

تقویت کامپوزیت های الیاف - سیمان به کمک افزایش چسبندگی الیاف با استفاده از نانوسلولز باکتریایی

محمدامیر اخلاقی^۱، راحب باقرپور^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: مرداد ۱۳۹۷، پذیرش: فروردین ۱۳۹۹)

چکیده

مواد پایه سیمانی به دلایلی همچون ارزانی و مقاومت بالا به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد در ساخت‌وسازهای عمرانی و به شکل‌های مختلفی همچون ملات، بتن و شاتکریت به کار برده می‌شوند. مقاومت خمشی پایین مواد پایه سیمانی به عنوان یک ضعف ذاتی در این مواد محسوب می‌گردد. با توجه به کاربرد گسترده این ماده، در این پژوهش توانایی استفاده از نانوسلولز حاصل از باکتری به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ملات سیمانی تحت ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از نانوسلولز باکتریایی در حالت پودر، ژل و پوشش‌دهنده الیاف پلی‌پروپیلن به عنوان تقویت‌کننده در ملات سیمانی استفاده شد. نتایج مقاومت خمشی نشان داد که استفاده از ۰/۵ درصد وزنی پودر نانوالیاف سلولزی، مقاومت خمشی ملات سیمان را تا ۱۰۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. همچنین نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با نانوسلولز باکتریایی نسبت به نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن ساده، مقاومت فشاری و خمشی را بهبود داد.

کلمات کلیدی

ملات سیمانی، نانوسلولز باکتریایی، الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت خمشی

* عهده‌دار مکاتبات: bagherpour@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

خصوصیات آن با توجه به دامنه کاربردشان استفاده شده است؛ که از مهم‌ترین آنها می‌توان به الیاف‌های طبیعی، فولادی و مصنوعی اشاره کرد که نمونه‌ای از آنها الیاف‌های سلولزی، کرین، شیشه، پلی‌پروپیلن و ... هستند [۱۲].

یکی از پرمصرف‌ترین الیاف‌های استفاده شده در بتن از نوع پلی‌پروپیلن هستند؛ که حالت شکست نرم خوبی دارند و می‌توانند ترک‌های پلاستیک را مهار کنند. برخلاف فولاد، الیاف‌های پلی‌پروپیلن از شرایط جوی، محیط قلیایی موجود در بتن یا حضور رطوبت اثر نمی‌پذیرند؛ بنابراین دچار فرسایش و اکسیداسیونی نمی‌شوند. زمانی که بتن ترک می‌خورد، الیاف‌ها مقاومت می‌کنند و یک پل الیافی تشکیل می‌شود که در جذب انرژی مؤثر است. این پل الیافی سبب بسته شدن ترک و حذف شدت تنش وارده در رأس ترک می‌شود. در نتیجه پیوند الیاف/مخلوط بتن به طور مؤثری، بر قابلیت الیاف‌ها برای پایدار کردن اشاعه ترک در مخلوط بتن اثرگذار است [۱۰].

سدان و همکاران در سال ۲۰۰۸ خصوصیات فیزیکی خمیر سیمان مسلح به الیاف‌های کنفی را تحت بررسی قرار دادند. این پژوهشگران تأثیر اصلاح سطحی الیاف‌ها را، با استفاده از دو محلول سدیم هیدروکسید و آلومینیوم کلرید، برای بهبود چسبندگی الیاف و مخلوط بتن سیمان را نیز تحت ارزیابی قرار دادند. آنها از آنالیزهای ICP^۱ و SEM^۲ و همچنین آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و تعیین مدول یانگ برای بررسی تأثیر الیاف‌ها استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از الیاف، باعث ایجاد تأخیر در زمان گیرش می‌گردد. در صورتی که استفاده از الیاف‌های کنفی به میزان ۱۶ درصد حجمی نمونه بتنی می‌تواند، تا ۴۰ درصد مقاومت خمشی خمیر سیمان را افزایش بخشد [۱۳]. پاکروان و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر استفاده از دو نوع مختلف الیاف‌های پلی‌پروپیلن بر مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که، مخلوط بتن‌های سیمانی تقویت‌شده با این الیاف‌ها، رفتار خمشی و سختی کششی بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های سیمانی معمولی از خود نشان می‌دهند. نمونه‌های حاوی الیاف‌های پلی‌پروپیلن به علت اتصال بیشتر با مخلوط بتن، چقرمگی بالاتری را از خود نشان دادند. این در حالی است که با افزایش میزان الیاف‌ها، مقاومت خمشی به علت کاهش اتصال الیاف‌ها با مخلوط بتن کاهش می‌یابد [۱۴]. سینگ و همکاران در سال ۲۰۱۰

بتن به دلایلی همچون ارزانی، در دسترس بودن و راحتی ساخت به‌عنوان رایج‌ترین ماده؛ در ساخت‌وسازها استفاده شده است و طراحی آن تقریباً تمامی سیمان تولیدشده در جهان را به خود اختصاص می‌دهد [۱، ۲]. بتن یک ماده کامپوزیتی ترد است که استحکام خمشی و کششی پایینی در مقایسه با استحکام فشاری دارد [۳، ۴]. کامپوزیت‌ها به طور کلی یا از دو فاز مخلوط بتن و تقویت‌کننده و یا دارای فاز سومی به نام فاز میانی/سطح مشترک هستند که مابین مخلوط بتن و تقویت‌کننده قرار دارند و عمل انتقال نیرو را انجام می‌دهند؛ اخیراً در این فاز با توجه به خصوصیات مخلوط بتن، از موادی استفاده شده که سبب افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود [۵]. بتن تازه توسط انقباض پلاستیک به خصوص تحت شرایط محیطی دچار ترک سطحی شده و این ترک گسترش پیدا کرده و عمل تخریب را سرعت می‌بخشد. عملیات ترمیم بتن بسیار هزینه‌بر بوده؛ به همین دلیل توجه پژوهشگران را برای افزایش خواص مقاومتی به خود جلب کرده است [۳، ۴]. بنابراین، بتن سنتی نمی‌تواند نیازهای ساخت‌وسازهای امروزی را برآورده کند، از این رو مهندسان و پژوهشگران به دنبال تولید بتن‌هایی بادوام و کارایی بالا هستند. پیشرفت مواد افزودنی بتن طی چند دهه گذشته، فناوری بتن را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده است [۶، ۷]. روش‌های مختلفی برای غلبه بر نقایص بتن معمولی توسط بسیاری از پژوهشگران معرفی شده است. به عنوان مثال افزودن الیاف به مخلوط بتن به عنوان راهی برای افزایش ظرفیت جذب انرژی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بتن ساده شناخته شده است. تأثیر الیاف روی رفتار مواد شکننده از دو نظر بررسی شده است؛ کنترل انتشار ترک و افزایش فشار نهایی. نقش الیاف بستگی به حجم، نسبت ابعاد، قدرت و پیوند آن با مخلوط بتن دارد [۸، ۹]. علاوه بر بهبود استحکام خمشی و کششی بتن؛ حالت شکست آن نیز، از ترد به شبه نرم تغییر می‌کند [۱۰].

در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی روموالدی و همکاران بحث بتن مسلح با الیاف را مطرح کردند و از الیاف‌های فلزی سیمی شکل برای اولین بار در بتن استفاده کردند [۱۱]. تاکنون انواع مختلفی از الیاف در بتن به منظور بهبود

متاکسا و همکاران در سال ۲۰۱۰ از نانو الیاف های کربنی، در ساخت نمونه های سیمانی استفاده نمودند. آنها نمونه های سیمانی را تحت آزمایش خمش و تحلیل میکروسکوپ الکترونی (SEM) قرار دادند. نتایج آزمایش ها حاکی از افزایش تا ۴۰ درصدی مقاومت خمشی نمونه های حاوی نانو الیاف های کربنی، نسبت به نمونه های ساده بود. این پژوهشگران بیان نمودند که افزودن نانو الیاف های کربنی، سبب پرکردن ترک ها و تخلخل ها در مقیاس نانو می شود [۲۲].

