

## اثر نانوسلولز باکتریایی بر خواص کامپوزیت‌های فیبر-سیمان و دوام در برابر چرخه ذوب-انجماد

فراتک محمد کاظمی

دکترای گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

کاظم دوست حسینی

استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

Eshmaiel Ganjian

دانشیار گروه مهندسی عمران، Coventry University، انگلیس

مهرداد آذین

دانشیار پژوهشکده بیوتکنولوژی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی، تهران، ایران

### چکیده

در این تحقیق، اثر نانوسلولز باکتریایی در سه سطح (شاهد، پودر و ژل) بعنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌های فیبر-سیمان بررسی شده است. همچنین الیاف باگاس با مقادیر ۶ و ۷ درصد برای ساخت کامپوزیت‌ها استفاده شد. خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌ها شامل مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE)، چقرمگی شکست (FT)، مقاومت چسبندگی داخلی (IB) و جذب آب (WA) پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های ساخته شده با ژل سلولز، مقاومت‌های خمشی، مقاومت چسبندگی داخلی و چقرمگی شکست بالاتری داشتند. ترکیب ۷ درصد الیاف باگاس و ژل سلولز در کامپوزیت‌ها جذب آب را کاهش داد. در این کامپوزیت‌ها احتمالاً به دلیل توزیع یکنواخت الیاف و ژل سلولز داخل ماتریکس سیمان اتصالات داخلی افزایش یافته و فضاهای خالی کمتری برای نفوذ آب باقی مانده است. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌ها نشان داد که در کامپوزیت‌های حاوی ژل سلولز باکتریایی شدت پیک‌های مربوط به فراورده‌های هیدراتاسیون عمده از جمله ژل کلسیم سیلیکات هیدراته و هیدروکسید کلسیم بیشتر بود. نتایج به‌دست آمده از آزمون چرخه ذوب-انجماد نشان داد که کامپوزیت‌های حاوی ژل سلولز مقاومت چسبندگی داخلی بالاتری بعد از ۲۰ چرخه در مقایسه با دو کامپوزیت دیگر داشتند. در این بررسی، کامپوزیت‌های فیبر-سیمان ساخته شده از ۷ درصد الیاف باگاس و ژل سلولز باکتریایی بعنوان تیمار بهینه انتخاب شدند.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت‌های فیبر-سیمان، نانوسلولز باکتریایی، خواص مکانیکی، جذب آب، آنالیز اشعه ایکس (XRD)، چرخه ذوب-انجماد.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، محققین زیادی به بررسی اثر الیاف طبیعی به‌عنوان اجزای باربر در مواد کامپوزیتی پرداخته‌اند [۱، ۲، ۳]. کاربرد الیاف طبیعی در ساخت بتن‌ها و کامپوزیت‌های سیمانی به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها این کامپوزیت‌ها را به کامپوزیت‌های دوستدار محیط زیست تبدیل می‌کند. الیاف طبیعی لیگنوسلولزی با توجه به ویژگی‌های جالب توجهی که دارند از جمله تجدیدپذیر بودن، در دسترس بودن، قیمت پایین، سبکی و خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب آن‌ها، جای‌گزینی مناسب برای تقویت‌کننده‌های معمولی مانند فولاد و آژبست خطرناک در کامپوزیت‌های سیمانی به‌شمار می‌روند [۴]. این کامپوزیت‌ها گزینه مناسبی در صنعت ساختمان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و کشورهایی که به مصالح ساختمانی ارزان‌قیمت نیاز دارند، می‌باشند [۵]. باگاس (تفاله نیشکر) یکی از پسماندهای کشاورزی بوده و با توجه به پتانسیل‌هایی که در کشور ما از این لحاظ وجود دارد، می‌تواند گزینه مناسبی جهت ساخت کامپوزیت‌های فیبر-سیمان باشد [۶]. در هر حال الیاف طبیعی که عموماً به‌صورت دستجات هستند مقاومت پایین‌تری (حدود ۶۰۰ مگاپاسکال) در مقایسه با سلول فیبر (تا ۱۵۰۰ مگاپاسکال) دارند. بنابراین زمانی که از نانوالیاف به‌عنوان تقویت‌کننده در این کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود، مقاومت‌های بالاتری پیش‌بینی می‌شود [۷].

تولید نانوسلولز و استفاده از آن در ساخت کامپوزیت‌های دوستدار محیط زیست، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است. سلولز باکتریایی توسط باکتری *Acetobacter xylinum* تولید می‌شود؛ سلولز تولید شده توسط این باکتری فاقد لیگنین، همی‌سلولز، پکتین و موم‌ها است و درجه کریستالینیته بالا (حدود ۷۵ درصد)، سطح ویژه بالا، درجه پلیمریزاسیون ۶۰۰-۲۰۰۰، ظرفیت جذب آب بالا، پایداری شیمیایی خوب، مقاومت مکانیکی بالا، حفظ مقاومت و شکل عالی دارد. ساختار کریستالی سلولز باکتریایی اغلب سلولز I است. گزارش شده است که غلبه سلولز I در سلولز باکتریایی کریستالینیته آن را بیشتر از سلولز گیاهی می‌کند. لایه سلولز تولید شده، ساختار شبکه‌ای فوق ریز دارد که نوارهایی با عرض ۵۰۰ نانومتر و

ضخامت ۱۰ نانومتر تولید می‌کند. نوارها شامل میکروفیبریل‌های کوچکتر با مقطع عرضی  $58 \times 16 \text{ \AA}$  ضخامت ۳-۴ نانومتر و قطر ۲۴-۸۶ نانومتر است [۸].

