ارزیابی روسازی بتنی متخلخل سازگار با محیط‌زیست با استفاده از خاکستر پوسته برنج

سعید حسامی*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی بابل
سعید احمدی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی بابل

E-mail: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۸/۰۳ – پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۲

چکیده

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست که سازگار با محیط‌زیست بوده و از آن به عنوان رویه در روسازی‌های با حجم ترافیک کم استفاده می‌شود. به دلیل حفره‌های موجود در این نوع روسازی، حجم رواناب در سطح راه کاهش یافته و همچنین سروصدای ناشی از ترافیک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه امروزه جمع‌آوری پوسته برنج در زمین‌های کشاورزی مسئله‌ساز بوده و عموماً در فضای باز سوزانده می‌شود، این عامل سبب آلودگی محیط‌زیست می‌گردد. بازیافت اجزای مواد زائد، از جمله پوسته برنج، موجب صرفه‌جویی انرژی در تولید سیمان و حفظ منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست می‌گردد. در مقاله حاضر، ترکیب جدیدی برای ساخت روسازی بتنی به‌کار رفته که از ماسه و همچنین پوزولان خاکستر پوسته برنج به منظور تقویت خمیر سیمان و همچنین از الیاف پلی‌فنیلن سولفاید (PPS) به منظور بهبود خصوصیات مقاومتی بتن متخلخل استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌های بتنی با مقادیر نسبت آب به سیمان مختلف ساخته شده و خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل طی آزمایش‌هایی تعیین گردید. نتایج آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی ماسه نشان می‌دهد که ماسه به تنهایی تأثیر کمی بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل داشته، این در حالی است که ترکیب ماسه، خاکستر پوسته برنج و الیاف تأثیر قابل‌توجهی بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل داشته است.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، روسازی، الیاف، خاکستر پوسته برنج، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی.

۱. مقدمه

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست که از سیمان، آب، با دانه‌بندی بدون ریزدانه و یا با ریزدانه کم، و در مواردی افزودنی‌های شیمیایی تشکیل می‌شود. بتن متخلخل به طور معمول فاقد مصالح ریزدانه و در بعضی حالات دارای مقدار کمی ریزدانه می‌باشد و تنها با ملات سیمانی مصالح درشت‌دانه را به هم می‌چسباند. به طوری که فضای خالی درون بتن ایجاد می‌شود. اگرچه بتن متخلخل از اواسط قرن ۱۹ وجود داشته، اما از سال ۱۹۸۰ در بسیاری از کشورها، به ویژه در ایالات‌متحده امریکا و ژاپن، مورد استفاده قرار گرفته است. روسازی با بتن متخلخل به دلیل سازگاری با محیط‌زیست جایگزین مناسبی نسبت به سیستم روسازی آسفالتی و بتن معمولی است (فرگوسن، ۲۰۰۵). سرعت نفوذ زیاد آب در بتن متخلخل سبب شده که از این نوع روسازی در مکان‌های

Archive of SID

www.SID.ir

دیگری شامل: سازه‌های هیدرولیکی، گلخانه‌ها و لایه اساس در روسازی‌های با حجم ترافیک سنگین استفاده شود (تنیس و همکاران، ۲۰۰۴). از مزایای بتن متخلخل می‌توان به این نکته اشاره داشت که این نوع روسازی سر و صدای وسایل نقلیه را کاهش داده و محیط آرامی را ایجاد می‌نماید. این در حالی است که در روزهای بارانی روی این نوع روسازی هیچ آبی جمع نشده و همچنین در شب کاهش تابش نور خیره‌کننده‌ای وجود نداشته و باعث بهبود ایمنی و راحتی رانندگان می‌شود (یانگ و جیانگ، ۲۰۰۳).

با وجود تمام مزایای ذکرشده، استفاده از بتن متخلخل به دلیل مقاومت و دوام کمتر در مقایسه با بتن معمولی، به مناطقی با بارهای ترافیکی کمتر، مانند پارکینگ‌ها، شانه جاده‌ها، خیابان‌ها و جاده‌های محلی محدود می‌شود (یانگ و جیانگ، ۲۰۰۳؛ کورن و همکاران، ۲۰۰۵).

به طور کلی، مقدار هوای درون بتن متخلخل ۱۵ تا ۲۵ درصد بوده و نفوذپذیری آن معمولاً بین ۲ تا ۶ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد (تنیس و همکاران، ۲۰۰۴؛ شیفر و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به اینکه مقدار ریزدانه در بتن متخلخل کم و یا در مواردی بدون ریزدانه است، باعث می‌شود به اندازه کافی خمیر سیمان ذرات درشت‌دانه را بپوشاند. به طوری که پیوستگی حفرات حفظ شود (NRMCA، ۲۰۰۴). تخلخل بالای بتن متخلخل به دلیل نبود ریزدانه سبب شده مقاومت و خصوصیات دوام کمتری نسبت به بتن معمولی داشته باشد بیلدنس و همکاران، ۲۰۰۳). مطالعاتی در مورد خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل به وسیله لیان و همکاران (۲۰۱۱)؛ سانبی و باسونیت (۲۰۱۳) و حسامی و همکاران (۲۰۱۴a) انجام شده است.

استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی(FRC[1]) به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی و خمشی بتن محسوب می‌شود (پارک و همکاران، ۲۰۱۲؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۴b). از مشخصات مهم بتن‌های الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه می‌باشد که به نحو مطلوبی خطر شکست بتن را، بخصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر قرار می‌گیرند، کاهش می‌دهد. به طور کلی، الیاف‌ها در بتن متخلخل به طور قابل‌توجهی نفوذپذیری و البته به مقدار کمی هوای درون بتن متخلخل را افزایش داده و همچنین سبب بهبود مقاومت کششی بتن متخلخل می‌شوند (کورن و همکاران، ۲۰۰۵؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۰۵). طبق مطالعه‌ای که توسط تاگنیت- همو و همکاران (۲۰۰۵) صورت گرفته، چقرمگی الیاف PPS برابر با الیاف فولادی است. به طوری که الیاف PPS مقاومت خمشی را به مقدار ۱۳٪ افزایش داده و از انتشار ترک به مقدار ۷۰٪ در مقایسه با بتن شاهد جلوگیری می‌کند.

علاوه بر آن، طبق مطالعه انجام شده توسط کمپانی 3M (۲۰۰۴)، الیاف PPS در مقایسه با الیاف فولادی مقاومت در برابر ضربه را دو برابر افزایش می‌دهد.

ناحیه تماس، که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نیز معروف است، ناحیه مرزی بین خمیر سیمان و سطح سنگ دانه یا الیاف است که نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. همچنین، خمیر سیمان در ناحیه تماس دارای میکروساختاری متفاوت با داخل خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است.

در این بررسی آزمایشگاهی، برای تقویت ناحیه تماس، از پوسته برنج به عنوان پوزولان مصنوعی استفاده شده است. یکی از کاربردی‌ترین منابع مواد پوزولانی در میان اجزای تشکیل دهنده ضایعات کشاورزی، پوسته برنج است که این محصول حاوی مقدار نسبتاً زیادی سیلیس می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از مواد با واکنش‌های پوزولانی عموماً می‌توانند به طور قابل‌توجهی خصوصیات بتن را بهبود بخشند (بویی و همکاران، ۲۰۰۵). خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین بخشی از سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری بتن معمولی شده و مقدار بهینه آن بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ وزنی سیمان می‌باشد ناجی گیوی و

1- Fiber reinforced concrete

Archive of SID

www.SID.ir

همکاران، ۲۰۱۰). پژوهش‌های مختلف مقادیر بهینه مختلفی را برای استفاده از خاکستر پوسته برنج پیشنهاد کرده‌اند. به طوری که سالاس و همکاران (۲۰۰۹) مقدار ۱۰٪ خاکستر پوسته برنج را به عنوان مقدار بهینه نیز به‌دست آورده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بیشترین مقاومت فشاری در این درصد به‌دست می‌آید. هر چند در بعضی پژوهش‌ها نظیر مطالعه انجام شده توسط گانسان و همکاران (۲۰۰۸) مقدار جایگزینی ۱۵٪ خاکستر پوسته برنج را گزارش کرده‌اند. این تفاوت‌ها می‌تواند وابستگی بسیاری به نحوه سوزاندن پوسته برنج داشته باشد که تأثیر مستقیمی بر خاصیت پوزولانی خاکستر دارد. بنابراین، به طور کلی، شاید بهتر باشد برای درصد بهینه، بجای مقدار ۱۰٪، محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد را بیان نمود (مدندوست و رحیمی پله شاه، ۱۳۹۰).

در مقاله حاضر، به بررسی مقادیر مختلف ماسه (صفر، ۳/۵ و ۷ درصد) و خاکستر پوسته برنج (صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ ۱۰ و ۱۲ درصد) و الیاف PPS[1] بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن متخلخل پرداخته شده است. همچنین، در این مقاله، سه نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش سعی بر این است که تعادلی بین نفوذپذیری و مقاومت بتن متخلخل برقرار شود. خصوصیاتی که از بتن متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفته شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، تخلخل و نفوذپذیری می‌باشد.