اونالوچی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر استفاده از نانو الیاف های سلولزی، روی هیدراسیون و خصوصیات مکانیکی ملات های سیمانی پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه های حاوی نانو الیاف های سلولزی، ضریب هدایت حرارتی پایین تری نسبت به نمونه کنترل داشته؛ و باعث بهبود درجه هیدراسیون، نسبت به نمونه اولیه بدون نانو الیاف گردیده است. آنها همچنین بیان نمودند که افزودن نانو الیاف ها به مخلوط، مقاومت خمشی و خواص جذب انرژی ملات سیمانی را ارتقا می دهد. در مقایسه با ملات نمونه کنترل، مقاومت خمشی و جذب انرژی نمونه های حاوی نانو الیاف به ترتیب به میزان ۱۰۶ و ۱۸۴ درصد افزایش می یابد [۲۳].

محمد کاظمی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر استفاده از نانو سلولز باکتریایی به عنوان پودر، ژل و پوشش دهنده الیاف های باگاس، روی خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت سیمان الیافی پرداختند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که کامپوزیت سیمانی حاوی ۶ درصد الیاف پوشش داده شده، به دلیل افزایش سطح تماس مخلوط بتن و الیاف، خصوصیات مکانیکی و درجه حرارت هیدراسیون بالاتری نسبت به سایر نمونه ها از خود نشان می دهند [۲۱].

سلولز، فراوان ترین ترکیب ارگانیک روی کره زمین است که هر ساله ۱۰^{۱۱} تن از آن تولید می شود. سلولز یک ماده تجدید پذیر و مقرون به صرفه است که توانایی خوبی در کنترل انقباض پلاستیک و افزایش استحکام بتن را دارد [۲۳، ۲۴]. استفاده از سلولز در مقیاس نانو با توجه به داشتن مساحت سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی ویژه، توانایی خوبی در افزایش استحکام بتن دارد. علاوه بر این، به علت اینکه ترک ها در بتن از مقیاس نانو شروع به رشد و گسترش می کنند، استفاده از الیاف در مقیاس نانو جلوی

تأثیر افزودن مقادیر مختلف الیاف های فلزی و پلی پروپیلن، بر مقدار مقاومت خمشی و فشاری را تحت بررسی قرار دادند. افزودن پلی پروپیلن سبب کاهش مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب به اندازه ۷ و ۱۳ درصد شده؛ در حالی که افزودن الیاف های فلزی، مقاومت فشاری و خمشی را به ترتیب ۶ و ۴۰ درصد افزایش می دهند [۱۵].

بهرنیا و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی استفاده از الیاف های پلی پروپیلن و فلزی، در پوشش های بتنی تونل های انتقال آب پرداختند. این پژوهشگران تأثیر درصدهای مختلف الیاف را بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آزمایش کردند. آنها مشاهده کردند که افزودن الیاف ها باعث کاهش کارایی مخلوط بتن، به دلیل قفل شدگی الیاف ها و سنگدانه ها می گردند. همچنین افزودن الیاف، سبب کاهش جذب آب نمونه ها شده و مقاومت فشاری، کششی و خمشی را بهبود می بخشد. این بهبود در مقاومت خمشی و جذب یون کلرید؛ برای نمونه های حاوی الیاف های پلی پروپیلن بیشتر از نوع فلزی بوده است [۱۶]. هاشمی و میرزایی مقدم در سال ۲۰۱۴ از ذرات نانو سیلیس، برای افزایش سطح پیوند الیاف های پلی پروپیلن با مخلوط بتن استفاده کردند. نتایج آزمایش ها نشان داد که افزودن نانو سیلیس، پیوند بین الیاف ها را با مخلوط بین افزایش می دهد و تأثیر به سزایی در سبک تر کردن آن دارد. نانو سیلیس استحکام نمونه های بتنی را در سنین اولیه و جذب آب را نسبت به نمونه های شاهد افزایش می دهد [۱۷].

استفاده از نانو تکنولوژی برای اصلاح خصوصیات کامپوزیت ها در مقیاس نانو، در رابطه با مصالح ساخت و ساز ایده جدیدی نیست. پژوهشگران مختلفی بیان نمودند که استفاده از مواد با اندازه میکرو و نانو می تواند؛ خصوصیات کامپوزیت های سیمانی و بتنی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در سال های اخیر استفاده مهندسی از محصولات دوست دار محیط زیست تولید شده توسط باکتری ها؛ از جمله: کربنات کلسیم و الیاف های سلولوزی به سرعت در حال فراگیر شدن است [۱۸-۲۰]. نانو سلولز های باکتریایی (BNC)، سلولزهایی خالص با ابعاد نانو و بسیار بلورهای هستند که، درجه کریستالیتی آنها تا ۹۰ درصد می رسد. این ساختار شدیداً کریستالی، باعث ایجاد مدول یانگ بالایی در این مواد می گردد؛ که تا مقادیر ۱۶۰ گیگاپاسکال گزارش شده است [۲۱].

سیمانی است. همچنین مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های ساخته شده با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن ساده و الیاف پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با نانو الیاف سلولزی مقایسه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش از الیاف‌های پلی‌پروپیلن به منظور تقویت‌کننده ملات سیمان استفاده شده، که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. از سیمان پرتلند معمولی (GEM I-32.5) در ساخت تمام نمونه‌ها استفاده شده است. ترکیب شیمیایی سیمان استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است. ماسه رودخانه‌ای شسته شده، با مدول نرمی $2/90$ و وزن مخصوص $2/65$ محدوده اندازه ذرات ($4/75 - 0$) به عنوان ریزدانه استفاده شد. طراحی مخلوط ملات سیمان با توجه به استاندارد ASTM C-348 با در نظر گرفتن مقاومت خمشی ۲۸ روزه انجام گرفت. به منظور تهیه ملات، یک قسمت وزنی سیمان، $2/75$ قسمت وزنی ماسه و آب به میزان $0/5$ درصد وزنی سیمان (نسبت سیمان به آب) با یکدیگر مخلوط شدند [۳۰].

جدول ۱: مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن استفاده شده

مشخصات	مقدار	استاندارد
دینیر ^۳ (گرم بر دینیر)	4 ± 1	ASTM D1577
طول (میلی‌متر)	۱۲	-
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۳۶-۳۱	ASTM D638
وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	910 ± 4	ASTM D792
دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۳	-

*دینیر: واحد اندازه‌گیری ضخامت الیاف پلی‌پروپیلن

جدول ۲: اجزای تشکیل‌دهنده سیمان

ترکیب شیمیایی	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Total Alkalis	SO ₃ %	Insole	L.O.I
مقدار (% wt.)	۶۱/۹۶	۴/۸۸	۳/۱۰	۶۱/۴۶	۲/۰	۰/۷۲	۲/۰	۰/۶	۱/۶۶

هیدروکلریک در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سپس در آب مقطر تا رسیدن به pH خنثی شست‌وشو داده شد. به منظور جداسازی الیاف‌ها، صفحات

رشد و گسترش ترک را در همان مقیاس نانو می‌گیرد [۲۳، ۲۵-۲۸]. اخیراً افزایش مقاومت خمشی با مستحکم کردن ماتریس بتن، توسط نانو الیاف‌های سلولزی توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. [۲۳، ۲۹].