سلولز باکتریایی می‌تواند در هر جایی که سلولز گیاهی استفاده می‌شود، به‌کار رود. این سلولز کاربردهای متعددی در رشته‌های مختلف دانش از جمله مهندسی عمران، بیوتکنولوژی، پزشکی، داروسازی، صنایع غذایی، علم مواد و غیره دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این سلولز ساخت انواع مختلف کامپوزیت‌ها می‌باشد. محققین خواص مکانیکی بیوکامپوزیت‌های نشاسته-سلولز باکتریایی را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که حضور نانوالیاف سلولز باکتریایی خواص کششی، مقاومت به رطوبت و حمله میکروارگانیزم‌ها را بهبود می‌بخشد [۹]. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مقاومت کششی و مدول یانگ کامپوزیت‌های سلولز استات بوتیرات تقویت‌شده با ورقه‌های سلولز باکتریایی افزایش یافت [۱۰]. همچنین اثر استفاده از سلولز باکتریایی به‌عنوان یک نانوپلیمر زیستی در تقویت بتن و کامپوزیت‌های سیمانی بررسی شده است. Shuzhen و همکاران عنوان کردند استفاده از سلولز باکتریایی در کامپوزیت‌های سیمانی مقاومت‌های خمشی و فشاری را به ترتیب ۲۰ و ۸ درصد افزایش دادند. سلولز باکتریایی تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده را در حین هیدراتاسیون تسریع می‌کند [۱۱]. اکثر کاربردهای این سلولز در ارتباط با تقویت ماتریکس‌های پلیمری بوده است و اطلاعات کمی درباره اثر تقویت‌کنندگی آن‌ها در ماتریکس سیمان وجود دارد. از این جهت، هدف از این پژوهش بررسی اثر نوع نانوسلولز باکتریایی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های فیبر-سیمان می‌باشد. همچنین اثر چرخه ذوب-انجماد بر دوام کامپوزیت‌ها جهت استفاده در مناطقی که در معرض دوره‌های یخبندان و ذوب متوالی قرار دارند، بررسی شده است.

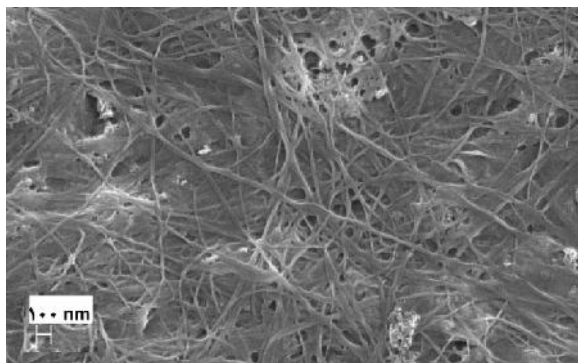
## ۲- مواد و روش‌ها

جهت ساخت کامپوزیت‌های فیبر سیمان از خمیر الیاف رنگبری نشده باگاس (لیگنین باقیمانده ۲/۷ درصد، طول الیاف ۱/۱۳ mm و قطر الیاف ۲۹/۵ میکرومتر) استفاده شد. مقدار الیاف بکار رفته، پس از تعیین مقدار بهینه در دو سطح ۶ و ۷ درصد وزنی سیمان

چسبندگی داخلی (IB) و جذب آب (WA) پس از غوطه‌وری در آب به مدت ۲ و ۲۴ ساعت مطابق استاندارد DIN 68763 روی نمونه‌های موردنظر انجام شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های شاهد، پودر و ژل نانوسلولز در محدوده  $2\theta = 4-60^\circ$ ،  $40 \text{ kV}$  و  $30 \text{ mA}$  انجام شد. همچنین آزمون چرخه ذوب-انجماد مطابق استاندارد طی بیست چرخه انجام شد [۱۳]. سپس مقاومت چسبندگی داخلی ( $IB_{f-w}$ ) و جذب آب (WA) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای انجام آنالیز آماری از نرم‌افزار SPSS و آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) استفاده شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از تکنیک تجزیه واریانس و گروه‌بندی میانگین‌ها براساس آزمون چند دامنه دانکن (DMRT) صورت گرفت.

### ۳- نتایج

شکل ۱ تصویر FE-SEM ساختار سلولز باکتریایی را نشان می‌دهد. سلولز تولید شده از میکروفیبریل‌های درهم رفته با آرایش تصادفی و بدون جهت‌گیری و زاویه مشخص تشکیل شده است. میانگین پهنای میکروفیبریل‌ها نیز حدود ۲۴ نانومتر اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- تصویر FE-SEM نانوسلولز باکتریایی

شکل ۲ اثر نوع سلولز باکتریایی را بر خواص مکانیکی و نیز گروه‌بندی میانگین‌ها را براساس آزمون دانکن نشان می‌دهد. اثر مقدار الیاف بر مدول گسیختگی معنی‌دار بود. کامپوزیت‌های ساخته شده با ۷ درصد الیاف مدول گسیختگی بالاتری (MPa)  $8/12$  نسبت به کامپوزیت‌های حاوی ۶ درصد الیاف (MPa)  $7/41$  از خود نشان دادند.

