

مطالعات آزمایشگاهی کارایی، رفتار مکانیکی و خصوصیات دوامی ملات سیمانی مسلح شده به الیاف بازالت و پلی پروپیلن

مهرداد رزاقیان قادیکلایی^{۱*}، مهدی میرزایی^۲، اصغر حبیب‌نژاد کورایم^۳

- ۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

* m_razzaghian@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱

چکیده

در این پژوهش تأثیر هم‌زمان درصدهای مختلف الیاف بازالت و پلی پروپیلن بر کارایی، رفتار مکانیکی و ویژگی‌های دوامی ملات سیمانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی تأثیر الیاف‌ها با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای مؤثر بر ویژگی‌های ملات سیمانی (مانند نسبت آب به سیمان و نسبت ماسه به سیمان) از نمونه‌های حاوی ترکیب هیبریدی ۰/۰۵ و ۰/۱۲۵ درصد (درصد وزنی مجموع سیمان و سنگدانه) از دو الیاف ذکر شده بهره گرفته شده است، به شکلی که در مجموع ۴ نوع طرح مخلوط حاوی هیبرید الیاف‌های بازالت و پلی پروپیلن ساخته شده و نتایج آن با نمونه شاهد مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که استفاده هم‌زمان این دو الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری ملات سیمانی نداشته است؛ این در حالی است که نتایج، عملکرد مطلوب و قابل توجه الیاف‌های مذکور در افزایش مقاومت خمشی و کششی را نشان دادند. همچنین مشاهده شد که ویژگی‌های دوامی شامل نرخ جذب آب، جذب آب حجمی و مقاومت ویژه الکتریکی ملات سیمانی اصلاح شده با ترکیب هیبریدی این دو الیاف نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. افزودن هیبریدی ۰/۱۲۵ درصد (درصد وزنی مجموع سیمان و سنگدانه) الیاف بازالت و پلی پروپیلن موجب افزایش به ترتیب ۲۸ و ۲۳ درصدی مقاومت خمشی و کششی نمونه شاهد شد. همچنین نمونه حاوی هیبرید ۰/۱۲۵ درصد (درصد وزنی مجموع سیمان و سنگدانه) الیاف بازالت و ۰/۰۵ درصد الیاف پلی پروپیلن موجب افزایش ۹/۳ درصدی مقاومت فشاری، کاهش ۲۴ درصدی نرخ جذب آب، کاهش ۱۵ درصدی جذب آب حجمی و بهبود ۲۲ درصدی مقاومت ویژه الکتریکی شد. مطابق نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌توان دریافت که حضور هم‌زمان الیاف‌های بازالت و پلی پروپیلن موجب بهبود بخش عمده ویژگی‌های ملات سیمانی شامل خصوصیات مکانیکی و دوامی می‌شود، این در حالی است که در صورت استفاده مجزا از هریک از این الیاف‌ها دستیابی به چنین نتیجه مطلوبی دور از انتظار است، چراکه هر یک از الیاف‌های بازالت و پلی پروپیلن با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی توانایی بهبود قابل توجه بخشی از ویژگی‌های ملات سیمانی را دارند.

واژگان کلیدی: الیاف بازالت، الیاف پلی پروپیلن، ویژگی‌های مکانیکی، دوام، ملات.

۱- مقدمه

مشاهده شد افزودن الیاف به کامپوزیت سیمانی موجب بهبود مقاومت سایشی، شکنندگی و ویژگی‌های دوامی آن مانند مقاومت در برابر ذوب و یخبندان شده است [12, 13]. بنابراین حضور الیاف‌ها در ملات سیمانی نه تنها می‌تواند ضعف‌های ملات را به شکل مناسبی در شرایط مختلف بهبود دهد بلکه از این طریق حوزه کاربرد انواع ملات مانند ملات معمولی، خودتراز و تعمیری را گسترش می‌دهد و موجب تولید سازه‌هایی پایدار با ویژگی‌های مطلوب می‌شود [14, 15]. فنگ و همکاران تأثیر الیاف کربن بر خصوصیات ملات تعمیری را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد ملات حاوی الیاف کربن نه تنها موجب افزایش مقاومت فشاری، خمشی و مقاومت چسبندگی می‌شود بلکه به خوبی جمع‌شدگی خشک ملات تعمیری را نیز بهبود می‌دهد [16].

به‌طورکلی به دو روش می‌توان الیاف‌ها را در کامپوزیت سیمانی استفاده کرد. یکی از روش‌ها افزودن جداگانه (مجزا) هر یک از الیاف‌ها و روش دیگر استفاده هم‌زمان یا هیبریدی دو یا چند الیاف با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت در کامپوزیت سیمانی می‌باشد. هر یک الیاف‌ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی می‌توانند روی برخی از خصوصیات کامپوزیت سیمانی تأثیر چشم‌گیر داشته باشند. بنابراین به‌طورکلی زمانی که الیاف‌ها به صورت مجزا و منفرد (جداگانه) در کامپوزیت سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند عملاً بهبودهای محدودی در عملکرد و ویژگی‌های کامپوزیت مشاهده می‌شود. این درحالی است که ترکیب هیبریدی یا هم‌زمان الیاف‌ها با جنس و مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌تواند بخش عمده‌ای از عملکرد و خصوصیات کامپوزیت سیمانی را بهبود دهد [17]. در حال حاضر ترکیب هیبریدی الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فولادی به‌طور گسترده در کامپوزیت‌های سیمانی استفاده می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل مشخصات بارز مانند شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری بالا، دوام مناسب، قیمت ارزان و سایر ویژگی‌ها، به صورت گسترده در حوزه کامپوزیت سیمانی استفاده می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن متشکل از مواد ترکیبی

ملات‌های سیمانی رایج به دلیل ویژگی‌هایی مانند قیمت ارزان، مقاومت فشاری مطلوب، دسترسی آسان و دوام به‌طور گسترده برای اتصال المان‌های سازه‌ای به یکدیگر مانند اتصال آجرها، سنگ‌ها و بلوک‌های بتنی و یا اتصالات انتهای تیرها و ستون‌ها استفاده می‌شوند [1]. از لحاظ سازه‌ای ملات می‌تواند بار وزنی وارد شده از یک سطح به سطح دیگر را به‌طور یکنواخت توزیع کند و از این طریق مقاومت برشی مجموعه روی هم قرارگرفته را افزایش می‌دهد. یکی دیگر از کاربردهای ملات سیمانی که امروزه بیشتر مورد توجه قرارگرفته است، استفاده از ملات به‌عنوان مصالح ترازکننده سطوح نهایی است که به‌عنوان ملات‌های خودتراز شناخته می‌شوند [2]. ملات‌های تعمیری نیز نمونه دیگری از کاربرد ملات سیمانی در حوزه کامپوزیت‌های سیمانی است و جزء موضوعات بااهمیت و جذاب تحقیقات اخیر پژوهشگران سراسر جهان بوده است [3]. با این حال همواره مقاومت کششی پایین، شکنندگی بالا، عملکرد ضعیف در برابر بازشدگی و گسترش ترک و عدم مقاومت در برابر تمرکز تنش‌ها از معضلات اصلی کامپوزیت‌های سیمانی به شمار می‌آید که اگر این معایب اصلاح نشود، سازه‌ها عملکرد مطلوبی نداشته و در مدت‌زمان کوتاهی دچار خرابی خواهند شد [4].

