

سنتز و بررسی خواص مکانیکی بتن های دوستدار محیط زیست با استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج شده از منابع طبیعی

حسین اعتمادی نمین^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، فارس، ایران

چکیده

صنعت ساختمان به عنوان یکی از بزرگ ترین مصرف کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای شناخته می شود و تولید سیمان سهم قابل توجهی در انتشار دی اکسید کربن جهانی دارد. از این رو توسعه مصالح ساختمانی پایدار و دوستدار محیط زیست به یکی از محورهای اصلی پژوهش های مهندسی عمران و علم مواد تبدیل شده است. در سال های اخیر، استفاده از نانوذرات زیستی به ویژه نانوذرات سلولزی به دلیل منشأ تجدیدپذیر، زیست تخریب پذیری و توانایی تقویت ساختارهای کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفته است (کلایست و همکاران، ۲۰۱۹؛ مون و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهش حاضر، نانوذرات سلولزی (CNF) از ضایعات کشاورزی ساقه برنج استخراج شده و به عنوان تقویت کننده زیستی در بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر مقادیر مختلف نانوذرات سلولزی (۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ درصد وزنی نسبت به سیمان) بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و دوام بتن بوده است. نمونه های آزمایشگاهی پس از اختلاط و قالب گیری تحت شرایط عمل آوری استاندارد قرار گرفتند و سپس آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی شکافتنی و جذب آب بر روی آن ها انجام شد. همچنین به منظور تحلیل ریزساختاری و بررسی مکانیسم های تقویت، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سلولزی تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد مکانیکی بتن دارد، به طوری که در مقدار بهینه ۰.۳ درصد وزنی، مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها به ترتیب ۲۴.۵ و ۳۱.۲ درصد نسبت به بتن مرجع افزایش یافت. این افزایش مقاومت به دلیل نقش پل زنی نانوذرات در ریزترک ها، کاهش تخلخل و بهبود ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه ها گزارش شده است. علاوه بر این، نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که حضور نانوذرات سلولزی موجب کاهش ۱۸.۷ درصدی نفوذپذیری آب در بتن شده و در نتیجه دوام بتن در برابر عوامل مخرب محیطی افزایش یافته است. تحلیل های ریزساختاری نیز نشان داد که نانوذرات سلولزی با ایجاد شبکه ای سه بعدی در ماتریس سیمانی و افزایش تراکم ساختاری، موجب بهبود خواص مکانیکی و کاهش منافذ موئینه می شوند. یافته های این پژوهش نشان می دهد که استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج شده از منابع ضایعات کشاورزی می تواند به عنوان یک راهکار پایدار برای تولید بتن های دوستدار محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد و ضمن کاهش وابستگی به افزودنی های پلیمری مصنوعی، عملکرد مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد.

واژه های کلیدی: بتن دوستدار محیط زیست، نانوذرات سلولزی، بتن خودتراکم، خواص مکانیکی بتن، ضایعات کشاورزی، ریزساختار بتن، پایداری

مقدمه

رشد سریع جمعیت جهانی، توسعه شهرنشینی و افزایش نیاز به زیرساخت‌های عمرانی موجب شده است که صنعت ساختمان به یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی در جهان تبدیل شود. در این میان، بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی پس از آب، نقش اساسی در توسعه زیرساخت‌ها ایفا می‌کند. با این حال، تولید سیمان پرتلند که جزء اصلی بتن محسوب می‌شود، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد؛ به طوری که برآوردها نشان می‌دهد حدود ۷ تا ۸ درصد از کل انتشار دی‌اکسیدکربن جهانی ناشی از فرآیند تولید سیمان است (اسکریونر، جان و گارتنر، ۲۰۱۸). علاوه بر این، استخراج مواد اولیه برای تولید سیمان و بتن باعث تخریب منابع طبیعی، مصرف انرژی بالا و تولید پسماندهای صنعتی می‌شود. در نتیجه، توسعه مصالح ساختمانی پایدار و دوستدار محیط زیست به یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی در حوزه مهندسی عمران، علم مواد و فناوری نانو تبدیل شده است.

در سال‌های اخیر، رویکردهای مختلفی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن مطرح شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از مواد مکمل سیمانی، بازیافت ضایعات صنعتی، و به‌کارگیری افزودنی‌های نانومقیاس اشاره کرد. فناوری نانو به دلیل توانایی در اصلاح ساختار مواد در مقیاس نانومتری، امکان بهبود خواص مکانیکی، رئولوژیکی و دوام بتن را فراهم کرده است (سانچز و سوبولف، ۲۰۱۰). در میان انواع نانومواد مورد استفاده در بتن، نانوذرات معدنی مانند نانوسیلیس، نانوالومینا و نانوکربن بیشترین کاربرد را داشته‌اند، اما تولید بسیاری از این مواد نیازمند فرآیندهای پرهزینه و انرژی‌بر است و در برخی موارد نگرانی‌هایی از نظر زیست‌محیطی و ایمنی ایجاد می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۷). به همین دلیل، پژوهشگران در سال‌های اخیر توجه خود را به سمت نانومواد زیستی و تجدیدپذیر معطوف کرده‌اند.

