارچه فیبری) مطابق استاندارد ASTM D8030 آب به صورت اسپری شده با دمای ۱۹ درجه سلسیوس و به صورت یکسان در تمامی نواحی پنل‌ها پاش گردید. سپس به جهت تکمیل فرآیند گیرش اولیه سیمان در دما و طوبت استاندارد قرار می‌گیرند تا فرآیند هیدراتاسیون سیمان تکمیل گردد. پس از ۲۴ ساعت و با تکمیل گیرش ابتدایی پنل‌های پارچه‌ای به حوضچه آب با دمای 24 ± 2

منتقل و تا سن مورد نظر در داخل حوضچه نگهداری گردیدند [۲۱]. با توجه به آنکه بر اساس استاندارد و پژوهش‌های صورت گرفته نظیر، هان و همکاران [۱۷]، لی و همکاران [۱۸]، زانک و همکاران [۱۹]، که ارزیابی مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای را در سن ۱۰ روز مورد ارزیابی قرار دادند و به منظور مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات پیشین پنل‌های بتن پارچه‌ای تا سن ۱۰ روز مورد عمل‌آوری و کیورینگ قرار گرفتند و سپس از حوضچه‌ها خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای استاندارد خشک‌شده و سپس با استفاده از مصالح FRP تقویت گردیدند.

۳-۲- نحوه تقویت پنل‌های بتن پارچه‌ای با

مصالح FRP

پس از آنکه نمونه‌های بتن پارچه‌ای از حوضچه‌های آب خارج شده و در شرایط آزمایشگاهی خشک گردیدند کار تقویت نمونه‌ها با استفاده الیاف شیشه و کولار بر روی آن‌ها آغاز گردید. بدین منظور ابتدا سطح نمونه‌ها جهت اتصال بهتر با مصالح FRP با استفاده از دستگاه هوادهی و برس پلاستیکی به آرامی و به نحوی که موجب آسیب دیدن بافت پارچه نگردد تمیز گردید. در مرحله بعد رزین و هاردنر باید با نسبت ارائه‌شده در دیتاشیت سازنده- رزین اپوکسی LR۶۳۰، رزین به میزان ۳۰۰ گرم با هاردنر H۶۳۰ به نسبت ۳۰ درصد وزنی (۹۰ گرم) مخلوط گردید. سپس ترکیب اپوکسی و هاردنر به خوبی با یکدیگر مخلوط شدند تا ترکیبی یک دست و شفاف به دست آید. بعد از آنکه سطح پنل‌های بتن پارچه‌ای به طور کامل با اپوکسی آغشته گردید، الیاف‌های تقویتی به صورت لایه‌ای بر روی پنل‌ها اجرا و متصل گردید. هر هر مرحله از نصب لایه‌های

تقویتی با استفاده از غلتک، هوای موجود میان ورق‌های تقویت و بتن پارچه‌ای خارج گردید و سپس لایه تقویت بعدی بر روی سطح بتن پارچه‌ای چسبانیده شد.

در این پژوهش طرح‌های تقویت با استفاده از الیاف شیشه (GFRP) و کولار (AFRP) در تعداد لایه‌های ۱، ۲ و ۳ و همچنین طرح‌های تقویتی ترکیبی الیاف شیشه و کولار شامل طرح الیاف شیشه/الیاف کولار، ۲ لایه شیشه / ۱ لایه کولار و ۲ لایه کولار/ ۱ لایه شیشه، در دو تنوع تار و پود ساخته و مورد ارزیابی مقاومت خمشی قرار گرفت. توجه به اینکه یکی از اهداف مطالعه حاضر بررسی تاثیر بافت پارچه اسپیسر سه بعدی بر مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای با و بدون تقویت می‌باشد کلیه نمونه‌های بتن پارچه- ای شاهد و تقویت‌شده در هر طرح در دو جهت تار و پودی اجرا و در مجموع ۲۰ طرح در سه تکرار برای هر یک از جهت‌های تار و پود ساخته شد. پنل- های بتن پارچه‌ای پس از تقویت با مصالح FRP مطابق دستورالعمل شرکت سازنده به منظور کسب حداکثر مقاومت ماتریس پلیمری به مدت ۱۴ روز مورد عمل‌آوری قرار و پس از آن جهت تست خمش مورد آماده‌سازی قرار گرفت.

۳-۴- آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن

پارچه‌ای تقویت‌شده با مصالح FRP

بر اساس استاندارد ASTM D8364 [۲۲] که استاندارد مرجع تعیین خواص بتن پارچه‌ای می‌باشد. مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D8058 تعیین می‌گردد. مطابق استاندارد ASTM D8058، نمونه‌ی GCCM هیدراته‌شده که فرایند عمل‌آوری مد نظر برای آن تکمیل گردیده شده باشد، تحت آزمایش خمش سه نقطه با بار

محوری متمرکز در وسط دهانه آزمون قرار می‌گیرد؛ که طی آن میزان بار، مقاومت خمشی، میزان خیز (تغییر شکل) برای هر آزمون محاسبه می‌گردد. [۲۳] به منظور انجام آزمون خمش نمونه‌های بتن پارچه‌ای ابتدا پنل‌های تقویت‌شده با مواد FRP پس از دوره عمل‌آوری با استفاده از تیغ الماسه آزمایشگاهی در ابعاد مورد نظر استاندارد ASTM D8058، (۴۰×۱۶۰ میلی‌متر)، بریده و آماده‌سازی گردیده و سپس به آزمایشگاه پلیمر بنیاد علوم کاربردی رازی و آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه صنعتی شریف جهت تست منتقل گردید.

دستگاه خمش سه نقطه مورد نظر ASTM D8058 ، دارای تکیه‌گاه پایینی و یک بار متمرکز در وسط دهانه برای بارگذاری نمونه می‌باشد. تکیه‌گاه‌های دستگاه باید به صورت استوانه‌ای شکل بوده که در محل تماس با نمونه مطابق ASTM D8058 می‌بایستی دارای حداقل شعاع ۳/۲ میلی‌متر و حداکثر شعاع ۱۲/۷ میلی‌متر باشد. که در دستگاه مورد استفاده در این تست این مقدار ۶/۷ میلی‌متر بوده است. به علاوه سطح بارگذاری نیز باید دارای یک لبه یک شکل بلبرینگ، به صورت استوانه افقی شکل باشد. اندازه دهانه در این آزمایش بر اساس استاندارد مذکور می‌بایستی ۱۰۰ میلی‌متر باشد و همچنین خط بار و تکیه‌گاه‌ها نیز در موازات یکدیگر قرار گیرند. بر اساس استاندارد ASTM D8058 هر نمونه می‌بایست در طول ۱۶۰ و عرض ۴۰ میلی‌متر و تهیه و در ۳ تکرار در راستای تار و پود تحت بارگذاری قرار گیرد. به علاوه مطابق با نظر استاندارد

نرخ بارگذاری در همه نمونه‌ها ثابت و سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. بر اساس استاندارد ASTM D8058 مقاومت خمشی هر آزمون بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_n = \frac{3P_n L}{2bd^2}$$

که در رابطه فوق:

R_n = مقاومت (استحکام) خمشی هر آزمون، بر حسب MPa؛

P_n = نیرو گسیختگی (حداکثر نیروی تاب آوری

خمشی) هر آزمون، بر حسب N؛

L = طول دهانه بر حسب mm؛

b = عرض آزمون بر حسب mm؛

d = ضخامت متوسط آزمون بر حسب mm.

۳- مشاهدات و نتایج آزمون خمش

آزمون خمش برای نمونه‌های بتن پارچه‌ای بدون تقویت و با تقویت با مصالح FRP در دو جهت تار و پود پارچه، در ۱۰ طرح و با استفاده از الیاف‌های شیشه ریزبافت دوجهته ۲۰۰ گرم و الیاف کولار بافت پلین دوجهته ۲۰۰ گرم در ۳ تکرار و در ابعاد مورد نظر استاندارد ASTM D8058، طول $160 \pm 1/6$ و عرض $40 \pm 1/6$ میلی‌متر بریده و آماده‌سازی گردید. آزمایشات نمونه‌های خمشی در دو آزمایشگاه مرکز پلیمر بنیاد علوم کاربردی رازی و آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه شریف صورت پذیرفت است. نتایج حاصل از بارگذاری خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با مصالح FRP در جدول ۴ ارائه گردیده است. نماد CC در جدول ۴ معرف بتن پارچه‌ای و عبارت پس از آن بیانگر نوع تقویت اجرا شده بر روی آن می‌باشد.

جدول ۴- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با مصالح FRP

سری نمونه	نوع تقویت	تنش خمشی متوسط (MPa)	متوسط ماکزیم نیرو خمشی شکست (N)	حداکثر خیز نقطه شکست (mm)
Wa ¹ -CC	شاهد	۵/۶۱	۱۸۶/۷۱	۳۰/۰۶
We ² -CC	شاهد	۵/۳۳	۱۵۸/۵۷	۲۱/۸۸
Wa-CC-1GFRP	۱ لایه GFRP	۲۶/۰۸	۹۸۴/۹۲	۴/۱۷
We-CC-1GFRP	۱ لایه GFRP	۲۴/۶۵	۹۲۱/۵۳	۴/۱۲
Wa-CC-2GFRP	۲ لایه GFRP	۳۸/۶۵	۱۳۵۵/۲۵	۲/۸۳
We-CC-2GFRP	۲ لایه GFRP	۳۵/۲۳	۱۲۸۱/۷۷	۲/۶۲
Wa-CC-3GFRP	۳ لایه GFRP	۴۶/۶۱	۱۸۹۶/۲۷	۲/۴۱
We-CC-3GFRP	۳ لایه GFRP	۴۱/۴۰	۱۸۸۲/۸۸	۲/۱۰
Wa-CC-1AFRP	۱ لایه AFRP	۳۷/۰۱	۱۳۷۰/۹۵	۲۰/۳۵
We-CC-1AFRP	۱ لایه AFRP	۳۱/۵۳	۱۲۶۴/۴۲	۱۸/۰۲
Wa-CC-2AFRP	۲ لایه AFRP	۵۵/۱۳	۲۱۰۸/۶۷	۱۲/۷۹
We-CC-2AFRP	۲ لایه AFRP	۵۱/۶۰	۱۸۴۱/۹۸	۱۰/۴۵
Wa-CC-3AFRP	۳ لایه AFRP	۶۵/۷۶	۳۰۳۸/۶۵	۷/۹۸
We-CC-3AFRP	۳ لایه AFRP	۵۶/۵۴	۲۶۵۳/۸۶	۶/۶۵
Wa-CC-1GFRP/1AFRP	۱ لایه GFRP؛ ۱ لایه AFRP	۴۰/۱۰	۱۷۶۶/۷۸	۱۴/۵۴
We-CC-1GFRP/1AFRP	۱ لایه GFRP؛ ۱ لایه AFRP	۳۹/۱۱	۱۶۷۸/۳۲	۱۱/۵۳
Wa-CC-2GFRP/1AFRP	۲ لایه GFRP؛ ۱ لایه AFRP	۵۲/۰۶	۲۱۳۵/۳۶	۸/۵۸
We-CC-2GFRP/1AFRP	۲ لایه GFRP؛ ۱ لایه AFRP	۵۰/۷۳	۱۹۴۵/۹۲	۷/۴۳
Wa-CC-1GFRP/2AFRP	۲ لایه AFRP؛ ۱ لایه GFRP	۶۱/۲۳	۲۴۲۹/۷۰	۱۲/۴۲
We-CC-1GFRP/2AFRP	۲ لایه AFRP؛ ۱ لایه GFRP	۵۲/۳۴	۲۴۱۵/۲۰	۹/۷۳

۱- عبارت Wa در جدول ۴ به معرف جهت تار (warp) بتن پارچه‌ای می‌باشد.

۲- عبارت We در جدول ۴ معرف جهت پود (weft) بتن پارچه‌ای می‌باشد.

استاندارد ASTM D8058 تحت آزمون خمش سه نقطه قرار گرفت. حداکثر میزان تغییر مکان ثبت شده برای نمونه‌های خمشی بتن پارچه‌ای در تنوع تار ۳۰/۰۶ و برای تنوع پودی ۲۱/۸۸ میلی‌متر می‌باشد.

به منظور درک بهتر و بررسی کامل‌تر نحوه کیفیت و میزان تاثیر استفاده از انواع مصالح FRP، ۶ نمونه در دو تنوع تار و پودی بتن پارچه‌ای فاقد تقویت به عنوان نمونه‌های شاهد و در ابعاد منطبق بر

ترک ها تنش بحرانی نواحی شکست را منتقل می کنند و از انتشار بیشتر ترک ها جلوگیری می کنند. این مکانیزم انتقال بار سبب خیز بیشتر بتن پارچه ای پیش از شکست می گردد.

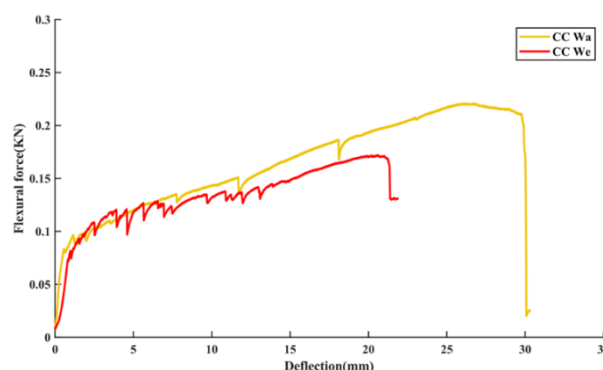


شکل ۴- بتن پارچه ای فاقد تقویت پس از بارگذاری خمشی

در طرح تقویت بتن پارچه ای با الایه الیاف شیشه نتایج نشان می دهد متوسط استحکام خمشی در تنوع تار نمونه های بتن پارچه ای تقویت شده با الایه- شیشه ۲۶/۰۸ و در نمونه های پودی ۲۴/۶۵ مگاپاسکال می باشد. همچنین حداکثر تغییر مکان ثبت شده که در این طرح تقویت بتن پارچه ای در وسط دهانه و در راستای اعمال بار رخ داده، که این میزان در نمونه های تار طرح ۴/۱۷ و برای پود ۴/۱۲ میلی- متر می باشد. متوسط نیروی خمشی منجر به شکست نیز در نمونه های تار ۰/۹۸۴ کیلو نیوتن و در نمونه های پودی ۰/۹۲۱ کیلو نیوتن می باشد.