در نظر گرفته شد. سیمان پرتلند نوع دو از کارخانه آبیگ تهیه شد. همچنین از کلرید کلسیم به مقدار ۵ درصد به عنوان کاتالیزور و فوق‌روان‌کننده به مقدار ۰/۵ درصد وزنی سیمان در همه نمونه‌ها استفاده شدند. برای تولید سلولز از روش کشت باکتری *Glucanacetobacter xylinus* استفاده شد [۱۲]. پس از پایان کشت، سلولز تولید شده استخراج و با محلول سود، دمای  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۱ ساعت خالص‌سازی شد. برای بررسی ساختار سلولز باکتریایی تولید شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) مدل Hitachi SU 8090 با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ استفاده شد. بخشی از سلولز تولید شده با استفاده از مخلوط کن به ژل تبدیل شد و بخشی از آن با استفاده از دستگاه خشک‌کن سرمایشی مدل SCANVAC Cool Safe در دمای  $92^\circ\text{C}$ - خشک و سپس با آسیاب دورانی آسیاب شد. مقدار سلولز مورد استفاده ۵۰ درصد وزنی الیاف بود. جدول ۱ سطوح عوامل متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- سطوح عوامل متغیر و مشخصات آن

عوامل متغیر	تعداد سطوح	توضیحات
مقدار الیاف	۲	۶ درصد الیاف
		۷ درصد الیاف
نوع سلولز باکتریایی	۳	شاهد
		پودر
		ژل

برای ساخت تخته‌ها، ملات با استفاده از دستگاه همزن با سرعت ۱۳۲۰ دور در دقیقه به مدت ۳ دقیقه با دو وقفه یک دقیقه‌ای مخلوط شد. پس از اختلاط کامل، ملات داخل قالب‌هایی با ابعاد  $25 \times 10 \times 5 \text{ cm}$  ریخته و تحت فشار ۱۰ کیلوگرم پرس شد. تخته‌ها تحت قید و فشار به مدت ۲۴ ساعت باقی ماندند. پس از اتمام فرایند گیرایی، به مدت یک ماه در شرایط  $95 \pm 5$  درصد رطوبت نسبی و دمای  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. در پایان در شرایط  $65 \pm 5$  درصد رطوبت نسبی و دمای  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  قرار گرفتند تا به شرایط تعادل برسند. جرم مخصوص هدف  $1/2 \text{ g/cm}^3$  در نظر گرفته شد از هر تیمار ۴ نمونه ساخته شد. پس از برش، آزمون‌های مربوطه شامل اندازه‌گیری مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE)، چقرمگی شکست (FT) و

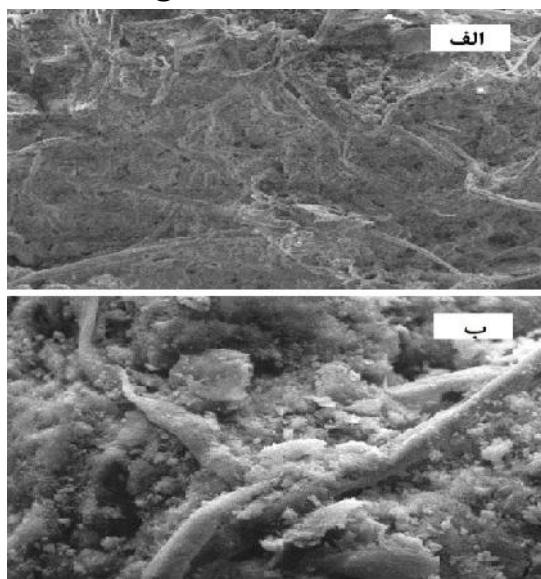
پیک‌ها در کامپوزیت‌های حاوی پودر سلولوز بدلیل کمتر بودن گروه‌های OH در دسترس، در توسعه واکنش‌های هیدراتاسیون نقش کمتری داشته است.

برای بررسی دوام کامپوزیت‌ها در برابر یخ‌زدگی- ذوب شدن، مقاومت چسبندگی داخلی و جذب آب کامپوزیت‌ها پس از بیست دوره متوالی ذوب و انجماد اندازه‌گیری شد. شکل ۵ مقاومت چسبندگی داخلی کامپوزیت‌ها را قبل و بعد از چرخه ذوب- انجماد نشان می‌دهد.

همانطور که ملاحظه می‌شود مقاومت چسبندگی داخلی کامپوزیت‌ها پس از چرخه ذوب- انجماد کاهش یافته و از لحاظ گروه‌بندی دانکن مشابه قبل از اعمال چرخه ذوب و انجماد می‌باشند و مقاومت کامپوزیت‌های حاوی ژل سلولوز باکتریایی همچنان بالاتر از بقیه می‌باشد.

در شکل ۶ اثر نوع سلولوز بر جذب آب کامپوزیت‌ها قبل و بعد از چرخه ذوب- انجماد آمده است. کامپوزیت‌های ساخته شده با پودر سلولوز جذب آب بالاتری پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب و قبل و بعد از چرخه ذوب و انجماد از خود نشان دادند و اختلاف جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت نیز بعد از چرخه بیشتر بود.

