ارزیابی خصوصیات مکانیکی کانال‌های انتقال آب ساخته شده از بتن حاوی نانوپوزولان خاکستر غلاف گندم

جهانگیر عابدی کوپایی[۱*]، سید سعید اسلامیان[۱]، سید علیرضا گوهری[۲] و رضا خدادادی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۴)

چکیده

پوشش کانال‌ها با هدف افزایش مقاومت دیواره‌های خاکی آنها در مقابل آب شستگی، کاهش نفوذ و سایرتلفات آب به منظور افزایش راندمان انتقال یک امر ضروری است. از آنجایی که ارزان‌ترین پوشش‌ها نیز هزینه قابل توجهی در بردارند، انتخاب نوع پوشش باید با دقت زیادی صورت گیرد و ضمن انتخاب مناسب‌ترین پوشش، باید در جهت کاهش هزینه‌ها با حفظ مشخصات و خصوصیات مهندسی تلاش شود. یکی از پوشش‌های معمول کانال‌های انتقال آب پوشش بتنی است. این پوشش به واسطه عمر متوسط بالا (در حدود ۴۰ سال) و هزینه نگهداری پائین، از بهترین نوع پوشش‌ها به شمار می‌رود. ولی در عوض هزینه اجرای آن گران بوده و سرمایه اولیه زیادی را لازم دارد. در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان روی انواع پوزولان‌ها و نیز دوام بتن‌های ساخته شده از پوزولان‌های مصنوعی در حال بررسی است. با توجه به سطح زیاد کشت گندم در کشور، پوزولان مورد استفاده در این تحقیق نانو (از اجزای واحد طول و مقدار آن 10^{-9} متر است) ذرات خاکستر غلاف گندم است. در این مطالعه خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده از نانو ذرات خاکستر غلاف (پوسته سلولزی دانه گندم است) گندم مورد بحث و بررسی قرار گرفت، خصوصیات مورد بررسی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام نمونه‌های بتنی در مقیاس آزمایشگاهی است. نتایج حاصل نشان داد که مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن با ۲۰ درصد وزنی جایگزینی سیمان با نانو پوزولان خاکستر غلاف گندم، تفاوت معنی‌داری، از نظر آماری با بتن کنترل (بتن فاقد جایگزینی پوزولان) نداشته است ($P<0/05$). درصد بهینه جایگزینی نانو پوزولان،۲۰ درصد وزنی سیمان بوده است. هم‌چنین نتایج دوام نمونه‌های بتنی نشان داد که بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر غلاف گندم جایگزینی، دارای دوام بیشتری نسبت به بتن کنترل در محیط سولفات منیزیم است. خاکستر غلاف گندم با داشتن ۹۰/۵۶ درصد اکسید سیلیسیوم، فعالیت پوزولانی قابل ملاحظه و قابلیت انجام واکنش‌های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم، سبب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت در بتن شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن، پوزولان، خاکستر غلاف گندم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نانو ذرات

۱. به ترتیب دانشیاران مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. عضو هیئت علمی گروه سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر در اقصی نقاط جهان موفقیت‌هایی در عرضه آب به صورت حجم زیاد قابل دستیابی برای کشاورزان به وجود آمده است که منجر به تمایل کشاورزان به بهره‌گیری از این آب، برای تولید محصولاتی که به آب بیشتر نیاز دارند و یا از نظر اقتصادی با ارزش‌ترند، گردیده است. علیرغم این جهش‌ها و اختصاص سرمایه‌های کلان به توسعه منابع آب، عملکرد شبکه‌های آبیاری در طولانی مدت کمتر از حد انتظار است. بنابراین پوشش کانال‌ها با هدف افزایش مقاومت دیواره‌های خاکی آنها در مقابل آب شستگی، کاهش نفوذ و تلفات دیگر آب به منظور افزایش راندمان انتقال یک امر ضروری است (۱). از آن جایی که ارزان‌ترین پوشش‌ها نیز هزینه قابل توجهی در بردارند بنابراین انتخاب نوع پوشش باید با دقت زیادی صورت گیرد و ضمن انتخاب مناسب‌ترین پوشش، باید در جهت کاهش هزینه با حفظ مشخصات و خصوصیات مهندسی تلاش شود. به عبارتی تا حد امکان پوشش طوری انتخاب شود که ارزان، بادوام و دارای حداقل نفوذپذیری بوده و نگهداری آن ساده و به راحتی نیز قابل دسترس باشد. یکی از پوشش‌های معمول کانال‌ها پوشش بتنی است (۲ و۴).

سالیان متمادی است که بتن به عنوان یکی از مصالح مصرفی ساخت بشر، جایگاه ویژه‌ای در بین مهندسین پیدا کرده است. در طول این سال‌ها عوامل گوناگونی در مورد بتن بررسی شده است. از جمله این عوامل می‌توان به اهمیت دوام بتن، اشاره کرد که نقش مهم و مؤثری در طول عمر سازه‌های بتنی دارد. رشد روزافزون جمعیت در دنیا و هم‌چنین افزایش نیازهای مختلف انسان سبب شده است که همه روزه به میزان تولید ضایعات اعم از صنعتی یا کشاورزی در دنیا افزوده شده و تجمع این مواد در محیط زیست سبب آلودگی آن شود. هر چند بهترین راه حل برای کاهش آلودگی سعی در کاهش میزان تولید ضایعات است بوده استفاده از ضایعات در صنعت نیز راه حل عملی است که در کشور ما به تحقیق و تجربه نیاز دارد.

یکی از قدم‌های مؤثر در این راستا استفاده از مواد پوزولانی به صورت طبیعی و مصنوعی در صنعت بتن است. استفاده از این مواد عنوان جایگزین درصدی از سیمان در درصدهای مختلف نه تنها بهای تمام شده بتن را تقلیل می‌دهد، بلکه دوام بتن را در محیط‌های مخرب افزون می‌سازد. تغییر در روانی بتن و تحول در رفتار پلاستیکی و هیدراتاسیون سیمان از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی است که یک پوزولان در بتن به وجود می‌آورد. هم‌چنین مقاومت و نفوذپذیری بتن‌های سخت شده، مقاومت در مقابل ترک‌های حرارتی، مقاومت در مقابل اثر سولفات‌ها و انبساط در اثر پدیده ترکیب اکسیدهای قلیایی و مواد سنگی، از جمله خواصی است که غالباً در بتن ساخته شده از سیمان‌های پوزولانی مشاهده می‌شود (۶).