با توجه به مطالعات‌های انجام‌شده به منظور استفاده از نانوتکنولوژی در بتن، هنوز تفسیر دقیقی در ارتباط با نانو ساختارهای طبیعی مانند: نانوسلولز در بتن در دسترس نیست. استفاده از نانو ساختارهای طبیعی به طور محدودی در مطالعات یافت می‌شود؛ با توجه به اینکه توانایی بالایی در بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد پایه سیمانی دارند. علاوه بر این، نانو سلولزهای طبیعی باکتریایی، دوست دار محیط‌زیست بوده و سلامتی انسان‌ها را تهدید نمی‌کنند. استفاده از نانوسلولز باکتریایی در بتن، رویکرد جدیدی است که هنوز تمام جوانب آن تحت بررسی و ارزیابی قرار نگرفته و هنوز در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شود. بر این اساس هدف این پژوهش، استفاده از نانو الیاف‌های باکتریایی تولیدشده، توسط باکتری *Gluconacetobacter xylinus* که یک‌گونه خوراکی است؛ به صورت مستقیم و به عنوان پوشش‌دهنده الیاف‌های پلی‌پروپیلن، در ساخت نمونه‌های سیمانی با سنین مختلف، به منظور بهبود خواص مکانیکی ملات‌های

الیاف‌های پلی‌پروپیلن در محیط کشت تولید الیاف، به مدت ۲۰ روز تا تشکیل ژل قرار گرفتند. سپس ژل تولید شده همراه با الیاف‌ها در محلول یک درصد سدیم

و سلولز را در envelope تولید کند. در مجموع ۲۳ درصد سلولزهای باکتریایی که با سلولز پوشانده شده اند؛ پس از تابش اشعه ماوراءبنفش زنده می ماندند. حذف پلی ساکاریدهای محافظ سلولز از سلولزهای باکتری، منجر به کاهش شدید سلول می شود؛ تا جایی که تنها ۳ درصد باکتری باقی می ماند [۳۳، ۳۴].

۲-۳- استفاده مستقیم از سلولز باکتریایی

۲-۳-۱- ژل

از ژل تولیدشده با درصدهای مختلف ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ وزنی سیمان به منظور یک ماده تقویت کننده ملات سیمان استفاده شد. در ابتدا مقادیر مختلف ژل با آب و فوق روان کننده (۱/۶ درصد وزنی سیمان) توسط یک همزن، مخلوط و به ملات سیمانی اضافه شدند. افزودن فوق روان کننده سبب پراکندگی یکنواخت نانوالیاف و افزایش کارایی ملات سیمانی می شود.

۲-۳-۲- پودر

از پودر به عنوان یک روش دیگر استفاده مستقیم سلولز باکتریایی؛ با درصدهای مختلف ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ وزنی سیمان، به عنوان یک ماده تقویت کننده استفاده شد. در ابتدا پودر به مخلوط سیمان و ماسه بادی اضافه شد و سپس آب و فوق روان کننده به آنها افزوده شد. به علت پراکندگی خوب الیافهای پودر شده، از فوق روان کننده صرفاً برای افزایش کارایی ملات سیمانی استفاده شد.

۲-۴- استفاده غیرمستقیم از سلولز باکتریایی به منظور پوشش دهنده الیاف پلی پروپیلن

الیافهای تقویت شده با باکتری، به منظور افزایش سطح تماس الیافهای پلی پروپیلن ساده، با ملات سیمانی استفاده شدند. این الیافهای تقویت شده با باکتری در درصدهای مختلف حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ به عنوان یک تحکیم کننده در ملات سیمان استفاده شدند. از پلی پروپیلن ساده نیز به منظور مقایسه با این الیافهای تقویت شده، در همان درصد استفاده شد.

۲-۵- فرآیند اجرا و آماده سازی نمونه ها

نمونه های آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C-348 منشورهایی به ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی متر است [۳۰]. برای این منظور با توجه به ابعاد مورد نیاز قالبها تهیه شد و

ژل تولیدی به مدت یک هفته تا خشک شدن کامل در محیط اتاق قرار گرفته و سپس با استفاده از دست، الیافهای پلی پروپیلن پوشش داده شده با سلولز باکتریایی جدا شدند.

۲-۲- میکرواورگانیسم و محیط کشت تولید سلولز باکتریایی (مشخصات فیزیکی و شیمیایی باکتریال نانوسلولز)

در این پژوهش از سویه باکتری *Gluconacetobacter xylinus* با کد شناسایی PTCC 1734 به منظور تولید نانوسلولز باکتریایی استفاده شده است [۳۱]. ژل تولید شده توسط باکتری، در محلول یک درصد سدیم هیدروکلریک در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، به مدت یک ساعت و سپس در آب مقطر تا رسیدن به pH خنثی شست و شو داده شد. به منظور پراکندگی یکنواخت ژل تولید شده در نمونه ها، از یک مخلوط کننده استفاده شد. به منظور تولید پودر، سلولز باکتریایی تولید شده با استفاده از یک یخزن منجمدکننده خشک *Dena vacuum(model FD-5003-BT)* در دمای ۹۲- درجه سانتی گراد به مدت دو روز خشک شد. سپس با استفاده از یک آسیای روتاری تا رسیدن به سایز یکنواخت با ژل، آسیاب شد.

Acetobacter xylinum یک میکرواورگانیسم گرم منفی است که به عنوان *Gluconacetobacter Xylinus* شناخته می شود. *A.xylinum* طولی در محدوده ۲-۱۰ و عرضی در محدوده ۰/۵ تا یک میلی متر دارد. این باکتری دارای فرمول $CH_2O_{0.52}N_{0.23}$ یک نوع از میکرواورگانیسم های هوازی است؛ که برای زنده ماندن نیاز به اکسیژن دارد. این باکتری ها همچنین به عنوان باکتری های اسید استیک شناخته می شوند؛ که قادرند اسید را از گلوکز، الکل و پروپیل الکل به جای اکسیداسیون اسیدها در دی اکسیدکربن و آب و در حضور اکسیژن تشکیل دهند. مهم ترین ویژگی این باکتری توانایی آنها در پلیمریزاسیون گلوکز، در سلولز از طریق یک فرآیند سنتز است. این باکتری ها معمولاً با زنجیر کوتاه تشکیل شده توسط ترکیبی از ۶ تا ۸ سلول زندگی می کنند [۳۲].

A.xylinum همچنین به تغییرات ناگهانی مانند: کاهش آب در ترکیب مرکب، pH، حضور مواد سمی و موجودات بیماری زا مقاوم است. اگر چه شرایط آب و هوایی اجازه نمی دهد، اما باکتری *A.xylinum* می تواند رشد کند

به منظور تفکیک و تشخیص آسان‌تر نمونه‌ها از نشانه‌گذاری استفاده شده است. جدول ۳ نشانه‌گذاری هرکدام از نمونه‌ها را با توجه به مقدار اجزای تشکیل‌دهنده آن نشان می‌دهد. همان طور که در جدول ۳ آورده شده است، حرف C بیانگر نمونه کنترل، PP پلی‌پروپیلن ساده، PPG پلی‌پروپیلن تقویت‌شده، G ژل نانوسولوز و P پودر نانوسولوز است. عدد نشان داده در نمونه‌های پلی‌پروپیلن بیانگر درصد حجمی و عدد نشان داده شده برای پودر و ژل نانوسولوز، بیانگر درصد وزنی استفاده‌شده است.