رفتار شکست نمونه های تقویت شده با الایه شیشه از نوع خمشی به همراه ترک های ترکیبی در محل بارگذاری متمرکز خمشی می باشد. در هیچ یک از نمونه های تقویت شده جداشگی میان الیاف شیشه و بستر بتن پارچه ای مشاهده نگردید و شکست صرفا به دلیل ترک عرضی در نمونه تحت بارگذاری

نتایج حاصل از آزمون های خمشی بتن پارچه ای فاقد تقویت نشان می دهد، نمونه های تار عملکرد و مقاومت خمشی بیشتری در بارخمشی، در مقایسه با نمونه های پودی دارا می باشند. نمودار مقایسه ای رفتار خمشی و منحنی نیرو- تغییر مکان بتن پارچه- ای فاقد تقویت در دو تنوع تار و پود در شکل ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۳- منحنی نیرو- تغییر مکان خمشی بتن پارچه ای فاقد تقویت در دو تنوع تار و پود

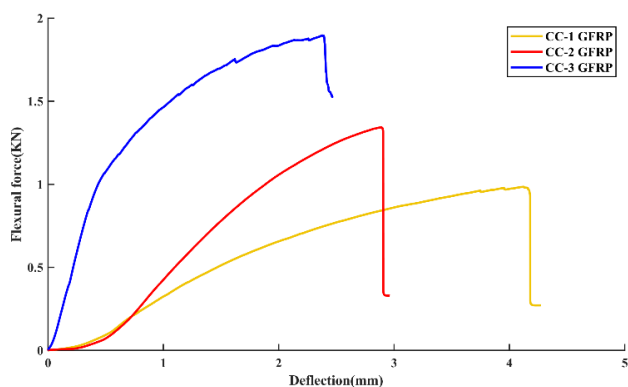
متوسط تنش در نمونه های تار بتن پارچه ای ۵/۶۱ و در تنوع پودی ۵/۳۳ مگاپاسکال می باشد. همچنین متوسط نیروی خمشی منجر به شکست نیز در نمونه های تار ۰/۱۸۶ کیلو نیوتن و در نمونه های پودی ۰/۱۵۸ کیلو نیوتن می باشد. همان طور که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است، مکانیزم کلی شکست آزمون های بتن پارچه ای تحت اثر خمش خالص بوده است، هر چند که در نواحی اطراف محل بارگذاری متمرکز ترک های ترکیبی خمشی و برشی با زاویه ۴۵ درجه به صورت پراکنده مشاهده گردید اما مکانیزم کلی گسیختگی خمشی تحت نیرو خمش خالص در محل اعمال بار متمرکز صورت می پذیرد. نخ های پارچه اسپیسر بتن پارچه ای در هنگام قراگیری تحت بار خمشی با پل زدن بر روی

صورت پذیرفته است. در طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۲ لایه الیاف شیشه نیز متوسط تنش در تنوع تار نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲ لایه شیشه ۳۸/۶۵ و در نمونه‌های پودی ۳۵/۲۳ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین حداکثر تغییر مکان ثبت شده که در این طرح تقویت بتن پارچه‌ای در وسط دهانه و در راستای اعمال بار رخ داده، در نمونه‌های تار ی طرح ۲/۸۳ و برای پود ۲/۶۲ میلی‌متر می‌باشد. متوسط نیروی خمشی منجر به شکست نیز در نمونه‌های تار ۱/۳۵ کیلو نیوتن و در نمونه‌های پودی ۱/۲۸ کیلو نیوتن می‌باشد.

ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تقویت شده با ۲ لایه الیاف شیشه نیز همچون طرح ۱ لایه شیشه نزدیک به ناحیه بارگذاری ایجاد گردیده همچنین نوع ترک ایجاد شده نیز ترک خمشی خالص است. عرض ترک ایجاد شده در این ناحیه ۰/۴۱ میلی‌متر می‌باشد. در هیچ یک از نمونه‌های مورد بررسی در این طرح تقویت جاشدگی میان لایه‌ای و جاشدگی الیاف از سطح رویه بتن رخ نداده است. نکته قابل توجه این است که در ناحیه تحتانی و خمشی بتن که تقویت صورت گرفته است، هنگامی که دال به بار نهایی خود رسید، الیاف شیشه وارد عمل شده‌اند و ترک‌های ناحیه خمشی آزمونه توسط الیاف شیشه شده مهار شدند به گونه‌ای که هیچ جاشدگی در این نواحی رخ نداده است. در طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۳ لایه الیاف شیشه نیز متوسط استحکام خمشی در دو راستای تار و پود به ترتیب ۴۶/۶۱ و ۴۱/۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. به علاوه

حداکثر تغییر مکان آزمونه‌ها در این طرح در دو راستا تار و پود ۲/۴۰ و ۲/۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

نتایج حاصل از طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای با لایه‌های ۱ و ۲ الیاف شیشه نشان می‌دهد استفاده از تنها ۱ الیاف شیشه برای تقویت بتن پارچه‌ای، سبب رشد مقاومت خمشی آن به میزان بیش از ۴/۶۴ برابر می‌گردد. به علاوه همان طور که در شکل ۵ ارائه گردیده استحکام خمشی (مقاومت خمشی) در نمونه‌های تار و پودی با افزایش تعداد لایه‌های تقویتی الیاف شیشه افزایش می‌یابد؛ به نحوی که اضافه نمودن هر لایه الیاف شیشه در تقویت بتن پارچه‌ای سبب ارتقاء ۴۷/۴۱ درصدی مقاومت خمشی در نمونه‌های تار و پودی می‌گردد. از دیگر موجب رشد به میزان ۴۳ درصدی می‌گردد. از دیگر نتایج به دست آمده در آزمون خمشی طرح‌های تقویتی شیشه می‌توان به مقاومت بیشتر در تنوع‌های تار و پود نسبت به تنوع‌های پودی در آزمون خمشی اشاره نمود. به علاوه با افزایش تعداد لایه‌های تقویت کننده الیاف شیشه، تغییر مکان (خیز) خمشی بتن پارچه‌ای به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۵- منحنی‌های نیرو- تغییر مکان خمشی بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه در تعداد لایه‌های مختلف

بر اساس نتایج بدست آمده، مکانیزم قالب شکست در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه گسیختگی ناشی از گسترش و تعمیق ترک ناشی خمش خالص در وسط پنل می‌باشد، و حالات دیگر گسیختگی مانند گسیختگی برشی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و یا جدایش میان‌لایه‌ای در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه مشاهده نگردیده است. نحوه توسعه ترک و گسیختگی خمشی نمونه‌های تقویت با الیاف شیشه GFRP در شکل ۶ ارائه گردیده است.



شکل ۶- توسعه ترک و نحوه گسیختگی ناشی از آزمون خمش در بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه GFRP

در سری طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای با الیاف کولار (AFRP) مشاهده گردید استفاده از الایه الیاف کولار ماکزیم نیروی گسیختگی خمشی را در تنوع تار به ۱/۳۷ کیلونیوتن و در تنوع پود ۱/۲۶ کیلونیوتن می‌رساند، که رشد ۷/۳۳ برابری را نسبت به نمونه شاهد فاقد تقویت بتن پارچه‌ای نشان می‌دهد به عبارت دیگر استفاده از الایه الیاف کولار استحکام خمشی را از ۵/۶۱ در نمونه شاهد به ۳۷/۰۱ مگاپاسکال ارتقاء می‌دهد. حداکثر تغییر مکان بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الایه الیاف کولار مربوط به نمونه تار و در وسط دهانه و راستای اعمال بار و به میزان ۲۰/۳۵ میلی‌متر است. همچنین

بیشترین میزان تغییر مکان نمونه‌های پودی نیز در این طرح به میزان ۱۸/۰۲ میلی‌متر است. در طی بارگذاری نمونه‌های تقویت‌شده با الایه الیاف کولار مشاهده گردید ترک‌ها عمدتاً در بخش کششی آزمون‌ها و دقیقاً در زیر محل بارگذاری متمرکز ایجاد می‌گردند. به علاوه الیاف کولار به سبب نوع ساختار زنجیره‌ای خود قادر است مقاومت کششی بسیار زیادی را تحت بار خمشی ارائه دهد، بنابراین بروز ترک‌های اولیه در مقایسه با الیاف شیشه، زمان بیشتری برای انتشار صرف نمود. به عبارت دیگر مقاومت خمشی و سختی بسیار زیاد الیاف کولار می‌تواند شروع ترک خمشی را به تاخیر اندازد و به طور بالقوه منجر به ظرفیت باربری بالاتری قبل از شکست گردد که این الگو با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده کولار به نحوه محسوس‌تری قابل مشاهده است (شکل ۷). در هیچ یک از نمونه‌های تقویت شده با ۱ لایه کولار پدیده لایه لایه شدگی الیاف و جدایی الیاف از ماتریس پلیمری مشاهده نگردیده که این خود نشانه حفظ انسجام نمونه تا لحظه گسیختگی می‌باشد؛ و در نهایت بارگذاری با شکست ماتریس پلیمری پایان می‌یابد؛ اما پارگی در الیاف رخ نداده است که نشان می‌دهد الیاف از نهایت ظرفیت خمشی خود استفاده ننموده و هنوز قابلیت تحمل بار بیشتری را دارا می‌باشد. همچنین متوسط استحکام خمشی در تنوع تار نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲ لایه کولار به میزان ۵۵/۱۳ و در نمونه‌های پودی ۵۱/۶۰ مگاپاسکال می‌باشد، به علاوه ماکزیم نیروی خمشی گسیختگی نهایی ۲/۱ کیلونیوتن و در تنوع پود

۱/۸۴ کیلونیوتن می‌باشد. به علاوه بیشترین میزان تغییر مکان ثبت شده در این سری نمونه مربوط به نمونه تار ی است، که در وسط دهانه و راستای اعمال بار و به میزان ۱۲/۷۹ میلی‌متر بوده است. همچنین بیشترین میزان تغییر مکان نمونه‌های پودی نیز به میزان ۱۰/۴۵ میلی‌متر است. در طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۳ لایه الیاف کولار ماکزیم نیروی خمشی گسیختگی نهایی در جهت تار ۳/۰۳ کیلونیوتن و در تنوع پودی ۲/۶۵ کیلونیوتن می‌باشد. بیشترین میزان تغییر مکان در این سری نمونه مربوط به نمونه تار، در وسط دهانه و راستای اعمال بار و به میزان ۷/۹۸ میلی‌متر بوده است.

همچنین بیشترین میزان تغییر مکان نمونه‌های پودی نیز به میزان ۶/۶۵ میلی‌متر بوده است. به علاوه متوسط تنش در تنوع تار ی نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۳ لایه کولار به میزان ۶۵/۷۶ و در نمونه‌های پودی ۵۴/۵۴ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با کولار توسط زانک و همکاران (۲۰۱۷)، ۵۰/۸۶ مگاپاسکال، رشد ۲۹/۲۸ درصدی، و نسبت به بتن معمول (با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی - معادل ۵/۳۵ مگاپاسکال مطابق رابطه تبدیلی ACI) - رشد ۱۱/۹۵ برابری را نشان می‌دهد.

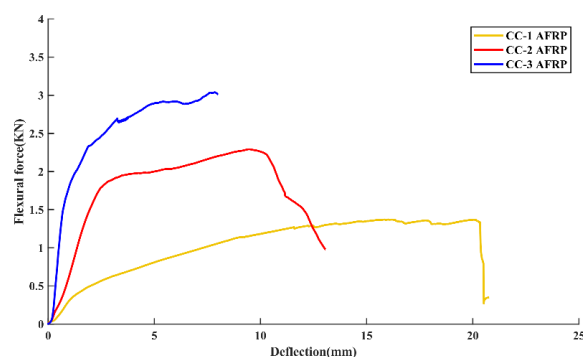


شکل ۷- روند توسعه ترک ونحوه گسیختگی ناشی از آزمون خمش در بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۳ لایه AFRP

استفاده از الیاف کولار مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود و ارتقا می‌بخشد به طوری که اضافه نمودن یک لایه الیاف - کولار به بتن پارچه‌ای مقاومت خمشی متوسط آن را به ۳۷/۰۱ مگاپاسکال ارتقاء می‌دهد که این مقدار، ارتقاء بیش از ۶/۵۹ برابری نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد، با مقاومت خمشی ۵/۶، را نشان می‌دهد. استفاده از الیاف کولار نسبت الیاف‌های شیشه قادر است تغییر شکل بیشتری را برای نمونه‌های بتن

پارچه‌ای فراهم آورد. در واقع علی رغم بافت و وزن یکسان الیاف شیشه و کولار، الیاف شیشه (مطابق جدول ۳) به سبب نوع ساختار سیلیکاتی، ترد و متراکم خود دارای دانسیته بیشتر و مدول کششی کمتری نسبت به الیاف کولار می‌باشد در حالی که الیاف کولار به سبب وجود ساختار زنجیره‌ای خود در مقایسه با الیاف شیشه شکل‌پذیری بیشتری را برای نمونه بتن پارچه‌ای تحت بار خمش ایجاد می‌کند که این مورد به طور خاص با افزایش تعداد

لایه‌های تقویت‌کننده مطابق شکل ۸ نمود بیشتری پیدا می‌کند. به علاوه همان‌طور که در طرح‌های تقویت‌با الیاف شیشه مشاهده گردید جهت تار بتن پارچه‌ای به سبب بافت پارچه اسپیسر، تراکم و فاصله کم‌تر نخ‌های میان دو وجه پارچه در شرایط یکسان مقاومت خمشی و در عین حال تغییر شکل بیشتری را ایجاد می‌کند و استفاده از الیاف‌های تقویتی شیشه و کولار نتوانسته بر این خاصیت ذاتی پارچه اسپیسر تاثیری داشته باشد.



شکل ۸- منحنی‌های نیرو- تغییر مکان خمشی بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف کولار در تعداد لایه‌های مختلف

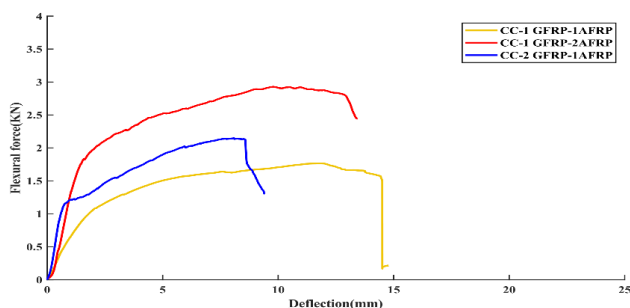
در طی این پژوهش ۳ طرح تقویت ترکیبی الیاف شیشه و کولار نیز به منظور بررسی عملکرد و نحوه تاثیر دو فاز ناهمسان الیافی در تقویت بتن پارچه‌ای مورد آزمون خمش قرار گرفت بر این اساس در طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۱ لایه الیاف شیشه لایه الیاف کولار متوسط مقاومت خمشی در تنوع تار ۴۰/۱۰ و در نمونه‌های پودی ۳۹/۱۱ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین حداکثر تغییر مکان خمشی نمونه‌های تار این طرح ۱۴/۵۴ و برای پود ۱۱/۵۳ میلی‌متر می‌باشد. متوسط نیروی خمشی منجر به شکست نیز در نمونه‌های تار ۱/۷۶ کیلو نیوتن و در نمونه‌های پودی ۱/۶۷ کیلو نیوتن می‌باشد. تقویت بتن پارچه‌ای با ترکیب دو نوع الیاف شیشه و کولار

با تعداد یکسان، موجب ایجاد شکل‌پذیری بیشتر در آزمونه‌های بتن پارچه‌ای گردید به طوری که شکل- پذیری آزمونه‌های تقویت‌شده در این طرح سبب افزایش تغییر مکان خمشی (خیز) نمونه‌ها به میزان بیش از ۵ برابر نسبت به حالت تقویت با ۲ لایه الیاف شیشه افزایش یافت. هر چند که استفاده از الیاف شیشه به عنوان لایه اول تقویت سبب محدود شدن خیز بتن پارچه‌ای نسبت به حالت تقویت با ۲ لایه الیاف کولار گردید. مکانیزم شکست در آزمونه- های تقویت‌شده با الیاف شیشه و کولار با تعداد لایه‌های یکسان بر خلاف طرح‌های گذشته عمدتاً بر اثر ورآمدگی انتهای لایه تقویت‌کننده رویی (الیاف کولار) بوده است چرا که با از بین رفتن اتصال بین چسب و لایه اول تقویت (الیاف شیشه)، آنگاه که الیاف شیشه به حداکثر مقاومت خمشی خود برسد، مکانیزم انتقال بار دچار اختلال می‌گردد که موجب می‌شود نیرو اعمالی به طور کامل به الیاف کولار منتقل نگردد به همین سبب با افزایش نیرو خمشی اعمالی تنش‌های بزرگ برشی و قائمی در نزدیکی انتهای صفحه تقویت کولار به وجود می‌آید؛ و زمانی که این تنش‌ها از حد تحمل لایه اول تقویت فراتر رود لایه فوقانی کولار قبل از آنکه به حداکثر مقاومت خمشی خود برسد دچار شکست زودرس شده و در بخش‌های انتهایی آزمونه از سطح بتن پارچه‌ای و الیاف شیشه جدا و دچار ورآمدگی می‌گردد. این نوع مکانیزم شکست خمشی به طور خاص در آزمونه‌های تقویت‌شده با ۱ لایه شیشه و ۲ لایه کولار نمود بیشتری دارد. به عبارت دیگر در نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با ترکیب ۱ لایه

الیاف شیشه و ۲ لایه الیاف کولار علاوه بر ترک‌های خمشی، ترک‌های ترکیبی خمشی و برشی نیز به طور قابل توجهی مشاهده می‌گردید. در اکثر قریب به اتفاق نمونه‌های این طرح آخرین لایه تقویت تحت کشش ناشی از خمش (لایه دوم کولار) دچار پارگی نگردیده‌اند و ترک عرضی شکست تنها بر روی سطح اپوکسی مشاهده شد که این بدین معنی ایست که الیاف کولار از حداکثر پارگی در الیاف رخ نداده است که نشان می‌دهد الیاف از نهایت ظرفیت خمشی خود استفاده ننموده و هنوز قابلیت تحمل بار بیشتری را دارا می‌باشد. دلیل این روند ناشی از آن است در حین خمش پس از آنکه الیاف شیشه به عنوان اولین لایه تقویتی به حد نهایی خمش خود رسید دچار ریز ترک‌های در محدوده اعمال بار می‌گردد که باعث میشود علاوه بر ایجاد سطح ناهمواری بروی آن به عنوان لایه اول تقویت نیروهای خمشی به درستی به لایه دوم و سوم تقویت الیاف کولار متقل نگردد، همین امر سبب ایجاد نیروی برشی زیادی در انتهای صفحات تقویت‌کننده می‌گردد که در نهایت با رسیدن این میزان به حداکثر قابل تحمل برای تقویت لایه‌ی بستر تقویت از سطح بتن پارچه‌ای جدا می‌گردد و بنابراین آزمون پیش از آنکه لایه اول و دوم فیبر کولار به حداکثر ظرفیت خمشی خود برسد آزمایش به اتمام می‌رسد.