استاندارد ASTM-C68، پوزولان را به این صورت تعریف نموده است: ماده سیلیسی یا ماده سیلیسی‌آلومینیومی که خود به تنهایی ارزش سیمانی شدن نداشته یا ارزش کمی دارد. اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت و هیدروکسید کلسیم در درجه حرارت معمولی از خود واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی با خاصیت سیمانی شدن به وجود می‌آورد (۱۳). پوزولان‌ها بر اساس منشاء تولید به دو دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند:

الف) پوزولان‌های طبیعی، شامل خاکسترهای دیاتومه، اپالین، چرت، شیل‌ها، توف‌ها و خاکسترهای آتشفشانی.

ب) پوزولان‌های مصنوعی یا صنعتی، که منبع اصلی آنها تأسیسات تولید انرژی است که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. هم‌چنین کوره‌های ذوب فلزات تولید شمش آهن، فولاد، مس، نیکل، سرب، سیلیس و آلیاژهای آهن و سیلیس نیز از منبع اصلی مواد صنعتی و مصنوعی به شمار می‌روند. خاکستر پوسته شلتوک.برنج و غلاف گندم نیز جزء پوزولان‌های مصنوعی به شمار می‌آیند (۲۲).

به طور کلی پوزولان با آهک، که محصولات واکنش که عمدتاً

شامل هیدرات‌های سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم هستند واکنش می‌دهد. به بیان دیگر، آهک می‌تواند به طور مستقیم به صورت مخلوط آهک و پوزولان یا این‌که به عنوان محصول فرعی هیدراتاسیون سیمان پرتلند باشد. برای مخلوط‌های آهک و پوزولان، وجود پوزولان خواص هیدرولیکی متمایزی به مخلوط می‌دهد، زمان گیرش را تقلیل و مقاومت را افزایش داده و به مقدار قابل توجهی دوام آن را بهبود می‌بخشد. بخش ریزدانه این مواد به دلیل زیاد بودن سطح مخصوص که انجام واکنش‌ها را تسهیل می‌نماید، بسیار فعال است. هرچه درصد بخش درشت دانه بیشتر شود، سطح آنها نسبت به حجم کاهش یافته و قابلیت واکنش سریع کاهش می‌یابد به طوری که سرعت واکنش دانه‌های با قطر بیشتر، عملاً در مراحل اولیه قابل ملاحظه نبوده و احتمال دارد که واکنش آنها در مدت زمان آبگیری و تشکیل بلورهای سیمانی کامل نشود و این دانه‌ها در خمیر سیمان محصور شده و قابلیت واکنش‌زایی خود را حفظ نمایند (۸). با کاهش یافتن اندازه ذرات در مقیاس نانو، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش یافته و آثار سطحی قوی‌تر می‌شوند. در نتیجه می‌توان گفت که واکنش‌پذیری مواد در ابعاد نانو بسیار افزایش می‌یابد که سبب بهبود خواص افزودنی‌های پوزولانی در صنعت بتن می‌شود. از طرف دیگر ذرات نانو می‌توانند بر واکنش‌های محیط نیز مؤثر باشند. با توجه به این‌که فرآیندهای کاتالیستی عموماً در سطح مواد کاتالیزوری انجام می‌شود، با کاهش ابعاد ذرات تا اندازه نانو، سطح مخصوص و همین طور نیروهای سطحی افزایش می‌یابد و بنابراین کاتالیزورهای نانو ذره‌ای، نسبت به مواد میکروساختار، خواص بهتری خواهند داشت. به طور کلی نانو ذرات، از یک سو نقش پرکنندگی حفرات بسیار ریز در خمیر سیمان (به خصوص در ناحیه انتقالی سنگدانه‌ها و خمیر سیمان) را داشته و از سوی دیگر م توانند تغییراتی را در فرآیند هیدراتاسیون در خمیر سیمان ایجاد نمایند (۲۰).

در حال حاضر تحقیقات زیادی در جهت بررسی خواص نانو سیمان‌ها در حال انجام است. مهم‌ترین عامل در کنترل خواص نانو سیمان‌ها، علاوه بر خواص نانو ذرات، اختلاط مناسب نانو ذرات و سیمان می‌باشد. یکی از شناخته شده‌ترین نانو ذرات مورد استفاده در فناوری بتن، نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم یا نانوسیلیکا یا نانو سیلیس آمورف است (۱۶). نانو سیلیس به دلیل دارا بودن سیلیس بی شکل (بیش از ۹۹ درصد) و اندازه ذرات بسیار کوچک‌تر نسبت به میکرو سیلیس (بین ۱ تا ۵۰ نانومتر)، دارای عملکرد بسیار بهتری بوده و مقدار بسیار کمتری از این نانو ماده تأثیر پوزولانی مورد نظر را در مقایسه با مقدار بالای استفاده از میکرو سیلیس داراست. با توجه به کند بودن روند کسب مقاومت سنین کوتاه مدت بتن‌های حاوی پوزلان‌های معدنی، استفاده از نانوسیلیس به همراه پوزولان‌های طبیعی، می‌تواند مشکلات مربوط به طولانی بودن دوره کسب مقاومت این بتن‌ها را برطرف کند. در جریان هیدراتاسیون سیمان پرتلند، بخش زیادی از فعالیت پوزولانی نانو سیلیکا باعث تبدیل کریستال‌های هیدروکسید کلسیم (که از هیدراتاسیون سیمان به وجود می‌آید) به ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده و به این ترتیب در فرآیند هیدراتاسیون در خمیر سیمان تغییر ایجاد می‌نمایند (۱۰).

تاو (۲۱) در سال ۲۰۰۵ به بررسی میزان نفوذپذیری ساختارهای بتنی ترکیب شده با نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن حاوی نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم دارای مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن شاهد است. تحقیقات انجام شده توسط بیونگ وان (۱۴) در سال ۲۰۰۷ نشان داده است که مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه سیمان‌های حاوی نانوسیلیس بیشتر از سیمان‌های حاوی میکرو سیلیس است. علاوه بر این، آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی و باقی‌مانده مقدار $Ca(OH)_2$ و سرعت تغییرات حرارتی، نشان‌دهنده افزایش واکنش‌پذیری سیمان‌های حاوی نانوسیلیس است.

استفاده از مواد افزودنی در طرح اختلاط بتن، جهت بهبود خواص بتن یک امر متداول است، ولی باید به این نکته توجه

داشت که در استفاده از مواد افزودنی، یکی از مهم‌ترین پارامترها، اقتصادی بودن بتن ساخته شده با مواد افزودنی مورد نظر است. به همین منظور استفاده از زایده‌های محصولات کشاورزی در امر ساختمان برای سال‌های زیادی مورد مطالعه بوده است. بسیاری از زایده‌های محصولات کشاورزی مواد زائدی نبوده و می‌توان آنها را به مصرف سوخت و یا خوراک دامی رساند. زایده‌های کشاورزی متشکل از مواد آلی مانند، سلولز، لیگنین، الیاف و مقدار کمی پروتئین خام و چربی بوده و هم‌چنین دارای مواد معدنی مانند سیلیس، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن می‌باشند. این زایده‌ها به صورتی که هستند نمی‌توانند به عنوان مواد جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گیرند بلکه باید خاکستر به دست آمده از سوزاندن این مواد به کار گرفته شود(۵ و ۱۵).