ملات در دو مرحله درون قالب ریخته و کوبیده شد. برای آزمایش خمش پس از ۲۴ ساعت در قالب ماندن، نمونه‌ها از داخل قالب بیرون آورده شدند و در داخل آب به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند. در این آزمایش ۳ عدد نمونه کنترل و ۳ عدد نمونه از هرکدام از درصدهای مختلف پودر، ژل، پلی‌پروپیلن ساده و تقویت‌شده استفاده شد. بنابراین در مجموع ۳۹ نمونه تهیه و تحت آزمایش خمش، فشار و جذب آب قرار گرفت.

۲-۶- نشانه‌گذاری نمونه‌ها

جدول ۳: نشانه‌گذاری نمونه‌ها

نام نمونه	ریزدانه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	پلی‌پروپیلن تقویت شده		ژل		پودر	
				(kg/m ³)	%	(kg/m ³)	%	(kg/m ³)	%
C	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PP-0.5	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۳/۵	۰/۵	۰	۰	۰	۰
PP-1	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۷	۱	۰	۰	۰	۰
PP-1.5	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۱۰/۵	۱/۵	۰	۰	۰	۰
PPG-0.5	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۳/۵	۰/۵	۰	۰
PPG-1	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۷	۱	۰	۰
PPG-1.5	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۱۰/۵	۱/۵	۰	۰
G-0.1	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۰	۰	۰/۳۶۳	۰/۱
G-0.3	۹۹۵	۳۶۲	۱۷۳	۰	۰	۰	۰	۱/۰۹	۰/۳
G-0.5	۹۹۲	۳۶۱	۱۷۲	۰	۰	۰	۰	۱/۸۱۵	۰/۵
P-0.1	۱۰۰۰	۳۶۳	۱۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳۶۳
P-0.3	۹۹۵	۳۶۲	۱۷۳	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰۹
P-0.5	۹۹۲	۳۶۱	۱۷۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۸۱۵

گسیختگی ثبت می‌شود. با توجه به ابعاد نمونه‌ها مقاومت خمش در لحظه شکست از رابطه (۱) به دست می‌آید [۳۰].

$$S_f = 0.0028P \quad (1)$$

$$S_f = \text{مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال}$$

$$P = \text{بیشینه بار اعمال شده بر حسب نیوتن}$$

۲-۸- آزمون مقاومت فشاری

در این آزمون مطابق با استاندارد C349 نمونه‌ها پس از آزمون مقاومت خمش، تحت مراقبت قرار گرفته و مقاومت فشاری ملات سیمان، با استفاده از نمونه‌های شکسته شده در آزمایش خمش تعیین شدند. نمونه‌های شکسته شده توسط دستگاه برش به نمونه‌های مکعبی ۴۰×۴۰×۴۰

۲-۷- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

مقاومت خمشی یک پارامتر مکانیکی برای مواد شکننده است؛ که به عنوان مقاومت مواد در برابر تغییر شکل تحت بار تعریف شده است. کامپوزیت‌های تقویت‌شده الیاف‌دار، دارای مقاومت خمشی بالاتری بوده؛ زیرا آنها با الیاف، انعطاف‌پذیرتر می‌شوند. مطابق با استاندارد ASTM C-348 نمونه‌ها روی فک مربوطه قرار گرفته و نیرو با نرخ بارگذاری 110 ± 2640 نیوتن بر ثانیه به طور عمود، به وسط نمونه‌ها اعمال می‌شود (شکل ۱). هم‌زمان با افزایش نیرو، میزان جابجایی نمونه‌ها تا رسیدن به نقطه

میلی متری بریده شدند و زیر دستگاه اعمال بار با نرخ بارگذاری ۱۸۰۰ نیوتن بر ثانیه قرار گرفته شدند.



شکل ۱: نمونه ملات سیمانی تحت بارگذاری خمشی

همزمان با افزایش نیرو، میزان جابجایی نمونه ها تا رسیدن به نقطه گسیختگی ثبت می شود. با توجه به ابعاد نمونه ها، مقاومت خمش در لحظه شکست از رابطه (۲) به دست می آید [۳۵]. شکل ۲ یک نمونه را تحت بارگذاری فشاری نشان می دهد.

$$S_c = 0.00062P \quad (2)$$

S_c = مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال

P = بیشینه بار اعمال شده بر حسب نیوتن



شکل ۲: نمونه ملات سیمانی تحت بارگذاری فشاری

۲-۹- آزمون جذب آب

آزمایش جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C 642-97 به منظور بررسی تأثیر باکتری ها، در بهبود مقاومت در برابر نفوذ آب در ملات سیمانی انجام شد [۳۶]. تمام نمونه ها پس از ۲۸ روز عمل آوری، در داخل آون در دمای ۳۰۲ درجه سانتی گراد خشک گردید. وزن نمونه ها در فواصل زمانی ۲۹ ساعته اندازه گیری شد تا جایی که اختلاف جرم دو اندازه گیری متوالی کمتر از ۰/۵ درصد گردد. سپس نمونه ها در آب حدود ۲۳ درجه سانتی گراد به مدت ۹۸ ساعت غوطه ور شدند و جرم اشباع آنها محاسبه گردید. درصد جذب آب با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$A_{ai} (\%) = ((M_s - M_d) / M_d) \times 100 \quad (3)$$

جایی که M_s جرم نمونه در حالت اشباع با سطح خشک، M_d جرم خشک نمونه است.

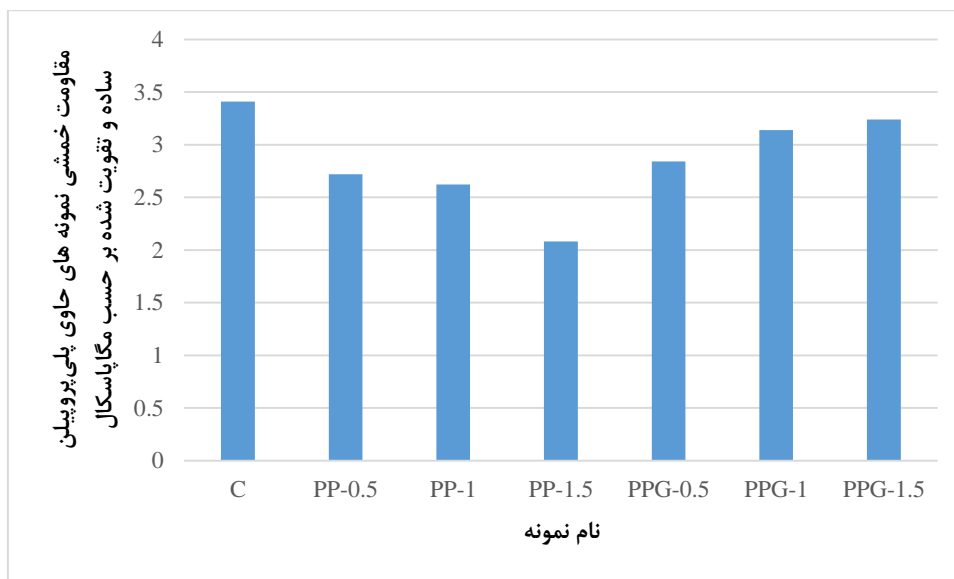
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تست مقاومت خمشی

نمونه های مختلف مسلح شده با نانو الیاف، به حالت پودر و ژل و الیاف های پلی پروپیلن ساده و تقویت شده و نمونه شاهد در سن ۲۸ روز تحت آزمون خمش سه نقطه ای قرار داده شده اند.