۲. بررسی خاکستر پوسته برنج از دیدگاه زیست محیطی

با توجه به افزایش آلودگی محیط زیست و همچنین بحران انرژی و نیاز به صرفه‌جویی در مواد انرژی‌زا در تهیه و تولید مواد مختلف نظیر سیمان، بایستی تلاش شود تا تولید این فراورده، اقتصادی شده و کیفیت آن بهبود بخشیده شود. همچنین، در عصر حاضر، در بسیاری از کشورها، خصوصاً کشور ایران، روند رو به رشدی در جهت افزایش ساخت و سازها در زمینه صنعت ساختمان و در زمینه روسازی بتنی صورت گرفته است. برآیند همه این پیشرفت‌ها در دوره حاضر، افزایش مصرف مصالح ساختمانی از جمله فولاد و در رأس آنها مصالح پرمصرفی مثل بتن می‌باشد. بنابراین، این پیشرفت‌ها منتج به افزایش مصرف سوخت در کارخانه‌های تولید مصالح می‌شود که در این میان، فرایند تولید بتن به‌دلیل اینکه دارای بالاترین حجم تولید در بین تمام مصالح ساختمانی در جهان است، اهمیت بسیار زیادی دارد. یکی از قدم‌های مهم در حل این مهم، استفاده از مواد پوزولانی به صورت طبیعی و مصنوعی در سیمان است. استفاده از این مواد و جایگزین کردن آن نه تنها هزینه بتن را پایین می‌آورد، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز سبب کاهش آلودگی می‌شود.

یکی از بهترین راهکارهای موجود جهت یافتن جایگزین مناسب برای سیمان مصرفی در بتن، استفاده از منابع و مصالح طبیعی و در رأس آنها ضایعات و مواد اضافی کشاورزی است. با توجه به فراوانی شالیزارهای تولید برنج در شمال ایران و نواحی دیگر کشور، سالانه مقدار زیادی پوسته برنج تولید می‌شود. در حال حاضر از این پوسته‌ها استفاده چندانی نمی‌شود و در بسیاری از موارد حتی دیده می‌شود که کشاورزان اقدام به سوزاندن این مواد به ظاهر اضافی می‌کنند. این امر هم آلودگی‌های زیست‌محیطی را در پی دارد و هم در مواقع بارندگی موجب اسیدی شدن آب و خاک کشاورزی و در نتیجه کاهش میزان تولیدات زراعی می‌گردد. با توجه به توضیحات داده شده، می‌توان از خاکستر پوسته برنج به عنوان ماده‌ای زائد استفاده کرد که حاوی سیلیس فعال بوده و دارای خاصیت پوزولانی فعالی می‌باشد که دفع آن منجر به آلودگی محیط‌زیست می‌شود. خاکستر پوسته برنج به سبب سیلیس بالای آن با هیدروکسید کلسیم در اثر فرایند هیدراتاسیون واکنش نشان داده و می‌تواند پیوند

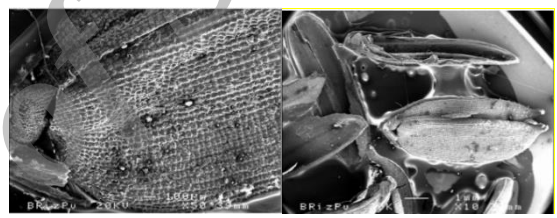
1- Polyphenylene sulfide

www.SID.ir
Archive of SID

سنگ‌دانه- خمیر سیمان را بهبود بخشد (ناجی گیوی و همکاران، ۲۰۱۰).

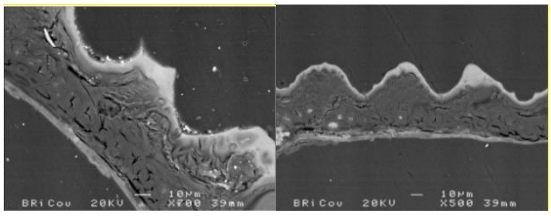
۲-۱. بررسی ساختار پوسته برنج

بر اساس آزمایش‌هایی که روی ساختار پوسته برنج انجام گرفته و همچنین عکس‌های الکترومیکروسکوپی که از آن گرفته شده، وجود ناهمواری‌هایی در سطح آن و برجستگی‌های نامنظم و منافذ زیادی در آن مشاهده شده است. خاصیت پوزولانی پوسته برنج به سبب سیلیس فراوان در آن می‌باشد. سطح خارجی و سطح داخلی پوسته برنج به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. تمرکز سیلیکا در قسمت خارجی پوسته بیشتر از سطح داخلی آن بوده و در نتیجه سطح داخلی آن به مراتب ضعیف‌تر از سطح خارجی آن می‌باشد (جوبرتی و همکاران، ۲۰۰۰).



(ب) (الف)

شکل ۱. سطح خارجی پوسته برنج با مقیاس‌های ۱۰ و ۵۰



(ب) (الف)

شکل ۲. سطح داخلی پوسته برنج با مقیاس‌های ۵۰۰ و ۷۰۰

۳. طرح آزمایشگاهی

۳-۱. مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش، از سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان نکا استفاده شده است.