در مرحله سوزاندن دو عامل مهم وجود دارد که یکی مقدار خاکستر تولید شده و دیگری مواد تشکیل دهنده خاکستر است. مقدار خاکستر از این جهت مهم است که مقدار زایده‌های مصرفی که باید سوزانده شود، قسمت عمده‌ای از ترکیبات تشکیل‌دهنده آن خاکستر را اکسید سیلسیم تشکیل دهد که با آهک واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدارته تولید نماید که دارای خاصیت سیمانی است. جدول ۱ مقدار خاکستر و اکسید سیلسیم موجود در بعضی از محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد. پوسته شلتوک برنج یکی از موادی است که اگر تحت شرایط کنترل شده سوزانده شود، خاکستر حاصل دارای خواص پوزولانی بسیار بالایی است. حاجتی مدارایی و صدر ممتاز مطالعاتی را روی استفاده از خاکستر پوسته شلتوک در تولید بتن سبک انجام داده‌اند (۳). بررسی عابدی کوپایی روی تأثیر استفاده از نانو ذرات خاکستر پوسته شلتوک برنج در بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سازه‌های آبی نشان داد که، استفاده از این نانو ذرات تا ۵۰ درصد میزان نفوذپذیری و تلفات نشت آب را کاهش داده و موجب بالا رفتن راندمان انتقال آب می‌شود (۷). تحقیقات مرشدی و احمدی مقدم نشان داد که مهم‌ترین ویژگی خاکستر پوسته برنج، نوع سیلیس بی شکل موجود و سطح ویژه بالای آن است، در نتیجه از آن می‌توان به عنوان افزودنی پوزولانی به عنوان جایگزین سیمان در بتن برای بالا بردن مقاومت بتن در سازه‌های در مجاورت آب دریا که دارای املاح گوناگون است و سبب پوکی بتن می‌شود، و سایر محیط‌های خورنده استفاده نمود (۱۰). نتایج تحقیقات مدندوست و همکاران نشان داد که اگرچه جایگزینی نسبی خاکستر پوسته برنج باعث کاهش مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته در سنین اولیه در مقایسه با بتن معمولی می‌شود، لیکن در سنین بالاتر از ۹۰ روز مقادیر فوق افزایش یافته به طوری‌که از بتن معمولی فراتر می‌رود. هم‌چنین به کارگیری خاکستر پوسته برنج باعث افزایش پیوستگی و کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش کیفیت بتن در هنگام بتن‌ریزی در مقایسه با بتن معمولی می‌گردد (۹).

گندم از مهم‌ترین غلات است. این گیاه در دو گونه دیمی و آبی موجود است. گندم گیاهی یک ساله و از خانواده گرامینه (گندمیان) است. شرایط ایدآل برای رشد این گیاه، آب و هوای خنک در دوره رشد رویشی، آب و هوای معتدل در دوره تشکیل دانه و آب و هوای گرم و خشک در زمان برداشت محصول است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود خاکستر غلاف گندم بعد از خاکستر پوسته شلتوک، دارای بیشترین درصد اکسید سیلیسیم است که نمایانگر پتانسیل بالای این ماده برای استفاده در صنعت بتن است. در صورتی که غلاف گندم تحت شرایط کنترل شده سوزانده شود، خاکستر حاصل به واسطه داشتن ۹۰/۵۶ درصد اکسید سیلیسیم دارای خواص پوزولانی بسیار مناسب جهت استفاده در مخلوط آهک- پوزولان و جایگزینی مناسب برای سیمان خواهد بود. با توجه به اهداف استفاده از فناوری نانو در بخش کشاورزی در سال‌های اخیر نیاز به روشی با قیمت بسیار مناسب، سادگی در تولید و قابلیت تولید انبوه می‌باشد که از این جهت روش آسیاب گلوله‌ای نسبت به سایر روش‌ها دارای برتری است. در این روش مواد خام به همراه گلوله و مواد کنترل

جدول ۱. مقدار خاکستر و اکسید سیلیسیم محصولات مختلف(۵)

گیاه	قسمت مورد نظر از گیاه	خاکستر(٪)	اکسید سیلیسیم (٪)
ذرت خوشه ای	غلاف بیرون برگ	۱۲/۵۵	۸۸/۷۰
گندم	غلاف	۱۰/۴۸	۹۰/۵۶
ذرت	برگ پهن	۱۲/۱۵	۶۴/۳۲
آفتابگردان	برگ و ریشه	۱۱/۵۳	۲۵/۳۲
پوسته برنج	----	۲۲/۱۵	۹۳/۰۰
پوشال برنج	----	۱۴/۶۵	۸۲/۰۰
نی (خیزران)	داخل گره ها	۱/۴۹	۵۷/۴۰
تفاله نیشکر	----	۱۴/۷۱	۷۳/۰۰
شاه پسند	برگ و ریشه	۱۱/۲۴	۲۳/۲۸
آفتابگردان	برگ و ریشه	۱۱/۵۳	۲۵/۳۲

فرآیند، داخل محفظه آسیاب ریخته می‌شود. در اثر چرخش محفظه آسیاب، گلوله‌ها به مواد خام برخورد کرده که منجر به آسیاب شدن و خردتر شدن مواد خام می‌شود. آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای یکی از انواع آسیاب‌های متداول در آلیاژ سازی مکانیکی و تولید نانو ذرات است که قابلیت تولید حداکثر چند صد گرم پودر را در هر بار آسیاب دارد. این نوع آسیاب شامل دو تا چهار محفظه است که روی یک دیسک نصب شده‌اند. محفظه‌ها حول محور عمودی خود دوران می‌کنند و بطور همزمان دیسک نگهدارنده محفظه‌ها نیز در جهت مخالف با چرخش محفظه‌ها دوران دارد. به این ترتیب محفظه دو نوع حرکت چرخشی خواهد داشت که در نتیجه گلوله‌های داخل محفظه آسیاب تا مسافتی به جداره داخلی آن چسبیده و در نقطه‌ای معین از جداره جدا شده و به سمت مقابل برخورد می‌کنند و باعث آسیاب نمودن ماده مورد نظر می‌شوند.