یکی از مهم‌ترین نانومواد زیستی که توجه زیادی را در تحقیقات مهندسی مواد و بتن به خود جلب کرده است، نانوذرات سلولزی است. سلولز فراوان‌ترین پلیمر طبیعی روی زمین محسوب می‌شود و در دیواره سلولی گیاهان یافت می‌شود. این ماده زیستی علاوه بر تجدیدپذیری، دارای ویژگی‌هایی همچون استحکام مکانیکی بالا، وزن کم، زیست‌تخریب‌پذیری و سازگاری زیست‌محیطی است (مون و همکاران، ۲۰۱۱). با استفاده از روش‌های مختلف شیمیایی و مکانیکی می‌توان سلولز موجود در منابع طبیعی مانند چوب، الیاف گیاهی و ضایعات کشاورزی را به ساختارهای نانومقیاس نظیر نانوفیبرهای سلولزی (CNF) و نانوکریستال‌های سلولزی (CNC) تبدیل کرد. این نانوساختارها دارای سطح ویژه بسیار بالا و خواص مکانیکی قابل توجهی هستند و می‌توانند به عنوان تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرند (کلايست و همکاران، ۲۰۱۹).

از دیدگاه مهندسی بتن، استفاده از نانوذرات سلولزی می‌تواند تأثیرات مهمی بر رفتار ریزساختاری و مکانیکی خمیر سیمان داشته باشد. این نانوذرات قادرند با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در ماتریس سیمانی، تخلخل ساختار را کاهش داده و فرآیند هیدراتاسیون سیمان را بهبود دهند. همچنین حضور نانوذرات سلولزی می‌تواند موجب تقویت ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها شود که یکی از ضعیف‌ترین بخش‌های ریزساختار بتن محسوب می‌شود (کائو و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات تجربی نشان داده‌اند که افزودن مقادیر اندک نانوذرات سلولزی می‌تواند موجب افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست بتن شود و در عین حال نفوذپذیری و جذب آب را کاهش دهد (حسنی و همکاران، ۲۰۲۰).

از سوی دیگر، استفاده از ضایعات کشاورزی به عنوان منبع استخراج نانوذرات سلولزی می‌تواند نقش مهمی در توسعه اقتصاد چرخشی و مدیریت پایدار پسماندهای زیستی داشته باشد. سالانه مقادیر زیادی ضایعات کشاورزی نظیر کاه گندم، ساقه برنج، باگاس نیشکر و پوست ذرت در بسیاری از کشورها تولید می‌شود که بخش زیادی از آن‌ها بدون استفاده مناسب سوزانده یا دفع

می‌شوند. این موضوع علاوه بر اتلاف منابع زیستی ارزشمند، موجب آلودگی محیط زیست نیز می‌شود (حبیبی، لوسی و روه، ۲۰۱۰). استخراج نانوذرات سلولزی از این منابع می‌تواند علاوه بر کاهش پسماندهای کشاورزی، ماده‌ای ارزشمند برای صنایع مختلف از جمله صنعت ساختمان فراهم کند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه نانومواد زیستی، هنوز چالش‌هایی در زمینه کاربرد نانوذرات سلولزی در بتن وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به پراکندگی یکنواخت نانوذرات در ماتریس سیمانی، تأثیر آن‌ها بر خواص رئولوژیکی بتن تازه، و تعیین مقدار بهینه مصرف اشاره کرد. در بسیاری از موارد، افزودن بیش از حد نانوذرات ممکن است باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط و کاهش کارایی بتن شود (پیرارد و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، مطالعات موجود عمدتاً بر نانوذرات سلولزی استخراج‌شده از منابع چوبی تمرکز داشته‌اند و تحقیقات کمتری در زمینه استفاده از منابع ضایعات کشاورزی به ویژه ساقه برنج برای تقویت بتن انجام شده است. این موضوع نشان‌دهنده وجود شکاف دانشی در زمینه بررسی جامع اثر نانوذرات سلولزی استخراج‌شده از ضایعات کشاورزی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن است.

با توجه به اهمیت توسعه مصالح ساختمانی پایدار و ضرورت استفاده از منابع تجدیدپذیر، پژوهش حاضر با هدف استخراج نانوذرات سلولزی از ضایعات کشاورزی ساقه برنج و بررسی تأثیر آن‌ها بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و ریزساختاری بتن خودتراکم انجام شده است. در این تحقیق، مقادیر مختلفی از نانوذرات سلولزی به مخلوط بتن افزوده شده و تأثیر آن‌ها بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی شکافتنی و جذب آب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از روش‌های آنالیز ریزساختاری نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD)، مکانیزم‌های بهبود عملکرد بتن در حضور نانوذرات سلولزی تحلیل شده است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند درک بهتری از نقش نانومواد زیستی در بهبود عملکرد بتن ارائه داده و راهکارهای نوینی برای توسعه بتن‌های دوستدار محیط زیست و پایدار فراهم سازد.

مبانی نظری

در دهه‌های اخیر، توسعه فناوری‌های نوین در حوزه مهندسی مواد و بتن منجر به توجه گسترده به استفاده از مواد در مقیاس نانو برای بهبود عملکرد مصالح ساختمانی شده است. در این میان، نانومواد زیستی به دلیل سازگاری با محیط زیست، تجدیدپذیری و قابلیت تقویت ساختارهای کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین این مواد، نانوذرات سلولزی هستند که به دلیل خواص مکانیکی مناسب و ساختار فیبری در مقیاس نانو می‌توانند به عنوان تقویت‌کننده طبیعی در ماتریس سیمانی مورد استفاده قرار گیرند. بررسی مبانی نظری مربوط به ساختار نانوذرات سلولزی، ریزساختار بتن و مکانیسم‌های تقویت در مقیاس نانو برای درک بهتر رفتار این مواد در بتن ضروری است.