۳-۱-۱- مقاومت خمشی نمونه های حاوی پلی پروپیلن ساده و تقویت شده

نتایج تست مقاومت خمش نمونه های ملات تقویت شده با الیاف های پلی پروپیلن ساده و تقویت شده در شکل ۳ آورده شده است. جدول ۴ میزان نیروی وارد شده به نمونه، تا لحظه شکست را که توسط دستگاه خمش ثبت شده است نشان می دهد. به عنوان مثال نیرو افزایش یافته و ترکی در وسط نمونه؛ یعنی در محل اعمال بار ایجاد می شود و سپس ترک باز شده و ملات دچار شکست می شود. نمونه های شاهد تنها رفتار خطی نشان داده، که بیانگر شکننده بودن ملات سیمانی است [۱۲]. شکل ۴ نمونه های کنترل، پلی پروپیلن ساده و تقویت شده را پس از رسیدن به بیشینه مقاومت خمشی و تسلیم شدن را نشان می دهد.



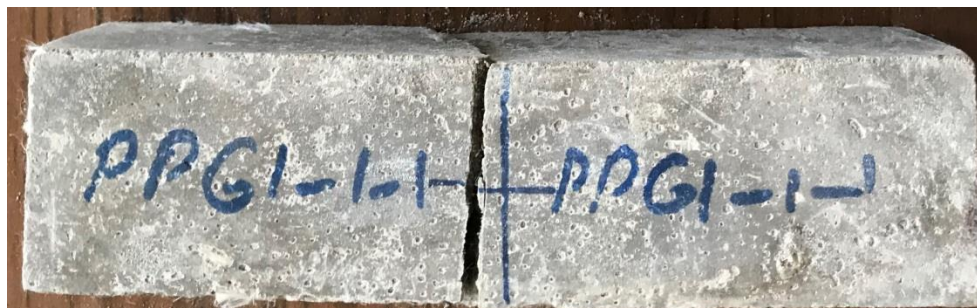
شکل ۳: نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی پلی پروپیلین ساده و تقویت‌شده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: نمونه‌های الف) کنترل، ب) پلی پروپیلین ساده، ج) پلی پروپیلین تقویت‌شده پس از شکست خمشی

جدول ۴: بیشینه نیروی قابل تحمل نمونه ها تا رسیدن به شکست خمشی

نام نمونه	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)
C	۱/۲
PP-0.5	۰/۹۷
PP-1	۰/۹۴
PP-1.5	۰/۷۴
PPG-0.5	۱/۰۱
PPG-1	۱/۱۲
PPG-1.5	۱/۱۶

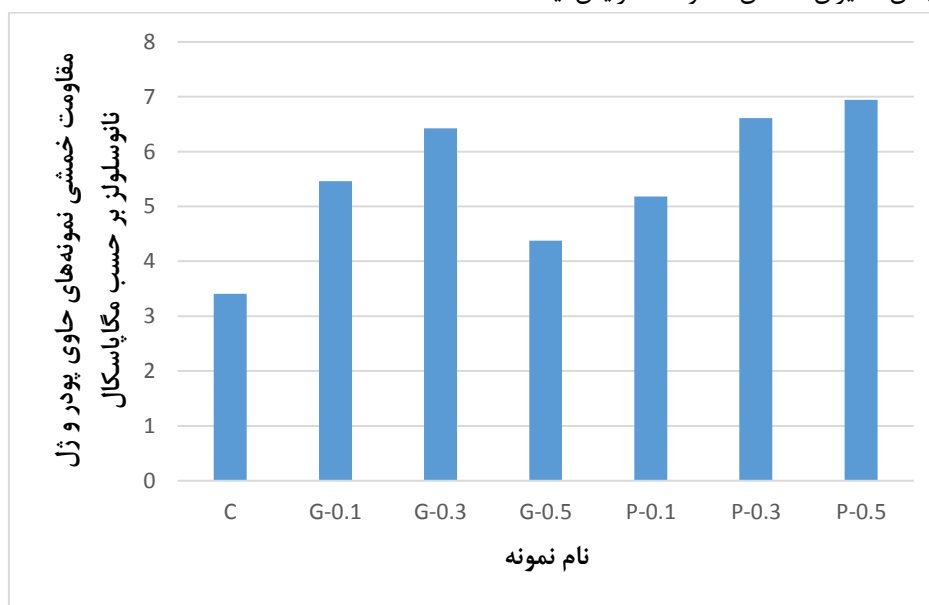
است؛ که این نتیجه برای الیاف های پلی پروپیلن تقویت شده، به علت سطح تماس ویژه بالا و اتصال بیشتر با مخلوط بتن سیمان مشاهده نمی شود.

همان طور که نتایج نشان می دهند، مقاومت نمونه های PPG1، PPG2 و PPG3 نسبت به نمونه های PP1، PP2 و PP3 به ترتیب ۴/۵، ۱۹/۶ و ۵۵/۶ درصد افزایش داشته است. این افزایش می تواند به علت افزایش اتصال در فاز میانی محل اتصال الیاف ها با ملات سیمان باشد.

۳-۱-۲- مقاومت خمشی نمونه های حاوی نانوسلولز در حالت پودر و ژل

مقاومت خمشی نمونه های تحکیم شده با پودر و ژل نانو الیاف ۲۸ روزه به میزان ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سیمان، تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج در شکل ۵ آورده شده است. مقاومت خمشی با افزودن نانو الیاف افزایش می یابد. نانو الیاف ها با قرارگیری در نانو تخلخل های موجود در نمونه ها، سبب افزایش پیوستگی و مانع از ایجاد نانو ترک می شوند. همچنین ذرات نانو به علت داشتن مساحت سطح ویژه بالا، استحکام و میزان سطح تماس بین الیاف و ملات سیمانی را بهبود می بخشد [۲۳]. سوما به علت خاصیت بالای هیدروفیلیکی نانو الیاف، چسبندگی در ملات را افزایش داده و خواص مقاومتی را بهبود می دهد. بیشترین افزایش مربوط به میزان ۰/۵ درصد بوده که ممکن است به علت پر کردن بیشتر تخلخل ها در مقیاس نانو بوده باشد.

نمونه های حاوی الیاف برخلاف نمونه شاهد، دارای مقاومت باقیمانده بوده که به دلیل وجود تقویت کننده در آنها است. نتایج نشان دهنده این است که افزودن الیاف های پلی پروپیلن ساده، مقاومت خمشی را به ترتیب ۲۰، ۲۳ و ۴۰ درصد و الیاف های پلی پروپیلن تقویت شده ۱۷، ۸ و ۵ درصد نسبت به نمونه کنترل کاهش می دهند. این کاهش می تواند به علت عدم اتصال مناسب الیاف با ملات سیمانی، یا وجود ذرات حباب به وجود آمده در اثر افزودن الیاف باشد، که خود عامل مهمی در پیدایش ترک است. به علاوه این الیاف، سبب ایجاد سطوح ضعف در ملات شده و از طرفی به علت چگالی متفاوت ملات با پلی پروپیلن این کاهش طبیعی به نظر می رسد. با افزودن مقدار الیاف های پلی پروپیلن ساده، به علت عدم توزیع یکنواخت و تجمع الیاف ها در یک نقطه (به علت اتصال نامناسب الیاف با مخلوط بتن سیمان) میزان کاهش مقاومت افزایش یافته



شکل ۵: نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه های نانو پودر و ژل سلولزی

میزان مقاومت خمشی را افزایش می‌دهند. اما در درصد‌های بالاتر، به علت بالا بودن خاصیت چسبندگی نانو الیاف‌ها در حالت ژل و ایجاد پدیده آگلومره شدن (درهم گره خوردن الیاف) مقاومت کاهش می‌یابد. شکل ۶ نمونه‌های حاوی پودر و ژل نانوسلولز را پس از رسیدن به تسلیم نشان می‌دهد.