به طور کلی اهداف مطالعه حاضر بررسی خصوصیات مکانیکی مانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن ساخته شده با ترکیبی از نانو ذرات خاکستر غلاف گندم با بتن معمولی در محیط آب و بررسی دوام این بتن در محیط سولفات منیزیم است.

مواد و روش‌ها

برای اجرای این تحقیق پس از تهیه مصالح و تعیین مشخصات مورد نیاز برای بتن ساخته شده، طرح اختلاط بتن را به روش آیین‌نامه ACI 211 و با در نظر گرفتن ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی به دست آورده و براساس طرح اختلاط مورد نظر، نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد. برای بررسی خصوصیات مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی، سه تیمار بتن مورد آزمایش قرار گرفت. بتن یکی از تیمارها بدون پوزولان، به عنوان بتن کنترل و بتن دو تیمار بعدی با کاهش حجم سیمان به ۷۰ درصد و ۸۰ درصد حجم سیمان در بتن کنترل و جایگزین کردن پوزولان به میزان درصدهای سیمان حذف شده، به شرح جدول ۲ ساخته شد. هر کدام از تیمارها در سه تکرار به مرحله اجرا درآمد. پوزولان مورد استفاده در این تحقیق خاکستر غلاف گندم حاوی نانو ذرات است.

براساس ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، نوع سیمان مورد استفاده برای تهیه بتن به جز در مواردی که در دفترچه مشخصات فنی به نحو دیگری تصریح شده باشد، باید از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ یا ۵ باشد. بنابراین سیمان مصرفی در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ انتخاب شد (۱). چگالی این نوع سیمان ۳/۱۵ گرم بر

جدول ۲. مشخصات بتن ساخته شده

مشخصات	شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳
علامت اختصاری	A	W_1	W_2
حجم سیمان نسبت به بتن کنترل(٪)	۱۰۰	۸۰	۷۰
میزان نانو ذرات خاکستر گندم(٪)	--	۲۰	۳۰

سانتی‌متر مکعب است.

بقایای گیاهی مورد نیاز این تحقیق، غلاف گندم بود که از مزارع کشت گندم واقع در شمال غرب در استان اصفهان تهیه و مراحل مختلف سوزاندن غلاف گندم، در کوره موجود در دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت پذیرفت. با توجه به درصد بالای اکسید سیلیسیم موجود در خاکستر غلاف گندم، پس از تهیه غلاف گندم مورد نیاز، اقدام به سوزاندن و تهیه خاکستر شد. در این تحقیق، برای تهیه خاکستر مورد نیاز، پس از مطالعات و بررسی‌های گوناگون، از کوره موجود در دانشگاه صنعتی اصفهان که توسط عابدی کوپایی با اقتباس از طرح‌های مشابه و رایج در کشورهای برنج‌خیز شرق آسیا طراحی گردیده، استفاده شد (۶). این کوره متشکل از یک محفظه فولادی به طول و عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر است. به منظور تأمین اکسیژن مورد نیاز برای سوختن پوسته شلتوک و زدوده شدن دی‌اکسید کربن محیط از اطراف ذرات، یک شبکه توری فولادی به فاصله ۳۰ سانتی‌متر از پایه کوره و تعداد دو دریچه به ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر در دو طرف کوره تعبیه شده است. در این آزمایش گاز سوختی کوره از طریق لوله‌کشی تأمین می‌شود و به منظور ایجاد درجه حرارت یکسان در تمام نقاط کوره، فشار گاز توسط چهار مشعل گاز که به فاصله مساوی در کف کوره تعبیه شده است، به صورت یکسان در تمام نقاط کف کوره توزیع شده است (۷). غلاف گندم به صورت دستی از طریق دریچه‌ای که به همین منظور در قسمت فوقانی کوره تعبیه شده است وارد کوره گردیده و خاکستر حاصل پس از ۲ ساعت سوختن در دمای بین ۶۷۰ الی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد از طریق دریچه‌ای که در کف کوره قرار دارد، خارج گردید. درجه حرارت کوره توسط ترموکوپل و از طریق شکاف کوچکی که در دو طرف کوره ایجاد شده است، به طور مستمر تحت کنترل قرار گرفت. درجه حرارت کوره از طریق باز و بسته کردن دریچه‌های هوا و هم‌چنین شیر گاز قابل تنظیم است.

تهیه خاکستر مرغوب، سفید رنگ و فاقد هرگونه کربن و ساختار بلوری مستلزم صرف دقت زیاد و ایجاد شرایط کنترل شده از نظر درجه حرارت مطلوب در تمام نقاط کوره و هم‌چنین تأمین اکسیژن و هوای تازه به جای دی‌اکسید کربن به وجود آمده در کوره است، در صورتی که حتی اگر یکی از موارد فوق رعایت نشود باعث تولید خاکستر نامرغوب، سیاه رنگ (دارای کربن زیاد) و دارای ساختار بلوری یا فعالیت پوزولانی ناچیز خواهد شد. بنابراین ایجاد شرایط یاد شده برای تهیه خاکستر مطلوب از اهمیت خاصی برخوردار است.

خاکستر تهیه شده پس از خروج از کوره و خنک شدن وارد دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای شده و برای مدت ۳۰ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ آسیاب شد. پودر حاصله حاوی نانو ذرات خاکستر گندم است. در این مرحله با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی موجود در دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان اقدام به آنالیز ذرات مربوط به پودر تهیه شده گردید.

طرح اختلاط بتن شامل تعیین نسبت اجزای بتن (سیمان،

آب، شن و ماسه) برای دستیابی به خواص مطلوب مشخص است. برای ساختن بتن با خواص معین لازم است مقادیر مناسب سیمان، سنگ‌دانه‌های دانه‌ریز، سنگ‌دانه‌های دانه‌درشت و آب بر اساس استانداردهای توصیه شده تعیین شود. از آنجا که اکثر روش‌های طرح اختلاط بتن بر اساس خواص مصالحی که در هر نقطه یا هر کشور موجود بوده تنظیم شده است، لذا کاربرد آنها در یک منطقه دیگر چندان دقیق نخواهد بود. با توجه با این‌که آئین نامه آمریکا ACI -۲۱۱ تأثیر خواص ویژه مصالح هر منطقه را به نحو مناسب، در نتایج طراحی دخالت می‌دهد، به همین دلیل روش آئین‌نامه آمریکا در مناطق مختلف و از جمله ایران، نتایج دقیق‌تری را به دنبال خواهد داشت (۸). برای به دست آوردن طرح اختلاط بتن مورد استفاده در این تحقیق با در نظر گرفتن ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری، از این روش استفاده شده است. طرح اختلاط بتن محاسبه شده در جدول ۳ آورده شده است.