ابتدا پوسته برنج در کوره‌ای در فضای باز به مدت ۲ ساعت سوزانده شد. فراورده‌های سیاه رنگ حاصل از این کوره نشان دهنده درصد بالای کربن آن می‌باشد که از خاصیت پوزولانی آن می‌کاهد. سپس محصول حاصل به کوره الکتریکی با قابلیت تخلیه دی‌اکسید کربن منتقل شده و در این مرحله به مدت یک ساعت و در دمای اتاق سرد شده است. این روش منجر به افزایش سطح ویژه و خاصیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج می‌شود (دیپا و همکاران، ۲۰۰۸).

اندازه ذرات درشت‌دانه مصرفی در این تحقیق از ۲/۳۶ تا ۱۹ میلی‌متر بوده که در رده‌بندی ۶۷ # طبق استاندارد ASTM C33 قرار می‌گیرد. ماسه مصرف شده زیر الک ۴/۷۵ میلی‌متر انتخاب شد که دارای هم‌ارز ماسه‌ای به میزان ۸۰٪ بوده است.

الیاف مصرفی در این پژوهش، الیاف از نوع PPS بوده که مشخصات آن را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

جدول ۱. مشخصات الیاف PPS

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	ضخامت (mm)	وزن مخصوص (g/cm^3)	مدول الاستیسیته $kg/cm^2 \times 10^5$
PPS	۵۰-۵۴	-	۰/۰۷	۰/۹۰	۳/۵

از خصوصیات شیمیایی سیمان و خاکستر پوسته برنج می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر سیلیس و اکسید کلسیم در سیمان و خاکستر پوسته برنج کاملاً باهم متفاوت‌اند. به طوری که مقدار سیلیس در سیمان و خاکستر پوسته برنج به ترتیب ۲۱/۹ و۸۶/۰۲ درصد می‌باشد. درحالی که اکسید کلسیم در سیمان و خاکستر پوسته برنج به ترتیب

Archive of SID

www.SID.ir

برابر ۶۳/۳۳ و ۱/۱۲ درصد می‌باشد. همان طور که از خواص شیمیایی پوسته برنج مشاهده می‌شود مجموع سیلیس و Al_2O_3 و Fe_2O_3 برابر ۸۶/۵٪ شده که این مقدار بیش از مقدار مشخص شده (حداقل ۷۰٪) در استاندارد ASTM-C618 می‌باشد. بنابراین، خاکستر پوسته برنج به عنوان یک ماده پوزولانی شناخته می‌شود که در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند. همین عامل سبب کاهش تخلخل در خمیر سیمان شده و به دنبال آن سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود.

۳-۲. روش آزمایش

در این تحقیق، آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری مقاومت فشاری، کششی و خمشی با توجه به استانداردهای ASTM C39، ASTM C496 و ASTM C78 انجام گرفته است. همچنین، آزمایش مربوط به اسلامپ هر نمونه بر اساس استاندارد ASTM C143 انجام شده است. برای اندازه‌گیری میزان تخلخل نمونه‌های آزمایشی از روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن نمونه خشک محاسبه می‌شود (مونتس و همکاران، ۲۰۰۵). ابتدا نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرم خانه با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس نگهداری می‌شود. با توزین آن، وزن خشک W_2 به دست می‌آید. سپس نمونه خشک شده در آب وزن شده و وزن غوطه‌وری W_1 به دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (۱) تخلخل نمونه محاسبه می‌شود. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، به عنوان درصد تخلخل گزارش خواهد شد.

$$P = (1 - (\frac{W_2 - W_1}{Vol \times \rho w})) \times 100 \qquad (۱)$$

که P تخلخل کل (٪)، W_1 وزن نمونه در آب (کیلوگرم)، W_2 وزن نمونه خشک در هوا (کیلوگرم)، Vol حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب) و ρ_w دانسیته آب در دمای $^{\circ}C$ ۲۱ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

بهترین توصیف برای بتن متخلخل و نفوذپذیر، خواص نفوذپذیری و تخلخل آن است. نفوذپذیری بازتابی از چگونگی ارتباط میان منافذ می‌باشد. میزان ضریب نفوذپذیری متوسط طبق رابطه (۲) و بر اساس قانون دارسی و فرض جریان لایه‌ای محاسبه می‌شود (نارایانان و همکاران، ۲۰۰۶). متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، به عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش می‌شود.

$$k = \frac{aL}{At} \ln(\frac{h_1}{h_2}) \qquad (۲)$$

که k ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)، a مساحت سطح مقطع لوله آب (سانتی‌متر مربع)، L طول نمونه (سانتی‌متر)، A مساحت سطح مقطع نمونه (سانتی‌متر مربع)، t زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از سطح h_1 به h_2 (ثانیه)، h_1 ارتفاع اولیه آب در لوله (سانتی‌متر) و h_2 ارتفاع نهایی آب در لوله (سانتی‌متر) است.