استفاده از الیاف‌های مختلفی مانند الیاف فولادی [5]، کربن و سلولز [6]، پلی‌پروپیلن [7]، شیشه و بازالت [8] در اندازه‌های مختلف که در تمام حجم کامپوزیت سیمانی پراکنده می‌شوند، یکی از روش‌هایی است که همواره مورد توجه پژوهشگران برای بهبود ویژگی‌های کامپوزیت سیمانی بوده است. دانشمندان در مطالعات اخیر خود نشان دادند که الیاف به‌طورکلی علاوه بر ایجاد ممانعت برای تولید ترک در کامپوزیت سیمانی و جلوگیری از رشد و انتشار آن‌ها [8]، سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی به ویژه مقاومت کششی و خمشی [9]، بهبود مقاومت چسبندگی ملات [10] و افزایش سختی و پتانسیل جذب انرژی [11] خواهد شد. همچنین در تحقیقاتی

کامپوزیت سیمانی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی و خصوصیات دوامی شامل مقاومت ویژه الکتریکی و جذب آب را به خوبی بهبود می‌دهد [17]. اصلانی و همکاران؛ نشان دادند که مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته کامپوزیت سیمانی مسلح شده به ترکیب هیبریدی الیاف‌های پلی‌پروپیلن و فولادی نسبت به حالتی که هرکدام از الیاف به صورت منفرد در کامپوزیت سیمانی استفاده می‌شوند بیشتر است [21]. با این حال، ترکیبات شیمیایی الیاف فولادی مشابه با میلگردهای فولادی است و به همین دلیل الیاف فولادی در یک محیط خورنده به راحتی دچار تخریب شده و حوزه کاربرد الیاف حاوی ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی عملاً محدود می‌شود [22]. بنابراین جایگزینی الیاف فولادی با الیافی با ویژگی‌های مطلوب‌تر در شرایط ترکیب هیبریدی با الیاف پلی‌پروپیلن برای دستیابی به بیشترین پتانسیل این روش استفاده از الیاف‌ها در کامپوزیت سیمانی لازم و ضروری است.

الیاف بازالت به وسیله فرآیند ذوب در دمای تقریبی ۱۴۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و از سنگ بازالت تولید می‌شود. ویژگی‌های شیمیایی الیاف بازالت مانند شیشه است و بخش عمده آن که حدود ۴۰-۶۰ درصد است از سیلیس تشکیل شده و حدود ۱۰-۲۰ درصد آن را نیز آلومینا اکسید در بر گرفته است [23]. برخلاف الیاف فولادی، الیاف بازالت نه تنها مقاومت مطلوبی در برابر خوردگی دارد بلکه ویژگی‌های قابل توجهی مانند خصوصیات مکانیکی مطلوب به خصوص مقاومت کششی بسیار بالا، مقاومت مناسب در برابر تغییرات درجه حرارت (درجه حرارت بالا)، دوام مناسب، مقاومت لرزه‌ای، مدول الاستیسیته بالا، کرنش شکست مناسب، مقاومت قابل قبول در برابر حملات شیمیایی، بار ضربه و آتش به همراه سمیت کم نیز به عنوان ویژگی‌های قابل توجه و منحصر به فرد این الیاف است که آن را به عنوان یک الیاف دوستدار محیط زیست با قابلیت بالا معرفی می‌کند [8, 23, 24]. بر همین اساس، الیاف بازالت می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای سایر

پلیمری مختلف، ساخته شده از پلی‌پروپیلن متشکل از رشته‌های بسیار نازک تک رشته‌ای است که باعث ایجاد یک سیستم بتن مسلح با کارایی و کیفیت بسیار بالا می‌شود. این الیاف با بهبود خصوصیات کششی و خاصیت پل زدگی باعث کاهش جمع شدگی کامپوزیت سیمانی تازه و افزایش مقاومت آن در برابر ایجاد ترک‌های تصادفی در ساعات اولیه ناشی از جمع شدگی پلاستیک می‌شود. این رشته‌ها، به وسیله تشکیل یک شبکه منسجم الیاف باعث ایجاد دوام طولانی مدت و افزایش قابلیت کنترل ترک‌های ثانویه یا حرارتی در کامپوزیت سیمانی می‌شود [18]. وانگ و همکاران، تأثیر ۰/۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن لاستیکی را بررسی کردند و نتایج حاکی از بهبود خصوصیات بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن شامل مقاومت کششی و خمشی، جمع شدگی خشک، انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی، مقاومت در برابر یخ زدگی، مقاومت الکتریکی و کاهش شکنندگی بود [19]. زنگزی^۲ و همکاران نشان دادند الیاف پلی‌پروپیلن ریز ساختار کامپوزیت سیمانی را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد و همچنین بلوره شدن کلسیم هیدروکسید را کاهش داده و به این صورت حفره‌های ریز و ترک‌های بتن را پر می‌کند [20]. همچنین به دلیل اینکه مدول الاستیسیته و مقاومت الیاف فولادی بالا می‌باشد، حضور این الیاف موجب کاهش میزان شکنندگی ترد و بهبود قابل توجه ویژگی‌های مکانیکی و ظرفیت تحمل بار کامپوزیت سیمانی می‌شود [5]. بر همین اساس حضور ترکیبی و هم‌زمان این دو الیاف در طرح اختلاط بتن یا ملات خصوصیات مکانیکی و دوامی آن‌ها را به شکل مناسبی بهبود می‌دهد و نتایج حاصل نسبت به حالتی که این دو الیاف به صورت مجزا استفاده می‌شود بیشتر قابل توجه است. افروغ‌ثابت و همکاران^۳ تأثیر هیبریدی الیاف‌های پلی‌پروپیلن و فولادی را بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی بررسی کردند. نتایج نشان داد ترکیب هم‌زمان درصدهای بهینه الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی تمام ویژگی‌های مکانیکی

4 Aslani et al.

5 SiO₂6 Al₂O₃

1. Wang et al.

2. Zengzhi

3. Afroughsabet et al.

است و نتایج آن کمک شایانی به ساخت سازه‌های پایدار و بادوام بتنی مسلح به الیاف خواهد کرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مصرفی

مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند معمولی تیپ II تهران مطابق با استاندارد ASTM C150 حاصل از آنالیز شیمیایی XRF در جدول (۱) قابل مشاهده است.

ماسه استفاده شده در این تحقیق، ماسه استاندارد برای آزمایش مقاومت فشاری و خمشی ملات ماسه سیمان، مدل CE 255 است. این ماسه بر اساس استاندارد EN 196-1 کشور آلمان است. نمودار دانه‌بندی ماسه استفاده شده در این پژوهش در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

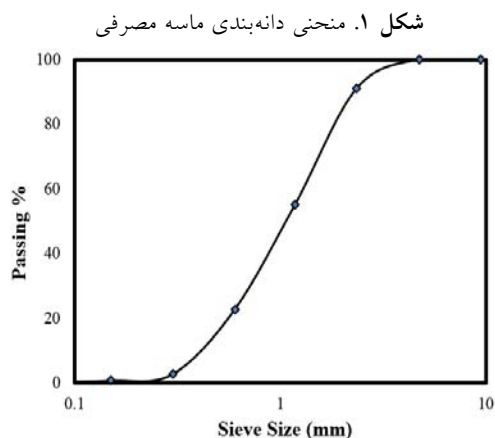


Fig. 1. Gradation curves of aggregate

در این پژوهش از الیاف‌های پلی‌پروپیلن و بازالت با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) استفاده شد. همچنین در شکل (۲) تصویر ظاهری و میکروسکوپ الکترونی روبشی الیاف‌های استفاده شده قابل مشاهده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایانگر سطح صاف و یکنواخت و همچنین قطر یکنواخت هر لایه از الیاف‌ها است.