با استفاده از طرح اختلاط تعیین شده، تعداد ۸۱ نمونه بتن آزمایشگاهی در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر و قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ساخته شد. بعد از مدت ۲۴ ساعت نمونه‌های بتن با دقت از قالب درآورده شده و در داخل حوضچه آب غوطه‌ور گردید. به این ترتیب، تعداد ۴۵ نمونه مکعبی و ۳۶ نمونه استوانه‌ای با استفاده از طرح اختلاط‌های ذکر شده ساخته شد و برای انجام آزمایش‌ها در سنین مربوطه، در داخل حوضچه آب نگهداری گردید. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام روی نمونه‌های بتنی فوق در سنین ۷، ۲۸ و ۶۰ روزه انجام گرفت. این آزمایش‌ها، در آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است.

نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر شد، در این مطالعه از خاکستر غلاف گندم به عنوان پوزولان در بتن استفاده شده است. پس از تهیه غلاف گندم مورد نیاز و سوزاندن آن در کوره به شرحی که در قسمت قبل آورده شد، به منظور اطمینان حاصل نمودن از کیفیت و ترکیبات تشکیل دهنده خاکستر تولید شده، مقداری از خاکستر تولید شده توسط آزمایش پراش سنجی اشعه ایکس مورد تحلیل قرار گرفت، که نتایج مربوط به آن در شکل ۱ آورده شده است.

نتایج حاصل از آزمایش پراش سنجی اشعه ایکس روی خاکستر تهیه شده، نشان داد که سیلیسیم و اکسیژن، عناصر غالب در ساختار خاکستر تولید شده هستند.

به منظور بررسی اندازه ذرات خاکستر گندم، بخشی از پودر حاصل توسط میکروسکوپ الکترونی مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۲). نتایج حاصل از دستگاه میکروسکوپ الکترونی نشان داد که ۲/۸ درصد از ذرات دارای اندازه کوچک‌تر از ۲۰۰ نانومتر هستند و قسمت اعظم ذرات تشکیل دهنده در محدوده ۴ تا ۶ میکرومتر قرار دارند.

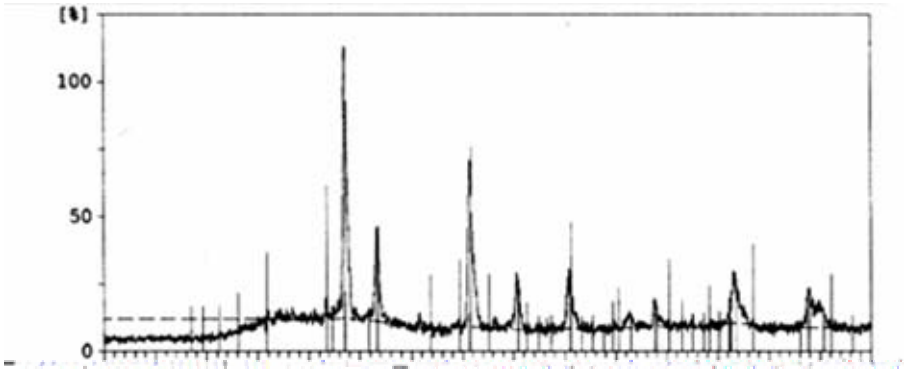
مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر غلاف گندم جایگزینی، تعداد ۳۶ نمونه مکعبی از تیمارهای A، W_1 و W_2 (۱۲ نمونه مکعبی از هر تیمار)، ساخته شد. تمام نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۶۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج به دست آمده برای هر نمونه بتن در سن مورد نظر توسط نرم‌افزار SAS (Statistical Analysis System) با آزمون واریانس یک طرفه به منظور بررسی وجود تفاوت آماری مورد تحلیل قرار گرفت. محل وجود تفاوت از طریق تحلیل Post Hoc با اجرای آزمون LSD (Least significant difference) با استفاده از مقایسه میانگین نمونه‌ها مشخص گردید، که نتایج حاصل در جدول ۴ آمده است. هم‌چنین تأثیر زمان بر افزایش مقاومت فشاری بتن ساخته شده با پوزولان‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده است.

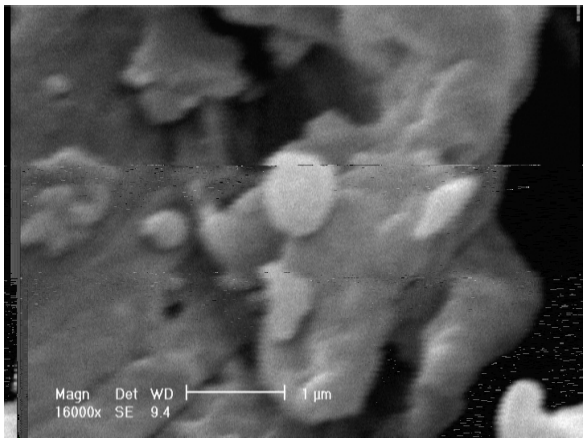
با توجه به بالا بودن نسبت آب به سیمان درتیمارهای W_1 و

جدول ۳. طرح اختلاط بتن تیمارهای مختلف با کارآئی ثابت برای حجم واحد بتن (برحسب کیلوگرم)

تیمار	مصالح				
	سیمان	آب	شن	ماسه	پوزولان
A	۳۵۰	۱۸۶	۹۱۴/۷۵	۸۷۰/۵۸۲	--
W_1	۲۸۰	۱۹۸	۹۱۴/۷۵	۸۷۰/۵۸۲	۷۰
W_2	۲۴۵	۲۰۶	۹۱۴/۷۵	۸۷۰/۵۸۲	۱۰۵