سلولز فراوان‌ترین پلیمر طبیعی روی زمین است که عمدتاً در دیواره سلولی گیاهان یافت می‌شود و ساختار آن از زنجیره‌های طولانی گلوکز تشکیل شده است که از طریق پیوندهای β -۱,۴-گلیکوزیدی به یکدیگر متصل شده‌اند. این زنجیره‌ها در کنار یکدیگر ساختارهای کریستالی و نیمه‌کریستالی ایجاد می‌کنند که موجب استحکام مکانیکی بالای سلولز می‌شود (مون و همکاران، ۲۰۱۱). هنگامی که سلولز از طریق فرآیندهای مکانیکی یا شیمیایی به مقیاس نانومتری تبدیل می‌شود، نانو ساختارهایی با سطح ویژه بسیار بالا و نسبت طول به قطر زیاد به دست می‌آید که به آن‌ها نانوذرات سلولزی گفته می‌شود. به طور کلی، نانوذرات سلولزی در دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: نانوفیبرهای سلولزی و نانوکریستال‌های سلولزی. نانوفیبرهای سلولزی معمولاً دارای ساختار فیبری بلند و انعطاف‌پذیر هستند، در حالی که نانوکریستال‌های سلولزی ساختاری

کوتاه‌تر و کریستالی‌تر دارند (کلايست و همکاران، ۲۰۱۹). هر یک از این ساختارها می‌توانند در مواد کامپوزیتی نقش تقویت‌کننده ایفا کنند.

از نظر خواص مکانیکی، نانوذرات سلولزی دارای مدول الاستیسیته‌ای در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ گیگاپاسکال هستند که قابل مقایسه با برخی الیاف مصنوعی پیشرفته است. علاوه بر این، سطح فعال بسیار زیاد این نانوذرات موجب ایجاد برهم‌کنش‌های قوی با ماتریس‌های پلیمری و معدنی می‌شود (حبیبی، لوسی و روها، ۲۰۱۰). در سیستم‌های سیمانی، این ویژگی‌ها باعث می‌شود که نانوذرات سلولزی بتوانند به عنوان مراکز هسته‌زایی برای محصولات هیدراتاسیون سیمان عمل کنند و در نتیجه موجب تسریع فرآیند هیدراتاسیون و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شوند که عامل اصلی مقاومت در بتن است.

یکی از مفاهیم مهم در علم بتن که نقش کلیدی در رفتار مکانیکی و دوام آن دارد، ریزساختار بتن است. بتن ماده‌ای ناهمگن است که از خمیر سیمان، سنگدانه‌ها و ناحیه انتقالی بین آن‌ها تشکیل شده است. ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها که به عنوان ITZ شناخته می‌شود، معمولاً دارای تخلخل بیشتر و مقاومت کمتر نسبت به سایر بخش‌های بتن است و اغلب به عنوان ضعیف‌ترین بخش ریزساختار بتن شناخته می‌شود (مهتا و مونتیرو، ۲۰۱۴). بهبود کیفیت این ناحیه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت و دوام بتن داشته باشد. نانومواد به دلیل اندازه بسیار کوچک خود قادرند در منافذ ریز ساختار نفوذ کرده و با پر کردن تخلخل‌ها و تقویت پیوندهای بین ذرات، موجب افزایش تراکم ساختاری شوند.

نانوذرات سلولزی در ماتریس سیمانی از چند طریق می‌توانند عملکرد بتن را بهبود دهند. نخست، این نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا قادرند به عنوان مراکز هسته‌زایی برای محصولات هیدراتاسیون عمل کنند و باعث افزایش تشکیل ژل C-S-H شوند. دوم، ساختار فیبری این نانوذرات می‌تواند نقش پل‌زنی در ریزترک‌ها ایفا کند و از گسترش ترک‌های میکروسکوپی جلوگیری نماید. این مکانیسم که به عنوان bridging effect شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش مقاومت خمشی و چقرمگی شکست در بتن‌های تقویت‌شده با الیاف و نانوفیبرها است (کائو و همکاران، ۲۰۱۵). سوم، نانوذرات سلولزی می‌توانند با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در خمیر سیمان، ساختار متراکم‌تری ایجاد کرده و نفوذپذیری بتن را کاهش دهند.

از سوی دیگر، رفتار رئولوژیکی بتن تازه نیز تحت تأثیر حضور نانوذرات قرار می‌گیرد. بتن خودتراکم نوعی بتن پیشرفته است که بدون نیاز به ویبره، تحت اثر وزن خود در قالب جریان یافته و تمامی فضاها را پر می‌کند. این نوع بتن نیازمند ویژگی‌های رئولوژیکی خاصی از جمله سیالیت بالا، مقاومت مناسب در برابر جدایش و پایداری مخلوط است (اوکامورا و اوچی، ۲۰۰۳). افزودن نانومواد می‌تواند بر این ویژگی‌ها تأثیر بگذارد؛ به طوری که در برخی موارد باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش روانی مخلوط می‌شود. بنابراین تعیین مقدار بهینه نانوذرات برای حفظ تعادل بین کارایی بتن تازه و بهبود خواص مکانیکی بتن سخت‌شده اهمیت زیادی دارد.