شکل ۷ تصویر SEM این کامپوزیت‌ها را قبل و بعد از چرخه ذوب- انجماد نشان می‌دهد. تورم الیاف در اثر جذب آب پس از اعمال چرخه‌های ذوب- انجماد به وضوح مشخص است.



شکل ۷- تصویر SEM کامپوزیت‌های حاوی پودر سلولوز قبل

(الف) و بعد (ب) از چرخه ذوب- انجماد

اثر سلولوز باکتریایی بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته، مقاومت چسبندگی داخلی و چقرمگی شکست معنی‌دار بود.

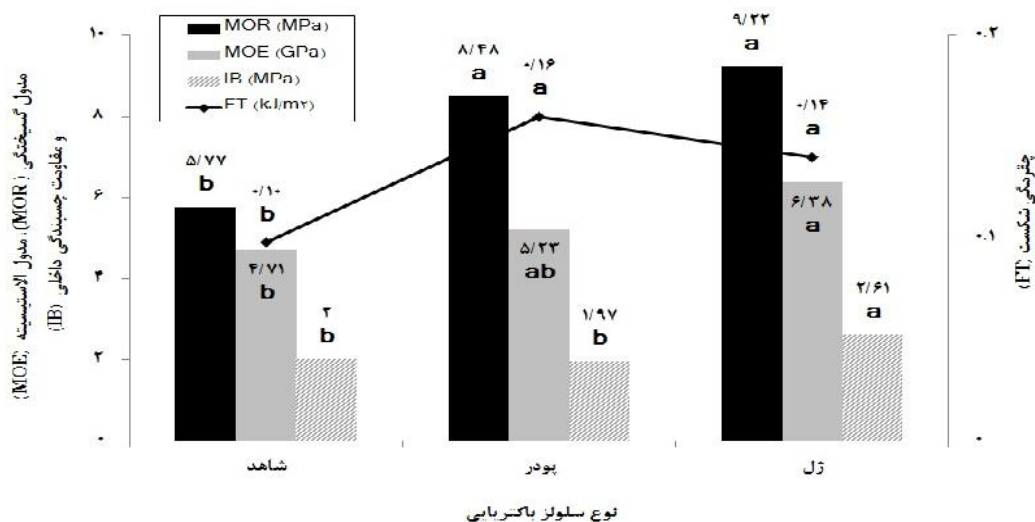
کامپوزیت‌های حاوی ژل و پودر سلولوز مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بالاتری در مقایسه با تیمار شاهد داشتند. براساس گروه‌بندی دانکن کامپوزیت‌های حاوی ژل سلولوز باکتریایی بالاترین مقاومت چسبندگی داخلی (۲/۶۱ MPa) را داشتند. کامپوزیت‌های حاوی پودر سلولوز و شاهد به ترتیب با مقاومت چسبندگی داخلی ۱/۹۷ و ۲ مگاپاسکال از لحاظ آماری در یک گروه قرار گرفتند. انرژی شکست کامپوزیت‌های شاهد کمترین مقدار را داشت (۰/۱ kJ/m<sup>2</sup>) و کامپوزیت‌های حاوی ژل و پودر سلولوز بالاترین چقرمگی شکست را داشته و از لحاظ گروه بندی دانکن در یک گروه قرار گرفتند.

شکل ۳ اثر مقدار الیاف و نوع سلولوز را بر جذب آب نشان می‌دهد.

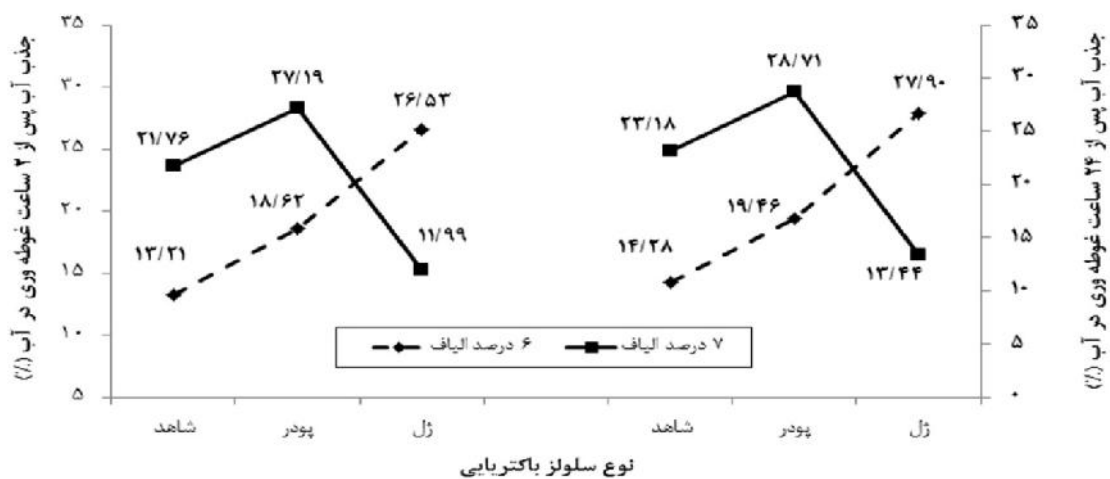
جذب آب کامپوزیت‌های ساخته شده با ۷ درصد الیاف خمیر باگاس بیشتر از ۶ درصد بوده است. همچنین در کامپوزیت‌های حاوی ۶ درصد الیاف، با استفاده از پودر و ژل سلولوز باکتریایی جذب آب کامپوزیت‌ها پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب افزایش یافته؛ در حالی که در کامپوزیت‌های حاوی ۷ درصد الیاف، استفاده از ژل سلولوز باکتریایی جذب آب را ۵۵-۵۱ درصد نسبت به کامپوزیت‌های حاوی ۶ درصد الیاف کاهش داده است.

آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌ها در شکل ۴ آمده است. براساس تجزیه و تحلیل پیک‌های XRD، فازهای هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)<sub>2</sub>)، لارنیت (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)، کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>)، هیدرو کالومیت (Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O)، کلسیم سیلیکات هیدراته (CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) و اترینگیت (Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.26H<sub>2</sub>O) در نمونه‌ها وجود داشتند. شدت پیک‌های فرآورده‌های هیدراتاسیون عمده که مسئول مقاومت هستند از جمله هیدروکسید کلسیم (۳۴°، ۴۷°)، ۱۸° = ۲) و ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (۵۰°، ۳۲°، ۲۹° = ۲) در کامپوزیت‌های حاوی ژل بیشتر از پودر و کامپوزیت‌های شاهد بود. نانوسلولوز به دلیل داشتن گروه‌های هیدروکسیل فراوان و در دسترس تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته را تسریع کرده و به واکنش‌های هیدراتاسیون کمک می‌کند. کمتر بودن شدت

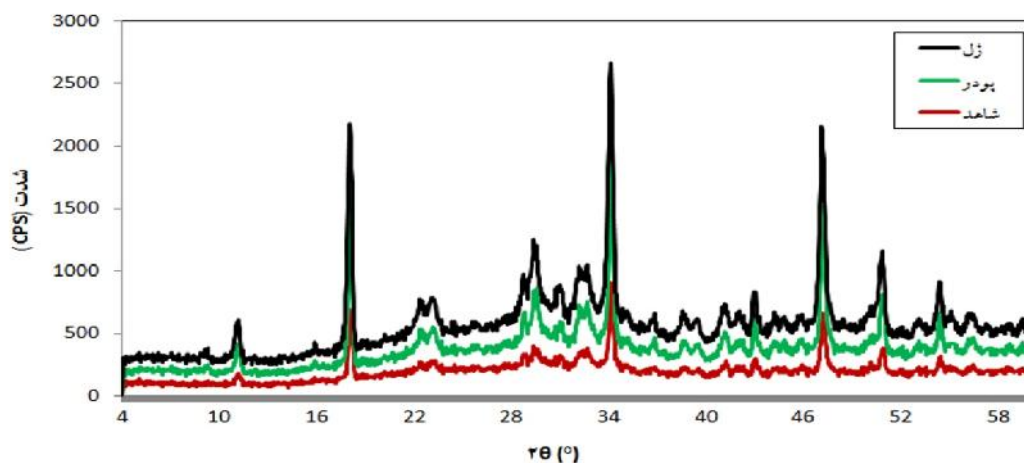
اثر نانوسلولز باکتریایی بر خواص کامپوزیت‌های ...



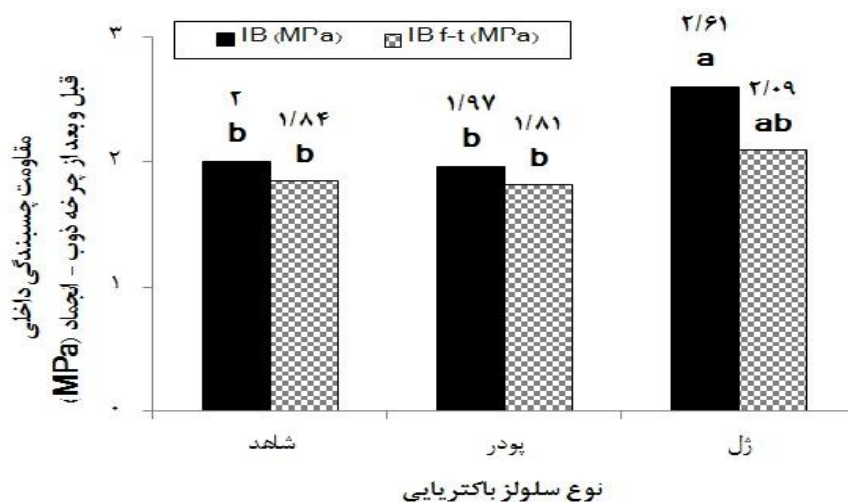
شکل ۲- اثر نوع سلولز باکتریایی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها



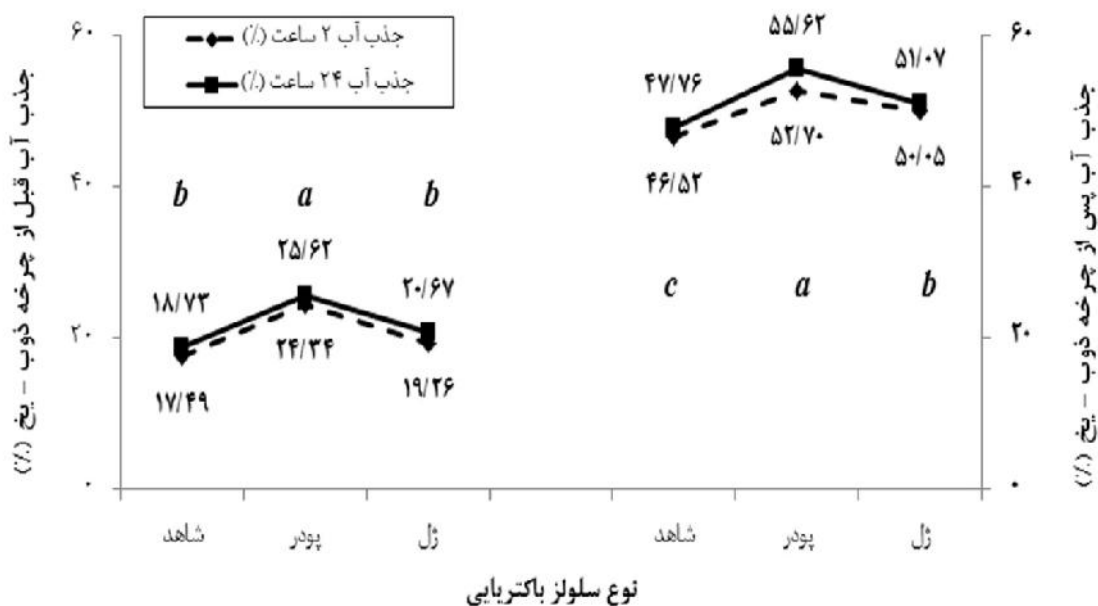
شکل ۳- اثر مقدار الیاف و نوع سلولز بر جذب آب کامپوزیت‌ها



شکل ۴- طیف XRD کامپوزیت‌ها



شکل ۵- مقاومت چسبندگی داخلی کامپوزیت‌ها قبل و بعد از چرخه ذوب و انجماد



شکل ۶- اثر نوع سلولز باکتریایی بر جذب آب کامپوزیت‌ها قبل و بعد از چرخه ذوب- انجماد

#### ۴- نتیجه گیری

زیادی به برقراری پیوندهای شیمیایی با یکدیگر دارند. اتصالات قوی بین سلولز و سیمان باعث افزایش مقاومت‌های خمشی کامپوزیت می‌شود.

در این بررسی، کامپوزیت‌های حاوی ژل سلولز باکتریایی بالاترین مقاومت چسبندگی داخلی را داشتند. تحقیقات نشان داد که در طول هیدراتاسیون، کریستال‌ها با سطوح الیاف، حفرات سلولی و منافذ دیگر اتصال برقرار کرده و زمانیکه کریستال‌ها رشد می‌کنند به درون هر حفره و فضاهای خالی موجود نفوذ می‌کنند [۱۵]. در این کامپوزیت‌ها، ژل سلولز باکتریایی بعنوان

براساس نتایج بدست آمده، کامپوزیت‌های حاوی ژل و پودر سلولز مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بالاتری در مقایسه با تیمار شاهد داشتند. سلولز باکتریایی درجه هیدراتاسیون، مقاومت کششی و مدول یانگ (۱۳۴ GPa) بالایی داشته و با توجه به ساختار نانو و فوق ریز آن سطح ویژه را افزایش داده و خواص متفاوت و قابل توجهی از خود نشان می‌دهد [۱۴]؛ ضمن اینکه نانوسلولز گروه‌های OH در دسترس زیادی دارد و از آنجاییکه ماتریکس سیمان و الیاف سلولز هر دو آب‌دوست هستند، تمایل

کامپوزیت‌ها  $1/0.1 \text{ g/cm}^3$  و کمتر از کامپوزیت‌های ژل و شاهد بود.

در اثر دوره‌های متوالی ذوب و انجماد، آبی که یخ زده و ذوب می‌شود موجب تنش‌های مکانیکی می‌گردد که ممکن است به کامپوزیت‌های فیبر-سیمان خسارت وارد کند. خسارت ناشی از ذوب و یخ زدگی به این دلیل اتفاق می‌افتد که مواد نفوذپذیر آب را جذب می‌کنند؛ وقتی این آب یخ می‌زند منبسط می‌شود. مواد در دوره‌های بعدی ذوب شدن بعثت افزایش تخلخل منبسط باقی مانده و نفوذپذیری افزایش می‌یابد. اگر آب بیشتری در دسترس باشد، حفرات با آب بیشتری پر شده و در دوره بعدی یخ‌زدگی بیشتر منبسط می‌شوند. دوره‌های متوالی ذوب-یخ باعث می‌شود ماده به مرور دچار شکست یا تخریب شود [۱۸].

در این پس از چرخه ذوب-انجماد کامپوزیت‌های حاوی ژل همچنان بالاترین مقاومت چسبندگی داخلی را داشتند. در کامپوزیت‌های حاوی پودر سلولز، در اثر انبساط و انقباض الیاف داخل ماتریکس، سطح مشترک تا حدودی ضعیف شده، ترک‌های میکروسکوپی افزایش می‌یابد [۱۹]. از این رو با افزایش تخلخل، قابلیت جذب آب این کامپوزیت‌ها و اختلاف جذب آب پس از ۲ و ۲۴ ساعت پس از چرخه افزایش یافته است. از طرف دیگر، آبی که در اثر ذوب یخ وارد نمونه‌ها می‌شود می‌تواند موجب توسعه واکنش‌های قلیایی-سیلیکاتی<sup>۳</sup> در کامپوزیت شود. این واکنش‌ها باعث تشکیل و واکنش‌دهی ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده<sup>۴</sup> و موجب افزایش حجم و تخلخل می‌گردد (شکل ۶، پایین).