شکل ۱. نقطه اوج مربوط به پراش سنجی پرتو ایکس خاکستر گندم



شکل ۲. آنالیز دستگاه میکروسکوپ الکترونی

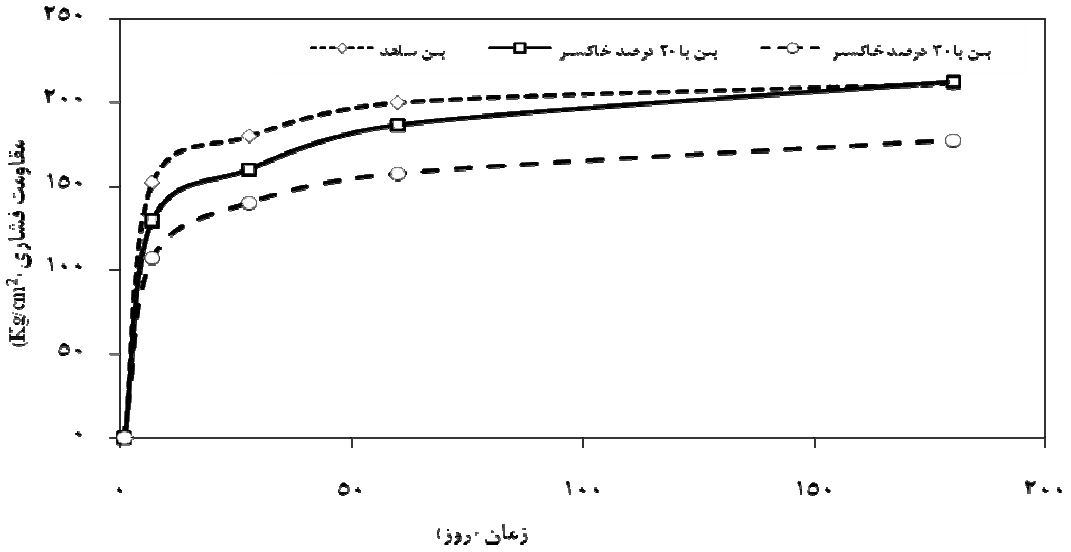
W_2 نسبت به بتن کنترل، انتظار می‌رود که مقاومت فشاری این دو کمتر از بتن کنترل باشد، در حالی‌که وجود خاکستر غلاف گندم و بالا بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش کارایی تیمارهای W_1 و W_2 شده است که بیانگر فعالیت پوزولانی در بتن حاوی نانو ذرات خاکستر غلاف گندم با گذشت زمان است. با بررسی و مقایسه تیمارهای W_1 (بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر گندم) و W_2 (بتن حاوی ۳۰ درصد خاکستر گندم) با بتن کنترل مشخص گردید که به دلیل حضور سیلیس فعال در خاکستر غلاف گندم و انجام واکنش‌های شیمیایی، حفرات بتن با گذشت زمان پر گردیده و منجر به افزایش روند کسب

جدول ۴. مقایسه میانگین مقاومت‌های فشاری و کششی تیمارهای خاکستر گندم و شاهد (بدون خاکستر) در هفته‌های مختلف(kg/cm^2)

تیمارها	مقاومت فشاری[1] ۷ روزه	مقاومت کششی ۲۸ روزه	مقاومت کششی ۶۰ روزه
A	۱۵۲/۵۹ [a]	۱۷۹/۲۶ [a]	۱۹۷/۰۴ [a]
W_1	۱۴۴/۲۹ [a]	۱۶۴/۴۴ [b]	۱۸۶/۶۷ [a]
W_2	۱۱۲/۵۹ [b]	۱۲۴/۴ [c]	۱۳۴/۸۱ [b]
LSD	۱۹/۴۷	۷/۸۳	۱۱/۰۷

۱. میانگین سه تکرار

میانگین‌هایی که به ترتیب در هر ستون در یک حرف مشترک هستند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند.



شکل ۳. تأثیر زمان بر افزایش مقاومت فشاری بتن ساخته با نانو پوزولان خاکستر غلاف گندم

مقاومت فشاری این تیمارها در مقایسه با بتن کنترل شده است. مقاومت فشاری تیمار W_1 (بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر گندم) از نظر آماری در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با بتن کنترل ندارد و تیمار W_2 (بتن حاوی ۳۰ درصد خاکستر گندم) دارای کمترین مقاومت فشاری بوده است. میزان کسب مقاومت فشاری بتن‌های حاوی نانو ذرات خاکستر غلاف گندم در سنین پایین، کمتر از مقاومت فشاری بتن کنترل است، در حالی‌که در سنین بالاتر به علت انجام واکنش‌های پوزولانی خاکستر غلاف گندم، روند کسب مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و در سن ۶۰ روزه اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر غلاف گندم و بتن کنترل وجود ندارد. علت این امر وجود واکنش‌های پوزولانی پویا در این نوع بتن است. در همه تیمارهای مطالعه شده همانند تحقیقات عابدی کوپایی در سال ۱۳۸۰ روند افزایش مقاومت فشاری در بتن حاوی نانو ذرات خاکستر پوسته شلتوک در سنین بالا از بتن کنترل بیشتر است (۷). استفاده از پوزولان خاکستر گندم به مقدار ۲۰ درصد منجر به مقاومت بیشتری نسبت به سایر درصدهای استفاده از پوزولان گردید که این ویژگی به دلیل بالا بودن اکسید سیلیسیم موجود در خاکستر غلاف گندم همانند خاکستر پوسته شلتوک برنج می‌باشد که منجر به گسترش واکنش‌های پوزولانی

در بتن می‌شود.

مقاومت کششی

برای تعیین مقاومت کششی بتن‌های ساخته شده با درصدهای مختلف نانو پوزولان خاکستر غلاف گندم جایگزینی، تعداد ۳۶ نمونه استوانه‌ای از تیمارهای A، W_1 و W_2 (۱۲ نمونه استوانه‌ای از هر تیمار)، ساخته شد. تمامی نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۶۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج به دست‌آمده برای هر نمونه بتن در سنین مورد نظر توسط نرم‌افزار SAS با آزمون واریانس یک طرفه به منظور بررسی وجود تفاوت آماری نمونه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. وجود تفاوت از طریق تحلیل Post Hoc با اجرای آزمون LSD با استفاده مقایسه میانگین‌ها مشخص شد که نتایج حاصل در جدول ۵ آمده است. هم‌چنین تأثیر زمان بر افزایش مقاومت کششی بتن ساخته شده با درصدهای مختلف نانو پوزولان خاکستر گندم، در شکل ۴ آورده شده است.