علی رغم انتقال ناقص بار در این طرح چسب (ماتریس پلیمری) در هیچ آزمونه‌ای دچار شکستگی نمی‌گردد که نشان می‌دهد مکانیزیم انتقال نیرو تا لحظه آخر از سطح بتن پارچه‌ای به

الیاف شیشه به عنوان اولین لایه تقویت به طور کامل انجام شده است و در درون تقویت نیز پدیده لایه لایه شدگی رخ نداده است. در حین حال و با وجود عدم استفاده از تمام ظرفیت خمشی الیاف کولار در طرح تقویت بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف شیشه و کولار، صرف استفاده از ۲ لایه الیاف کولار (آرامید) سبب ارتقاء مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای گردیده است تا آنجا که متوسط استحکام خمشی در تنوع تار نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۱ لایه شیشه ۲ لایه کولار به ۶۱/۲۳ و در نمونه‌های پودی ۵۲/۳۴ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین حداکثر تغییر مکان خمشی نمونه‌های تار این طرح تقویت ۱۲/۴۲ و برای پود ۹/۳۷ میلی‌متر می‌باشد. متوسط نیروی خمشی منجر به گسیختگی نیز در نمونه‌های تار ۲/۴۳ کیلو نیوتن و در نمونه‌های پودی ۲/۴۲ کیلو نیوتن می‌باشد. منحنی رفتاری نیرو-تغییر مکان هر یک از طرح‌های ترکیبی الیاف شیشه و کولار در شکل ۹ ارائه گردیده است.

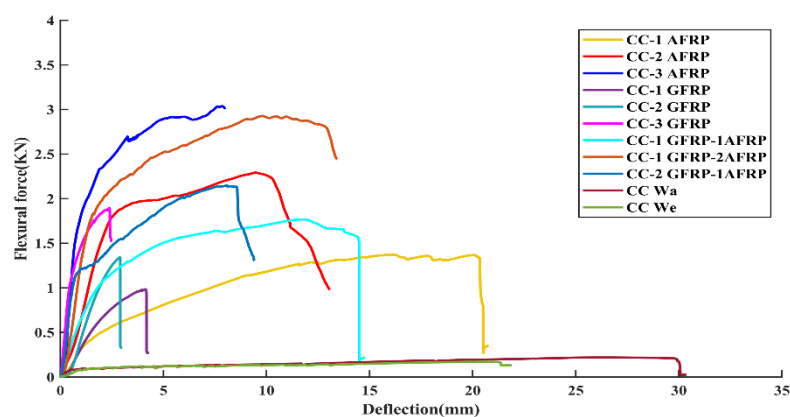


شکل ۹- منحنی‌های نیرو- تغییر مکان خمشی بتن پارچه‌ای تقویت شده با ترکیب الیاف شیشه و کولار در تعداد لایه‌های مختلف

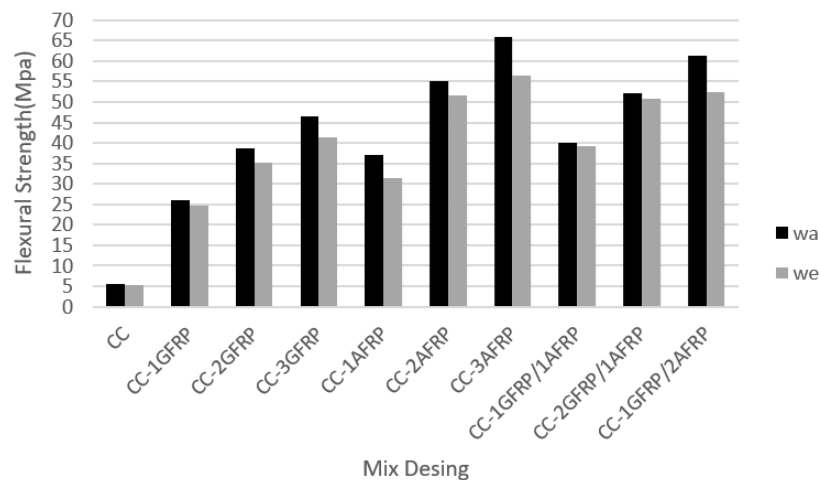
مکانیزیم شکست نمونه‌های تقویت شده با ۲ لایه الیاف شیشه و ۱ لایه کولار نشان می‌دهد استفاده از الیاف کولار موجب شکل‌پذیری بیشتری در بتن پارچه‌ای می‌گردد. اضافه نمودن ۱ لایه الیاف شیشه موجب تغییر مکانیزیم شکست نسبت به

حالت تقویت با الایه شیشه و الایه الیاف کولار و همچنین الایه الیاف شیشه و الایه کولار می‌گردد. الایه الیاف شیشه با تشکیل ماتریس هم فاز اگر چه میزان تغییر شکل کلی آزمونه‌ها را کاهش می‌دهند و از استحکام خمشی کمتری نیز نسبت به طرح تقویت الایه شیشه و الایه کولار ایجاد می‌کند اما مکانیزیم غالب در تمامی نمونه‌های تقویت‌شده با این طرح تحت اثر خمش خالص صورت می‌پذیرد. در بیشتر نمونه‌های این طرح شکستگی به واسطه رشد ترک عرضی خمشی در نمونه‌ها دیده شده و لایه لایه شدگی در نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی مشاهده نگردید. بنابراین علت شکست نمونه‌ها رشد ترک‌ها پس از پارگی پارچه و در ادامه با افزایش بار و شکست ماتریس پلیمری شیشه، تمامی مقادیر تنش خمشی به لایه کولار منتقل و با رسیدن به حداکثر میزان تغییر شکل الیاف کولار و پارگی آن

نمونه دچار گسیختگی نهایی گردیده است. متوسط استحکام خمشی در تنوع تار نمونه‌های بتن پارچه-ای تقویت شده با الایه شیشه ۱ لایه کولار به ۵۲/۰۶ و در نمونه‌های پودی ۵۰/۷۳ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین حداکثر تغییر مکان ثبت شده نمونه‌های تار طرح ۸/۵۸ و برای پود ۷/۴۳ میلی‌متر می‌باشد. متوسط نیروی خمشی منجر به شکست نیز در نمونه‌های تار ۲/۱۳ کیلو نیوتن و در نمونه‌های پودی ۱/۹۵ کیلو نیوتن می‌باشد. استفاده از ۱ لایه کولار به منظور تقویت بتن پارچه‌ای دارای ۲ لایه شیشه می‌تواند موجب افزایش مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای به میزان ۳/۸۴ برابر تقویت با دو لایه شیشه گردد. در ادامه در شکل ۱۰ و ۱۱ منحنی‌های رفتاری نیرو-تغییر مکان خمشی و استحکام خمشی (مقاومت خمشی) هریک از طرح‌های مورد بررسی ارائه گردیده است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان خمشی طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای با مصالح FRP با طرح شاهد



شکل ۱۱- مقایسه حداکثر میزان مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای، تقویت شده با مصالح FRP در طرح‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

بتن پارچه‌ای علی‌رغم مزایای بسیار خود دارای کاستی‌هایی در خواص مکانیکی خود از جمله استحکام (مقاومت خمشی) خودمی‌باشد. رویکردهای تقویتی نیز که تاکنون در خصوص ارتقاء استحکام خمشی بتن پارچه‌ای ارائه گردیده است عمدتاً مبتنی بر ارتقاء خواص اجزا تشکیل‌دهنده بتن پارچه‌ای از قبیل سیمان و پارچه اسپیسر می‌باشد که این رویکرد تقویتی نیز با محدودیت‌های متعددی برای ارتقاء خواص مواجه است لذا استفاده از مصالح FRP برای تقویت خمشی بتن پارچه‌ای ضمن رفع محدودیت‌های پیشین می‌تواند ظرفیت‌های جدیدی در خصوص خمش بتن‌های پارچه‌ای ایجاد نماید بر همین مبنا در این مطالعه حاضر جمعاً ۶۰ نمونه پنبل بتن پارچه‌ای تقویت شده با مصالح FRP، شیشه و آرامید (کولار) در ۱۰ طرح در دو تنوع کلی تار و پودی در تعداد لایه‌های ۲، ۱ و ۳ به صورت چندلایه و ترکیبی، مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار داده شده است. طرح‌های مورد بررسی شامل آزمون‌های شاهد، ۶ طرح تقویت ۱ تا

۳ لایه الیاف شیشه و کولار به صورت تک نوع الیاف و ۳ طرح ترکیبی ۲ لایه و ۳ لایه با ترکیبی این دو نوع الیاف می‌باشد؛ که مهم‌ترین نتایج بدست آمده عبارت‌اند از:

۱) جهت تار بتن پارچه‌ای به سبب نوع بافت، آرایش و تراکم نخ‌های اسپیسر در آن تحت بار خمشی مقاومت و رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به جهت پود در بتن پارچه‌ای دارد به طوری که مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای در راستای تار ۵/۶۱ و در جهت پود ۵/۲۳ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین خیز نقطه شکست در جهت تار ۳۰/۰۶ و در جهت پود بتن پارچه‌ای ۲۱/۸۸ میلی‌متر می‌باشد. این رفتار جز خواص ذاتی بتن پارچه‌ای بوده و تقویت آن با مصالح FRP سبب تغییر در آن نمی‌گردد. چنان که در تمامی طرح‌های تقویت صورت پذیرفته در مطالعه همواره جهت تار بتن پارچه‌ای مقاومت و خیز بیشتری را نسبت به جهت پود بتن پارچه‌ای ارائه نموده است.

۲) به دلیل آنکه الیاف در مصالح FRP جزء اصلی تحمل کننده بار است، نوع الیاف، تعداد لایه‌های

تقویت‌کننده، آرایش آن و وزن و تراکم کلی الیاف، در خواص خمشی بتن پارچه‌ای تقویت شده با FRP مؤثر می‌باشند. همچنین ماتریس پلیمری آن نیز باید به گونه‌ای ساخته و اجرا گردد تا تحت بارگذاری خمشی دارای تاخیر در پیک شکست نباشد و قادر باشد تا لحظه گسیختگی الیاف، بدون شکست در ساختار خود بار وارده را به الیاف منتقل و پیش از آن دچار شکست نگردد.

۳) استفاده از مصالح FRP در تقویت بتن پارچه‌ای سبب بهبود عملکرد خمشی بتن پارچه‌ای می‌گردد. به‌علاوه استفاده از مصالح FRP در بتن پارچه‌ای باعث می‌شود تنش‌های کششی ناشی از خمش را به طور یکنواخت‌تر در سراسر متریال توزیع شود و تمرکز تنش‌های موضعی را کاهش می‌دهند و از ترک خوردن زود هنگام بتن پارچه‌ای جلوگیری می‌کنند. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده مصالح FRP سختی، نیروگسیختگی و استحکام خمشی افزایش و در عین حال میزان شکل‌پذیری (خیز) پل‌های بتن پارچه‌ای کاهش می‌یابد.

۴) در طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای با لایه‌های ۱، ۲ و ۳ الیاف شیشه مشاهده گردیده است که استحکام خمشی (مقاومت خمشی) در نمونه‌های تار و پودی با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. به نحوی که اضافه نمودن هر لایه الیاف شیشه در تقویت بتن پارچه‌ای سبب ارتقاء ۳۴/۴۷ درصدی مقاومت خمشی در نمونه‌های تار و همچنین در نمونه‌های پودی به میزان ۳۰/۲۵ درصد می‌گردد. از دیگر نتایج به دست آمده در آزمون خمشی طرح‌های تقویتی شیشه می‌توان به مقاومت بیشتر در تنوع‌های

تاری نسبت به تنوع‌های پودی در آزمون خمش اشاره نمود.

۵) در طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای با لایه‌های ۱، ۲ و ۳ الیاف آرامید (کولار) مشاهده گردیده است استفاده از الیاف کولار می‌تواند مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پارچه‌ای را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود و ارتقا بخشد به طوری که اضافه نمودن یک لایه الیاف کولار به بتن پارچه‌ای مقاومت خمشی متوسط آن را به ۳۷/۰۱ مگاپاسکال ارتقاء می‌دهد که این مقدار ارتقاء بیش از ۶/۶ برابری را نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد، با مقاومت خمشی ۵/۶، را نشان می‌دهد به علاوه مقدار ظرفیت خمشی (بارنهایی گسیختگی) را از ۱۸۶/۷۱ نیوتن به ۱۳۷۰/۹۵ نیوتن افزایش می‌دهد که رشد ۷/۳۴ برابری را نشان می‌دهد. استفاده از الیاف کولار در تقویت خمشی بتن پارچه‌ای به دلیل نوع ساختار زنجیره‌ای این الیاف قادر است تا تغییر شکل بیشتری را نسبت به الیاف شیشه حتی با وجود افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده ارائه دهد.

۶) ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی - الایه شیشه و الایه کولار می‌تواند خواص خمشی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۱ لایه الیاف کولار را ارائه دهد به خصوص این طرح توانسته رشد مناسبی را در نمونه‌های خمشی تار و پودی نسبت به نمونه‌های مشابه در طرح ۱ کولار ارائه نماید. هر چند که این میزان بهبود عملکرد کماکان کمتر از مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای با ۲ لایه الیاف کولار خواهد بود. استفاده از الیاف شیشه سبب تردشکن شدن کلی متریال بتن پارچه‌ای می‌گردد و موجب

می‌شود تا الیاف کولار قادر نباشد از تمام ظرفیت در مقادیر کمتری با حداکثر ظرفیت خود دچار مقاومتی خود استفاده نماید به همین جهت نمونه‌ها شکست می‌شوند.

مراجع

- [۱] میندس، س؛ یانگ، ف؛ ترجمه دکتر محمدشکرچی زاده، قدوسی پرویز و علی اکبر رضانیانپور؛ (۱۳۹۳)، "بتن"، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲] مهتاپ، ییرو، پ؛ ترجمه دکتر علی اکبر رضانیانپور، پرویز قدوسی، اسماعیل گنجیان (۱۳۹۱)، "ریزساختار خواص و اجزای بتن تکنولوژی بتن"، تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [۳] غفاری مقدم، ف؛ (۱۳۹۳)، "راهنمای بهسازی و ترمیم سازه‌های بتنی"، تهران: قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص).