۳-۳. طرح‌های اختلاط

در این پژوهش، در مجموع ۲۷ طرح اختلاط ساخته شد که این طرح‌ها با استفاده از آئین‌نامه ACI211.3R-24به‌دست آمده است. در ابتدا به بررسی اثر ماسه بر بتن متخلخل، در گام بعد تأثیر الیاف بر بتن متخلخل و در نهایت تأثیر ماسه، خاکستر پوسته برنج به همراه الیاف PPS پرداخته شد. طرح اختلاط سری ۱ بتن متخلخل حاوی ۳/۵ و ۷ درصد وزن درشت‌دانه (شن) ماسه است. طرح اختلاط سری ۲ نمونه‌های شاهد بتن متخلخل در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ می‌باشد و در نهایت، طرح اختلاط سری ۳، ۴ و ۵ به ترتیب با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ بوده که در هر یک از این طرح‌های اختلاط الیاف PPS به مقدار ۰/۳ درصد حجمی استفاده شده است. همچنین، در هر یک از این طرح‌های اختلاط مقادیر صفر، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی سیمان، خاکستر پوسته برنج که به صورت

Archive of SID

www.SID.ir

جایگزین با سیمان استفاده شده است.

در جدول ۲، به طور نمونه، طرح اختلاط نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ نشان داده شده است. همچنین، همه مقادیر نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ و ۰/۴ همانند نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ بوده و فقط مقدار آب متفاوت بوده و به ترتیب برابر ۱۱۲ و ۱۳۵ کیلوگرم می‌باشد. همچنین، در جدول ۲ پارامتر V_f به عنوان درصد حجم الیاف به حجم بتن می‌باشد.

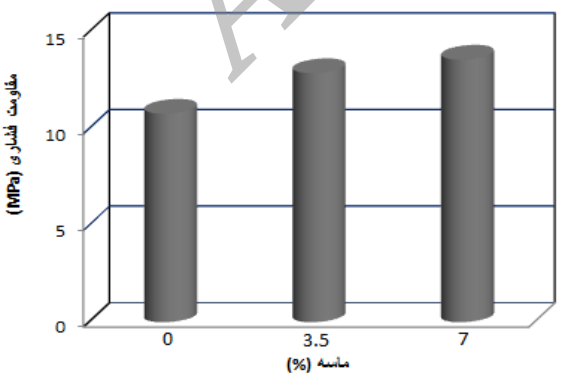
جدول ۲. جزئیات طرح‌های اختلاط مصالح

سری	نسبت آب به سیمان	نوع الیاف	خاکستر پوسته برنج (٪)	خاکستر پوسته برنج (kg)	سیمان	شن	ماسه	آب	فوق روان کننده
		-	-	-	۳۴۰	۱۵۰۰	۰	۹۳	۳/۵
۱	۰/۲۷	-	-	-	۳۴۰	۱۵۰۰	۱۴۴۷.۵	۹۳	۳/۵
		-	-	-	۳۴۰	۱۵۰۰	۱۳۹۵	۹۳	۳/۵
	۰/۲۷	-	–	–	۳۴۰	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۱/۵
۲	۰/۳۳	-	–	–	۳۴۰	۱۳۹۵	۱۰۵	۱۱۲	۱/۵
	۰/۴	-	–	–	۳۴۰	۱۳۹۵	۱۰۵	۱۳۵	۱/۵
			-	-	۳۴۰	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۱/۵
			۲	۶/۸	۳۳۳/۲	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۱/۸
			۴	۱۳/۶	۳۲۶/۴	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۲/۳
۳	۰/۲۷	الیافPPS V_f=0.3%	۶	۲۰/۴	۳۱۹/۶	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۲/۷
			۸	۲۷/۲	۳۱۲/۸	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۳/۱
			۱۰	۳۴	۳۰۶	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۳/۵
			۱۲	۴۰/۸	۲۹۹/۲	۱۳۹۵	۱۰۵	۹۳	۴

۴. تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۴-۱. اثر ماسه بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل

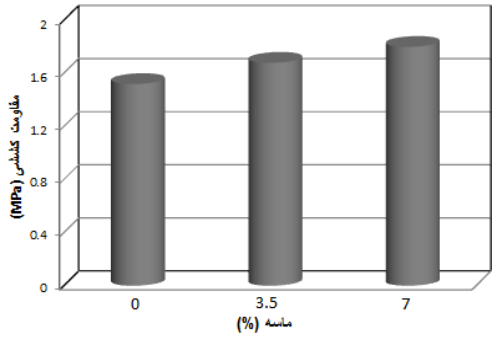
همانطور که از جدول طرح اختلاط مشاهده می‌شود، مقادیر ۳/۵ و ۷ درصد ماسه به بتن متخلخل اضافه شد و نتایج مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن متخلخل در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد ماسه، مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش یافته که این امر طبیعی است. به این دلیل که منافذی که درون بتن متخلخل وجود داشته و باعث می‌شود که خصوصیات مکانیکی بتن کاهش یابد، از ریزدانه پر شده و به تبع آن خواص مکانیکی بتن را بالا می‌برد. البته بایستی به این نکته توجه کرد که اگر درصد ماسه از یک حدی بیشتر شود امکان دارد نفوذپذیری بتن را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، مقدار ۷ درصد ماسه برای استفاده در طرح‌های اختلاط بعدی مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که سعی بر این بوده که تعادلی بین نفوذپذیری و مقاومت بتن متخلخل برقرار شود.