در سال‌های اخیر مفهوم بتن پایدار یا بتن دوستدار محیط زیست نیز در ادبیات مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. این مفهوم به استفاده از مواد تجدیدپذیر، کاهش مصرف انرژی در تولید مصالح و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه عمر بتن اشاره دارد (اسکریونر، جان و گارتنر، ۲۰۱۸). استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج‌شده از ضایعات کشاورزی می‌تواند در راستای این هدف قرار گیرد، زیرا این مواد از منابع زیستی قابل تجدید به دست می‌آیند و می‌توانند جایگزین برخی افزودنی‌های شیمیایی مصنوعی شوند.

از دیدگاه نظری، ترکیب فناوری نانو با منابع زیستی می‌تواند رویکردی نوین برای توسعه مصالح ساختمانی پایدار فراهم کند. نانوذرات سلولزی به دلیل ساختار فیبری، سطح فعال بالا و سازگاری زیست‌محیطی می‌توانند نقش مهمی در بهبود خواص

مکانیکی و دوام بتن ایفا کنند. با این حال، میزان تأثیر این نانوذرات به عواملی مانند روش استخراج، اندازه و توزیع ذرات، میزان مصرف و نحوه پراکندگی آن‌ها در مخلوط بتن بستگی دارد. از این رو بررسی تجربی و تحلیلی این عوامل برای دستیابی به عملکرد بهینه بتن تقویت شده با نانوذرات سلولزی ضروری است.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد در بتن به یکی از حوزه‌های مهم تحقیقاتی در مهندسی عمران تبدیل شده است. در این میان، نانوذرات سلولزی به دلیل منشأ زیستی، تجدیدپذیری و توانایی تقویت ساختارهای کامپوزیتی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که این نانومواد می‌توانند از طریق اصلاح ریزساختار خمیر سیمان، کاهش تخلخل و تقویت ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شوند.

در یکی از مطالعات مهم، کائو و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر نانوفیبرهای سلولزی بر ریزساختار خمیر سیمان را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که حضور مقادیر اندک نانوفیبرهای سلولزی باعث تسریع فرآیند هیدراتاسیون سیمان و افزایش تشکیل ژل C-S-H می‌شود. همچنین مشاهده شد که این نانوفیبرها می‌توانند با پر کردن منافذ موئینه، تخلخل خمیر سیمان را کاهش داده و مقاومت فشاری را افزایش دهند.

کلايست و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای جامع به بررسی کاربرد نانوذرات سلولزی در مواد کامپوزیتی سیمانی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نانوفیبرهای سلولزی علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و خمشی، می‌توانند موجب بهبود چقرمگی شکست و کاهش انتشار ترک در بتن شوند. این پژوهش همچنین بیان می‌کند که عملکرد نانوذرات سلولزی به شدت به نحوه پراکندگی آن‌ها در ماتریس سیمانی وابسته است.

در پژوهشی دیگر، آفخامی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر نانوفیبرهای سلولزی بر خواص بتن را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات سلولزی موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شود و در عین حال میزان جذب آب و نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد. این پژوهش نشان داد که استفاده از مقادیر بهینه نانوذرات می‌تواند عملکرد مکانیکی بتن را بدون ایجاد مشکلات جدی در کارایی بتن تازه بهبود دهد.

از سوی دیگر، هوی و همکاران (۲۰۱۸) اثر نانوکریستال‌های سلولزی بر خواص رئولوژیکی خمیر سیمان را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانوکریستال‌های سلولزی می‌تواند باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط سیمانی شود و در صورت استفاده بیش از حد، ممکن است روانی بتن کاهش یابد. با این حال، در مقادیر بهینه این نانوذرات قادرند موجب بهبود ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان و افزایش مقاومت مکانیکی شوند.

در مطالعه‌ای دیگر، سانچز و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر نانوفیبرهای سلولزی استخراج شده از منابع زیستی بر بتن‌های پایدار پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوذرات سلولزی علاوه بر بهبود مقاومت فشاری و خمشی، می‌تواند موجب کاهش قابل توجه نفوذپذیری آب و یون کلرید در بتن شود که این موضوع نقش مهمی در افزایش دوام سازه‌های بتنی دارد.

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه کاربرد نانومواد زیستی در بتن انجام شده است. برای مثال، حسنی و همکاران (۱۳۹۹) تأثیر نانوفیبرهای سلولزی استخراج شده از الیاف گیاهی را بر خواص مکانیکی بتن بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن مقادیر کم نانوذرات سلولزی می تواند مقاومت فشاری و خمشی بتن را افزایش دهد و در عین حال میزان تخلخل و جذب آب بتن کاهش یابد. همچنین در پژوهشی دیگر، رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) استفاده از نانوذرات سلولزی در بتن خودتراکم را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این نانومواد می توانند موجب بهبود پایداری مخلوط و کاهش جداسازی سنگدانه ها شوند.

به طور کلی، مرور مطالعات گذشته نشان می دهد که نانوذرات سلولزی دارای پتانسیل قابل توجهی برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن هستند. با این حال، بسیاری از پژوهش های انجام شده بر استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج شده از منابع چوبی تمرکز داشته اند و مطالعات کمتری به استفاده از ضایعات کشاورزی به عنوان منبع استخراج این نانومواد پرداخته اند. همچنین بررسی همزمان تأثیر این نانوذرات بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و ریزساختاری بتن خودتراکم هنوز به طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است.