[4] ConcreteCanvas;2020, Concrete canvas provides: erosion control& containment <http://www.concretecanvas.com> accessed 12, January.

[5] ASTM D-8173-18. (2023), Standard Guide for Site Preparation, Layout, Installation, and Hydration of Geosynthetic Cementitious Composite Mats, American Society for Testing and Materials.

[6] Concrete Canvas GCCM. (2022) England: concrete canvas companies. Retrieved from www.concretecanvas.com

[7] Chen Y, Hu C, Ding M, et al. (2014), Structural design and performance research of concrete tent. Jiangxi Build Mater; 12: 216–225.

[8] Lu W, Sun C, Yang C, et al. (2018), Application of concrete canvas in slope protection. Hous Real Estate; 10: 192.

[9] Zhou L, Ding G, Tan J, et al. (2019), Seismic response of concrete canvas reinforced slopes: influence of tilt degrees for reinforcement. J Earthq Tsunami. Epub ahead of print November.

[10] Yip, J. and N. Pui, (2007), "Study of three-dimensional spacer fabrics: Physical and mechanical properties," Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, p. 359-364.

[11] Hou, X., Hu, H., & Silberschmidt, V. V. (2012), "A study of computational mechanics of 3D spacer fabric: factors affecting its compression deformation". Journal of Materials Science, 47, 3989-3999.

[12] Wang, P., Lai, C., Wang, F., Jin, F., & Fan, H. (2016), Fabrication and mechanical behaviors of cementitious composites reinforced by 3D woven lattice sandwich fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 85, 130-137.

[13] Bao B. (2013), Preparation and performance of concrete canvas. Nanjing, China: Southeast University.

[14] Guo Y. (2014), Preparation and properties of magnesium phosphate cement-based composite. Nanjing, China: Southeast University.

[15] Cao P and Cai Z. (2016) Experimental study on tensile properties of concrete canvas. Low Temp Build Technol; 7: 1–3.

[16] Han, F., Chen, H., Li, X., Bao, B., Lv, T., Zhang, W., & Hui Duan, W. (2016), Improvement of mechanical properties of concrete canvas by anhydrite-modified calcium sulfoaluminate cement. Journal of Composite Materials, 50(14), 1937-1950.

- [17] Han, F., Chen, H., Zhang, W., Lv, T., & Yang, Y.(2016), *Influence of 3D spacer fabric on drying shrinkage of concrete canvas*. *Journal of Industrial Textiles*, 45(6), 1457-1476.
- [18] Li, H., Chen, H., Liu, L., Zhang, F., Han, F., Lv, T., & Yang, Y.(2016),*Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure*. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(4), 557-567.
- [19] Zhang, F., Chen, H., Li, X., Li, H., Lv, T., Zhang, W., & Yang, Y. (2017). *Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels*. *Composite Structures*, 176, 608-616.
- [20] Niu, J., Xu, W., Li, J., & Liang, J. (2021). *Influence of cross-sectional shape on the mechanical properties of concrete canvas and CFRP-reinforced columns*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-14.
- [21] ASTM D8030/D8030M ,(2019). *Standard Practice for Sample Preparation for GCCM*.
- [22] ASTM D8364/D8364M-21,(2021)*Standard Specification for Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Materials*.
- [23] ASTM D8058/D8058 – 17,(2017).*Standard Test Method for Determining the Flexural Strength of a Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Using the Three-Point Bending Test*.

ارزیابی تاثیر پوزولان خاکستر بادی نوع A و میکروسیلیس

بر خواص مکانیکی و دوام بتن



محمدرضا محمدی زاده

دانشیار، دانشگاه هرمزگان، گروه مهندسی عمران



مهدیه عبدالمهی تی آب

دانشجوی کارشناسی ارشد-سازه، دانشگاه هرمزگان

گروه مهندسی عمران

چکیده

تولید سیمان مانند بسیاری از فرآیندهای صنعتی، با پتانسیل انتشار گاز دی اکسید کربن همراه است که تاثیر منفی بر محیط زیست دارد. پژوهش های علمی در تکنولوژی بتن موجب شده است تا در سال های اخیر برای کاهش آلودگی محیط زیست از روش های نوین و مواد جدید مانند پوزولان ها استفاده شود. در این مطالعه خواص مکانیکی و دوام بتن های ساخته شده با درصد های متفاوت از خاکستر بادی نوع A (۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد)، میکروسیلیس (۱۰ و ۱۵ درصد) و ترکیب درصد بهینه خاکستر بادی و درصد بهینه میکروسیلیس (ترکیب بهینه) به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان بررسی شد. خواص مکانیکی و دوام بتن با انجام آزمایش های مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و نفوذ پذیری بر روی تعداد ۲۱۶ آزمون بتنی حاصل از ۸ طرح مخلوط در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از طرح مخلوط با پوزولان خاکستر بادی نوع A به مقدار ۵ درصد و طرح مخلوط با میکروسیلیس به مقدار ۱۵ درصد، هر کدام به تنهایی به عنوان طرح های مخلوط بهینه باعث افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۳ و ۳۵/۹ درصد در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد متناظر می شود. همچنین برای این طرح مخلوط های بهینه، افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۳/۸ و ۲۴/۵ درصد در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه شاهد متناظر می باشد. با توجه به نتایج می توان مشاهده شد که افزودن پوزولان های خاکستر بادی نوع A (به مقدار ۳، ۵ و ۷/۵ درصد وزن سیمان) و میکروسیلیس (به مقدار ۱۵ درصد وزن سیمان) باعث افزایش مدول گسیختگی نمونه های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می گردد. با مقایسه نتایج می توان دریافت که میزان نفوذ پذیری نمونه دارای ۵ درصد خاکستر بادی، نمونه دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس و نمونه دارای ترکیب بهینه به ترتیب به میزان ۱۰/۷، ۴۲/۹ و ۳۵/۷ درصد در سن ۲۸ نسبت به نفوذ پذیری نمونه شاهد کاهش یافته است. همچنین مشاهده شد که میزان نفوذ پذیری نمونه حاوی ۵ درصد خاکستر بادی در سن ۹۰ روز معادل با نفوذ پذیری نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس می باشد

کلمات کلیدی: پوزولان صنعتی، خاکستر بادی نوع A، میکروسیلیس، خواص مکانیکی، دوام بتن

سیمان یکی از اجزای بتن و پرمصرف‌ترین ماده در مقیاس جهانی است و برای طیف وسیعی از ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما با این حال، تولید سیمان به صورت قابل توجهی با انتشار گاز دی‌اکسید کربن همراه است که تاثیر منفی بر محیط زیست دارد. لذا موضوع استفاده از پوزولان‌ها و مواد جدید به عنوان جایگزین جزئی سیمان از جمله موضوعات مهم در صنعت ساختمان سازی تبدیل شده است [۱-۳]. پوزولان خاکستر بادی^۱ محصول فرعی نیروگاه‌های حرارتی سوخت زغال سنگ و یا از سوزاندن ضایعات برخی کارخانجات، پالایشگاه‌ها و صنایع مختلف حاصل می‌گردد. براساس استاندارد ASTM C618 و متن‌های علمی، بر مبنای فرآیند تولید و مواد اولیه انواع مختلف از خاکستر بادی وجود دارد. نوعی خاکستر بادی از گازهای خروجی نیروگاه‌های حرارتی با سوختن زغال سنگ جمع‌آوری می‌گردد که با نام کلاس F و کلاس C معرفی می‌شوند [۴]. نوع دیگر خاکستر بادی از فرآیند سوختن زباله یا سایر مواد ضایعاتی برخی کارخانجات، پالایشگاه‌ها و صنایع مختلف در کوره در دمای بین ۶۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود که این نوع خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری کلاس A معرفی می‌گردد. دانه‌بندی و سطح ویژه خاکستر بادی

صنعتی نوع A^۲ مشابه سیمان و دارای خواص پوزولانی است [۵ و ۶]. این نوع خاکستر بادی حاوی درصد بسیار پایینی از اکسید آلومینات و اکسید کلسیم و درصد بالایی از اکسید سیلیس می‌باشد [۷]. میکروسیلیس^۳ توسط سیستم غبارگیر گازهای خروجی در حین تولید سیلیس و آلیاژهای سیلیس مانند فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی جمع‌آوری می‌گردد. میکروسیلیس به رنگ خاکستری روشن با وزن مخصوص بسیار کم، سطح ویژه بسیار بالا و میزان دی اکسید سیلیسیم موجود در آن معمولاً بین ۹۵-۸۵ درصد وزنی می‌باشد [۸ و ۹]. در ادامه می‌توان به تعدادی از کارهای تحقیقاتی انجام شده در خصوص استفاده از پوزولان خاکستر بادی نوع A و میکروسیلیس اشاره نمود.

زندگی و عابدهی (۲۰۲۰)، تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس F، C و خاکستر بادی صنعتی نوع A را بر روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر و تخلخل بتن ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد میزان نفوذپذیری، قطر فضای تخلخل و حجم نفوذ با افزایش میزان درصد هر سه نوع خاکستر بادی کاهش یافته است. در خاکستر بادی نوع A کاهش نفوذپذیری بیش‌تری نشان داده شد و علت آن سطح ویژه بیش‌تر و بالا بودن میزان سیلیس فعال نسبت به کلاس‌های دیگر خاکستر بادی می‌باشد. همچنین در نمونه‌های حاوی خاکستر بادی نوع A، کاهش

^۱Type A industrial fly ash^۲MicroSilica^۳Fly ash

کم‌تری در قطر تخلخل و حجم نفوذ دیده شد. علت این نتیجه، نزدیکی سطح ویژه و ریزی خاکستربادی نوع A با سیمان می‌باشد [۵]. بیات و بحرینیان (۲۰۲۰)، از نوعی ماسه با دانه‌بندی یکنواخت به-عنوان ماده‌ی اصلی و نیز خاکستربادی صنعتی نوع A و آهک به‌عنوان ماده‌ی افزودنی استفاده شد. خاکستربادی در درصدهای مختلف ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ به صورت اضافه شده با آهک یا بدون آهک بررسی شد. وزن مخصوص خشک حداکثر و آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که هر چه میزان درصد خاکستربادی افزایش یابد، میزان نفوذپذیری کاهش بیش‌تری می‌یابد. در بررسی بافت اولیه نمونه‌های حاوی خاکستربادی، نتایج نشان داد که خاکستربادی نوع A ابتدا فضاهای خالی ماسه را پر می‌نماید و پس از آن از تماس دانه‌های ماسه بر روی یکدیگر جلوگیری می‌کند و به همین علت کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها نشان داده شد [۶]. کاظمیان و همکاران (۲۰۱۰)، خاکستربادی با مقدار سیلیس بالا را با استفاده از فرآیند تبدیل دو مرحله‌ای به یک ژئولیت با ظرفیت تبادل یونی بالا تبدیل کردند [۱۰]. یوزباس و آیدین (۲۰۲۰)، تاثیر میکروسیلیس در درصدهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به عنوان جایگزین وزنی سیمان بر خواص مکانیکی بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بررسی شد. نتایج نشان داد بتن حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس دارای بیش‌ترین مقاومت فشاری در همه سنین ذکر شده، می‌باشد [۱۱]. نادری و همکاران (۱۳۹۹)، اثر پوزولان‌های میکروسیلیس، ژئولیت و خاکستربادی با

درصدهای وزنی جایگزین سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بر روی نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌های بتنی ۷ روزه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزودن پوزولان میکروسیلیس در تمامی درصدهای وزنی موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری می‌گردد و افزودن خاکستربادی سبب کاهش مقاومت فشاری و نفوذپذیری

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع ۲ تولیدی کارخانه سیمان هرمزگان استفاده شد که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. از سنگ‌دانه درشت (شن) با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر و سنگ‌دانه ریز (ماسه) که کوچکترین اندازه آن برابر با ۰/۰۷۵ میلی‌متر و مدول نرمی ۳ مطابق با استاندارد ASTM C33 [13] استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی (شن و ماسه) در شکل ۱ نشان داده شده است. وزن مخصوص برای شن و ماسه به ترتیب ۲/۶۳ و ۲/۴۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. همچنین درصد جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۱/۱ و ۱/۳ درصد تعیین گردید. آب مصرفی در ساخت بتن، آب شرب شهر بندرعباس می‌باشد. از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات ساخت شرکت فارس ایران نوع آیورامیکس ۴۰۳ استفاده شده است. پوزولان‌های مورد استفاده در این مطالعه، خاکستربادی صنعتی با نام تجاری A که از فرآیند خاکستر کوره زباله‌سوز و ساخت شرکت شهرک بتن اصفهان می‌باشد، تهیه

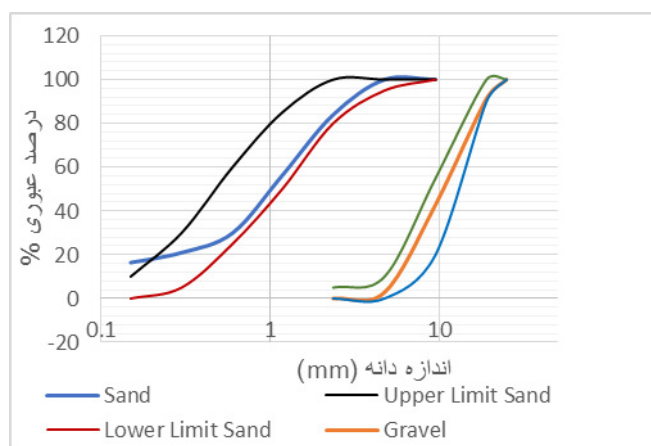
گردید. همچنین میکروسیلیس از کارخانه مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن‌ها در جداول ۱ و ۲ فروسیلیس ایران، واقع در سمنان تهیه شد که ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان، خاکستر بادی نوع A و میکروسیلیس

خواص شیمیایی (%)									
L.O.I	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	
1.72	1.83	0.52	0.52	1.88	3.78	4.92	63.79	21.37	سیمان
4.17	0.19	0.93	0.81	1.16	0.99	3.46	0.58	80	خاکستر بادی نوع A
3.5	0.1	0.5	1	1.5	2	1	1.5	85	میکروسیلیس

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان، خاکستر بادی نوع A و میکروسیلیس

خواص فیزیکی			
وزن مخصوص (kN/m ³)	بلین (m ² /kg)	اندازه ذرات (μm)	
31.6	305.1	<45	سیمان
16	290-300	0.2-45	خاکستر بادی نوع A
4-6	14000-20000	0.08-0.4	میکروسیلیس



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه

۲-۲- طرح مخلوط بتن

طرح مخلوط که در مجموع ۲۱۶ عدد آزمون بتنی ساخته و ارزیابی گردید. در جدول ۳، نام‌گذاری طرح مخلوط بدین صورت است که RF بیانگر طرح مخلوط بتن شاهد، FA بیانگر طرح مخلوط مربوط به بتن‌های حاوی پوزولان خاکستر بادی نوع A و MS بیانگر طرح مخلوط بتن‌های دارای میکروسیلیس می‌باشد. اعدادی که به عنوان پسوند

در این مطالعه برای ارزیابی تاثیر جایگزینی پوزولان خاکستر بادی در درصدهای وزنی ۰، ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد و پوزولان میکروسیلیس ۱۰ و ۱۵ درصد و همچنین یک ترکیب از درصد بهینه خاکستر بادی و میکروسیلیس (بترتیب ۵ و ۱۵ درصد) بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن، ۸ طرح مخلوط بررسی گردید. همچنین تعداد ۳ آزمون برای هر آزمایش از هر

پس از حروف FA و MS قرار دارند به ترتیب نشان دهنده‌ی درصد خاکستربادی و میکروسیلیس جایگزین وزن سیمان می‌باشند. در بخش ارائه نتایج هر آزمایش بر روی نمودارها، D مخفف Day (روز)

و اعداد ۲۸ و ۹۰ که به عنوان پسوند پس از حرف D قرار دارند، نشان دهنده‌ی سن عمل‌آوری می‌باشند.