با بررسی و مقایسه تیمارهای W_1 (بتن با ۲۰درصد خاکستر غلاف گندم) و W_2 (بتن با۳۰ درصد خاکستر غلاف گندم) با بتن کنترل مشخص شد که به دلیل حضور سیلیس فعال در خاکستر غلاف گندم و انجام واکنش‌های شیمیایی، حفرات بتن با گذشت زمان پر گردیده و منجر به افزایش روند کسب مقاومت کششی این تیمارها در مقایسه با بتن کنترل می‌شود. مقاومت کششی تیمار W_1 (بتن با ۲۰درصد خاکستر) از نظر آماری در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با بتن کنترل ندارد و تیمار W_2 (بتن با ۳۰ درصد خاکستر) دارای کمترین مقاومت فشاری بوده است. در همه تیمارهای مطالعه شده روند افزایش مقاومت کششی در بتن حاوی خاکستر غلاف گندم در سنین زیاد از بتن کنترل بیشتر بود. با توجه به بالا بودن نسبت آب به سیمان درتیمارهای W_1 و W_2 نسبت به بتن کنترل، انتظار می‌رود که مقاومت کششی این دو کمتر از بتن کنترل باشد، در حالی‌که وجود خاکستر غلاف گندم و بالا بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش کارایی تیمارهای W_1 و W_2 شده است که بیانگر فعالیت پوزولانی در بتن حاوی خاکستر غلاف گندم با گذشت زمان است. میزان کسب مقاومت کششی بتن‌های حاوی نانو ذرات خاکستر غلاف گندم در سنین پایین، کمتر از مقاومت کششی بتن کنترل است، در حالی‌که در سنین بالاتر به علت انجام واکنش‌های پوزولانی خاکستر غلاف گندم، روند کسب مقاومت کششی افزایش می‌یابد و در سن ۶۰ روزه اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مقاومت کششی بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر غلاف گندم و بتن کنترل وجود ندارد. علت این امر وجود واکنش‌های پوزولانی پویا در این نوع بتن است. استفاده از نانو پوزولان خاکستر گندم به مقدار ۲۰ درصد منجر به مقاومت کششی بیشتری نسبت به سایر درصدهای استفاده از پوزولان شد که این ویژگی به دلیل بالا بودن اکسید سیلیسیم موجود در خاکستر غلاف گندم همانند خاکستر پوسته شلتوک برنج است که منجر به گسترش واکنش‌های پوزولانی در بتن می‌شود.

نتایج حاصل از این مطالعه هم جهت با نتایج مطالعات دیگر محققین بوده است. تحقیقات بیونگ وان و همکاران نشان داده که نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیم نه‌تنها به عنوان مواد پرکننده موجب بهبود ریز ساختارهای بتن شده بلکه به عنوان تسریع کننده واکنش‌های پوزولانی عمل می‌کند که منجر به افزایش استحکام بتن شده است. افزایش مقدار این ماده از ۳ درصد به ۱۲ درصد باعث تفاوت چشمگیری در مقاومت بتن گردیده است (۱۴). تحقیقات تاو نیز نشان داده که بتن حاوی نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم دارای مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن شاهد است، که مشاهده این نتایج به واسطه آن است که نانوذرات دی اکسید سیلیسیم می توانند به عنوان هسته ای برای تشکیل ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته عمل کنند(۲۱).

تغییرات وزنی نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات

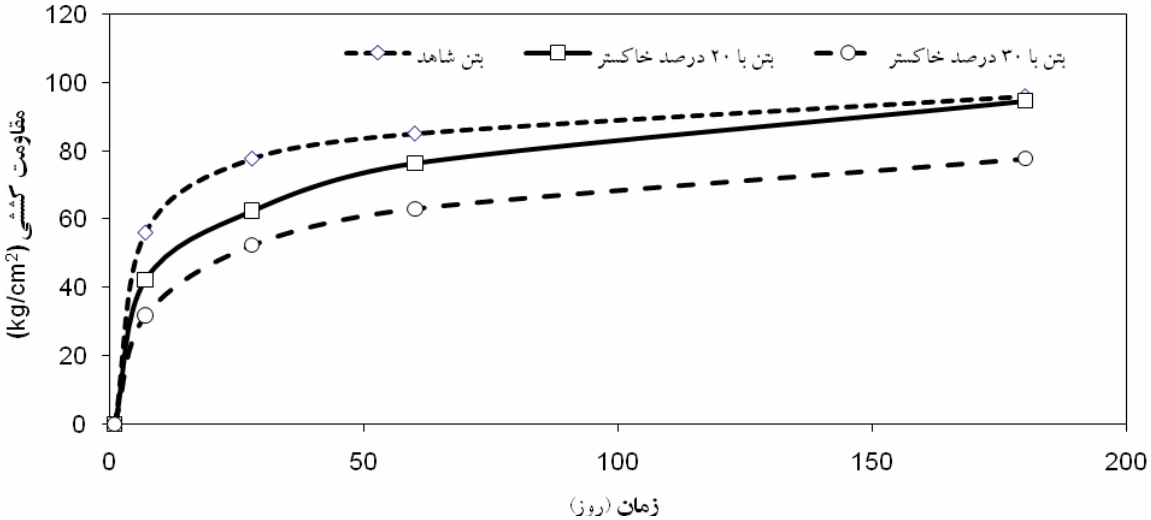
برای تعیین تغییرات وزنی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر غلاف گندم جایگزینی، ۳ نمونه مکعبی از هر

جدول ۵. مقایسه میانگین مقاومت کششی تیمارهای غلاف گندم و شاهد (بدون خاکستر) در هفته‌های مختلف (kg/cm^2)

تیمارها	مقاومت کششی[1] ۷ روزه	مقاومت کششی ۲۸ روزه	مقاومت کششی ۶۰ روزه
A	۱۵۲/۵۹ [a]	۱۷۹/۲۶ [a]	۱۹۷/۰۴ [a]
W_1	۱۴۴/۲۹ [a]	۱۶۴/۴۴ [b]	۱۸۶/۶۷ [a]
W_2	۱۱۲/۵۹ [b]	۱۲۴/۴ [c]	۱۳۴/۸۱ [b]
LSD	۱۹/۴۷	۷/۸۳	۱۱/۰۷

۱.میانگین سه تکرار

میانگین‌هایی که به ترتیب در هر ستون در یک حرف مشترک هستند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند.



شکل ۴. تأثیر زمان بر افزایش مقاومت کششی بتن ساخته با نانو پوزولان خاکستر گندم

جدول ۶. نتایج آزمایش تعیین دوام نمونه‌های بتنی

تیمار	کاهش وزن (گرم)	نسبت وزن باقی‌مانده	درصد کاهش وزن
A	۳۰/۵	۹۵/۵۶۶	۴/۴۳۳۱۴
W_1	۲۳/۷۵	۹۶/۲	۳/۸
W_2	۲۵/۴۵	۹۵/۹۲۸	۴/۰۷۲

کدام از تیمارهای A، W_1 و W_2 برای نگهداری در محیط سولفات منیزیم ساخته شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز به منظور عمل‌آوری در داخل حوضچه آب با دمای ۲±۲۰ نگهداری گردید. پس از ۱۴ روز بلافاصله بعد از خارج کردن نمونه‌ها از داخل آب، سفیدک و جرم‌های سطح رویی تمامی نمونه‌ها به دقت تمیز گردید و سپس توسط ترازوی دقیق آزمایشگاهی، تک‌تک نمونه‌ها توزین و سپس به داخل محلول‌های ۴ درصد سولفات منیزیم قرار داده شدند و در سنین مختلف بلافاصله بعد از خارج کردن از محلول‌های سولفات، دوباره سفیدک و جرم سطحی نمونه‌ها را تمیز شده و سپس وزن گردیدند. نتایج حاصل از این آزمایش برای هر تیمار بتن در سن ۹۰ روزه در جدول ۶ آورده شده است که هر کدام

میانگین ۳ نمونه هستند.