۲-۲- طرح اختلاط

مراحل اختلاط مطابق استاندارد ASTM-C305 انجام شد. نسبت ماسه به سیمان (S/C) در تمام طرح‌ها ثابت و برابر ۲/۸ اختیار شد. در ابتدا برای بررسی تأثیر الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن

الیاف‌ها به خصوص الیاف فولادی در حالت ترکیب هیبریدی با الیاف پلی‌پروپیلن باشد [25, 26]. اسپرون و همکاران پس از بررسی رفتار نرخ کرنش ملات مسلح شده به الیاف بازالت، بهبود شکنندگی و سختی ملات سیمانی که منجر به ایجاد ویژگی‌های مکانیکی مطلوب شد را گزارش کردند [27]. نیهات کبای ۲ بهبود مقاومت سایشی کامپوزیت سیمانی حاوی ۰/۰۷ و ۰/۱۴ درصد الیاف بازالت در اندازه‌های مختلف را نتیجه گرفته است [24].

بنابراین مطابق مطالب ارائه‌شده، پتانسیل بالای الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن و عدم وجود پژوهشی در زمینه موضوع این مقاله، در این پژوهش هدف بررسی اثر هم‌زمان و ترکیبی این دو الیاف بر خصوصیات ملات سیمانی در نظر گرفته شد تا از این طریق بتوان تمام خصوصیات ملات سیمانی را بهبود بخشید. الیاف پلی‌پروپیلن به‌طور عمده موجب کاهش ترک‌های جمع‌شدگی و کنترل گسترش ماکروترک‌ها می‌شود که در زمینه بهبود ویژگی‌های نفوذپذیری و دوامی تأثیر مناسبی خواهند داشت. الیاف بازالت نیز به سبب ویژگی‌های مکانیکی مطلوب به خصوص مقاومت کششی بسیار بالا توانایی بهبود قابل توجه این خاصیت را دارند، از طرفی در زمینه کنترل ترک‌های با ابعاد مختلف می‌توانند به عملکرد الیاف پلی‌پروپیلن نیز کمک کنند که از این طریق بهبود خصوصیات دوامی را نیز نتیجه می‌دهند، این در حالی است که شکست ترد کامپوزیت سیمانی توسط این الیاف بهبود چندانی نخواهد داشت. بنابراین برای جبران این نقیصه از الیاف پلی‌پروپیلن که شکل‌پذیری کامپوزیت سیمانی را به شکل مناسبی بهبود داده و از شکست ترد جلوگیری می‌کند، به‌عنوان مکمل الیاف بازالت در این پژوهش می‌توان نام برد. از طرفی خصوصیات قابل قبول دوامی و زیست‌محیطی هر دو الیاف در کنار قیمت مناسب آن‌ها این انتخاب را مستحکم‌تر کرد. نتایج این پروژه نیز حاکی از سازگاری مناسب این دو الیاف برای بهبود خصوصیات ملات بوده است؛ بنابراین این پژوهش قدمی مطلوب در راستای انجام پژوهشی جدید حوزه استفاده هیبریدی الیاف‌ها در کامپوزیت‌های سیمانی برداشته

طرح‌های مختلف از فوق‌روان‌کننده‌های (SP) پایه پلی‌کربوکسیلات با مقادیر متفاوت (درصد وزنی سیمان) استفاده شد. همچنین مقادیر استفاده شده الیاف بازالت (BF) و پلی‌پروپیلن (PP) بر مبنای درصدی از وزن مصالح جامد (درصد وزنی مجموع سیمان و سنگدانه) نیز مطابق جدول (۳) است.

بر کارایی کامپوزیت سیمانی از مقادیر ثابت نسبت آب به سیمان (۰/۵) و فوق‌روان‌کننده (۰/۶) استفاده شد. سپس به منظور بررسی ویژگی‌های مکانیکی، جذب آب و مقاومت الکتریکی مطابق جدول (۳) نسبت آب به سیمان (W/C) در تمام طرح‌ها ثابت و برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. همان‌طور که در جدول (۳) قابل مشاهده است، به منظور ثابت نگاه داشتن کارایی در تمام نمونه‌های آزمایش‌های مکانیکی و دوام، در

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند

Component	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Cl
%	63	19.42	6.8	3.62	3.23	2.69	0.71	0.29	0.19	0.1	0.09	0.06

Table 1. Chemical properties of Portland cement

جدول ۲. مشخصات الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن

Basalt fiber		Polypropylene fiber	
Property	Annotation		
Fiber length	20 mm	Fiber length	12 mm
Filament diameter	15 μm	Tensile strength	320 MPa
Tensile strength	3500 MPa	Elastic modulus	3.8 GPa
Elongation at break	3.5 %	Specific gravity	0.91
Elastic modulus	82 GPa	Color	White
Melting range	1460-1550 °C	Resistant to acidic and alkaline environments	Yes
Crystallization Temperature	1250 °C		

Table 2. Properties of basalt and polypropylene fiber

شکل ۲. تصویر ظاهری و میکروسکوپ الکترونی، الف و ب) الیاف پلی‌پروپیلن ج و د) الیاف بازالت

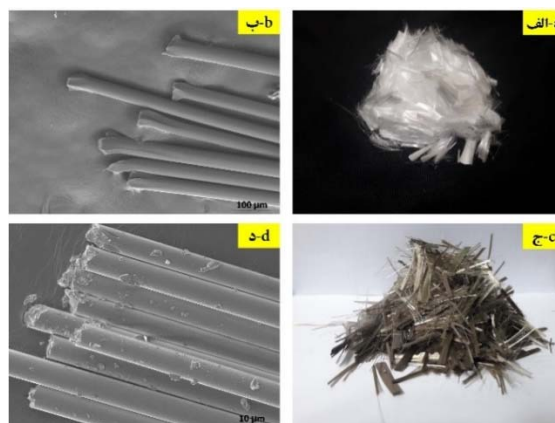


Fig. 2. Appearance and SEM image, a and b) polypropylene fiber c and d) basalt fiber

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط تحقیق

Mix ID	S/C	Workability test		Other tests		OPC (%)	PP	BF
		W/C	SP (%)	W/C	SP (%)		% by solid weight (C+S)	
C	2.8	0.5	0.6	0.38	0.5	100	0	0
PBXX	2.8	0.5	0.6	0.38	0.5	100	0.05	0.05
PBXY	2.8	0.5	0.6	0.38	0.55	100	0.05	0.125
PBYX	2.8	0.5	0.6	0.38	0.55	100	0.125	0.05
PBYX	2.8	0.5	0.6	0.38	0.6	100	0.125	0.125

Table 3. Mix design properties

۳-۲- شرح آزمایش**۳-۲-۱- کارایی**

آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM-C143 و با الگوبرداری از روش هونگ و همکاران [28] انجام شد. در این آزمایش پس از قرارگیری و تراکم ملات تازه در قالب موردنظر، قالب به آرامی به سمت بالا بلند گشد، پس از افت ملات فاصله عمودی میان وضعیت نهایی و وضعیت اولیه در مرکز سطح بالایی نمونه اندازه‌گیری، و عدد اندازه‌گیری شده تحت عنوان اسلامپ گزارش شد (شکل ۳) [29].

به منظور بررسی روانی ملات سیمانی مطابق استاندارد ASTM-C230 پس از قراردادن ملات تازه در قالب میزجریان ۲ و پس از تکرار ۲۵ ضربه در مدت ۱۵ ثانیه به روش اشاره شده در استاندارد، میزان جریان که برابر است با افزایش قطر قاعده ملات نسبت به قطر اولیه به‌عنوان نرخ جریان گزارش شد.