مقاومت خمشی با افزودن نانو ژل ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین افزایش مقاومت، مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد است. با افزایش میزان الیاف، پیوستگی در مخلوط بتن سیمان افزایش یافته و نانو تخلخل‌ها با نانو الیاف‌ها پوشش داده می‌شوند و همچنین به علت مساحت سطح ویژه بالای نانو الیاف، استحکام و میزان سطح تماس بین الیاف‌ها و ملات سیمانی افزایش یافته و



(الف)



(ب)

شکل ۶: نمونه‌های الف (حاوی نانو ژل، ب) حاوی نانو پودر پس از شکست خمشی

شده و نمونه شاهد در سنین مختلف، تحت آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد C-349 قرار داده شده‌اند.

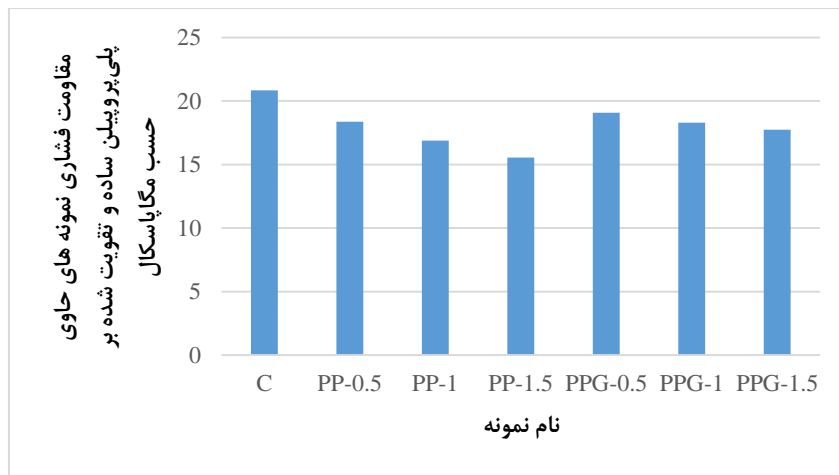
۳-۲-۱- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن ساده و تقویت‌شده

نتایج تست مقاومت فشاری نمونه‌های ملات تقویت شده، با الیاف‌های پلی‌پروپیلن ساده و تقویت شده در شکل ۷ آورده شده است. جدول ۵ میزان نیروی وارد شده به نمونه تا لحظه شکست را که توسط دستگاه فشار ثبت شده است نشان می‌دهد. به عنوان مثال نیروی از صفر تا ۳۳/۳۳ کیلو نیوتن برای نمونه کنترل افزایش یافته و ترکی در وسط نمونه، محل اعمال بار ایجاد می‌شود و ترک باز شده و بتن دچار شکست می‌شود. نمونه‌های شاهد، تنها رفتار خطی نشان داده که؛ بیانگر شکننده بودن بتن است. شکل ۸ نمونه حاوی پلی‌پروپیلن را در کنار نمونه شاهد پس از شکست فشاری نشان می‌دهد.

افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی پودر نانوسلولز به مراتب بیشتر از نمونه‌های مسلح شده با ژل نانو الیاف است. ژل نانو سلولز به علت خاصیت چسبندگی که در ذات خود دارد، در مقادیر بیش از ۰/۳ درصد، مقاومت خمشی را در اثر برزو پدیده آگلومره شدن کاهش می‌دهد. این در حالی است که با افزودن مقادیر پودر نانو سلولز مقاومت کاهش نمی‌یابد. بیشترین افزایش مقاومت، مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد پودر است؛ که مقاومت خمشی را تا ۱۰۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد؛ در صورتی که بهترین افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ژل نانو سلولز ۸۸ درصد است.

۳-۲- نتایج تست مقاومت فشاری

نمونه‌های مختلف مسلح شده با نانو الیاف‌های سلولزی به حالت پودر و ژل و الیاف‌های پلی‌پروپیلن ساده و تقویت



شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی پلی پروپیلن ساده و تقویت شده



شکل ۸: نمونه شاهد (سمت راست) و نمونه حاوی پلی پروپیلن (سمت چپ) پس از شکست در آزمون فشاری

تقویت کننده در آنها است. این کاهش می‌تواند به علت عدم اتصال مناسب الیاف با ملات سیمانی یا وجود ذرات حباب به وجود آمده در اثر افزودن الیاف باشد؛ که خود عامل مهمی در پیدایش ترک است. با افزایش درصد الیاف‌های تقویت شده، این کاهش مقاومت، کاهش می‌یابد. این کاهش ممکن است به علت درگیری بیشتر الیاف‌ها با مخلوط بتن بوده؛ که مانع از جدا شدن و از هم پاشیدگی ملات در زیر فشار می‌شود. همچنین الیاف‌های تقویت شده با توجه به سطح تماس ویژه بالاتر، به برقراری پیوند در بین ذرات مخلوط بتن، یک به هم پیوستگی مناسب را در بین ذرات مخلوط بتن به وجود می‌آورند [۳۷].

۳-۲-۲- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسلولز در حالت پودر و ژل

مقاومت فشاری نمونه‌های تحکیم شده با پودر و ژل نانو الیاف‌های ۲۸ روزه به میزان ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سیمان، تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج در شکل ۹ آورده شده است. مقاومت فشاری با افزودن نانو الیاف افزایش و

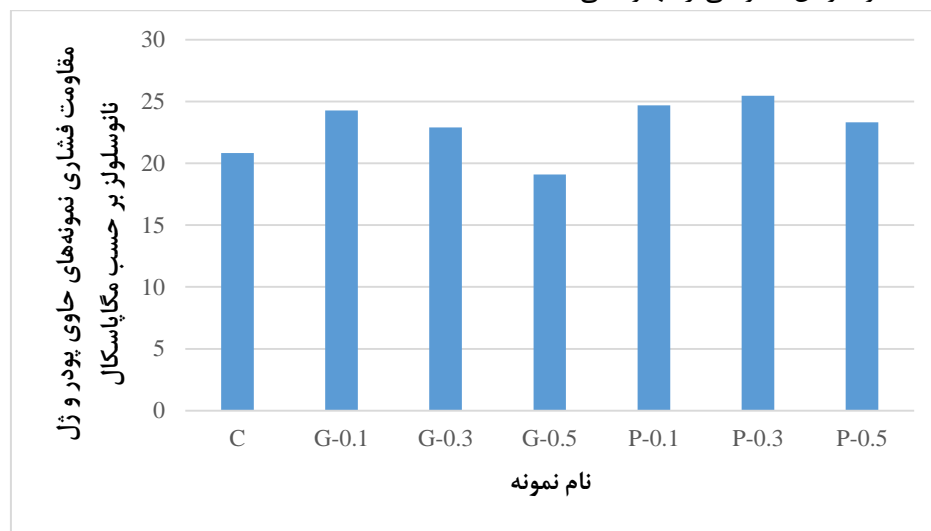
جدول ۵: بیشینه نیروی قابل تحمل نمونه‌ها تا رسیدن به شکست فشاری

نام نمونه	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)
C	۳۳/۳۳
PP-0.5	۲۹/۳۷
PP-1	۲۸/۸۹
PP-1.5	۲۴/۹۰
PPG-0.5	۳۱/۰۶۴
PPG-1	۳۰/۳۱
PPG-1.5	۲۷/۴۰

نتایج نشان‌دهنده این است که افزودن الیاف‌های پلی پروپیلن ساده، مقاومت فشاری را در تمامی سنین کاهش می‌دهند. افزودن الیاف‌های پلی پروپیلن ساده، مقاومت خمشی را به ترتیب ۱۲، ۱۳ و ۲۵ درصد و الیاف پلی پروپیلن تقویت شده ۵، ۹ و ۱۸ درصد به ترتیب برای درصد‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهند. نمونه‌های حاوی الیاف، بر خلاف نمونه شاهد، دارای مقاومت باقیمانده بوده که به دلیل وجود

بیشترین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد مشاهده شد که، ممکن است به علت خاصیت پرکنندگی بیشتر نانوپودر در مقیاس نانو باشد. با افزایش درصد میزان الیاف‌ها به دلیل جمع شدگی آنها در یک نقطه و ایجاد نقطه تمرکز تنش، شرایط را برای ایجاد سطح شکست فراهم می‌کنند و مقاومت را کاهش می‌دهند.