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که بیشترین مقدار کاهش وزن مربوط به بتن کنترل و کمترین مقدار کاهش وزن در تیمار W_1 (بتن با ۲۰ درصد نانو ذرات خاکستر غلاف گندم) قابل مشاهده است. تیمار W_1 (بتن با ۲۰ درصد نانو ذرات خاکستر غلاف گندم) به واسطه داشتن فعالیت پوزولانی قابل ملاحظه (ناشی از حضور اکسید سیلیسیوم) دارای دوام بهتری در محیط سولفات منیزیم می‌باشد.

نتیجه‌گیری

۱. آزمایش‌های صورت گرفته روی خاکستر غلاف گندم نشان داد که قسمت اعظم ترکیبات آن را اکسیژن و سیلیسیم تشکیل داده که دارای ساختار غیر بلوری است. که این موضوع به خوبی فعالیت بالای پوزولانی خاکستر غلاف گندم را تأیید می‌کند.

۲. مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن نگهداری شده در محیط آب، با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در حالی‌که روند افزایش مقاومت در نمونه‌های بتن حاوی خاکستر غلاف گندم در سنین بالا بیشتر از نمونه‌های بتن کنترل است.

۳. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و دوام بتن، مزیت استفاده از نانو ذرات خاکستر غلاف گندم را به عنوان ماده پوزولانی به خوبی آشکار می‌سازد.

۴. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات وزنی نمونه‌های بتنی نگهداری شده در محیط سولفات منیزیم نشان داد که حضور خاکستر غلاف گندم منجر به شدت فعالیت پوزولانی و افزایش دوام بتن در محیط سولفاته می‌گردد.

۵. درصد بهینه جایگزینی خاکستر غلاف گندم به جای سیمان با توجه به نتایج مقاومت فشاری و کششی ۶۰ روزه و نتایج دوام بتن در محیط سولفاته (سن ۹۰ روزه) ۲۰ درصد است. خصوصیات مکانیکی بتن حاوی نانو ذرات خاکستر غلاف گندم جایگزین تا ۳۰ درصد نشان می‌دهد که از این نوع بتن می‌توان در برخی از سازه‌های آبی از جمله پوشش بتنی کانال‌های انتقال آب استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

۱. بزاز، م. ۱۳۷۰. پوشش کانال‌های آبیاری با استفاده از مواد شیمیایی (کاربرد کربنات سدیم و مالچ نفتی)، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، گزارش علمی.

۲. بیرامی، م.ک. ۱۳۷۶. *سازه‌های انتقال آب*. مرکز نشر جهاد دانشگاهی، اصفهان.

۳. حاجتي مدارائي، ع. و ع. صدرممتاز. ۱۳۷۷. استفاده از پوسته شلتوک درساخت بتن سبک. پنجمین همایش دستاوردهاي علمي- پژوهشی دانشگاه گیلان، ص ۸۶ .

۴. حیدری‌زاده، م. ۱۳۶۹. بررسی تلفات نشت از کانال‌های آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۵. رمضانیانپور، ع. ا. ۱۳۷۴. بررسی تحقیقات انجام شده روی مصارف پوسته برنج و خاکستر آن در صنعت ساختمان. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۱۸، ۱۳۲ صفحه.

۶. عابدی کوپایی، ج. و م. ع. فتحی. ۱۳۸۲. بررسی خصوصیات مکانیکی پوشش بتنی کانال‌های آبیاری حاوی خاکستر شلتوک در محیط‌های سولفاته، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۷: ۱۳-۲۷.

۷. عابدی کوپایی، ج. ۱۳۸۲. کاربرد بقایای گیاهی برنج در ترکیب بتن پوشش کانال‌های آبیاری. دانشگاه صنعتی اصفهان، گزارش طرح پژوهشی.

۸. قالیبافان، م.۱۳۸۲. مروری بر تولید و مصرف مواد افزودنی در بتن با تأکید بر مصرف میکروسیلیس و نقش آن در جلوگیری از خورده شدن میلگردهای آرماتور در داخل بتن، نشریه پیام آبادگران، ش۱۹۹، تهران.

۹. مدندوست، ر.، م. م. رنجبر و ا. عابدی‌نژاد. ۱۳۸۳. بررسی خواص مهندسی بتن حاوی خاکستر پوسته برنج. مجموعه مقالات همایش بین‌المللی سیمان، تهران.

۱۰.مرشدی، ا. و م. احمدی مقدم. ۱۳۸۶. بررسی ویژگی بتن‌های حاوی خاکستر پوسته برنج و مقایسه آن با نمونه شاهد. مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان.

۱۱.مستوفی نژاد. د. ۱۳۸۵. *تکنولوژی و طرح اختلاط بتن*. انتشارات ارکان دانش، تهران.

12. Aitcin, P.C., P. Pinsonneault and G. Ran. 1981. The use of condensed silica fume in concrete. Proceedings Symposium on Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Materials Research Society, Boston, MA, pp.316.
13. ASTM C618-78. Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.
14. Byung-Wan, J., K. Chang-Hyun, T. Ghi-ho and P. Jong-Bin. 2007. Characteristics of cement morar with nano-SiO2 particles. Materials J. 104: 404-407.
15. Cook, D.J. 1983. Rice husk ash. Cement Replacement Materials 3(4): 120-131
16. Hui, L. X. Hui-gang, Y. Jie and O. Jin-ping. 2004. Microstructure of Cement mortar with nano-particles Composites. Part B, Engineering 35: 185- 189.
17. Masazza, F. 1974. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements. Proc. 6th Intl. Cong. on the chemistry of Cements, Moscow. pp. 628-642.
18. Mielenz, R.C., L.P. Witte and O.J. Glantz. 1950. Effect of calcinations on natural pozzolana. ASTM Special Technical Publication. pp. 43-91.
19. Sersale, R. 1980. Sturcture and characterization of pozzolanas and fly ashes, Proc. 7th Int. Cong. on the Chemistry of Cements, Paris, Sub Theme IV-1, pp. 1-18.
20. Surinder, M. 2006. Nanotechnology and Construction, Report on Nanotechnology and Construction, Nanofrum Publication, Institute of Nanotechnology, pp.1-55.
21. Tao, J. 2005. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO2. J. Cement and Concrete Res. 35: 1943-1947.
22. Zhenhua, L., W. Huafeng, H. Shan, L. Yang and W. Miao. 2006. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. J. Material Sci. 60: 356-359.