جدول ۳- طرح مخلوط بتن

نام طرح مخلوط	اجزای تشکیل دهنده (kg/m^3)							فوق روان کننده (%)
	سیمان	آب	ماسه	شن بادامی	شن نخودی	خاکستربادی	میکروسیلیس	
RF	400	211	1012	366	380	0	0	0
FA3	388	211	1012	366	380	12	0	0
FA5	380	211	1012	366	380	20	0	0
FA7.5	370	211	1012	366	380	30	0	0
FA10	360	211	1012	366	380	40	0	0
MS10	360	211	1012	366	380	0	40	0.24
MS15	340	211	1012	366	380	0	60	0.33
FA5MS15	320	211	1012	366	380	20	60	0.33

۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها

بتن مطابق با نسبت مخلوط‌های تعیین شده که جزئیات آن‌ها در جدول ۳ ارائه گردیده است، تهیه شد. برای این منظور پس از محاسبه حجم بتن لازم در هر مرحله، وزن اجزای بتن تعیین گردید و مصالح مورد نیاز وزن شدند. سپس مطابق با استاندارد ASTM C192/C192M-18 [۱۴] برای ساخت بتن ابتدا مصالح سنگی مخلوط گردید و سپس سیمان، خاکستربادی نوع A و میکروسیلیس افزوده شد، در نهایت آب به ترکیبات خشک اضافه شده است. در بتن‌های دارای خاکستربادی، به علت جذب آب بسیار کم این پوزولان در هنگام استفاده در بتن روانی بتن را به میزان کمی کاهش می‌دهد. به همین علت از فوق روان کننده در زمان ساخت

بتن‌های حاوی خاکستربادی نوع A استفاده نشده است. در بتن‌های دارای میکروسیلیس با توجه به خواص فیزیکی این پوزولان پس از آب، فوق روان کننده نیز به منظور تراکم بهتر بتن اضافه گردید. پس از ساخت بتن، مخلوط بتن براساس استاندارد در ۳ لایه و در هر لایه ۲۵ ضربه (جهت تراکم بتن) درون قالب ریخته شد. آزمون‌های ساخته شده در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند (شکل ۲). پس از خارج کردن آزمون‌ها از قالب، تا سنین ۲۸ و ۹۰ روز جهت آزمایش در دمای آزمایشگاه تحت عمل‌آوری مربوط در حوضچه‌ی آب قرار گرفتند.

براساس زمان ۷۲ ساعت و فشار ۰/۵ مگاپاسکال سنجیده می‌شود. به این گونه که آزمون مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، درون محفظه تحت فشار تا ۰/۵ مگاپاسکال قرار می‌گیرد و بعد از گذشت زمان ۷۲ ساعت، به وسیله جک بتن شکن به دو نیم تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از خط کش، عمق نفوذ آب در بتن بر حسب میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج مربوط به مقاومت فشاری تمام طرح‌های مخلوط که شامل نتایج نمونه شاهد، نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف خاکستر بادی، دارای دو درصد متفاوت از میکروسیلیس و نمونه دارای ۵ درصد خاکستر بادی و ۱۵ درصد میکروسیلیس (به عنوان ترکیب بهینه) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد خاکستر بادی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه شاهد به میزان جزئی افزایش داشته است. بیش‌ترین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مربوط به نمونه بتنی حاوی ۵ درصد خاکستر بادی، به ترتیب به میزان افزایش ۳ و ۳/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد و این به دلیل بالا بودن میزان سیلیس فعال (SiO_2) در خاکستر بادی می‌باشد که موجب بهبود ریزساختار بتن می‌گردد [۵]. همچنین مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه حاوی ۷/۵ درصد خاکستر بادی برابر با مقاومت فشاری نمونه شاهد در دو سن ۲۸ و ۹۰ روز می‌باشد. نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز



شکل ۲- قالب‌گیری نمونه‌ها

۴-۲- شرح انجام آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری بر روی آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مطابق با استاندارد ASTM C39 [۱۵]، با استفاده از جک هیدرولیکی و سرعت بارگذاری ۶/۷۵ کیلونیوتن بر ثانیه انجام شد (شکل ۳). برای ارزیابی قابلیت تیر یا دال بتنی غیر مسلح به لحاظ مقاومت در مقابل شکست ناشی از خمش، آزمایش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C78 [۱۶] بر روی آزمون‌های تیر $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر در دو سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام گردید. همچنین به منظور بررسی دوام، آزمایش تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار بر اساس استاندارد BS EN12390-8 [۱۷]، بر روی آزمون‌های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای تعیین میزان عمق نفوذ آب در بتن،

فیزیکی ذرات بسیار ریز میکروسیلیس، امکان پر کردن فضاهای خالی کوچک، بین ذرات مخلوط بتن را فراهم می‌سازد و به این ترتیب ساختار بتن چگال‌تر شده و سبب افزایش مقاومت فشاری بیش‌تر می‌گردد.

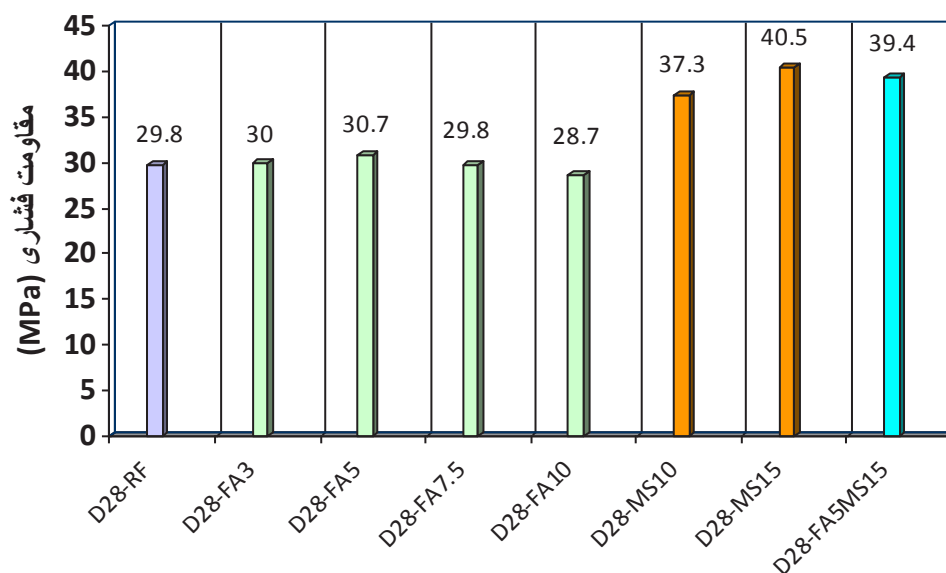


شکل ۳- آزمایش مقاومت فشاری بتن

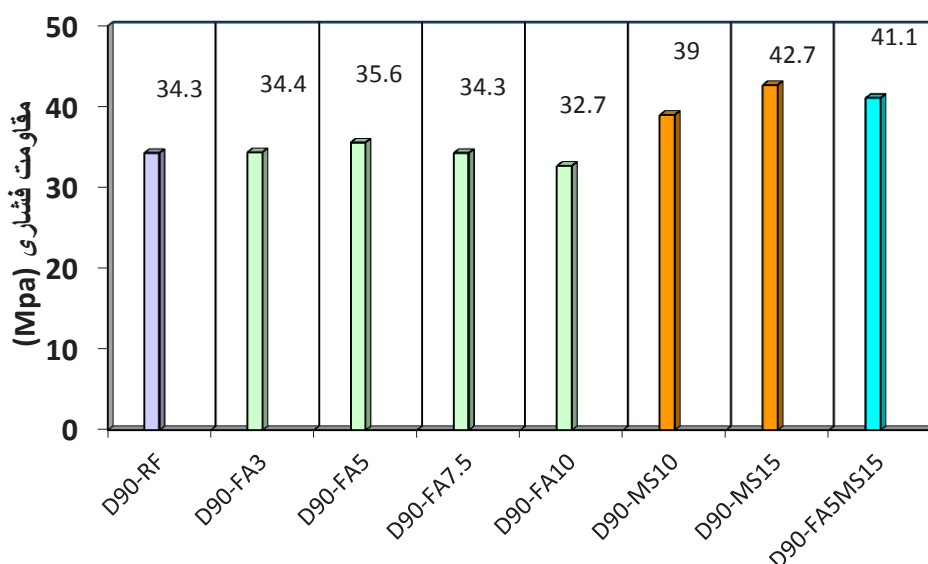
دارای کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۳/۷ و ۴/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

همچنین نتایج شکل ۴ و ۵ نشان می‌دهد که افزودن هر دو درصد پوزولان میکروسیلیس جایگزین بخشی از سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به بتن شاهد می‌شود. در میان نمونه‌ها، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس دارای افزایش مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۲۵/۲ و ۱۳/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس دارای بالاترین مقاومت فشاری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۳۵/۹ و ۲۴/۵ درصد نسبت به بتن شاهد می‌باشد. در ضمن نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب درصد بهینه خاکستر بادی و میکروسیلیس نشان می‌دهد، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب بهینه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۳۲/۲ و ۱۹/۸ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است.

علت کسب مقاومت کم در نمونه‌های دارای درصدهای مختلف خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های دارای میکروسیلیس می‌توان با توجه به این موضوع اشاره کرد که سطح ویژه، وزن مخصوص و اندازه ذرات خاکستر بادی مشابه سیمان است [۵]. اما در بتن‌های حاوی میکروسیلیس، به دلیل ماهیت



شکل ۴- نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز



شکل ۵- نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط مختلف در سن ۹۰ روز

مشاهده می‌شود، نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف خاکستری با افزایش سن عمل‌آوری دارای درصد افزایش بالاتر، نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشند. بیش‌ترین درصد تغییر مقاومت فشاری از سن ۹۰ روز نسبت به همان نمونه در سن ۲۸ روز، مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد خاکستری با ۱۶ درصد افزایش می‌باشد. علت افزایش بیش‌تر مقاومت

میزان درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز در جدول ۴ ارائه شده است. از مقایسه و ارزیابی نتایج می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۹۰ روز نسبت به همان نمونه در سن ۲۸ روز بیش‌تر می‌باشد و این به علت انجام واکنش آبگیری و تا حدودی تکمیل شدن فرآیند آن در طول سن عمل‌آوری می‌باشد که موجب افزایش ژل C-H-S می‌شود. همچنین

فشاری نمونه‌های حاوی خاکستربادی نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس این مسئله می‌باشد که استفاده از میکروسیلیس در بتن موجب می‌گردد که بتن تا سن ۲۸ روز تقریباً به آگیری نهایی خود برسد [۱۸]. اما بتن در سنین بالاتر با استفاده از خاکستربادی نوع A، به دلیل تکمیل فرآیند عمل آگیری، به مقاومت فشاری بیش‌تری دست می‌یابد.

جدول ۴- درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روز نسبت به ۲۸ روز

نام طرح	درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روز نسبت به ۲۸ روز
RF	15.1
FA3	14.7
FA5	16
FA7.5	15.1
FA10	13.9
MS10	4.6
MS15	5.4
FA5MS15	4.3

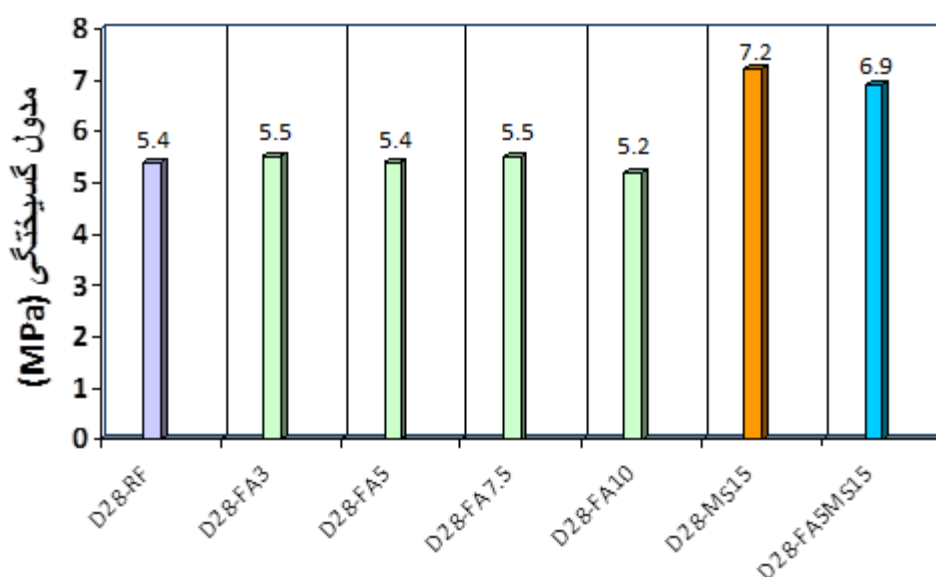
۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی

شکل ۶ آزمایش مقاومت خمشی بر روی تیر بتنی را نشان می‌دهد. مقاومت خمشی رابطه مستقیم با مدول گسیختگی دارد. در این مطالعه پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری و مشخص شدن درصد بهینه میکروسیلیس (۱۵ درصد)، فقط آزمونه‌های دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس جهت ارزیابی مدول گسیختگی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مربوط به مدول گسیختگی همه طرح‌های مخلوط که شامل

نتایج نمونه شاهد، نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف خاکستربادی، نمونه دارای فقط ۱۵ درصد میکروسیلیس و همچنین نمونه دارای ۵ درصد خاکستربادی و ۱۵ درصد میکروسیلیس (به عنوان ترکیب بهینه) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. از مقایسه نتایج شکل ۷ مشاهده می‌شود که مدول گسیختگی نمونه دارای ۵ درصد پوزولان خاکستربادی در سن ۲۸ روز، معادل با مدول گسیختگی نمونه شاهد می‌باشد. مدول گسیختگی نمونه‌های دارای ۳ و ۷/۵ درصد خاکستربادی نسبت به نمونه شاهد به میزان مساوی ۱/۸۵ درصد در سن ۲۸ روز افزایش داشته است. همچنین نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستربادی در سن ۲۸ روز، دارای کاهش مدول گسیختگی به میزان ۳/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد متناظر می‌باشد. بیش‌ترین افزایش مدول گسیختگی در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس به میزان ۳۳/۳ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد و نیز نسبت به نمونه‌های دارای خاکستربادی و نمونه دارای ترکیب بهینه بیش‌تر می‌باشد. همچنین از نتایج می‌توان دریافت، مدول گسیختگی نمونه دارای ترکیب بهینه به میزان ۲۷/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد در سن ۲۸ روز افزایش یافته است.