سپس کاهش می‌یابد. نانو الیاف‌ها با فرارگیری در نانو تخلخل‌های موجود در نمونه‌ها، سبب افزایش پیوستگی و مانع از ایجاد نانو ترک می‌شوند. همچنین ذرات نانو به علت داشتن مساحت سطح ویژه بالا، سطح تماس بین الیاف‌ها و ملات سیمانی را بهبود می‌بخشد [۲۳]. سوما به علت خاصیت بالای هیدروفیلیکی نانو الیاف‌ها، چسبندگی در ملات را افزایش داده و خواص مقاومتی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۹: نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های نانو پودر و ژل سلولزی

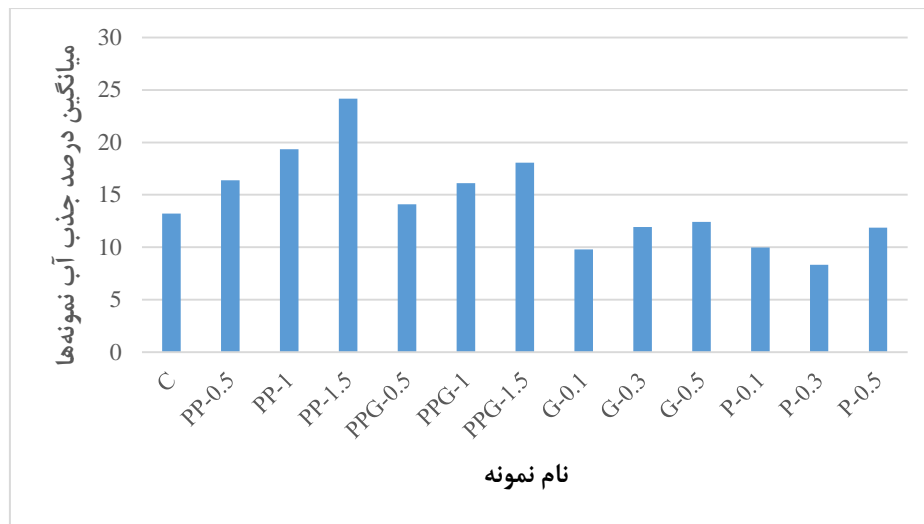
است. میزان جذب آب در نمونه‌های تحکیم شده با پلی‌پروپیلن تقویت‌شده، کمتر از نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن ساده است. دلیل این امر ممکن است به علت توانایی بالای الیاف‌های تقویت‌شده در تماس با مخلوط بتن سیمان باشد.

افزودن نانوسلولز ژلی به علت پر کردن خلل و فرج‌ها و ایجاد یک فضای یکپارچه مانع از جذب آب می‌شود. با افزایش مقدار الیاف در حالت ژل، به علت به هم چسبندگی الیاف‌ها و ایجاد پدیده آگلومره شدن؛ باعث ایجاد فضای خالی‌شده و جذب آب را افزایش می‌دهد. نانو سلولز در حالت پودر با پر کردن منافذ در مقیاس نانو، موجب کاهش تخلخل و مسدود شدن منافذ موئینگی می‌گردد و عملکرد بهتری را نسبت به نانوسلولز ژلی به همراه دارند که، در درصد‌های بالا به علت تجمع الیاف‌ها در یک نقطه؛ سبب ایجاد خلل و فرج در مخلوط بتن ملات می‌شود. بنابراین از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت؛ که استفاده از نانوسلولز حاصل از باکتری، توانایی بالایی در بهبود مقاومت ملات سیمان در برابر تخریب و در نتیجه افزایش دوام و بهره‌وری آن دارند.

افزودن ژل نانو الیاف با درصدهای ۰/۱ و ۰/۳ درصد مقاومت فشاری را به میزان ۱۶/۵۰ و ۱۰ درصد به ترتیب، نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌دهد؛ در صورتی که نمونه‌های ۰/۵ درصد نانو الیاف ژلی، مقاومت فشاری را به میزان ۸ درصد کاهش می‌دهد. بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد است. اما با افزودن نانوزل به میزان ۰/۵ درصد، به علت بالا بودن خاصیت چسبندگی نانو الیاف در حالت ژل، الیاف در هم تنیده شده (پدیده آگلومره شدن) و مقاومت کاهش می‌یابد.

۳-۳- جذب آب

تأثیر باکتری‌ها بر جذب آب در ملات سیمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذب آب از طریق فرآیند موئینگی وابسته به خلل و فرج ساختار ملات سیمانی است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود میزان جذب آب در نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن، بیشتر از نمونه شاهد است؛ که دلیل این موضوع را ممکن است به خلل و فرج ایجاد شده در اثر افزودن الیاف‌ها دانست که، این امر با افزایش میزان الیاف شدیدتر می‌شود. حضور باکتری‌ها به طور قابل توجهی در کاهش جذب آب شاتکریت نتیجه‌بخش بوده



شکل ۱۰: نتایج میزان جذب آب در نمونه‌های مختلف

۴- نتیجه گیری

- افزودن ۰/۱ درصد نانو ژل، مقاومت فشاری را به میزان ۱۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. با افزایش میزان نانو ژل مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ که این کاهش مقاومت ممکن است به علت چسبندگی و تمرکز الیافها در یک نقطه و ایجاد سطوح ضعف در ساختار ملات سیمانی باشد. افزودن نانو پودر به میزان ۰/۳ درصد مقاومت فشاری را به میزان ۲۲ درصد، نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. بهبود سطح الیاف‌های پلی‌پروپیلن توسط نانو سلولز باکتریایی توانست؛ مقاومت فشاری را در ۱/۵ درصد حجمی به میزان ۱۴ درصد نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف‌های پلی‌پروپیلن ساده افزایش دهد.
- استفاده از نانو ژل به میزان ۰/۱ درصد در طرح اختلاط، باعث کاهش ۲۳ درصدی تخلخل و ۲۶ درصدی جذب آب نسبت به نمونه شاهد گردید. این اعداد برای نمونه‌های حاوی نانو پودر به میزان ۰/۳ درصد به ترتیب به ۳۷ و ۳۲ درصد رسید. بنابراین به نظر می‌رسد نانو پودر عامل مؤثری در کاهش تخلخل و جذب آب در ملات سیمان است. الیاف‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با درصدهای حجمی ۰/۵ ، ۱ و ۱/۵ مقدار تخلخل را نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف‌های ساده، به میزان ۱۲، ۱۱ و ۱۹ درصد و میزان جذب آب را ۱۷، ۱۴ و ۲۵ درصد کاهش می‌دهند.