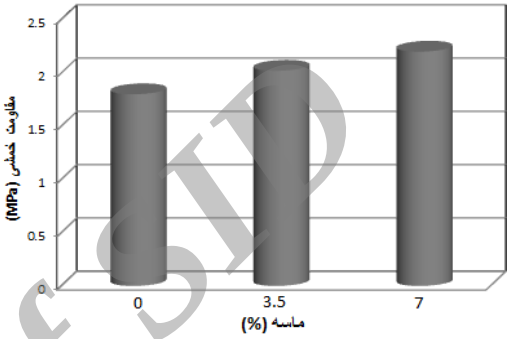
شکل ۳. مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی ماسه (سری ۱)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. مقاومت کششی بتن متخلخل حاوی ماسه (سری ۱)

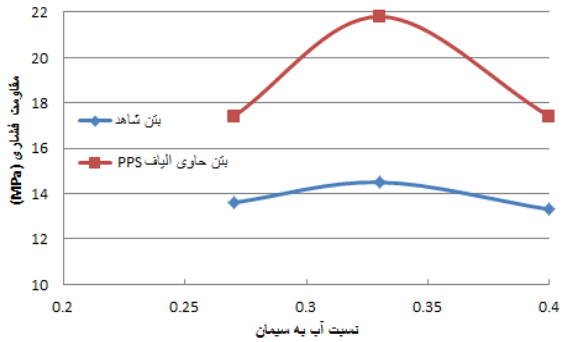


شکل ۵. مقاومت خمشی بتن متخلخل حاوی ماسه (سری ۱)

۴-۲. اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی

۴-۲-۱. مقاومت فشاری

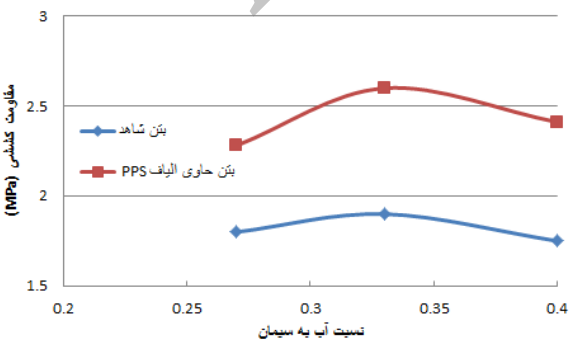
شکل ۶ اثر الیاف را بر مقاومت فشاری بتن متخلخل مطابق نتایج سری‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، الیاف PPS موجب افزایش ۲۸٪ مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد شده، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ این افزایش ۵۰٪ بوده و در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به مقدار ۳۰٪ می‌رسد. واضح است که زمانی که نیروی قائم فشاری به یک المان بتنی وارد می‌شود بتن خواستار افزایش کرنش جانبی است. به دلیل جای‌گیری و توزیع مناسب الیاف در ملات سیمان و به دنبال آن قفل و بست بهتر میان بتن و الیاف، کرنش جانبی تأخیر بیشتری پیدا می‌کند که این منجر به افزایش بیشتر مقاومت می‌شود. باید توجه داشت که انعطاف‌پذیری بالای الیاف و جای‌گیری مناسب الیاف در بتن متخلخل، مقاومت بیرون کشیدگی را افزایش می‌دهد و به دنبال آن مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.



شکل ۶. مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی الیاف

۴-۲-۲. مقاومت کششی

شکل ۷ اثر الیاف را بر مقاومت کششی بتن متخلخل مطابق نتایج سری‌های ۳ تا ۵ نشان داده است. با افزودن الیاف، روندی مشابه با افزایش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. مشابه مقاومت فشاری مخلوط، مقاومت کششی بتن حاوی الیاف مقاومتی به مراتب بالاتر نسبت به طرح بدون الیاف داشته است. به طوری که در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، الیاف PPS موجب افزایش ۲۸٪ مقاومت کششی نسبت به بتن شاهد شده، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ این افزایش ۳۷٪ می‌باشد و در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به مقدار ۳۱٪ می‌رسد. الیاف PPS به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری که دارند و همچنین جای‌گیری مناسب آنها درون بتن باعث درگیری بیشتر در ماتریس سیمان شده و سبب افزایش مقاومت کششی بتن متخلخل می‌شوند.