به‌طور کلی کامپوزیت‌های فیبر-سیمان ساخته شده از ۷ درصد الیاف باگاس با ژل نانو سلولز باکتریایی بهترین خواص مکانیکی و فیزیکی را از خود نشان دادند. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد نانو سلولز باکتریایی، افزودن آن به کامپوزیت‌های سیمانی اثر قابل توجهی را در تقویت این کامپوزیت‌ها خواهد داشت. این کامپوزیت‌ها برای کاربردهای داخلی مناسب بوده و استفاده خارجی آن‌ها در مناطقی که دوره‌های یخبندان شدید و نوسانات دمایی شدید را تجربه می‌کنند با پوشش‌های حفاظتی توصیه می‌شود.

بخشی از ماده زمینه، در تمام قسمت‌های ماتریکس سیمان توزیع شده و الیاف و سیمان را محکم کنار یکدیگر نگه می‌دارد. در این کامپوزیت‌ها نسبت  $\text{Ca/Si}$  بالاترین مقدار را داشت (۴/۸۱) که نشان دهنده تشکیل بیشتر فراورده‌های هیدراتاسیون می‌باشد. سلولز باکتریایی نانو ساختار بوده، سطح ویژه بالایی داشته و حرارت هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد؛ ضمن اینکه مقاومت کششی و مدول یانگ بالایی دارد که باعث افزایش مقاومت چسبندگی داخلی کامپوزیت می‌شود.

در کامپوزیت‌های شاهد، معدنی شدن<sup>۱</sup> الیاف اتفاق افتاده و یون‌های قلیایی و فراورده‌های هیدراتاسیون سیمان در سطوح و داخل حفرات الیاف باگاس رسوب کرده‌اند؛ بدین ترتیب، بیرون‌کشی الیاف<sup>۲</sup> در حین خمش کاهش یافته، الیاف انرژی کمتری جذب کرده و شکست ترد اتفاق می‌افتد؛ در نتیجه چقرمگی شکست کاهش می‌یابد؛ در این حالت کامپوزیت‌ها به شدت شکننده هستند. استفاده از سلولز باکتریایی باعث افزایش انرژی جذب شده حین خمش و چقرمگی شکست شد. گزارش شده است که افزودن نانو سلولز تا ۳ درصد، انرژی شکست را تا بیشتر از ۵۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۶].

در کامپوزیت‌های حاوی ۷ درصد الیاف، استفاده از ژل سلولز باکتریایی جذب آب را نسبت به کامپوزیت‌های حاوی ۶ درصد کاهش داد. در این کامپوزیت‌ها احتمالاً به دلیل توزیع یکنواخت الیاف و ژل سلولز باکتریایی داخل ماتریکس سیمان و تراکم بیشتر، اتصالات داخلی افزایش یافته و فضاهای خالی کمتری برای نفوذ آب باقی مانده است. لازم به ذکر است جرم مخصوص این کامپوزیت‌ها  $1/2 \text{ g/cm}^3$  و با جرم مخصوص هدف برابر بود. ضمن اینکه ژل سلولز باکتریایی انرژی سطح بیشتری داشته و بدلیل افزایش سطح تماس الیاف با ماتریکس سیمان، باعث تقویت سطح مشترک و افزایش درگیری مکانیکی آن با سیمان می‌گردد [۱۷]. بالاترین جذب آب متعلق به کامپوزیت‌های حاوی پودر می‌باشد. پودر سلولز ممکن در بین الیاف و سطح مشترک بین الیاف و ماتریکس سیمان اتصالاتی برقرار کند که باعث به دام افتادن برخی فضاهای خالی، افزایش تخلخل و به دنبال آن افزایش جذب آب شود. میانگین جرم مخصوص این

<sup>3</sup> Alkali-Silica Reactions

<sup>4</sup> CSH

<sup>1</sup> Mineralization

<sup>2</sup> Pull out

Bacterial Cellulose Fiber-Reinforced Starch Biocomposites”. *Composite Science and Technology*, 69, 7-8, 1212-1217, 2009.

[10] Gindl, W., Keckes, J. “Tensile Properties of Cellulose Acetate Butyrate Composites Reinforced with Bacterial Cellulose”. *Composite Science and Technology*, 64, 15, 2407-2413, 2004.

[11] Shuzhen, L., Ning, C., Zhonghua, P., Yanhua, P., Taifu, H. “Preparation and Properties of Bacterial Cellulose Reinforced Cement composites”. *China Powder Science and Technology*, 4, 016, 2011.

[12] Mohammadkazemi, F., Azin, M., Ashori, A. “Production of bacterial cellulose using different carbon sources and culture media”. *Carbohydrate Polymers*. 117, 518-523, in press, 2015.

[13] Lopez-Anido, R., Michael, A. P., Sandford, T. S. “Freeze-Thaw Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites Adhesive Bonds with Underwater Curing Epoxy”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 3, 283-286, 2004.