در این پژوهش امکان استفاده از نانوسلولز باکتریایی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ملات سیمانی بررسی شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- استفاده از نانو ژل در بهترین حالت (۰/۳ درصد وزنی سیمان) مقاومت خمشی ملات سیمان را به میزان ۸۸ درصد، نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. افزودن نانو پودر به نمونه‌ها عملکرد بهتری در افزایش مقاومت خمشی، نسبت به نمونه‌های حاوی نانو ژل را از خود نشان می‌دهد. به طوری که با افزودن ۰/۵ درصد نانو پودر مقاومت خمشی را ۱۰۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. نانو الیافها با قرارگیری در نانو تخلخل‌های موجود در نمونه‌ها سبب افزایش پیوستگی مخلوط شده و مانع از ایجاد نانو ترک می‌شوند. ثانیاً ذرات نانو به علت داشتن مساحت سطح ویژه بالا، پیوند بین الیافها و ملات سیمانی را بهبود می‌بخشند. سوما به علت خاصیت بالای جذب آب نانو الیاف، چسبندگی در ملات را افزایش داده و خواص مقاومتی را بهبود می‌دهد. بهبود سطح الیاف‌های پلی‌پروپیلن نتیجه بخش بوده و مقاومت خمشی را نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف‌های پلی‌پروپیلن ساده (در ۱/۵ درصد حجمی) به میزان ۵۵ درصد افزایش می‌دهد.

مراجع

- [12] Zollo, R.F., (1997), Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites*, 19(2): pp. 107-122.
- [13] Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. and Chotard, T., (2008), Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction, *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1): pp. 183-192.
- [14] Pakravan, H., Jamshidi, M., Latifi, M. and Neshastehriz, M., (2011), Application of polypropylene nonwoven fabrics for cement composites reinforcement.
- [15] Singh, S., Singh, A. and Bajaj, V., (2010), Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres.
- [16] Behfarnia, K. and Behravan, A., (2014), Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels, *Materials & Design*, 55(Supplement C): pp. 274-279.
- [17] Hashemi, S. and MirzaeiMoghadamb, I., (2014), Influence of Nano-silica and Polypropylene Fibers on Bond Strength of Reinforcement and Structural Lightweight Concrete, *polymer*, 900: pp. 6-18mm.
- [18] Kalhori, H. and Bagherpour, R., (2017), Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete, *Construction and Building Materials*, 148(Supplement C): pp. 249-260.
- [19] Lee, K.-Y., Tammelin, T., Schulfter, K., Kiiskinen, H., Samela, J. and Bismarck, A., (2012), High Performance Cellulose Nanocomposites: Comparing the Reinforcing Ability of Bacterial Cellulose and Nanofibrillated Cellulose, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(8): pp. 4078-4086.
- [20] Keshk, S.M., (2014), Bacterial cellulose production and its industrial applications, *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 4(2): pp. 1.
- [21] Mohammadkazemi, F., Doosthoseini, K., Ganjian, E. and Azin, M., (2015), Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber-cement composites, *Construction and Building Materials*, 101(Part 1): pp. 958-96. †
- [22] Metaxa, Z., Konsta-Gdoutos, M. and Shah, S., (2010), Mechanical properties and nanostructure of cement-based materials reinforced with carbon nanofibers and polyvinyl alcohol (PVA) microfibers, *Special Publication*, 270: pp. 115-124.
- [23] Onuaguluchi, O., Panesar, D.K. and Sain, M., (2014), Properties of nanofibre reinforced cement composites, *Construction and Building Materials*, 63(Supplement C): pp. 119-124.
- [1] Hasan-Nattaj, F. and Nematzadeh, M., (2017), The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica, *Construction and Building Materials*, 137: pp. 557-572.
- [2] Fallah, S. and Nematzadeh, M., (2017), Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume, *Construction and Building Materials*, 132: pp. 170-187.
- [3] Yao, W. and Zhong, W., (2007), Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(1): pp. 52-55.
- [4] Qi, C., Weiss, J. and Olek, J., (2003), Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function, *Materials and Structures*, 36(6): pp. 386-395.
- [5] Shubhra, Q.T., Alam, A. and Quaiyyum, M., (2013), Mechanical properties of polypropylene composites: A review, *Journal of thermoplastic composite materials*, 26(3): pp. 362-391.
- [6] Ma, Q. and Zhu, Y., (2017), Experimental research on the microstructure and compressive and tensile properties of nano-SiO₂ concrete containing basalt fibers, *Underground Space*.
- [7] Li, J., Wu, C. and Liu, Z.-X., (2017), Comparative evaluation of steel wire mesh, steel fibre and high performance polyethylene fibre reinforced concrete slabs in blast tests, *Thin-Walled Structures*.
- [8] Yoo, D.-Y. and Banthia, N., (2017), Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast, *Construction and Building Materials*, 149: pp. 416-431.
- [9] Ferro, G., Tulliani, J.M., Jagdale, P. and Restuccia, L., (2014), New Concepts for Next Generation of High Performance Concretes, *Procedia Materials Science*, 3: pp. 1760-1766.
- [10] Singh, S., Shukla, A. and Brown, R., (2004), Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix, *Cement and Concrete Research*, 34(10): pp. 1919-1925.
- [11] Romualdi, J. and Batson, G.J.J.A.I., (1963), Mechanics of crack arrest in concrete beam with closely spaced reinforcement, 60: pp. 775-789.

- [35] ASTM-C349, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure).
- [36] ASTM-642-9 (1997), Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- [37] Barr, B.I.G., Liu, K. and Dowers, R.C., (1982), A toughness index to measure the energy absorption of fibre reinforced concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(4): pp. 221-227.
- [24] Hisseine, O.A., Omran, A.F. and Tagnit-Hamou, A., (2018), Influence of Cellulose Filaments on Cement Paste and Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6): pp. 04018109.
- [25] Metaxa, Z.S., Seo, J.-W.T., Konsta-Gdoutos, M.S., Hersam, M.C. and Shah, S.P., (2012), Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, 34(5): pp. 612-617.
- [26] Peters, S., Rushing, T., Landis, E. and Cummins, T., (2010), Nanocellulose and microcellulose fibers for concrete, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2142): pp. 25-28.
- [27] Buch, N., Rehman, O. and Hiller, J., (1999), Impact of processed cellulose fibers on portland cement concrete properties, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1668): pp. ۷۲-۸۰.
- [28] Kutcharlapati, S., Singh, S. and Rajamane, N. Influence of Nano Cellulose Fibres on Portland Cement Matrix. in *National Conference on Advanced materials and Characterization*", VIT, Vellore, July23-25 pp. 2008.
- [29] Cengiz, A., Kaya, M. and Pekel Bayramgil, N., (2017), Flexural stress enhancement of concrete by incorporation of algal cellulose nanofibers, *Construction and Building Materials*, 149(Supplement C): pp. 289-295.
- [30] ASTM-C348, Test method for flexural strength of hydraulic mortar. *Annual Book of ASTM Standards*, 401.
- [31] Mohammadkazemi, F., Doosthoseini, K. and Azin, M., (2015), Effect of ethanol and medium on bacterial cellulose (BC) production by *Gluconacetobacter xylinus* (PTCC 1734), *Cellul. Chem. Technol*, 49(5-6): pp. 455-462.
- [32] Siti, M., Mohammad, S., Abd.Rahman, N., Sahaid, M., Khalil, S., Rozaimah, S. and Abdullah, S., (2014), An Overview of Biocellulose Production Using *Acetobacter xylinum* Culture. Vol. 8. 307-313.
- [33] Vandamme, E., De Baets, S., Vanbaelen, A., Joris, K. and De Wulf, P., (1998), Improved production of bacterial cellulose and its application potential, *Polymer Degradation and Stability*, 59(1-3): pp. 93-99.
- [34] Mohammad, S.M., Rahman, N.A., Khalil, M.S. and Abdullah, S.R.S., (2014), An overview of biocellulose production using *acetobacter xylinum* culture, *Advances in Biological Research*, 8(6): pp. 307-313.

¹ Inductively Coupled Plasma

² Scanning Electron Microscope

³ Denier