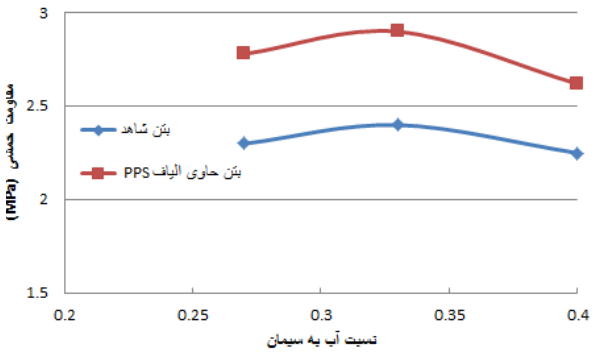
شکل ۷. مقاومت کششی بتن متخلخل حاوی الیاف

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۲-۳. مقاومت خمشی

شکل ۸ اثر الیاف را بر مقاومت خمشی بتن متخلخل مطابق نتایج سری‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد. در این شکل، با افزودن الیاف، روندی مشابه با افزایش مقاومت کششی در اثر حضور الیاف مشاهده می‌شود. مشابه مقاومت کششی مخلوط، مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف مقاومتی به مراتب بالاتر نسبت به طرح بدون الیاف داشته‌اند. به طوری که در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، الیاف PPS موجب افزایش ۲۱٪ مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد شده، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ این افزایش ۲۱٪ می‌باشد و در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به مقدار ۱۷٪ می‌رسد. با در نظر گرفتن این حقیقت که الیاف‌ها به طور ذاتی تحت کشش و یا کشش ناشی از خمش، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهند، نتایج آزمایش نیز مشخص می‌کند که با افزودن الیاف، مقاومت خمشی افزایش یافته و به تبع آن شکل‌پذیری بیشتری قبل از شکست در نمونه‌ها رخ می‌دهد. همان طور که از نتایج مشاهده می‌شود طول زیاد این الیاف سبب شده قرارگیری مناسب درون بتن داشته باشد و سبب درگیری بیشتر در ماتریس سیمان شود.



شکل ۸ مقاومت خمشی بتن متخلخل حاوی الیاف

۴-۳. اثر توأم الیاف و خاکستر پوسته برنج بر خصوصیات مکانیکی

با توجه به ضعیف بودن مقاومت بیرون کشیدگی الیاف در بتن‌های متخلخل حاوی الیاف (نمونه‌های شامل الیاف و بدون خاکستر پوسته برنج) به نظر می‌رسد که از ظرفیت الیاف به اندازه کافی استفاده نشده است. از طرفی، با توجه به نبود ریزدانه در بتن متخلخل ماتریس سیمان ضعیفی در آن وجود دارد. بنابراین، باید درگیری بین الیاف و بتن، با تقویت خمیر سیمان افزایش داده شود. این در حالی است که نمی‌توان حجم ماتریس سیمان را افزایش داد؛ به این دلیل که نفوذپذیری بتن را تحت تأثیر قرار داده و این با ماهیت بتن متخلخل مغایر می‌باشد. پس می‌توان با عیار سیمان موجود حجم عیار را ثابت نگه داشته و بخشی از سیمان را حذف نموده و به جای آن از پوزولان خاکستر پوسته برنج استفاده کرد تا از خاصیت پوزولانی پوسته برنج بهره برد. خاکستر پوسته برنج فعالیت پوزولانی بالایی دارد و معمولاً به عنوان ماده پوزولانی برای بتن استفاده می‌شود.

افزودن پوزولان‌ها، کریستال‌های سوزنی شکل (CH) را کاهش داده و با واکنش‌های پوزولانی، ژل C-S-H تولید کرده و مقاومت و دوام بتن را بهبود می‌بخشد (عزیز و همکاران، ۲۰۰۵). افزایش مقاومت و دوام بتن حاوی خاکستر پوسته برنج به دلیل تقویت ناحیه انتقال، اصلاح ساختار منافذ، مسدود کردن حفرات بزرگ در خمیر سیمان هیدراته از طریق واکنش پوزولانی می‌باشد.

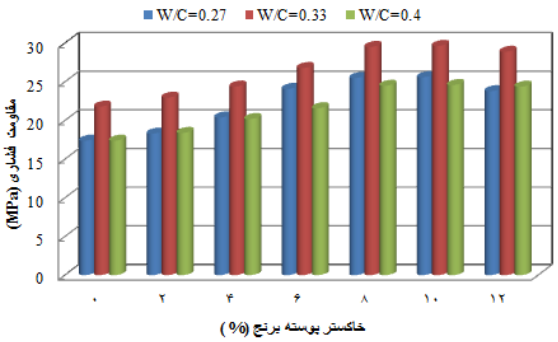
از جنبه شیمیایی می‌توان به تأثیرگذاری خاکستر پوسته برنج بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل اشاره کرد که باعث شده این ماده خواص بتن را بهبود بخشد. منظور از اثر شیمیایی خاکستر پوسته برنج سطح مخصوص زیاد و واکنش‌پذیری بسیار بالای آن می‌باشد. خاکستر پوسته برنج می‌تواند با هیدروکسید کلسیم به سرعت واکنش دهد و ژل C–S–H تولید نماید. به این ترتیب، ابعاد و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد و به جای آن ژل C–S–H فضاهای خالی موجود در سطح تماس سنگ‌دانه‌ها با خمیر سیمان را پر می‌کند و سبب می‌شود ناحیه فصل مشترک سنگ‌دانه‌ها با خمیر سیمان بسیار متراکم‌تر شود (رمضانیانپور و همکاران، ۲۰۰۹).