[14] Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Hessler, N., Hornung, M., Schmauder, H-P., Marsch, S. “Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application”. *Advances in Polymer Science*, 205, 9, 49-96, 2006.

[15] Ahn, W. Y., Moslemi A. A. “SEM Examination of Wood-Portland Cement Bonds”. *Wood Science*, 13, 2, 77-82, 1980.

[16] Peters, S. J., Rushing, T. S., Landis, E. N., Cummins, T. K. “Nanocellulose and Microcellulose Fibers for Concrete”. *Journal of the Transportation Research Board*, 2142, 25-28, 2010.

[17] Frybort, S., Mauritz, R., Teischinger, A., Muller, U. “Investigation of the mechanical interactions at the interface of wood-cement composites by means of electronic speckle pattern interferometry”. *Bioresources*, 7, 2, 2483-2495, 2012.

[18] Cooke, A. M. “Durability of Autoclaved Cellulose Fiber Cement Composites”. The 7<sup>th</sup> Inorganic-Bonded Wood and Fiber Conference, Sun Valley, Idaho, USA, Sept.27, 1-37, 2000.

## ۵- قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی دانشگاه تهران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو قدردانی کنند.

## ۶- مراجع

[1] Ardanuy, M., Claramunt, J., Garcia-Hortal, J. A., Barra, M. “Fiber-Matrix Interactions in Cement Mortar Composites Reinforced with Cellulosic Fibers”. *Cellulose*, 18, 2, 281-289, 2011.

[2] Beckermann, G. W., Pickering, K. L. “Engineering and Evaluation of Hemp Fiber Reinforced Polypropylene Composites: Fiber Treatment and Matrix Modification”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 6, 979-988, 2008.

[3] John, M. J., Thomas, S. “Biofibers and Biocomposites”. *Carbohydrate Polymers*, 71, 3, 343-364, 2008.

[4] Pandey, J. K., Ahn, S. H., Lee, C. S., Mohanty, A. K., Misra, M. “Recent Advances in the Application of Natural fiber based composites”. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295, 11, 975-989, 2010.

[5] Claramunt, J., Ardanuy, M., Garcia-Hortal, J. A., Toledo Filho, R. D. “The hornification of vegetable fibers to Improve the Durability of Cement Mortar Composites”. *Cement and Concrete Composites*, 33, 5, 586-595, 2011.

[6] Khorami M. Ganjian E. “Comparing Flexural Behavior of Fiber-Cement Composites Reinforced Bagasse, Wheat, and Eucalyptus”. *Construction and Building Material*, 25, 9, 3661-3667, 2011.

[7] Stamboulis, A. Baillie, C. A. Peijs, T. “Effect of Environmental Conditions on Mechanical and Physical Properties of Flax Fibers”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 8, 1105-1115, 2001.

[8] Guo, J., Catchmark, J. M. “Surface Area and Porosity of Acid Hydrolysed Cellulose Nanowhiskers and Cellulose Produced by *Gluconacetobacter Xylinus*”. *Carbohydrate polymers*, 87, 2, 1026-1037, 2012.

[9] Wan, Y. Z., Luo, H., He, F., Liang, H., Huang, Y., Li, X. L. “Mechanical, Moisture Absorption, and Biodegradation Behaviors of



[19] Jang, S-J., Rokugo, K., Park, W-S., Yun, H-D. "Influence of Rapid Freeze-Thaw Cycling on the Mechanical Properties of Sustainable Strain-Hardening Cement". *Materials*, 7, 2, 1422-1440, 2014.

## Effects of Bacterial Nanocellulose on Properties of Fiber-Cement Composites and Durability to Freeze-Thaw Cycling

Faranak Mohammadkazemi<sup>\*</sup>

PhD., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Kazem Doosthoseini

Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Eshmaiel Ganjian

Associated professor, Department of Civil Engineering, Coventry University, Coventry, UK

Mehrdad Azin

Associated professor, Department of Biotechnology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

### Abstract

In this study, the effect of bacterial nanocellulose, in three levels (control, powder and gel) as a reinforcement for fiber- cement composites was investigated. Also, 6 and 7 wt% of bagasse fibers were used for composite manufacturing. Mechanical and physical properties of composites including modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), fracture toughness (FT), internal bonding strength (IB), and water absorption (WA) after 2 and 24h emersion in water were measured. Results showed that composites made with cellulose gel had higher bending strengths, internal bonding strength and fracture toughness. Combination of 7% bagasse fiber content and cellulose gel reduced water absorption of composites. In these composites, internal bonding was increased and less empty spaces remained for water penetration probably due to uniform distribution of fibers and cellulose gel within the cement matrix. XRD analysis showed that peaks corresponding to main hydration products such as CSH and calcium hydroxide had higher intensities in composites containing bacterial cellulose gel. Results obtained from freeze-thaw cycling test showed that composites containing cellulose gel had the higher internal bonding strength compared with other two composites after 20 cycles. In this study, fiber-cement composites produced from 7% bagasse fiber and bacterial cellulose gel have been selected as the optimum treatment .

**Key words:** fiber- cement composites, bacterial nanocellulose, mechanical properties, water absorption, XRD, freeze- thaw cycling.

---

\* Corresponding author: f\_mkazemi@yahoo.com