شکل ۳- آزمایش اسلامپ (مینی اسلامپ)

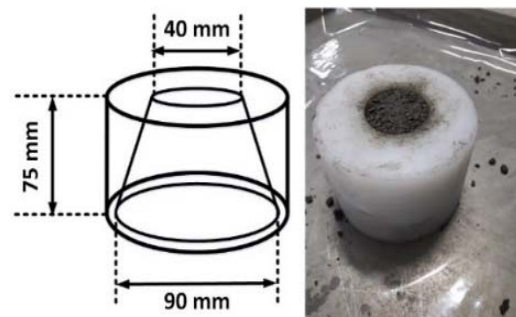


Fig. 3. Slump (mini-slump) test

۳-۲-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری ملات مطابق استاندارد ASTM-C109 و روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر انجام شد. در این آزمایش مطابق استاندارد هرکدام از نمونه‌های مکعبی پس از قرارگیری در مرکز دستگاه، تحت نیروی فشاری با نرخ بارگذاری ۱۰۰۰ نیوتن بر ثانیه قرار گرفتند، سپس با بیشترین تقسیم بار بدست آمده از دستگاه فشاری بر مساحت سطح نمونه مکعبی مقاومت فشاری گزارش شد.

۳-۲-۳- مقاومت خمشی

مطابق استاندارد ASTM-C348 آزمایش مقاومت خمشی روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی‌متر انجام گرفت. در این آزمایش نمونه خمشی در دستگاه مخصوص قرار

گرفت و بار خمشی با نرخ ۲۶۰۰ نیوتن بر دقیقه وارد شد، پس از محاسبه بیشترین بار خمشی توسط دستگاه، مقاومت خمشی هر نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$M = \frac{P \times L}{2 \times B \times D^2} \quad (1)$$

که در آن M مقاومت خمشی، P بار خمشی بیشینه ثبت شده توسط دستگاه، L فاصله میان دو تکیه‌گاه خمشی، B عرض نمونه و D ارتفاع نمونه خمشی آزمایش است.

۳-۲-۴- مقاومت کششی

همچنین آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم کردن نمونه‌ها که به آزمایش کشش برزیلی نیز معروف است، مطابق استاندارد ASTM-C496 و روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر انجام گرفت. مطابق استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای به صورت افقی و با استفاده از قالب خاصی که باعث توزیع نیرو می‌شود زیر جک فشاری قرار گرفتند و بار با نرخ ۰/۹ مگاپاسکال بر دقیقه بر نمونه اعمال شد. نهایتاً با قرار دادن بیشترین بار گسیختگی ثبت شده توسط دستگاه در رابطه ۲ مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه شد.

$$T = \frac{P}{\pi \times L \times D} \quad (2)$$

که در آن T مقاومت کششی، P بار بیشینه ثبت شده توسط دستگاه، L طول نمونه و D قطر نمونه کششی آزمایش است.

۳-۲-۵- سرعت پالس التراسونیک

آزمایش سرعت پالس التراسونیک روی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM-C597 انجام شد. از طریق انجام این آزمایش، علاوه بر ارزیابی مستقیم کیفیت و یکنواختی ملات سیمانی، به صورت غیرمستقیم مقاومت فشاری، تخمین مدول الاستیسیته دینامیکی، بررسی عمق ترک، آگاهی نسبت به تخلخل، ترک و فضاهای ضعیف درون ماتریس سیمانی و میزان وجود حفرات نیز در کامپوزیت سیمانی قابل بررسی است [30].

۳-۲-۶- نرخ جذب آب

بررسی تأثیر هم‌زمان الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن بر نرخ

استاندارد ASTM-C642 روی سه نمونه دیسکی با ابعاد مشابه آزمایش نرخ جذب آب انجام گرفت. نمونه‌های خشک‌شده (مطابق استاندارد مذکور به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) وزن شدند (m_d) و سپس در ظرف آب غوطه‌ور شدند به شکلی که سطح آب 25 ± 5 میلی‌متر بالاتر از سطح نمونه‌ها قرار گرفت. در انتها پس از گذشت زمان وزن اشباع نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (m_s). میزان درصد جذب آب حجمی (WA) از طریق رابطه ۴ محاسبه شد.

$$WA(\%) = \frac{m_d}{m_d} \quad (4)$$

۲-۳-۸- مقاومت ویژه الکتریکی

آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی ۷ و ۲۸ روزه روی سه نمونه دیسکی انجام، و میانگین نتایج با در نظر گرفتن انحراف معیار و از طریق فرمول زیر محاسبه و گزارش شد [31].

$$\rho_c = \frac{D}{D} \quad (5)$$

که در آن مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)، ER مقاومت الکتریکی قرائت‌شده از روی دستگاه اهم‌متر (اهم)، S سطح مقطع نمونه (مترمربع) و D فاصله میان دو سطح تماس (متر) می‌باشد.

لازم به توضیح است برای هر کدام از آزمایش‌های ذکر شده ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و در انتها میانگین نتایج این ۳ نمونه به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش، و انحراف معیار نیز بر همین اساس تعیین شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کارایی

شکل (۵) نتایج اسلامپ و میز جریان نمونه‌های کنترل و حاوی درصد‌های مختلف الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۵) مشخص است با افزایش درصد‌های الیاف میزان کارایی (اسلامپ و میز جریان) ملات سیمانی کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت و ۰/۱۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PBYY) و به میزان ۴۴ درصد و ۲۹ درصد به ترتیب برای اسلامپ و میز جریان است. بنابراین برای جبران کارایی در

جذب آب ملات سیمانی مطابق استاندارد ASTM-C1585 و روی سه نمونه دیسکی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری انجام شد. پس از خشک‌کردن نمونه‌ها در کوره با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، سطوح جانبی و بالایی نمونه‌ها با استفاده از چسب و پوششی ضد آب کاملاً پوشانده شد تا آب به‌صورت تک‌جهته از سطح در تماس با آب (سطح زیرین) نمونه حرکت کند. در ادامه نمونه‌های دیسکی در یک ظرف حاوی آب دیونیزه که فقط 5 ± 1 میلی‌متر آن بالاتر از کف نمونه بود، قرار گرفتند (شکل ۴). سپس وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه و ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ ساعت و ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۱۴ روز از زمان شروع آزمایش محاسبه شد. به‌این‌ترتیب با داشتن وزن نمونه در حالت خشک و وزن نمونه در هر یک از فواصل زمانی میزان نرخ جذب آب در واحد سطح از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$A = \frac{m}{a \times d \times \sqrt{t}} \quad (3)$$

که در آن A میزان جذب آب در واحد سطح، m تغییر وزن نمونه برحسب گرم در زمان t ، a سطح مقطع در تماس آب نمونه برحسب میلی‌متر مربع، d چگالی آب برحسب گرم بر میلی‌متر مکعب و t زمان آزمایش است.

شکل ۴. تصویر شماتیک آزمایش نرخ جذب آب موئینه

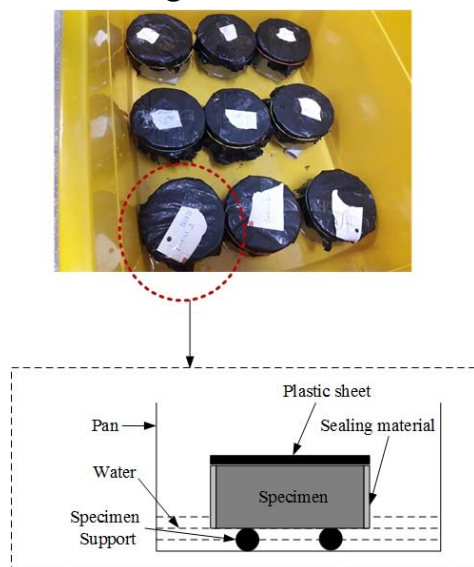


Fig. 4. Schematic diagram of sorptivity test

۲-۳-۷- جذب آب حجمی

آزمایش تعیین جذب آب حجمی هر مخلوط مطابق با

داده است. به نظر می‌رسد الیاف‌ها در بحث مقاومت فشاری تنها سبب ممانعت از شکست ترد کامپوزیت سیمانی خواهند شد و افزایش چندان در مقاومت فشاری ایجاد نخواهند کرد.

شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

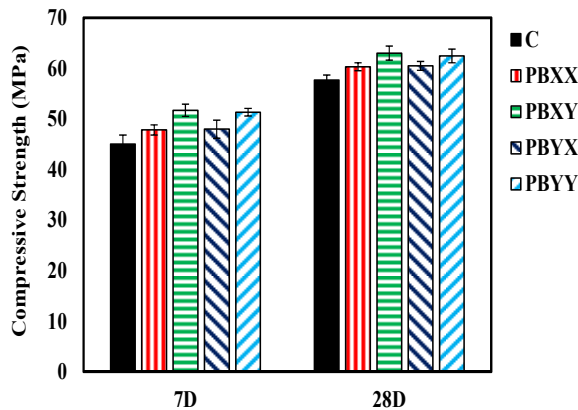


Fig. 6. The results of compressive strength test

۳-۳- مقاومت خمشی

نتایج مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کنترل و حاوی درصدهای مختلف الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن در شکل (۷) قابل مشاهده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل توجه مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه کنترل است. بیشترین افزایش در مقاومت خمشی متعلق به نمونه ترکیب هیبریدی ۰/۱۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصدی الیاف بازالت در ملات سیمانی (PBYY) بوده و به ترتیب برای زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه برابر ۳۲/۵ و ۲۸ درصد است. الیاف پلی‌پروپیلن به سبب انعطاف‌پذیری بالاتر، خاصیت مسلح‌کنندگی و پل‌زدگی بیشتری دارد و نقش کلیدی در جلوگیری از گسترش سریع ترک‌ها بازی می‌کند و به شکل مناسب عملکرد خمشی کامپوزیت سیمانی را بهبود می‌بخشد [19]. همچنین الیاف بازالت با توجه به مقاومت کششی بالایی که از خود نشان می‌دهند، میکروتورک‌های موجود در کامپوزیت سیمانی را به شکل مناسبی کنترل می‌کنند و تنش‌های خمشی ایجادشده را جذب کرده و مانع گسترش ماکروتورک‌ها در کامپوزیت سیمانی می‌شوند که در پایان موجب بهبود عملکرد ماتریس سیمانی در ناحیه بحرانی نمونه‌های

نمونه‌های حاوی الیاف باید با ثابت ماندن آب، میزان فوق‌روان‌کننده را افزایش داد. این پدیده را می‌توان به ساختار شبکه‌ای ایجادشده توسط الیاف‌ها در کامپوزیت سیمانی نسبت داد که از روانی و جداشدگی در ملات جلوگیری می‌کنند [32]. همچنین با توجه به اینکه سطح مخصوص الیاف‌ها از سنگدانه‌ها بیشتر است، خمیر سیمان بیشتری اطراف الیاف قرار می‌گیرند که موجب افزایش لزجت ملات و کاهش کارایی آن می‌شود [33].

شکل ۵. نتایج آزمایش الف) اسلامپ ب) میزجریان

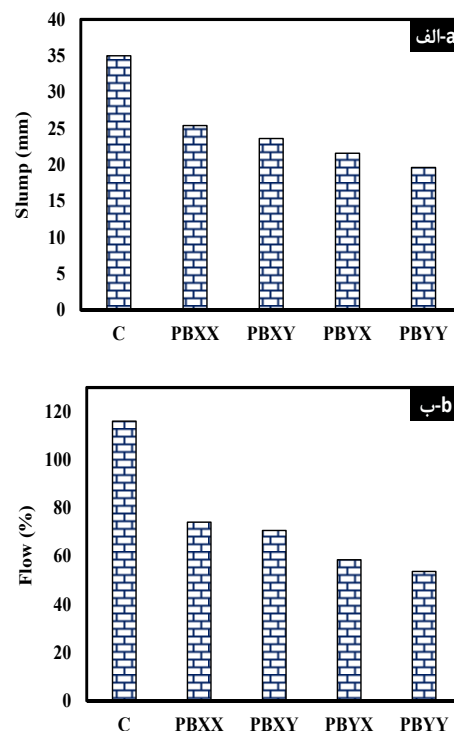


Fig. 5. The test results of, a) Slump b) Flow table

۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های آزمایش در شکل (۶) نمایان است. همان‌گونه که در تحقیقات پژوهشگران گزارش شده است [8]، افزودن الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن تأثیر چندان بر مقاومت فشاری ملات سیمانی نداشته است. نتایج حاکی از آن است که ترکیب هیبریدی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصدی الیاف بازالت در کامپوزیت سیمانی (PBXY) بیشترین افزایش مقاومت فشاری را که به میزان ۱۵ درصد ۷ روزه و ۹/۳ درصد ۲۸ روزه می‌باشد، نتیجه

۳-۵- سرعت پالس التراسونیک

نتایج آزمایش سرعت پالس التراسونیک نمونه‌های ۲۸ روز عمل‌آوری شده کنترل و حاوی الیاف در شکل (۹) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است نتایج این آزمایش به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی غیرمستقیم مقاومت فشاری و میزان حفرات (تخلخل) کامپوزیت سیمانی استفاده می‌شود [34]. از نتایج کاملاً واضح است که افزودن الیاف به ملات سیمانی سرعت پالس التراسونیک را نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده کاهش میزان حفرات موجود در کامپوزیت سیمانی است. این نتایج با گزارش‌های آزمایش مقاومت فشاری هماهنگ بوده و تأییدکننده آن است. نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت (PBXY) بهترین عملکرد را در این آزمایش نشان داده است و میزان سرعت پالس التراسونیک را ۴/۹۲ درصد نسبت به نمونه کنترل افزایش داده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سرعت پالس التراسونیک تمام نمونه‌های آزمایش در محدوده مناسب ۳۶۶۰ تا ۴۵۷۰ متر بر ثانیه قرار دارد که این موضوع نشان‌دهنده کیفیت مناسب ملات مورد استفاده در این پژوهش است که این ملات در گروه کامپوزیت سیمانی خوب قرار می‌گیرد [35].

شکل ۹. نتایج آزمایش سرعت پالس التراسونیک

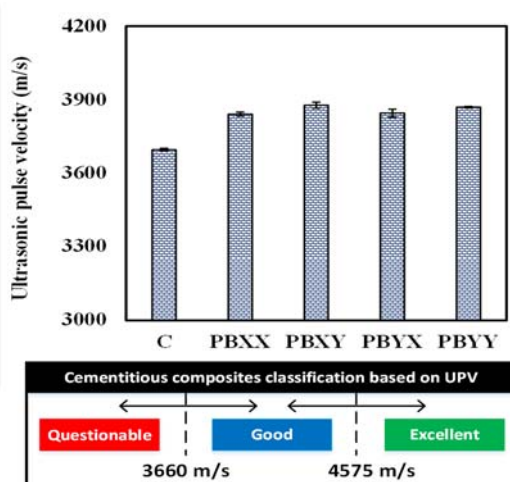


Fig. 9. The results of ultrasonic puls velocity test

۳-۶- نرخ جذب آب

نتایج آزمایش نرخ جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج این آزمایش میزان جذب آب موئینه در نمونه‌های اشباع‌نشده را نشان می‌دهد که همواره این آزمایش

خمشی (۱/۳) انتهایی هر نمونه مکعب مستطیل خمشی) که منجر به افزایش مقاومت خمشی خواهد شد؛ می‌شوند [32].

شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

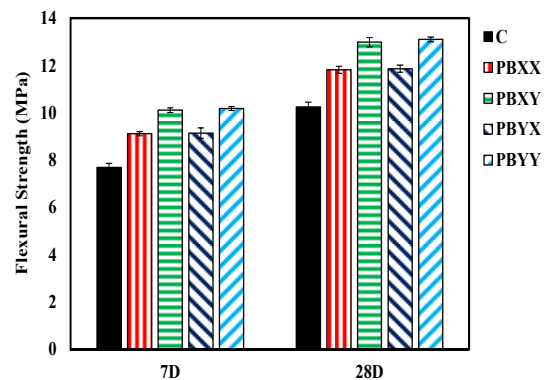


Fig. 7. The results of flexural strength test

۳-۴- مقاومت کششی

در شکل ۸ می‌توان نتایج مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های این پژوهش را مشاهده کرد. مشابه نتایج مقاومت خمشی، با افزودن الیاف‌ها به ملات سیمانی شاهد افزایش قابل توجه مقاومت کششی هستیم. نمونه ترکیب هیبریدی ۰/۱۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت (PBYY) بیشترین مقاومت کششی را دارد که این افزایش به ترتیب برای زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه برابر ۲۷ و ۲۳ درصد است. افزایش مقاومت خمشی و کششی ناشی از عواملی مانند نقش مسلح‌کنندگی الیاف‌ها، پل‌زدگی الیاف‌ها، خاصیت انعطاف‌پذیری الیاف پلی‌پروپیلن و خاصیت مقاومت کششی بالای الیاف بازالت می‌باشد که تجمیع این آثار موجب افزایش مناسب ویژگی‌های مکانیکی ملات سیمانی نسبت به حالت عادی است.

شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت کششی

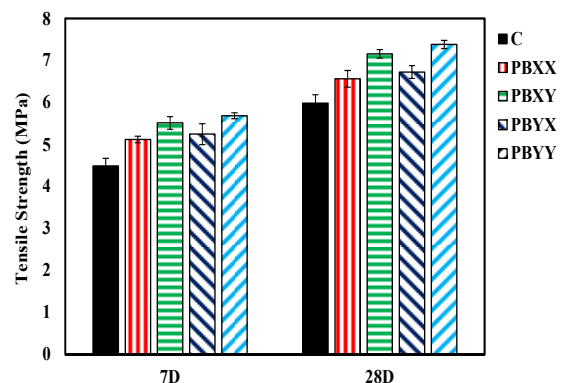


Fig. 8. The results of tensile strength test

۷-۳- جذب آب حجمی

شکل (۱۱) نتایج مربوط به آزمایش جذب آب حجمی نمونه‌های ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. از نتایج روشن است که نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت بیشترین کاهش در درصد جذب آب حجمی نسبت به نمونه کنترل را ایجاد کرده است؛ که این کاهش حدود ۱۵ درصد است. این پدیده نشانگر بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل ملات سیمانی اصلاح‌شده با الیاف است که در پایان دوام کامپوزیت سیمانی را بهبود خواهد داد.

شکل ۱۱. نتایج آزمایش جذب آب حجمی

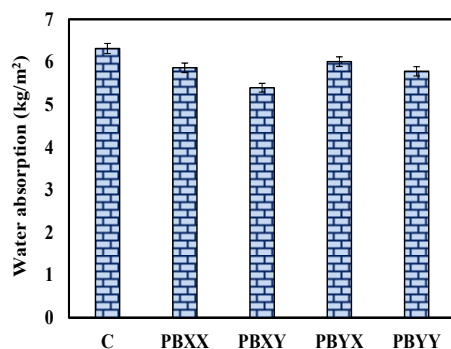


Fig. 11. The results of water absorption test

۸-۳- مقاومت ویژه الکتریکی

نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی ملات‌های ۲۸ روزه حاوی درصد‌های مختلف الیاف در شکل (۱۲) گزارش شده است. مقاومت الکتریکی یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی خوردگی کامپوزیت‌های سیمانی به شمار می‌رود. بنابراین، یک ویژگی کاربردی برای پیش‌بینی دوام کامپوزیت سیمانی است [38]. مشابه سایر نتایج مربوط به آزمایش‌های خصوصیات دوامی، نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت بیشترین افزایش را در مقاومت الکتریکی که به میزان ۲۱/۷۲ درصد نسبت به نمونه شاهد است، گزارش کرده است. از آنجایی که مقاومت الکتریکی می‌تواند به‌عنوان شاخص دوام و کیفیت بتن و میزان تخلخل آن ارزیابی شود [25]؛ این بهبود در مقاومت الکتریکی به‌گونه‌ای کاهش میزان تخلخل، بهبود ریزساختار و بهبود دوام ملات سیمانی در برابر عوامل و یون‌های مخرب در بلندمدت را نشان می‌دهد.

به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم برای تخمین و ارزیابی دوام کامپوزیت‌های سیمانی تلقی می‌شود [36]. مطابق نتایج می‌توان دریافت که استفاده هم‌زمان از الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن می‌تواند نرخ جذب آب ملات سیمانی را نسبت به نمونه کنترل بهبود ببخشد. افزودن ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت (PBXY) بیشترین بهبود را در این خصوصیت ایجاد کرده که کاهشی حدود ۲۴ درصد در نرخ جذب آب نسبت به نمونه کنترل را نشان می‌دهد. این پدیده را می‌توان به عملکرد مناسب الیاف‌ها در کنترل افزایش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک در ساعات اولیه و ترک‌های ثانویه یا حرارتی که عامل ایجاد تخلخل در کامپوزیت سیمانی خواهند شد؛ نسبت داد [18]. استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی میزان ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک را کاهش داده و باعث ایجاد اختلال در شکل‌گیری کانال‌های متخلخل در ماتریس سیمانی که عامل اصلی در افزایش فضاها موئینه هستند، خواهد شد و به همین دلیل میزان تخلخل و جذب آب آن‌ها به میزان مناسبی کاهش می‌یابد [37]. در واقع حضور الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن با مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌تواند ارتباط میان فضاها موئینه در ماتریس سیمانی را قطع کرده و به این شکل از انتقال آب یا مواد مضر به سرتاسر ماتریس سیمانی که موجب تخریب ملات خواهد شد جلوگیری کنند، این عملکرد خوب موجب افزایش دوام ملات سیمانی خواهد شد.

شکل ۱۰. نتایج آزمایش نرخ جذب آب

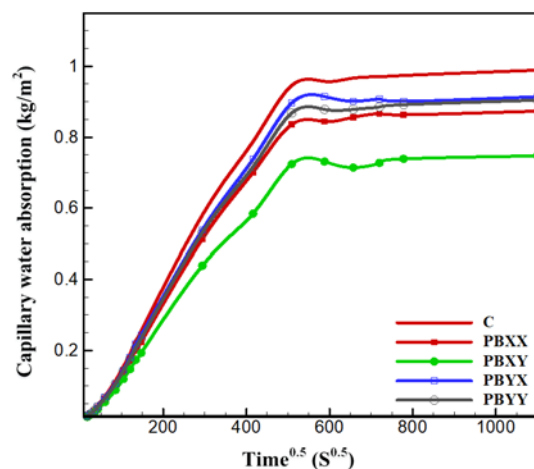


Fig. 10. The results of sorptivity test

شکل ۱۴. رابطه میان مقاومت فشاری و سایر خصوصیات مکانیکی

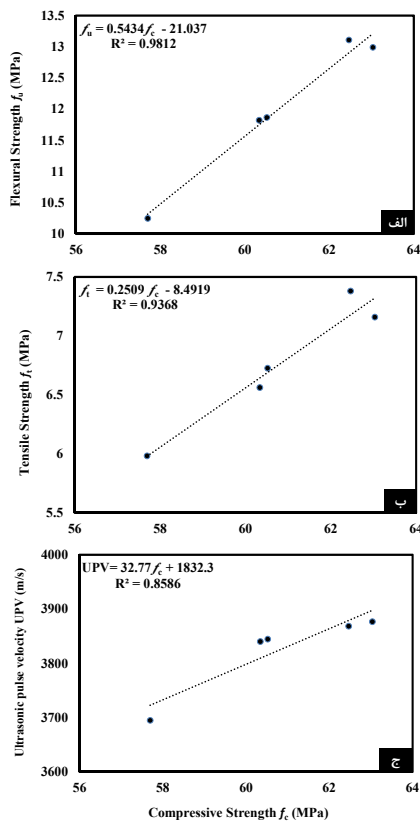


Fig. 14. The relationship between compressive strength and other mechanical properties