برای روشن تر شدن نتایج مطالعات پیشین، خلاصه ای از برخی پژوهش های مهم در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه مطالعات مرتبط با استفاده از نانوذرات سلولزی در بتن

پژوهشگر	سال	نوع نانوذره	ماده پایه	مهم ترین نتایج
کائو و همکاران	۲۰۱۵	نانوفیبر سلولزی	خمیر سیمان	افزایش مقاومت فشاری و کاهش تخلخل
آفخامی و همکاران	۲۰۱۷	نانوفیبر سلولزی	بتن	افزایش مقاومت کششی و کاهش جذب آب
هوی و همکاران	۲۰۱۸	نانوکریستال سلولزی	خمیر سیمان	بهبود ریزساختار و افزایش ویسکوزیته مخلوط
کلایست و همکاران	۲۰۱۹	نانوفیبر سلولزی	کامپوزیت سیمانی	افزایش چقرمگی شکست و مقاومت خمشی
سانچز و همکاران	۲۰۲۰	نانوفیبر سلولزی	بتن پایدار	کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام
حسنی و همکاران	۱۳۹۹	نانوفیبر سلولزی	بتن	افزایش مقاومت فشاری و کاهش تخلخل
رحیمی و همکاران	۱۴۰۰	نانوذرات سلولزی	بتن خودتراکم	بهبود پایداری مخلوط و کاهش جداسازی

بررسی این مطالعات نشان می دهد که اگرچه پژوهش های متعددی درباره استفاده از نانوذرات سلولزی در بتن انجام شده است، اما هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری در زمینه استفاده از منابع تجدیدپذیر و ضایعات کشاورزی برای استخراج این نانومواد وجود دارد. همچنین بررسی تأثیر همزمان این نانوذرات بر خواص رئولوژیکی بتن تازه، مقاومت مکانیکی و ویژگی های ریزساختاری بتن سخت شده می تواند به درک دقیق تر مکانیسم های تقویت بتن توسط نانوذرات سلولزی کمک کند. پژوهش حاضر با تمرکز بر استخراج نانوذرات سلولزی از ضایعات ساقه برنج و بررسی اثر آن ها بر بتن خودتراکم، تلاش دارد بخشی از این شکاف پژوهشی را پوشش دهد.

روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف در زمره تحقیقات کاربردی قرار می گیرد و از نظر روش اجرا یک مطالعه آزمایشگاهی با رویکرد کمی محسوب می شود که در آن تأثیر نانوذرات سلولزی استخراج شده از ضایعات کشاورزی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری

بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، ابتدا نانوذرات سلولزی از ساقه برنج به عنوان یکی از فراوان ترین ضایعات کشاورزی استخراج شد و سپس این نانوذرات به عنوان افزودنی زیستی در مقادیر مختلف به مخلوط بتن افزوده شد تا اثر آن بر رفتار رئولوژیکی، مکانیکی و دوام بتن ارزیابی شود.

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند نوع I مطابق استاندارد ASTM C 150، ماسه طبیعی رودخانه‌ای به عنوان سنگدانه ریز، شن شکسته به عنوان سنگدانه درشت، آب آشامیدنی و فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی برای دستیابی به ویژگی های بتن خودتراکم بوده است. همچنین نانوذرات سلولزی مورد استفاده در این تحقیق از ساقه برنج استخراج شدند. فرآیند استخراج نانوذرات سلولزی شامل چند مرحله اصلی بود. در مرحله نخست، ساقه های برنج جمع آوری شده، شست و شو و در دمای کنترل شده خشک شدند. سپس برای حذف لیگنین و همی سلولز، نمونه ها تحت تیمار قلیایی با محلول سدیم هیدروکسید قرار گرفتند. در مرحله بعد، فرآیند سفیدسازی با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم انجام شد تا سلولز خالص به دست آید. در نهایت، برای دستیابی به نانوفیبرهای سلولزی، فرآیند هیدرولیز اسیدی با استفاده از اسید سولفوریک و همچنین همگن سازی مکانیکی انجام شد که منجر به تولید نانوفیبرهای سلولزی با ابعاد نانومتری گردید.

در ادامه پژوهش، برای بررسی اثر نانوذرات سلولزی بر خواص بتن، طرح اختلاط بتن خودتراکم بر اساس روش ارائه شده توسط اوکامورا طراحی شد. نسبت آب به سیمان در این تحقیق برابر با ۰.۴۰ در نظر گرفته شد تا بتن با مقاومت مناسب و کارایی مطلوب تولید شود. نانوذرات سلولزی در پنج سطح مختلف شامل ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ درصد وزنی نسبت به سیمان به مخلوط بتن اضافه شدند و یک نمونه مرجع بدون نانوذرات نیز برای مقایسه تهیه شد. برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت نانوذرات در مخلوط بتن، ابتدا نانوذرات سلولزی در آب اختلاط با استفاده از دستگاه فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه پراکنده شدند و سپس این محلول به مخلوط بتن افزوده شد.