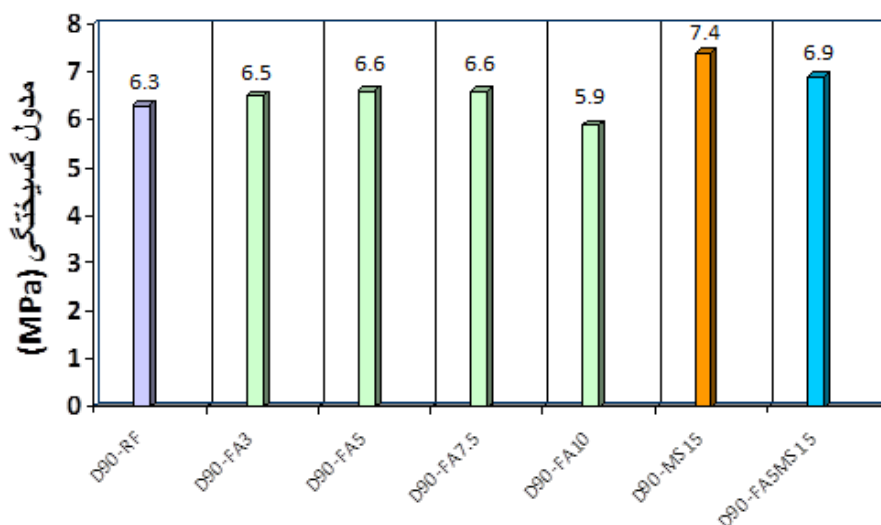
شکل ۶- آزمایش تعیین مدول گسیختگی بتن



شکل ۷- نمودار نتایج آزمایش مدول گسیختگی طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز

خاکستربادی، دارای کاهش مدول گسیختگی به میزان ۶/۳ درصد نسبت به نمونه شاهد در سن ۹۰ روز می‌باشند. ضمناً مدول گسیختگی نمونه حاوی ترکیب بهینه به میزان ۹/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. علاوه بر این، بیش‌ترین افزایش مدول گسیختگی در سن ۹۰ روز مربوط به نمونه دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس به میزان ۱۷/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

نتایج مربوط به مدول گسیختگی سن ۹۰ روز در شکل ۸ نشان می‌دهد که افزودن ۳، ۵ و ۷/۵ درصد خاکستربادی به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان، باعث افزایش مدول گسیختگی در سن ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۳/۲، ۴/۸ و ۴/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌گردد و بیش‌ترین مدول گسیختگی مربوط به نمونه‌های حاوی ۵ و ۷/۵ درصد خاکستربادی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های دارای ۱۰ درصد



شکل ۸- نمودار نتایج آزمایش مدول گسیختگی طرح‌های مختلف در سن ۹۰ روز

۳-۳- آزمایش نفوذپذیری

در این مطالعه پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری و مشخص شدن درصد بهینه میکروسیلیس (۱۵ درصد)، فقط آزمونه‌های دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس جهت ارزیابی میزان نفوذپذیری بررسی شدند. ۳ آزمونه در دستگاه نفوذپذیری و میزان عمق نفوذ آب در ۳ آزمونه در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج مربوط به آزمایش نفوذپذیری تمام طرح‌های مخلوط که شامل نتایج نمونه شاهد، نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف خاکستر بادی، نمونه دارای فقط ۱۵ درصد میکروسیلیس و همچنین نمونه دارای ۵ درصد خاکستر بادی و ۱۵ درصد میکروسیلیس (به عنوان ترکیب بهینه) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نفوذپذیری نمونه حاوی ۳ درصد پوزولان خاکستر بادی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نفوذپذیری نمونه متناظر شاهد به ترتیب به میزان ۵/۴ و ۱۱/۱ درصد کاهش یافته است. کم‌ترین میزان نفوذپذیری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مربوط به نمونه بتنی حاوی ۵ درصد خاکستر بادی نوع A، به ترتیب به میزان کاهش ۱۰/۷ و ۱۶/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد و این به دلیل بالا بودن میزان اکسید سیلیس فعال (SiO_2) در خاکستر بادی

نوع A می‌باشد که با شرکت در ترکیبات شیمیایی ژل C-H-S موجب پر شدگی منافذ ریز و درشت و همچنین توانایی بیش‌تر بتن در مقابل نفوذ آب می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش خاکستر بادی به میزان ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزین بخشی از وزن سیمان، میزان نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد به این صورت که، نفوذپذیری نمونه حاوی ۷/۵ درصد خاکستر بادی نسبت به نفوذپذیری نمونه شاهد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۳/۶ و ۵/۶ درصد افزایش یافته است و نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز دارای افزایش نفوذپذیری به میزان ۱۴/۳ و ۲۷/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

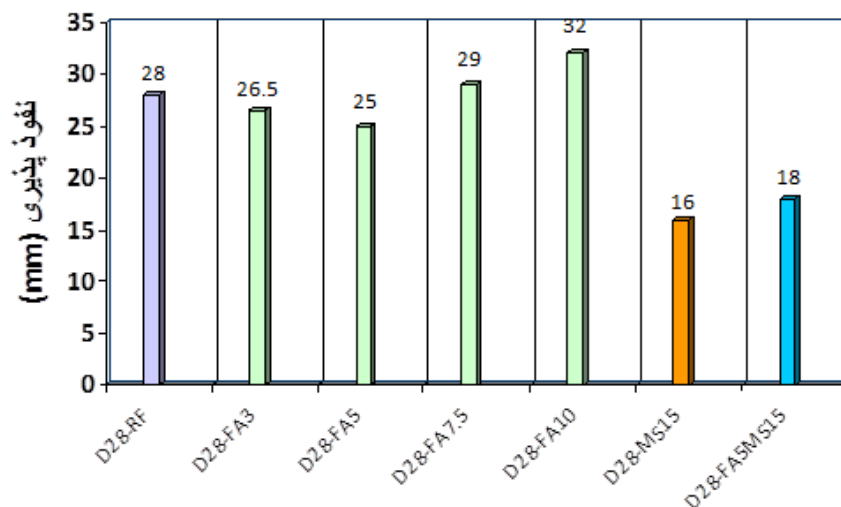
همچنین نتایج شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که میزان نفوذپذیری نمونه دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به مقدار ۴۲/۹ و ۱۶/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. میزان نفوذپذیری نمونه دارای ترکیب بهینه (۵ درصد خاکستر بادی و ۱۵ درصد میکروسیلیس) در سن ۲۸ روز به میزان ۳۵،۷ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است و میزان نفوذپذیری نمونه حاوی ترکیب بهینه در سن ۹۰ روز معادل با میزان نفوذپذیری نمونه

لحاظ تکمیل فرآیند عمل آگیری دارای نفوذپذیری کم‌تری می‌باشد.

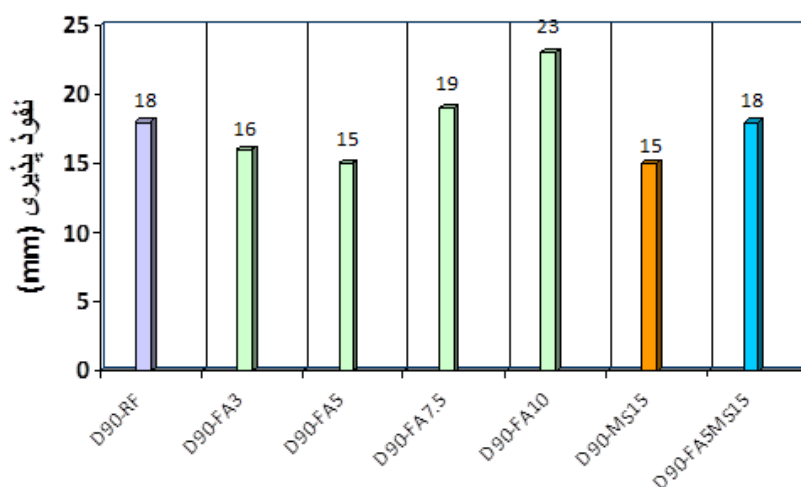


شکل ۹- آزمون‌ها در دستگاه نفوذپذیری و میزان عمق نفوذ آب در

نمونه بتنی



شکل ۱۰- نمودار نتایج میزان نفوذپذیری طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز



شکل ۱۱- نمودار نتایج میزان نفوذپذیری طرح‌های مختلف در سن ۹۰ روز

شاهد می‌باشد. اگر ارزیابی مقایسه‌ای بین نمونه شاهد، درصد بهینه خاکستربادی، درصد بهینه میکروسیلیس و ترکیب بهینه انجام گردد، می‌توان مشاهده کرد که میزان نفوذپذیری نمونه حاوی فقط ۵ درصد خاکستربادی معادل با نمونه حاوی فقط ۱۵ درصد میکروسیلیس می‌باشد که هر دو به میزان ۱۶/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته‌اند. علت کاهش بیش‌تر نفوذپذیری نمونه حاوی خاکستربادی نسبت به نمونه حاوی میکروسیلیس این مسئله می‌باشد که استفاده از میکروسیلیس در بتن موجب می‌گردد که بتن تا سن ۲۸ روز تقریباً به آگیری نهایی خود برسد. اما در رابطه با استفاده از خاکستربادی نوع A، بتن در سنین بالاتر به

۴- نتیجه گیری

- نتایج کلی حاصل از ارزیابی آزمایش‌های مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و نفوذپذیری صورت گرفته بر روی ۲۱۶ نمونه موجود در این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:
- بهترین عملکرد در آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری و نفوذپذیری در نمونه حاوی فقط ۵ درصد خاکستر بادی و نمونه حاوی فقط ۱۵ درصد میکروسیلیس جایگزین وزنی سیمان در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده شده است.
- افزودن ۳، ۵ و ۷/۵ درصد خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، باعث افزایش مدول گسیختگی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه شاهد می‌شود و بیش‌ترین مدول گسیختگی مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ و ۵/۷ درصد در سن ۲۸ روز و ۵ و ۷/۵ درصد خاکستر بادی در سن ۹۰ روز می‌باشد.
- عملکرد افزودن ترکیب ۵ درصد خاکستر بادی و ۱۵ درصد میکروسیلیس جایگزین وزنی سیمان در بتن (ترکیب بهینه)، موجب کاهش به نسبت کم مقاومت فشاری و مدول گسیختگی و افزایش نسبتاً کم نفوذپذیری نسبت به افزودن فقط ۱۵ درصد میکروسیلیس به بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌گردد.
- با افزودن ۷/۵ درصد پوزولان خاکستر بادی جایگزین سیمان، مقاومت فشاری معادل با مقاومت فشاری بتن شاهد را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده شد.
- افزودن ۷/۵ درصد پوزولان خاکستر بادی جایگزین سیمان، موجب افزایش نفوذپذیری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌شود.
- افزودن ۱۰ درصد خاکستر بادی در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و افزایش میزان نفوذپذیری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌گردد.
- مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و نفوذپذیری در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیش‌تر می‌باشند. بیش‌ترین درصد تغییر مربوط به نمونه‌های حاوی ۵ درصد خاکستر بادی می‌باشد. علت افزایش این است که استفاده از میکروسیلیس در بتن باعث می‌شود که بتن تا سن ۲۸ روز تقریباً به آگیری نهایی خود برسد. اما در رابطه با استفاده از خاکستر بادی نوع A، بتن در سنین بالاتر به لحاظ تکمیل فرآیند عمل آگیری دارای خواص مکانیکی و دوام بیش‌تری می‌باشد.
- میزان نفوذپذیری نمونه حاوی ۵ درصد خاکستر بادی معادل با نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس در سن ۹۰ روز نشان داده شد.

[1] Imbabi, M.S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012). "Trends and developments in green cement and concrete technology". *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), pp 194-216.

[2] Drammeh, A., Sidibeh, O. (2015). "Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology". *sustainable Industrial Processing Summit*, Vol. 6, pp 79-80, Flogen Star Outreach.

[3] Vorayos, N., Vorayos, N., Jaitiang, T. (2020). "Energy-environmental performance of Thai's cement industry". *Energy Reports*, 6, pp 460-466.

[4] Tikalsky, P.J., Huffman, M.V., Butler, W.B., Jensen, J.S., Popovics, S., Call, B.M., Keck, R., Prusinski, J., Carrasquillo, R.L., Kosmatka, S.H., Reddy, D.V. (1996). "Use of fly ash in concrete". *ACI Committee*, 232.

[۵] زندی، ی.، عابدی، م. (۱۴۰۰). "ارزیابی تأثیر پارامترهای متفاوت بر روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل آن". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۳، صفحات ۱۰۶۷-۱۰۸۲.

[۶] بیات، م.، بحرینیان، س. م. ح. (۱۳۹۹). "تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات رئوتکنیکی خاک ماسه ای". نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد سیزدهم، شماره ۲، صفحات ۸۵-۹۵.

[7] Fotovat, F., Kazemian, H., Kazemeini, M. (2009). "Synthesis of Na-A and faujasitic zeolites from high silicon fly ash. *Materials Research Bulletin*". 44(4), 913-917.

[8] Medina, N.F., Barluenga, G., Hernández-Olivares, F. (2015). "Combined effect of polypropylene fibers and silica fume to improve the durability of concrete with natural pozzolans blended cement". *Construction and Building Materials*, 96, pp 556-566.

[9] Mohammadi, M., Moghtadaei, R.M., Samani, N.A. (2014). "Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete". *Construction and Building Materials*, 51, pp 141-150.

[10] Kazemian, H., Naghdali, Z., Kashani, T. G., Farhadi, F. (2010). "Conversion of high silicon fly ash to Na-P1 zeolite: Alkaline fusion followed by hydrothermal crystallization". *Advanced Powder Technology*, 21(3), pp 279-283.

[11] Uzbaz, B., Aydin, A.C. (2020). "Microstructural analysis of silica fume concrete with scanning electron microscopy and X-ray diffraction. *Engineering". Technology & Applied Science Research*, 10(3), pp.5845-5850.

[۱۳] نادری، م. و همکاران. (۱۳۹۹). "مطالعه نفوذپذیری و مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی با استفاده از روش محفظه استوان‌های و استاندارد بریتانیا". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ۳، صفحه ۹۲ تا ۱۱۳.

[13] ASTM C33/C33M – 18. (2018). "Standard Specification for Concrete Aggregates".

- [14] ASTM C192/C192M – 18. (2018). “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”.
- [15] ASTM C39/C39M – 21. (2020). “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- [16] ASTM C78/C78 – 21. (2021). “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”.
- [17] BS EN 12390-8. (2019). “Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure”.
- [18] Pachideh, Gh., Gholhaki, M., Moshtagh, A. (2020). “Laboratory study of mechanical properties and microstructure of cement mortar containing Silicafume and Granulated Blast- Furnace Slag in post-high temperature condition”. *Concrete research*, 13(1), pp 81-97.