۴- نتیجه گیری

نتایج بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن بر کارایی، رفتار مکانیکی و خصوصیات دوامی ملات سیمانی عبارتند از:

- نتایج آزمایش‌های اسلامپ و میزجریان (کارایی) ملات سیمانی حاکی از کاهش میزان کارایی با افزودن الیاف بوده است، لازم به ذکر است الیاف بازالت به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود، تأثیر زیادی در کاهش کارایی ندارد و جذب آب بالای الیاف پلی‌پروپیلن عامل اصلی کاهش حدود ۴۴ درصدی اسلامپ و ۲۹ درصدی میزجریان نمونه حاوی ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه کنترل بوده است.
- با توجه به خصوصیات الیاف‌ها و روند اثرگذاری آن‌ها بر ملات سیمانی؛ آن‌ها به‌طور کلی توجهی بر مقاومت فشاری ملات سیمانی ندارند و مطابق نتایج بیشترین افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه متعلق به نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت و به میزان ۹/۳ درصد بوده است.

شکل ۱۲. نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

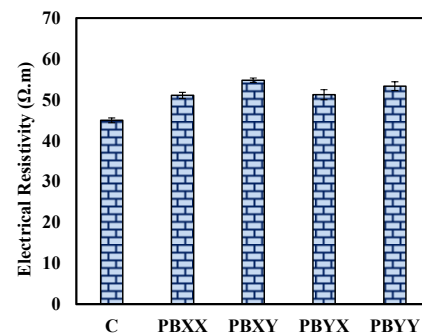


Fig. 12. The results of specific electrical resistance

۳-۹- روابط میان ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت سیمانی

مقاومت فشاری به‌عنوان یک شاخص برای همه انواع مقاومت‌ها در نظر گرفته می‌شود و از آنجایی که ارزیابی مقاومت از طریق آزمایش‌های مختلف غیرقابل کنترل است، رابطه مستقیمی بین مقاومت فشاری با سایر ویژگی‌های مکانیکی ارائه می‌شود. بر همین اساس، مؤسسات و پژوهشگران مختلف که در زمینه تکنولوژی بتن فعالیت می‌کنند چندین رابطه میان مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و کششی ارائه کرده‌اند [39]. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی، کششی و سرعت پالس التراسونیک؛ رابطه میان مقاومت فشاری با سایر خصوصیات کامپوزیت سیمانی در سن ۲۸ روزه در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که قابل ملاحظه است با توجه به ضریب همبستگی بدست آمده از نمودار خطی که نزدیک به یک است، یک همبستگی بسیار مناسبی بین مقاومت فشاری با سایر خصوصیات بررسی شده وجود دارد که سازگار با پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته هست.

شکل ۱۳. رابطه میان مقاومت‌های خمشی و کششی

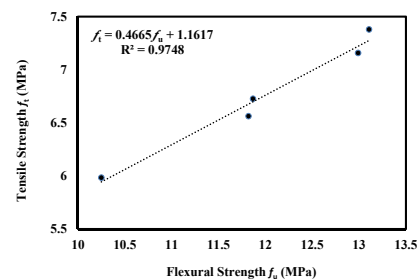


Fig. 13. The relationship between flexural and tensile strengths

الکترونی دانشگاه موناخ استرالیا، آزمایشگاه نانو عمران و آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه علم و صنعت ایران را در انجام این پژوهش ارج می‌نهند. همچنین نویسندگان این مقاله از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان در راستای پیشبرد این پژوهش سپاسگزار هستند.

۶- مراجع

- [1] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. "Concrete : Microstructure, Properties, and Materials. (Advanced Concrete Technology)", *Amirkabir University of Technology Publication (Tehran Polytechnic)*, Tehran, 2009. (In Persian).
- [2] Yang, J., Liu, L., et al. 2019 Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar. *Construction and Building Materials*, 201, 401-407.
- [3] Shi, J., Liu, B., et al. 2020 Experimental study of performance of repair mortar: evaluation of in-situ tests and correlation analysis. *Journal of Building Engineering*, 101325.
- [4] Wang, D., Ju, Y., et al. 2019 Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, 464-473.
- [5] Tadepalli, P.R., Mo, Y., et al. 2013 Mechanical properties of steel fibre concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65, 462-474.
- [6] Azhari, F. and Banthia, N. 2017 Carbon Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Tensile Strain Sensing. *ACI Materials Journal*, 114,
- [7] Eidan, J., Rasoolan, I., et al. 2019 Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195-206.
- [8] Kizilkanat, A.B., Kabay, N., et al. 2015 Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218-224.
- [9] Qin, J., Qian, J., et al. 2018 Mechanical properties of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement composites. *Construction and Building Materials*, 188, 946-955.
- [10] Zanotti, C., Rostagno, G., et al. 2018 Further

افزودن الیاف‌های بازالت (ترد با مقاومت کششی بسیار بالا) و الیاف پلی‌پروپیلن (منعطف) به صورت هیبریدی موجب بهبود قابل توجه خصوصیات خمشی و کششی ملات سیمانی شده است. بیشترین افزایش مقاومت خمشی و کششی ۲۸ روزه متعلق به نمونه حاوی ۰/۱۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت و به ترتیب به میزان ۲۸ و ۲۳ درصد بود.

نتایج آزمایش سرعت پالس تراسونیک نیز حاکی از کاهش تخلخل و بهبود خصوصیات نمونه‌های حاوی الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن بود.

بررسی نتایج جذب آب و مقاومت الکتریکی به عنوان شاخص‌های مهم دوام ملات سیمانی؛ حاکی از کاهش تخلخل و میزان جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف بود به طوری که نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت توانست نرخ جذب آب، جذب آب حجمی و مقاومت ویژه الکتریکی را به ترتیب به میزان ۲۴، ۱۵ و ۲۲ درصد نسبت به نمونه کنترل بهبود دهد که حاکی از بهبود دوام کامپوزیت سیمانی است.

با توجه به ضریب همبستگی بدست آمده از نمودار خطی که نزدیک به یک می‌باشد، یک همبستگی بسیار مناسبی بین مقاومت فشاری با سایر خصوصیات بررسی شده وجود دارد.