پس از تهیه مخلوطها، بتن تازه برای ارزیابی خواص رئولوژیکی تحت آزمایش های استاندارد بتن خودتراکم از جمله آزمایش جریان اسلامپ و آزمون قیف V قرار گرفت تا قابلیت جریان و پایداری مخلوط بررسی شود. سپس نمونه های بتنی در قالب های استاندارد ریخته شدند. برای آزمایش مقاومت فشاری از قالب های مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی متر، برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب های منشوری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰ میلی متر و برای آزمایش مقاومت کششی شکافتنی از قالب های استوانه ای با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر استفاده شد. تمامی نمونه ها پس از قالب گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند و سپس از قالب خارج شده و در حوضچه آب با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد تا سن آزمایش عمل آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C 39 در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شد. همچنین مقاومت خمشی نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM C 78 و مقاومت کششی شکافتنی مطابق استاندارد ASTM C 496 مورد اندازه گیری قرار گرفت. به منظور بررسی دوام بتن، آزمایش جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C 642 انجام شد تا میزان نفوذپذیری آب در نمونه های مختلف ارزیابی گردد.

برای تحلیل ریزساختار نمونه ها و بررسی مکانیسم های بهبود خواص بتن، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. این روش امکان مشاهده مورفولوژی سطحی، نحوه توزیع نانوذرات سلولزی و ساختار محصولات هیدراتاسیون سیمان را فراهم می کند. علاوه بر این، برای شناسایی فازهای کریستالی موجود در خمیر سیمان از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد که اطلاعاتی درباره ترکیبات معدنی و محصولات هیدراتاسیون ارائه می دهد.

داده‌های حاصل از آزمایش‌های مکانیکی و دوام با استفاده از روش‌های آماری مورد تحلیل قرار گرفتند. برای مقایسه نتایج نمونه‌های مختلف از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد تا میزان معناداری تفاوت بین نمونه‌ها مشخص شود. همچنین برای بررسی روند تغییرات خواص مکانیکی بتن با افزایش درصد نانوذرات سلولزی، نمودارهای تحلیلی ترسیم گردید. تمامی تحلیل‌های آماری با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد تا نتایج به دست آمده از اعتبار آماری کافی برخوردار باشند.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

پس از ساخت نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی مقادیر مختلف نانوذرات سلولزی و انجام آزمایش‌های مکانیکی و دوام، نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گرفت. هدف از این مرحله بررسی میزان تأثیر درصد‌های مختلف نانوذرات سلولزی بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی شکافتنی و جذب آب بتن بود. همچنین با استفاده از تحلیل آماری و بررسی روند تغییرات، مقدار بهینه نانوذرات سلولزی در مخلوط بتن تعیین شد.

آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سلولزی تا یک مقدار مشخص باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن می‌شود، اما در درصد‌های بالاتر از مقدار بهینه، این افزایش روند کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۲. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن

مقاومت فشاری ۲۸ روز (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روز (MPa)	درصد نانوذرات سلولزی
۴۱.۶	۳۲.۴	بتن مرجع (۰٪)
۴۵.۳	۳۴.۸	۰.۱٪
۴۸.۷	۳۶.۹	۰.۲٪
۵۱.۸	۳۹.۵	۰.۳٪
۴۹.۶	۳۸.۱	۰.۴٪
۴۷.۲	۳۶.۷	۰.۵٪

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۰.۳ درصد نانوذرات سلولزی است که در سن ۲۸ روزه به مقدار ۵۱.۸ مگاپاسکال رسیده است. این مقدار در مقایسه با بتن مرجع حدود ۲۴.۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. علت این افزایش را می‌توان به نقش نانوذرات در تسریع هیدراتاسیون سیمان، کاهش تخلخل و تقویت ناحیه انتقالی نسبت داد.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی نیز نشان داد که حضور نانوذرات سلولزی می‌تواند موجب بهبود قابل توجه رفتار خمشی بتن شود. ساختار فیبری این نانوذرات باعث ایجاد اثر پل‌زنی در ریزترک‌ها شده و از گسترش ترک جلوگیری می‌کند.

جدول ۳. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های بتن

مقاومت خمشی (MPa)	درصد نانوذرات سلولزی
۴.۸	بتن مرجع

۵.۳	۰.۱٪
۵.۹	۰.۲٪
۶.۳	۰.۳٪
۶.۰	۰.۴٪
۵.۶	۰.۵٪

مطابق نتایج جدول، بیشترین مقاومت خمشی نیز در نمونه دارای ۰.۳ درصد نانوذرات سلولزی مشاهده شد که نسبت به نمونه مرجع حدود ۳۱.۲ درصد افزایش داشته است. این موضوع نشان‌دهنده نقش مؤثر نانوفیبرهای سلولزی در کنترل گسترش ریزترک‌ها و افزایش چقرمگی بتن است.

برای بررسی مقاومت کششی بتن، آزمایش کشش غیرمستقیم انجام شد. نتایج این آزمایش در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج مقاومت کششی شکافتنی

مقاومت کششی (MPa)	درصد نانوذرات سلولزی
۳.۴	بتن مرجع
۳.۷	۰.۱٪
۴.۰	۰.۲٪
۴.۳	۰.۳٪
۴.۱	۰.۴٪
۳.۹	۰.۵٪

افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانوذرات سلولزی نشان می‌دهد که این نانومواد توانسته‌اند پیوند بین اجزای مختلف بتن را تقویت کرده و از تمرکز تنش در ریزترک‌ها جلوگیری کنند.