بررسی تاثیر رزین پلی استر غیراشباع به عنوان ماده پرکننده مابین بلوک‌های رویه بتن بلوکی سطوح پروازی فرودگاه (توقفگاه هواپیما) بر شاخص FOD و در مواجهه با سوخت هواپیما



مجید قاسمی

دانشجوی دکتری راه و ترابری

دانشکده عمران - معماری و هنر

واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران



پرهام حیاتی

استادیار گروه راه و ترابری

دانشکده عمران و محیط زیست

دانشگاه تربیت مدرس، تهران



امیر ابراهیم دهشپور

دانشجوی دکتری راه و ترابری

دانشکده عمران - معماری و هنر

واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

چکیده

استفاده از انواع روسازی‌های بتنی (صلب) در سطوح پروازی فرودگاه‌ها به دلیل ظرفیت باربری بالا، مقاومت در برابر ریزش سوخت و همچنین طول عمر بهره‌برداری بیشتر نسبت به روسازی‌های آسفالتی ارجحیت پیدا کرده است. از بین انواع روسازی‌های بتنی، روسازی بتن بلوکی علاوه بر ظرفیت باربری کافی دارای انعطاف‌پذیری مناسب، سرعت نگهداری و تعمیر بالا و امکان دسترسی سریع به لایه‌های زیرین روسازی است که موجب استفاده از این روسازی به عنوان یکی از گزینه‌های طراحی در سطوح توقفگاه هواپیماها شده است. روسازی‌های بتنی سطوح پروازی خصوصاً توقفگاه‌های هواپیما در طی عمر بهره‌برداری خود وضعیتی را تحمل می‌کنند که در شرایط متداول در سایر رویه‌های بتنی تجربه نمی‌شود. این شرایط خاص سبب وقوع خرابی‌هایی همچون پوسته شدن سطح رویه بر اثر ریزش سوخت هواپیما شده است که منجر به افزایش احتمال وقوع شاخص پتانسیل آسیب ناشی از جسم خارجی (FOD) می‌گردد. بنابراین روسازی این نواحی نیازمند مقاومت در برابر ریزش سوخت یا روغن‌های نفتی است. در این پژوهش رویه بتن بلوکی بر اساس ضوابط FAA در محدوده $2 \times 1/5$ متر با بلوک‌های بتنی به ابعاد 22×11 سانتی‌متر و ضخامت ۸ سانتی‌متر با الگوی چینش جناغی با ماسه درزبند به عنوان پرکننده مابین بلوک‌ها ملاحظه گردید. همچنین به منظور بررسی تاثیر ماده درزبند، فضای مابین بلوک‌ها با استفاده از مصالح پرکننده متداول (ملات ماسه و سیمان) و ترکیب رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ به ضخامت ۱ سانتی‌متر آب‌بندی گردید. آزمون‌های بیرون کشیدگی (Pull-off) و حلالیت در مواجهه با سوخت JP-4 هواپیما انجام گردید و در نهایت بافت مصالح پرکننده توسط تصاویر میکروسکوپی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از مصالح پرکننده پایه رزین علاوه بر ایجاد بافت پیوسته و افت وزنی کمتر از ۰/۵٪ در مواجهه با سوخت JP-4 هواپیما که سبب کاهش پتانسیل FOD سطوح پروازی شد، قفل و بست مابین بلوک‌های بتنی را نیز به میزان ۴۵٪ نسبت به ملات ماسه و سیمان افزایش داد. امکان سنجی کاربرد مصالح پرکننده حاوی رزین پلی استر غیراشباع با توجه به بهبود پیوستگی، افزایش قفل و بست و کاهش تغییر وزن و کاهش پتانسیل شاخص FOD در روسازی‌های سطوح پروازی پیشنهاد می‌گردد. کلمات کلیدی: روسازی بتن بلوکی، رزین پلی استر غیراشباع، آزمون بیرون کشیدگی (Pull-off)، سطوح پروازی فرودگاه، شاخص پتانسیل آسیب ناشی از جسم خارجی (FOD).

استفاده از روسازی‌های بتنی (صلب)^۱ به جهت افزایش ظرفیت باربری و همچنین طول عمر بهره برداری بیشتر نسبت به روسازی‌های آسفالتی، ارجحیت پیدا کرده است [۱]. با توجه به مقاومت باربری مناسب این نوع از روسازی، استفاده از آن در سطوح پروازی فرودگاه‌ها توصیه شده، در حالی که نگهداری و تعمیر آن نیازمند صرف زمان و مسدود سازی ترافیک عبوری است [۲]. از بین انواع روسازی های بتنی، روسازی بتن بلوکی علاوه بر ظرفیت باربری کافی دارای انعطاف پذیری مناسب، سرعت نگهداری و تعمیر بالا و امکان دسترسی سریع به لایه های زیرین روسازی است که موجب کاربرد آن به عنوان یکی از گزینه های طراحی در سطوح توقفگاه هواپیماها^۲ شد [۳، ۴]. روسازی بتن بلوکی از اجزا منفرد (بلوک های بتنی) با سطوح جانبی نامنظم تشکیل شده است که در کنار یکدیگر به عنوان یک ساختار پیوسته عمل می کنند. ساخت و اجرای روسازی های سطوح پروازی فرودگاه ها به دلیل شرایط خاص این سطوح، باید با کیفیت بالا و همچنین ریسک پایین باشد. بنابراین سازمان هوانوردی فدرال (FAA)^۳ شرایط و نحوه ساخت و اجرای روسازی بتن بلوکی را ارائه کرده است. بر همین اساس روسازی های بتن بلوکی که بار

ترافیکی بر روی آنها بیشتر از ۴۵ تن است باید از لایه اساس تثبیت شده با سیمان (CTB)^۴ در ساختارشان استفاده شود [۵، ۲]. برای ساخت بلوک های بتنی از استانداردهای BS EN 1338 و ASTM C936-C936M استفاده می گردد که توضیحات کاملی از مواد اولیه، ابعاد و روش های آزمایش بر روی بلوک های بتنی را ارائه کرده اند [۶، ۷].

ظرفیت باربری روسازی های بتن بلوکی مورد استفاده در سطوح پروازی توسط طاهری و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ بررسی گردید. روسازی بتن بلوکی به مساحت ۴ متر مربع بر مبنای ضوابط FAA ساخته و بارگذاری صفحه در مرکز آن انجام شد. سپس تعداد تکرار مجاز بارگذاری بر روی روسازی با توجه به پاسخ لایه CTB تعیین گردید. برای پر کردن فضای خالی مابین بلوک ها از ترکیب ماسه و سیمان با نسبت ۳ به ۱ استفاده شد.

در بررسی روسازی های بتن بلوکی علاوه بر بررسی ظرفیت باربری، میزان چفت و بست^۵ بلوک ها به یکدیگر و همچنین مقاومت در برابر نیروی برشی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در روسازی های بتنی بلوکی، قفل و بست افقی بلوک های بتنی تاثیر مستقیم بر مقاومت روسازی در برابر بارهای افقی دارد که به شکل و الگوی چیدمان بلوک ها، نوع مصالح پرکننده بین آنها و تماس بلوک ها با یکدیگر

¹ Rigid pavement² Apron³ Federal Aviation Administration (FAA)⁴ Cement Treated Base (CTB)⁵ interlock

که در نتیجه آن انتقال بار بین آنها صورت می‌گیرد، بستگی دارد [۹].

یک سیستم جدید توسط جان امری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۴ ارائه گردید که موجب افزایش قفل و بست بین بلوک‌های بتنی و کاهش پدیده FOD در سطوح پروازی فرودگاه‌ها شد. سیستم جدید ارائه شده شامل اعمال تغییراتی در شکل بلوک‌ها بود. این تغییرات به منظور چفت شدن بلوک‌های بتنی به یکدیگر انجام شد.

در سال ۲۰۱۸ ووگانگ لین و همکاران [۱۱] چهار مدل مختلف بلوک بتنی را با چهار الگو چیدمان کنار یکدیگر قرار دادند که از بین الگوهای انتخابی، مدل جناغی^۶ عملکرد سازه‌ای بهتری از خود نشان داد. ایجاد تغییرات در شکل بلوک‌های بتنی منجر به کاهش شاخص پتانسیل آسیب ناشی از جسم خارجی (FOD)^۷ و همچنین افزایش قفل و بست بین بلوک‌های بتنی گردید. با چینش پنج مدل مختلف بلوک بتنی در شش الگو گوناگون، مشخص گردید که سختی تماسی^۸ ماسه پرکننده درزها نقش مهمی در تغییر شکل‌های افقی دارد و باید از پر شدن کامل درزها اطمینان حاصل کرد [۱۲].

روسازی‌های بتنی سطوح پروازی خصوصاً توقفگاه‌های هواپیما در طی عمر بهره‌برداری خود وضعیتی را تحمل می‌کنند که در شرایط متداول در سایر رویه‌های بتنی تجربه نمی‌شود. این شرایط

خاص سبب وقوع خرابی‌هایی همچون پوسته شدن^۹ سطح رویه بر اثر ریزش سوخت هواپیما شده است که منجر به افزایش احتمال وقوع پدیده FOD گردید [۱۳]. بنابراین روسازی این نواحی نیازمند مقاومت در برابر ریزش سوخت یا روغن‌های نفتی است. برای کنترل مقاومت روسازی‌ها در برابر ریزش سوخت، بند P-404 از آیین‌نامه FAA [۱۴] و استاندارد ASTM D1854 [۱۵] نحوه انجام آزمایش برای روسازی‌های آسفالتی و بتنی را ارائه کرده‌اند. نکته مهم در آزمایش‌های ارائه شده، تماس مستقیم سوخت با رویه روسازی به مدت ۲۴ ساعت است [۱۶].

۲- روش پژوهش

علاوه بر دو عامل ظرفیت باربری و قفل و بست بین بلوک‌ها، مقاومت در برابر ریزش سوخت برای روسازی‌های واقع در مکان‌هایی نظیر توقفگاه‌های هواپیما، پارکینگ‌ها و جایگاه‌های سوخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اجزا روسازی این مکان‌ها باید مقاومت کافی در برابر ریزش سوخت داشته باشند. در این پژوهش تلاش گردید تا با ارائه یک ماده پرکننده بین بلوکی جدید ضمن افزایش قفل و بست بلوک‌ها به یکدیگر، از احتمال خرابی‌های ناشی از FOD در سطوح پروازی کاست. همچنین مقاومت در برابر ریزش سوخت را به حداقل رساند که خود موجب افزایش عمر بهره‌برداری روسازی است و از ورود رطوبت و ذرات خارجی به لایه‌های روسازی جلوگیری می‌کند.

^۶ Herringbone pattern

^۷ Foreign Object Damage (FOD)

^۸ Contact stiffness

^۹ Scaling

۲-۱- ساختار روسازی

روسازی بتن بلوکی بر اساس ضوابط FAA در ابعاد $1/3m \times 2m$ به ضخامت ۷۱ سانتی‌متر در ۶ لایه شامل خاک بستر، زیراساس، اساس سنگی شکسته و اساس تثبیت شده با سیمان (CTB) هر یک به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، لایه بستر ماسه‌ای به ضخامت ۳ سانتی‌متر و بلوک‌های بتنی به ضخامت ۸ سانتی‌متر ساخته شد. مصالح لایه‌های خاک بستر، زیراساس و اساس سنگی شکسته شده پس از دانه‌بندی مطابق بندهای P-152 [۱۷] و P-154 [۱۸] از آئین نامه FAA اجرا شد و سپس درصد تراکم هر لایه مطابق با AASHTO T191 [۱۹]

کنترل گردید. لایه CTB مطابق با بند P-209 نشریه FAA [۲۰] دانه بندی، پخش و به وسیله متراکم کننده دستی مطابق شکل شماره (۱-الف) متراکم و پس از عمل‌آوری لایه CTB، لایه بستر ماسه‌ای مطابق شکل شماره (۱-ب) به ضخامت ۳ سانتی‌متر دانه‌بندی و بر روی آن اجرا و متراکم گردید. در مرحله آخر ساخت روسازی، بلوک‌های بتنی مطابق شکل شماره (۱-ج) با الگوی جناغی بر روی بستر ماسه‌ای چیده و متراکم گردید. برای پر کردن فضای خالی بین بلوک‌های بتنی از ماسه با قطر کمتر از $1/18$ میلی‌متر استفاده شد (مطابق معیار (FAA(150/5320-6D) [۲۱].



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱- مراحل ساخت روسازی بتن بلوکی فرودگاهی: (الف) تراکم لایه CTB، (ب) اجرای لایه بستر ماسه‌ای، (ج) چینش بلوک‌های بتنی با الگوی جناغی

۲-۲- مشخصات مصالح پرکننده بین بلوک‌های بتنی

از نوع ماده چسباننده^{۱۰} برای ساخت ملات پرکننده در درزهای روسازی بلوکی مطابق با شکل شماره ۳ استفاده شد.

¹⁰ binder



(ب)



(الف)

شکل ۳- نوع ماده چسباننده: الف) سیمان تیپ ۲، ب) رزین پلی استر غیر اشباع

سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان قاین انتخاب و مشخصات شیمیایی آن به شرح جدول شماره ۲ می‌باشد. وزن مخصوص سیمان مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C188 [۲۳]، مقدار ۳۱۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد.

به منظور پخش میزان اسیدی یا بازی بودن هر یک از رزین‌ها، آزمایش سنجش PH [۲۲] با روش الکترومتری انجام شد. ویسکوزیته رزین پلی استر غیراشباع با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد محاسبه گردید. نتایج آزمایشات مطابق جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات رزین پلی استر غیراشباع

آزمایش	نتیجه
ویسکوزیته (CPS)	۱۰۹۰
PH	۳/۸۱

جدول ۲- مشخصات ترکیبات شیمیایی سیمان

ترکیب	استاندارد	حد استاندارد	مقدار (%)
SiO ₂	ISIRI 1692	---	۲۱/۷
Al ₂ O ₃	ISIRI 1692 Titer	Max 6	۴/۶
Fe ₂ O ₃	ISIRI 1692 Titer	Max 6	۴/۶
CaO	ISIRI 1692 Titer	---	۶۳
MgO	ISIRI 1692 Titer	Max 6	۱/۱
SO ₃	ISIRI 1692	Max 3	۱/۸۴
LOI	ISIRI 1692	Max 3	۲/۶
IR	ISIRI 1692	Max 1.5	۰/۵۵
C ₃ A	---	Max 8	۶

مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در جدول شماره ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳- مشخصات ترکیبات فیزیکی سیمان

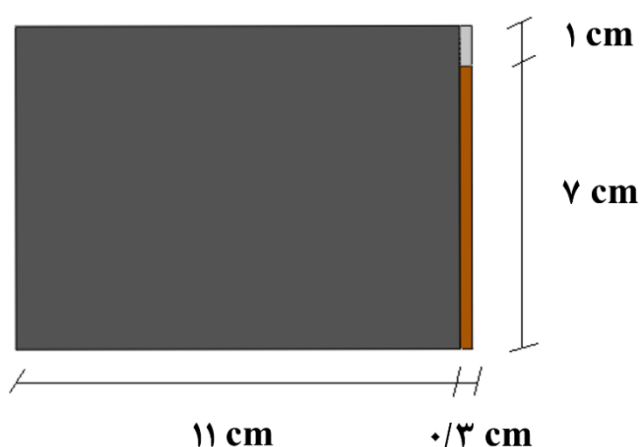
نتایج	حد استاندارد	استاندارد	مشخصه	
۱۴۵	Min 100	ISIRI 393	۲ روزه	مقاومت فشاری Kg/cm2
---	---	ISIRI 393	۳ روزه	
۳۱۰	---	ISIRI 393	۷ روزه	
۴۵۰	Min 425 Max 625	ISIRI 393	۲۸ روزه	
۰/۰۲	Max 0.8	ISIRI 391	انقباض اتوکلاو (٪)	
۲۲	Min 45	ISIRI 392	اولیه	زمان گیرش min
۲۶۵	Max 360	ISIRI 392	نهایی	
۳۰۰۰	Min 2800	ISIRI 390	بلین Cm2/gr	

۳-۲- نسبت‌های مخلوط مصالح پرکننده بین بلوک‌های بتنی

در این تحقیق دو نوع ترکیب مختلف به عنوان ماده پرکننده مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات طرح اختلاط ترکیبات مطابق جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاط مصالح پرکننده

کد طرح	نسبت اختلاط	مصالح افزوده شده	مصالح چسباننده
۱	۱ واحد سیمان + ۳ واحد ماسه [۸]	ماسه	سیمان
۲	۱ واحد رزین + ۱/۸ واحد پودر سنگ	پودر سنگ	رزین پلی استر غیراشباع



شکل ۴- جزئیات درزگیری بلوک‌های بتنی

۴-۲- عملیات آب‌بند کردن روسازی با مصالح

پرکننده

به منظور بهبود قفل و بست مابین بلوک‌های بتنی، از دو نوع چسباننده به عنوان مصالح اولیه برای درزگیری نهایی به ضخامت ۱ سانتی‌متر و عرض ۰/۳ سانتی‌متر مابین بلوک‌های بتنی برای درزگیری نهایی سطح روسازی استفاده شده است. فضای ۷ سانتی‌متر باقی مانده توسط ماسه درزبند خشک پر شده است (شکل شماره ۴).