مطابق نتایج، تأثیر مطلوب ترکیب هیبریدی الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن بر تمام خصوصیات مکانیکی و دوامی ملات سیمانی ارزیابی شده در این پژوهش دو نتیجه مهم را نشان داد: (۱) نتایج حاصل از ترکیب هم‌زمان الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن که در این پژوهش انجام شد در مقایسه با تحقیقات گذشته در مورد تأثیر منفرد هر یک از این الیاف‌ها نشان داد ترکیب هیبریدی الیاف‌ها موجب بهبود بخش بیشتری از خصوصیات ملات سیمانی نسبت به استفاده مجزا از آن‌ها خواهد شد، (۲) در مقایسه با پژوهش‌های گذشته، برای استفاده از الیاف‌ها به صورت هیبریدی، الیاف بازالت می‌تواند بهترین جایگزین برای سایر الیاف‌ها به خصوص الیاف فولادی در کنار الیاف پلی‌پروپیلن باشد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله همکاری و مساعدت مرکز میکروسکوپ

- [20] Sun, Z. and Xu, Q. 2009 Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527, 198-204.
- [21] Aslani, F. and Nejadi, S. 2013 Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering*, 53, 121-133.
- [22] Li, C., Wang, X., et al. 2018 Research Progress of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *J. Mater. Sci Eng*, 36, 504-510.
- [23] Fiore, V., Scalici, T., et al. 2015 A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- [24] Santarelli, M.L., Sbardella, F., et al. 2014 Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration. *Materials & Design*, 63, 398-406.
- [25] Razzaghian Ghadikolae, M., Mirzaei, M., et al. 2020 Simultaneous effects of nano-silica and basalt fiber on mechanical properties and durability of cementitious mortar: An Experimental Study. *Canadian journal of civil engineering*, ja, .
- [26] Razzaghian Ghadikolae, M., Mirzaei, M., et al. 2020 Development of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced cementitious composite using nano-silica. *Proceedings of the 2nd International Congress on Engineering, Technology and Innovation, Darmstadt University, Germany*, .
- [27] Asprone, D., Cadoni, E., et al. 2014 Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar. *Cement and Concrete Composites*, 53, 52-58.
- [28] Wong, H.S., Barakat, R., et al. 2015 Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. *Cement and Concrete Research*, 70, 9-20.
- [29] Razzaghian Ghadikolae, M., Habibnejad Korayem, A., et al. 2018 Effect of halloysite nanotubes on workability and permeability of cement mortar. *Modares Civil Engineering journal*, 18, 89-100. (In Persian).
- [30] Cao, M., Li, L., et al. 2018 Behaviour and damage assessment of a new hybrid-fibre-reinforced mortar under impact load. *Magazine of Concrete Research*, 70, 905-918.
- [31] Ghadikolae, M.R., Korayem, A.H., et al. evidence of interfacial adhesive bond strength enhancement through fiber reinforcement in repairs. *Construction and Building Materials*, 160, 775-785.
- [11] Felekoğlu, B., Türkel, S., et al. 2007 Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Composites*, 29, 391-396.
- [12] Grdic, Z.J., Curcic, G.A.T., et al. 2012 Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 27, 305-312.
- [13] Çavdar, A. 2014 Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 58, 463-472.
- [14] Razzaghian Ghadikolae, M., Mirzaei, M., et al. 2019 Investigation of basalt fiber effect on the mechanical properties and durability of cementitious composites: A review. *Proceedings of the 3th International Conference on Applied Researches in Structural Engineering and Construction Management, Tehran, Iran*, . (In Persian).
- [15] Razzaghian Ghadikolae, M., Mirzaei, M., et al. 2019 The experimental studies of the hybrid effect of basalt and polypropylene fibers on the workability and mechanical properties of cementitious composite. *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran, Tehran, Iran*, . (In Persian).
- [16] Feng, S., Xiao, H., et al. 2020 Bond performance between substrate concrete and repair mortar: Effect of carbon fibre and expansive agent. *Construction and Building Materials*, 250, 118830.
- [17] Afroughsabet, V., Biolzi, L., et al. 2016 High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of materials science*, 51, 6517-6551.
- [18] Toutanji, H.A. 1999 Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 13, 171-177.
- [19] Wang, J., Dai, Q., et al. 2019 Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic Polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*,

- [35] Solis-Carcaño, R. and Moreno, E.I. 2008 Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 22, 1225-1231.
- [36] Dias, W. 2000 Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. *Cement and Concrete Research*, 30, 1255-1261.
- [37] Karahan, O. and Atiş, C.D. 2011 The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32, 1044-1049.
- [38] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. 2015 Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73-82.
- [39] Perumal, R. 2014 Correlation of compressive strength and other engineering properties of high-performance steel fiber-reinforced concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 27, 04014114.
- 2020 The halloysite nanotube effects on workability, mechanical properties, permeability and microstructure of cementitious mortar. *Construction and Building Materials*, 120873.
- [32] Jiang, C., Fan, K., et al. 2014 Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193.
- [33] Chen, B. and Liu, J. 2005 Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35, 913-917.
- [34] Shahbazi, R., Korayem, A., et al. 2020 Integrally hydrophobic cementitious composites made with waste amorphous carbon powder. *Construction and Building Materials*, 233, 117238.

Experimental studies of workability, mechanical behavior and durability properties of basalt-polypropylene fibers-reinforced cementitious mortar

Mehrdad Razzaghian Ghadikolaee^{1*}, Mehdi Mirzaei², Asghar Habibnejad Korayem³

1 M. Sc., Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2 M. Sc., Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3 Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*m_razzaghian@alumni.iust.ac.ir

Abstract

Conventional construction cementitious composites typically contains cement, fine and gravel aggregate and additive in a specific ratio along with water. It is extensively used to bind the structural elements together like the bricks, stones, and concrete blocks, or end connection of the column and beam, and to develop a sufficient bond with the substrate as a repair cementitious composite, due to its several advantages, such as low cost, appropriate compressive strength, and easy access. However, some weaknesses of the cementitious mortar influence its performance under different conditions. For example, low tensile strength, brittle behavior, unacceptable performance against shrinkage cracks, and lack of resistance against stress concentration are some of these critical properties of the mortar, if not modified, the structures will be deteriorated in a short time. These deficiencies emerge from extravagance water, bleeding, plastic settlement, shrinkage stress and strain concentrations due to external limitations. When loads are applied and further increased, type of cracks grow and reach a critical condition, and catastrophic failure is precipitated. In this situation, the mortar will be exposed to severe damaging factors such as premature saturation, disadvantage of freeze-thaw, scaling, and corrosion of steel. In recent years, researchers in the field of concrete technology have focused on the using of a variety of fibers such as carbon, steel, glass, polypropylene and basalt fiber into the cementitious composites to improve their mechanical properties (especially their ductility behavior) and to some extent their durability. Accordingly, in the present study, the hybrid effect of different percentages of basalt and polypropylene fibers on the workability, mechanical behavior and durability properties of cementitious mortar was investigated. Polypropylene fibers are known in the field of reinforced concrete, but basalt fibers are a new potential additive in this field. In recent decades, researchers have studied more about basalt fibers because of their potential reinforcement properties in composite materials. The basalt fibers are an appropriate replacement for another fibers, including glass, steel, and carbon fibers in plenty of applications due to their excellent properties such as high mechanical properties specially tensile strength and flexural strength, good resistance to low and high temperature, low cost, durability, vibration resistance, high elasticity modules, great failure strain, acceptable persistence to chemical assault, impact load and fire with less toxic materials. Samples containing a hybrid composition of 0.05 and 0.125 percent (weight percent of total cement and aggregate) of the basalt and polypropylene fibers have been used in order to evaluate the effect of fibers so that a total of 4 types of mixed designs containing hybrids of basalt and polypropylene fibers were made and its results have been compared with a control sample. As expected, after analyzing the results, the fibers had no significant effect on the compressive strength of the cementitious composite, while the results of this study reported a favorable and remarkable performance of these fibers in increasing flexural and splitting tensile strength, as well as the water absorption of cementitious mortar is favorably decreased by the fiber. The sample containing 0.125% basalt and polypropylene fibers increased flexural and splitting tensile strengths by 28 and 23%, respectively. Also, the sample containing 0.125% basalt fiber and 0.05% polypropylene fibers resulted in 9.3% increase in compressive strength, 24% decrease in sorptivity and 15% water absorption. The results of the current study have shown that the simultaneous use of basalt and polypropylene fibers can improve significantly the mechanical behavior and durability properties of cementitious mortar, whereas according to the previous studies if each of these fibers is used separately, such a desirable result will not be obtained.

Keywords: Cementitious mortar, basalt fiber, polypropylene fiber, mechanical properties, durability