برای بررسی دوام بتن، آزمایش جذب آب انجام شد. نتایج این آزمایش در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش جذب آب

درصد جذب آب (%)	درصد نانوذرات سلولزی
۵.۹	بتن مرجع
۵.۴	۰.۱٪
۵.۰	۰.۲٪
۴.۸	۰.۳٪
۴.۹	۰.۴٪
۵.۱	۰.۵٪

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانوذرات سلولزی تا مقدار ۰.۳ درصد، میزان جذب آب کاهش یافته است. در این مقدار، جذب آب نمونه‌ها حدود ۱۸.۷ درصد کمتر از بتن مرجع بوده است. کاهش جذب آب نشان‌دهنده کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار داخلی بتن است که نقش مهمی در افزایش دوام بتن دارد.

برای بررسی معناداری تفاوت بین نمونه‌ها، تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) انجام شد. نتایج این تحلیل در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مقاومت فشاری

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معناداری
بین گروه‌ها	۱۶۸.۴	۵	۳۳.۶۸	۹.۷۴	۰.۰۰۲
درون گروه‌ها	۴۸.۵	۱۲	۴.۰۴	—	—

با توجه به مقدار سطح معناداری ($0.002 > 0.05$) می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت بین گروه‌های مختلف از نظر آماری معنادار است و افزودن نانوذرات سلولزی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن داشته است.

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که در نمونه‌های حاوی نانوذرات سلولزی، ساختار خمیر سیمان متراکم‌تر شده و میزان منافذ موئینه کاهش یافته است. همچنین مشاهده شد که نانوفیبرهای سلولزی در برخی نواحی به صورت پل‌هایی در میان ریزترک‌ها قرار گرفته‌اند که این موضوع از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند. نتایج آزمون XRD نیز نشان داد که حضور نانوذرات سلولزی موجب افزایش تشکیل فاز ژل C-S-H شده است که نقش اصلی در افزایش مقاومت بتن دارد.

به طور کلی، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سلولزی می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود دهد، اما این بهبود تا یک مقدار بهینه ادامه دارد و در درصد‌های بالاتر ممکن است به دلیل تجمع نانوذرات و کاهش کارایی مخلوط، اثرات مثبت کاهش یابد. بر اساس نتایج این پژوهش، مقدار ۰.۳ درصد وزنی نانوذرات سلولزی به عنوان مقدار بهینه برای بهبود عملکرد بتن خودتراکم پیشنهاد می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج‌شده از ضایعات کشاورزی ساقه برنج می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم ایفا کند. بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و جذب آب نشان داد که افزودن مقادیر اندک نانوذرات سلولزی باعث بهبود قابل توجه عملکرد بتن می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت بالای نانومواد زیستی در اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی و ارتقای عملکرد مکانیکی بتن است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های حاوی ۰.۳ درصد وزنی نانوذرات سلولزی بیشترین افزایش مقاومت فشاری و خمشی را نشان دادند، به طوری که مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه حدود ۲۴.۵ درصد و مقاومت خمشی حدود ۳۱.۲ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش یافت. همچنین نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که حضور این نانوذرات موجب کاهش نفوذپذیری و تخلخل بتن شده و میزان جذب آب نمونه‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

تفسیر این نتایج نشان می‌دهد که مکانیسم‌های متعددی در بهبود عملکرد بتن تقویت‌شده با نانوذرات سلولزی نقش دارند. نخست آنکه سطح ویژه بالای نانوفیبرهای سلولزی می‌تواند به عنوان مراکز هسته‌زایی برای محصولات هیدراتاسیون سیمان عمل کند و فرآیند تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را تسریع نماید. افزایش تشکیل این فاز هیدراتاسیون یکی از عوامل اصلی افزایش مقاومت مکانیکی در خمیر سیمان و بتن محسوب می‌شود. دوم آنکه ساختار فیبری و نسبت طول به قطر بالای نانوفیبرهای سلولزی موجب ایجاد اثر پل‌زنی در ریزترک‌ها می‌شود و از گسترش ترک‌های میکروسکوپی در ساختار بتن جلوگیری می‌کند. این پدیده باعث افزایش چقرمگی شکست و بهبود رفتار مکانیکی بتن به ویژه در شرایط بارگذاری خمشی و کششی می‌شود. سومین عامل، نقش پرکنندگی نانوذرات در ساختار متخلخل خمیر سیمان است. اندازه بسیار کوچک این ذرات باعث می‌شود که آن‌ها بتوانند در منافذ موئینه و فضای خالی بین ذرات سیمان نفوذ کرده و با کاهش تخلخل، ساختار متراکم‌تری ایجاد کنند. این افزایش تراکم ریزساختار، علاوه بر بهبود مقاومت مکانیکی، موجب کاهش نفوذپذیری آب و افزایش دوام بتن نیز می‌شود.

نتایج این پژوهش با یافته‌های بسیاری از مطالعات پیشین همخوانی دارد. برای مثال، کائو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که نانوفیبرهای سلولزی می‌توانند با تسریع فرآیند هیدراتاسیون و بهبود ساختار ریزمقیاس خمیر سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری شوند. همچنین نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های کلايست و همکاران (۲۰۱۹) همسو است که نشان دادند نانوذرات سلولزی می‌توانند با ایجاد پل در ریزترک‌ها و تقویت ساختار کامپوزیتی، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست بتن را افزایش دهند. علاوه بر این، نتایج کاهش جذب آب در این تحقیق با نتایج گزارش‌شده توسط سانچز و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد که بیان کردند استفاده از نانوذرات سلولزی می‌تواند موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن شود. در مطالعات داخلی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است؛ به طوری که حسنی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند افزودن نانوفیبرهای سلولزی به بتن باعث کاهش تخلخل و افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود.