تصویر بلوک‌های بتنی پس از آب‌بندی مطابق با شکل شماره ۵ ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- آب‌بندی سطح روسازی: (الف) ملات ماسه و سیمان، (ب) رزین پلی استر غیر اشباع به همراه پودر سنگ

۳- آزمایش‌ها

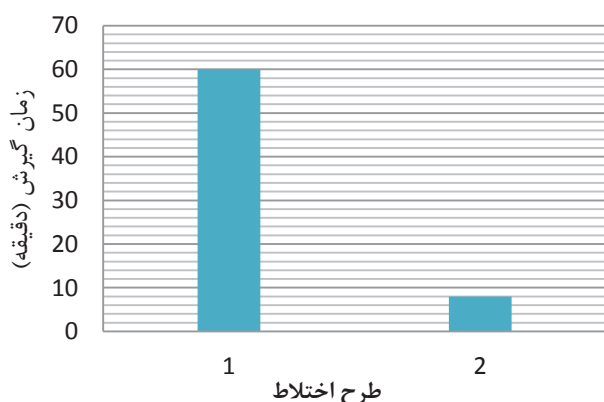
آزمایش‌های تعیین ویسکوزیته و PH رزین به ترتیب بر اساس ISO 2555: 2018 [۲۴] و Manual for PH-meter 2016 و آزمایش بیرون کشیدگی بلوک‌های بتنی به منظور ارزیابی قفل و بست بلوک‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM D4541-22 [۲۵]، آزمایش حالیت^{۱۱} مصالح پرکننده در مواجهه با سوخت JP-4 هواپیما بر اساس بند P-404 از استاندارد FAA انجام گردیده است و همچنین تصاویر میکروسکوپی با استفاده از

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^{۱۲} از بافت سطحی مصالح بر اساس استاندارد ASTM E2809-22 [۲۶] تهیه شده است. آزمایش‌ها در محل سایت آزمایش روسازی بلوکی دانشگاه آزاد اسلامی سمنان انجام گرفته است.

۴- بحث و تحلیل نتایج

۴-۱- زمان گیرش مصالح پرکننده

زمان گیرش مصالح مورد استفاده به عنوان پرکننده بین بلوک‌های بتنی از نظر افزایش سرعت ساخت یا تعمیر روسازی بتن بلوکی از اهمیت بالایی برخوردار است. زمان گیرش مصالح مورد استفاده در این پژوهش مطابق با نمودار شکل شماره ۶ ارائه گردیده است.



شکل ۶- مدت زمان لازم برای گیرش مصالح پرکننده

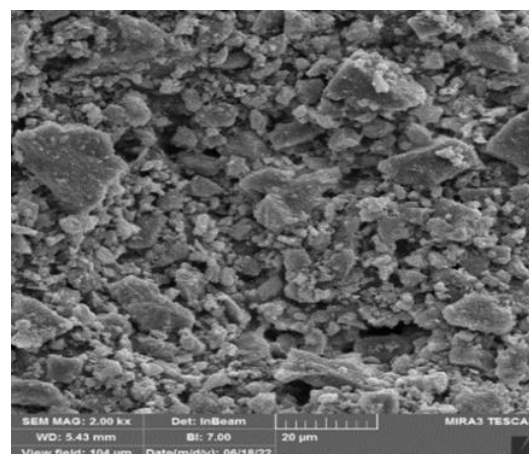
سرعت گیرش مصالح پرکننده حاوی رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ ۵۲ دقیقه کمتر از مصالح پرکننده متداول (ملات ماسه و سیمان) بود که موجب ارتقا سرعت عملیات تعمیر در سطوح پروازی گردید.

¹² Scanning Electron Microscopy (SEM)

¹¹ Solubility

۲-۴- تصاویر میکروسکوپی از سطح مصالح پرکننده (SEM)

تصاویر میکروسکوپی از سطح مصالح پرکننده در مقیاس 20μm مطابق شکل شماره ۷ ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی از سطح مصالح پرکننده: (الف) ملات ماسه و سیمان، (ب) رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ

برمبنای تصاویر میکروسکوپی مشاهده گردید ملات ماسه و سیمان متخلخل بوده و پیوستگی بین مصالح آن کم است. استفاده از رزین موجب ایجاد سطحی یکپارچه در مصالح پرکننده شد. براساس تصاویر ارائه شده از مصالح پایه رزین مشخص گردید دانه‌های پودر سنگ به صورت کامل درون رزین حل نشده اما ترکیب پودر سنگ و رزین دارای پیوستگی کامل است و اثری از تخلخل مشاهده نگردیده است.

همچنین احتمال جداشدگی بخشی از مصالح ملات ماسه و سیمان به دلیل عدم پیوستگی کافی و متخلخل بودن، بیشتر از مصالح پایه رزین است. بنابراین استفاده از مصالح پرکننده پایه رزین گزینه مناسبی برای آب‌بندی نهایی بلوک‌های بتنی در سطوح پروازی فرودگاه است و در نتیجه استفاده از این مصالح، پتانسیل شاخص FOD نیز کاهش یافت. مصالح حاوی رزین دارای صلیبت بیشتری نسبت به ملات ماسه و سیمان است که موجب افزایش مقاومت این مصالح در برابر ضربه و فشارهای ناشی از عبور چرخ‌های هواپیما از سطح روسازی می‌شود. تصاویر شکستن مصالح پرکننده در اثر اعمال نیرو مطابق شکل شماره ۸ ارائه گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- تصاویر مصالح پرکننده در هنگام خردشدن بر اثر نیروی وارد شده: (الف) ملات ماسه و سیمان، (ب) رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ

ملات ماسه و سیمان پس از شکسته شدن به قطعات ریزتر تقسیم شد که به مرور زمان می‌تواند از

تصاویر مربوط به بلوک های بتنی پس از انجام آزمایش Pull-off مطابق شکل شماره ۱۱ ارائه گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- تصاویر بلوک های بتنی پس از انجام آزمون Pull-off: (الف) ملات ماسه و سیمان، (ب) رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ

۴-۴- آزمایش حلالیت

آزمایش حلالیت مطابق با بند P-404 از استاندارد FAA بر روی مصالح پرکننده روسازی بتن بلوکی انجام شده است [۱۴]. بر همین اساس مقداری از مصالح پرکننده برداشت و وزن آنها محاسبه گردیده است. در گام بعد معادل وزن برداشت شده، سوخت JP-4 هواپیما اضافه شده است. مصالح به مدت ۲۴ ساعت در شرایط غوطه وری در سوخت هواپیما قرارداشته اند. در نهایت پس از ۲۴ ساعت، مصالح از

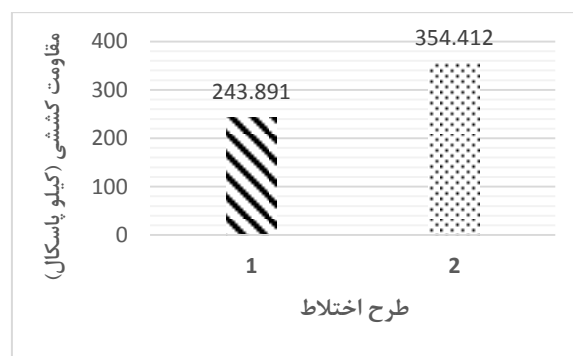
میان بلوک های بتنی خارج شده و علاوه بر افزایش احتمال آسیب ناشی از اجسام خارجی، نفوذ رطوبت به لایه های زیرین بلوک های بتنی را تسریع کند.

۳-۴- آزمون بیرون کشیدگی (Pull-off)

آزمون Pull-off بر روی سه بلوک بتنی که دور تا دور هر یک از آنها با مصالح رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ و ملات ماسه و سیمان به ارتفاع ۱ سانتی متر درزگیری شده بود، مطابق با استاندارد ASTM D4541-22 انجام گردیده است. نحوه انجام آزمون در شکل شماره ۹ و نتایج نیروی کششی نهایی وارد شده به هر بلوک برای جداسازی مطابق نمودار شکل شماره ۱۰ ارائه گردیده است.



شکل ۹- انجام آزمایش Pull-off بر روی بلوک های بتنی



شکل ۱۰- نتایج آزمایش Pull-off

براساس نتایج مشخص گردید که استفاده از رزین باعث افزایش قفل و بست بین بلوک های بتنی به میزان ۴۵ درصد نسبت به پرکننده متداول (ملات ماسه و سیمان) شد.

۵- نتیجه گیری

بر مبنای آزمون های انجام گرفته، نتایج زیر بدست آمده است:

- سرعت گیرش مصالح پرکننده حاوی رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ ۵۲ دقیقه کمتر از مصالح پرکننده متداول (ملات ماسه و سیمان) بوده که موجب افزایش سرعت عملیات ترمیم و تعمیر در سطوح پروازی خواهد شد.

- بر مبنای مشاهدات میدانی مشخص گردیده است که مصالح حاوی رزین پلی استر غیراشباع دارای صلبیت و عدم انعطاف پذیری بوده است که می تواند باعث افزایش صلبیت رویه بتنی نیز شود، در حالی که روسازی بتن بلوکی یک روسازی نیمه صلب بوده و صلبیت بیشتر از سودمندی این روسازی خواهد کاست.

- بر مبنای تصاویر میکروسکوپی از بافت مصالح پرکننده و همچنین مشاهدات میدانی، استفاده از مصالح حاوی رزین پلی استر غیراشباع همراه با پودر سنگ، به علت ایجاد پیوستگی و صلبیت بیشتر موجب کاهش پتانسیل شاخص FOD گردید.

- بر مبنای آزمایش Pull-off، استفاده از مصالح پرکننده حاوی رزین موجب افزایش قفل و بست ما بین بلوک های بتنی به میزان ۴۵٪ نسبت به ملات ماسه و سیمان (پرکننده متداول) به عنوان ماده درزگیر نهایی گردید.

- واکنش پذیری مصالح حاوی رزین پلی استر غیر اشباع در مواجهه با سوخت هواپیما (JP-4) کمتر از ۰/۵٪ بوده است که این موضوع مقاومت این مصالح

حالت غوطه وری خارج و اقدام به از بین بردن ماده حلال (سوخت هواپیما) گردیده است. وزن مصالح پس از خشک شدن (از بین رفتن کامل سوخت هواپیما) محاسبه شد. درصد افت وزن مصالح قبل و بعد از قرار گیری در حلال مطابق با رابطه شماره ۱ محاسبه و با نتایج حالیت مواد معمول پرکننده (ملات ماسه و سیمان) مقایسه گردید.

$$(۱) \quad \text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه} = \frac{\text{درصد افت وزنی}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

نتایج آزمایش حالیت مطابق جدول شماره ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۵- جزئیات طرح های اختلاط مصالح پرکننده

مصالح	درصد تغییرات وزن پس از ۲۴ ساعت غوطه وری در سوخت هواپیما
پرکننده حاوی رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ	۰/۳٪ -
ملات ماسه و سیمان	۳٪

براساس نتایج حاصل، واکنش پذیری مصالح هر ۲ گروه نسبت به سوخت هواپیما حداقل بوده و از این میان، ملات ماسه و سیمان تغییرات وزنی بیشتری نسبت به مصالح حاوی رزین داشت (افزایش وزن) که علت عمده آن ناشی از متخلخل بودن این مصالح بود (نسبت بیشتر ماسه در مقابل سیمان). مصالح حاوی رزین پلی استر غیراشباع به همراه پودر سنگ دچار خوردگی شد که میزان آن ۰/۳٪ بود.

افزایش قفل و بست و کاهش تغییر وزن و کاهش
پتانسیل شاخص FOD در روسازی‌های سطوح
را در برابر ریزش سوخت در توقفگاه هواپیماها نشان
داده است.
- امکان سنجی کاربرد مصالح پرکننده حاوی رزین
پلی استر غیراشباع با توجه به بهبود پیوستگی،
پروازی پیشنهاد می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] Estates, D. (2011). *A guide to airfield pavement design and evaluation. Design & Maintenance Guide*, 27.
- [2] Gkyrtis, K., Armeni, A., Plati, C., & Loizos, A. (2021). *Structural performance assessment of airfield concrete pavements based on field and laboratory data. Infrastructures*, 6(12), 173.
- [3] Yeo, S. H., Mo, K. H., Hosen, M. A., & Mahmud, H. B. (2022). *Properties of cementitious repair materials for concrete pavement. Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 3057801.
- [4] Rollings, R. S., & Geotechnical Laboratory (US). (1983). *Concrete block pavements*.
- [5] FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports*. 2018, Federal Aviation Administration: USA. p. 727.
- [6] Purwanto, P., & Priastiw, Y. A. (2008). *Testing of concrete paving blocks the BS EN 1338: 2003 British and European standard code. Teknik*, 29(2), 80-84..
- [7] ASTM C936/C936M-23, *Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units*, United States.
- [8] Taheri, V., Fakhri, M., & Hayati, P. (2021). *Evaluation of airfield concrete block pavements based on 3-D modelling and plate loading test. Construction and Building Materials*, 280, 122441.
- [9] Garilli, E., Autelitano, F., Roncella, R., & Giuliani, F. (2020). *The influence of laying patterns on the behaviour of historic stone pavements subjected to horizontal loads. Construction and Building Materials*, 258, 119657.
- [10] Emery, J., Lazar, M., & Burrows, G. R. (2004). *A new paver system for airfields. In Transportation Systems Workshop, Fort Lauderdale USA*.
- [11] Lin, W., Kim, D., Ryu, S., Hao, H., Ge, Y. E., & Cho, Y. H. (2018). *Evaluation of the load dissipation behavior of concrete block pavements with various block shapes and construction patterns. Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017291.
- [12] Hengl, H. L., Kluger-Eigl, W., Lukacevic, M., Blab, R., & Füssl, J. (2018). *Horizontal deformation resistance of paving block superstructures-Influence of paving block type, laying pattern, and joint behavior. Internacional Journal of Pavement Research and Technology*, 19(7), 1575-1594.

- [13] Shill, S. K., Al-Deen, S., & Ashraf, M. (2018). Concrete durability issues due to temperature effects and aviation oil spillage at military airbase—A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 160, 240-251.
- [14] FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports*, in: *Item P-404 Fuel-Resistant Asphalt Mix Pavement*, 2018, FAA: USA. p. 24.
- [15] ASTM, *Standard Specification for Jet-Fuel-Resistant Concrete Joint Sealer, Hot-Applied Elastic Type (Withdrawn 2006)*. 2017, ASTM: USA. p. 1.
- [16] Rizvi, H., Mehta, Y., Weis, D., Purdy, C., & Ali, A. (2019). Fuel Resistance Asphalt Binder: Mixing Procedure and Fuel Damage Resistance. In *Testing and Characterization of Asphalt Materials and Pavement Structures: Proceedings of the 5th GeoChina International Conference 2018—Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes: From Failure to Sustainability*, held on July 23 to 25, 2018 in Hangzhou, China (pp. 1-11). Springer International Publishing.
- [17] FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports*, in *Item P-152, Excavation, Subgrade, and Embankmen*. 2018, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration: USA. p. 103.
- [18] FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports*, in *Item P-154, Subbase Course*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 121.
- [19] AASHTO T191, *Standard Method of Test for Density of Soil In-Place by the Sand-Cone Method*. 2014, AASHTO: USA. p. 8.
- [20] FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports*, in *Item P-209, Crushed Aggregate Base Course*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 173.
- [21] FAA, *Airport Pavement Design and Evaluation AC No:150/5320-6F*, in *Pavement Design*. 2016, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA.
- [22] Toledo, M. (2016). *A Guide to PH measurement: theory and practice of laboratory pH applications. Manual for pH-meter*.
- [23] ASTM C188-09, A.S., *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. 2009, ASTM: USA.
- [24] ISO, E. (2018). 2555. *Plastics—Resins in the Liquid State or as Emulsions or Dispersions—Determination of Apparent Viscosity Using a Single Cylinder Type Rotational Viscometer Method*. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, Technical Committee ISO/TC61/SC5: Geneva, Switzerland.
- [25] ASTM D4541-22, *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*, ASTM International, 2022, ASTM: USA
- [26] ASTM E2809-22, A., *Standard Guide for Using Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM/EDS) in Forensic Polymer Examinations*. 2022, ASTM: USA. p. 8.