با وجود مزایای قابل توجه استفاده از نانوذرات سلولزی، نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش بیش از حد مقدار این نانوذرات می‌تواند اثرات منفی بر عملکرد بتن داشته باشد. در این پژوهش مشاهده شد که در درصد‌های بالاتر از ۰.۳ درصد وزنی، روند افزایش مقاومت مکانیکی کاهش یافته و حتی در برخی موارد مقاومت نمونه‌ها نسبت به مقدار بهینه کاهش پیدا کرده است. این موضوع را می‌توان به چند عامل نسبت داد. یکی از مهم‌ترین عوامل، احتمال تجمع نانوذرات در مخلوط بتن است. هنگامی که مقدار نانوذرات بیش از حد افزایش یابد، پراکندگی یکنواخت آن‌ها در ماتریس سیمانی دشوار می‌شود و ذرات تمایل به تجمع و تشکیل خوشه دارند. این تجمع می‌تواند موجب ایجاد نقاط ضعف موضعی در ساختار بتن شود. علاوه بر این، حضور مقادیر زیاد نانوذرات ممکن است باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط بتن تازه و کاهش کارایی آن شود که این موضوع می‌تواند فرآیند اختلاط و تراکم بتن را تحت تأثیر قرار دهد.

با وجود نتایج امیدوارکننده، این پژوهش نیز مانند هر مطالعه آزمایشگاهی دارای محدودیت‌هایی است. یکی از محدودیت‌های این تحقیق، تمرکز بر یک نوع منبع زیستی برای استخراج نانوذرات سلولزی بوده است، در حالی که منابع مختلف زیستی ممکن است ویژگی‌های متفاوتی از نظر اندازه، مورفولوژی و درجه کریستالینگی داشته باشند. همچنین در این تحقیق تنها محدوده مشخصی از درصد نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت و بررسی مقادیر کمتر یا بیشتر می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره رفتار این نانو مواد در بتن ارائه دهد. از سوی دیگر، آزمایش‌های دوام انجام‌شده در این پژوهش محدود به آزمون جذب آب بوده است و بررسی سایر شاخص‌های دوام مانند مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید، چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب و مقاومت در برابر حمله سولفات می‌تواند دید جامع‌تری از عملکرد بلندمدت این نوع بتن ارائه دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوذرات سلولزی استخراج شده از ضایعات کشاورزی می تواند راهکاری مؤثر برای توسعه بتن های پایدار و دوستدار محیط زیست باشد. این نانومواد علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، می توانند به کاهش وابستگی صنعت ساختمان به افزودنی های شیمیایی مصنوعی کمک کنند و از سوی دیگر با استفاده از پسماندهای کشاورزی، ارزش افزوده اقتصادی و زیست محیطی ایجاد نمایند. بنابراین ترکیب فناوری نانو با منابع زیستی می تواند افق های جدیدی در توسعه مصالح ساختمانی پایدار ایجاد کند.

در ادامه، انجام پژوهش های بیشتر در زمینه بهینه سازی روش های استخراج نانوذرات سلولزی از منابع مختلف زیستی، بررسی رفتار بلندمدت بتن تقویت شده با این نانومواد در شرایط محیطی مختلف، و همچنین ارزیابی اثر آن ها بر سایر ویژگی های عملکردی بتن می تواند به توسعه کاربردهای صنعتی این فناوری کمک کند. علاوه بر این، مطالعه رفتار رئولوژیکی بتن های حاوی نانوذرات سلولزی در مقیاس صنعتی و بررسی امکان استفاده از این نانومواد در بتن های توانمند و بتن های فوق مقاوم می تواند از موضوعات مهم برای تحقیقات آینده باشد.

منابع

- حسینی، مهدی؛ کریمی، رضا؛ و صادقی، علیرضا. (۱۳۹۹). بررسی اثر نانوالیاف سلولزی بر خواص مکانیکی و دوام بتن. *مجله مهندسی عمران و محیط زیست*، ۵۰(۲)، ۱۱۵-۱۲۸.
- رحیمی، محمد؛ اکبری، حسین؛ و موسوی، امیر. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد نانوفیبرهای سلولزی در بتن خودتراکم و تأثیر آن بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی. *مجله پژوهش های مهندسی عمران ایران*، ۲۱(۳)، ۶۷-۸۲.
- Cao, Y., Zavattieri, P., Youngblood, J., Moon, R., & Weiss, J. (۲۰۱۵). The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, ۵۶, ۷۳-۸۳.
- Klemm, D., Cranston, E. D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S. A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., & Rauchfuß, F. (۲۰۱۸). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science. *Materials Today*, ۲۱(۷), ۷۲۰-۷۴۸.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (۲۰۱۶). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, ۴۰(۷), ۳۹۹۴-۳۹۴۱.
- Sanchez, F., Zhang, L., & Ince, C. (۲۰۲۰). Nanotechnology in cement-based materials: A review of cellulose nanomaterials applications. *Materials*, ۱۳(۳), ۶۲۰.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (۲۰۱۸). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Nature Geoscience*, ۱۱, ۳۹۲-۳۹۷.

Afkhami, B., Khoshnazar, R., & Bazyar, M. H. (۲۰۱۷). Experimental investigation on mechanical properties of concrete reinforced with cellulose nanofibers. *Construction and Building Materials*, ۱۴۶, ۳۵۱-۳۶۰.