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۳-۱. مقاومت فشاری

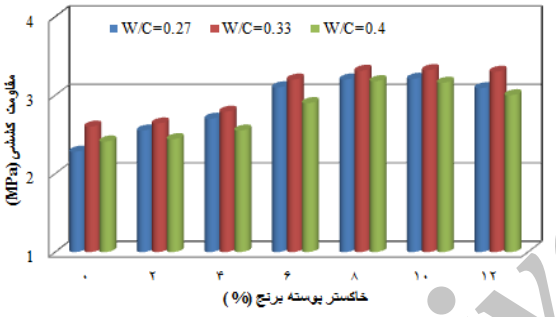
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سری‌های ۳ تا ۵ نمونه‌های حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج مقاومت فشاری افزایش یافته، اما با بیشتر شدن آن منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود. بنابراین، محدوده ۸ تا ۱۰ درصد خاکستر پوسته برنج را می‌توان به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت که منجر به بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری می‌شود. مقادیر افزایش مقاومت فشاری در هر سه نسبت آب به سیمان بین ۳۴ تا ۳۶ درصد نسبت به بتن شاهد بدون خاکستر و با الیاف می‌باشد. باید توجه نمود که احتمالاً به دلیل کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم و کاهش ضخامت ناحیه انتقال بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان، افزایش مقاومت بتن حاوی خاکستر پوسته برنج در مقایسه با بتن شاهد مشاهده شده است. اما بعد از حد بهینه با افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج مقدار مقاومت فشاری به دلیل کاهش کارایی و عدم وجود آب لازم، کاهش می‌یابد.



شکل ۹. مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴

۴-۳-۲. مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی در سری‌های ۳ تا ۵ نمونه‌های حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود همانند روند مقاومت فشاری، با افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط خاکستر پوسته برنج در ابتدا مقاومت کششی افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. مقدار افزایش مقاومت کششی در هر سه نسبت آب به سیمان بین ۳۰ تا ۴۱ درصد است، که این درصد افزایش برای هر کدام از نسبت‌های آب به سیمان نسبت به بتن شاهد بدون خاکستر و با الیاف می‌باشد. می‌توان این‌گونه بیان نمود که خاکستر پوسته برنج سبب تقویت خمیر سیمان شده و همچنین الیاف PPS کارایی مناسبی از خود نشان داده و سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود. همچنین، از دیگر دلایل افزایش مقاومت کششی، اندازه بسیار کوچک خاکستر پوسته برنج و اثر پرکنندگی آن می‌باشد.



شکل ۱۰. مقاومت کششی بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴

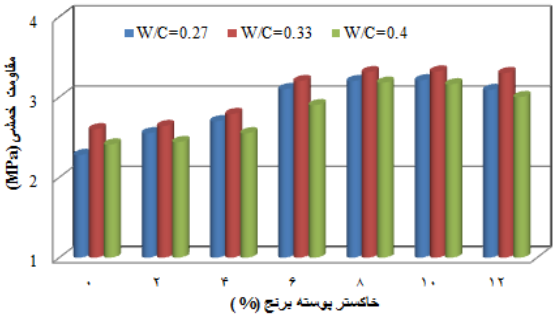
۴-۳-۳. مقاومت خمشی

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی در سری‌های ۳ تا ۵ نمونه‌های حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط خاکستر پوسته برنج در ابتدا مقاومت خمشی افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. مقدار افزایش مقاومت خمشی در هر سه نسبت آب به سیمان بین ۵۳ تا ۶۹ درصد می‌باشد که این درصد افزایش برای هر کدام از نسبت‌های آب به سیمان نسبت به بتن شاهد بدون خاکستر و با الیاف می‌باشد. این امر نشان‌دهنده آن است که چسبندگی بین ماتریس سیمان

Archive of SID

www.SID.ir

و سنگ‌دانه در اثر حضور خاکستر پوسته برنج تقویت شده و عاملی برای افزایش مقاومت خمشی شده است.

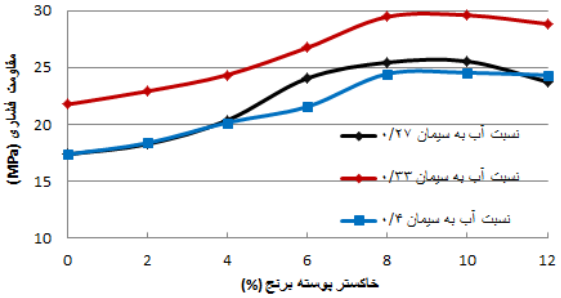


شکل ۱۱. مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/٤

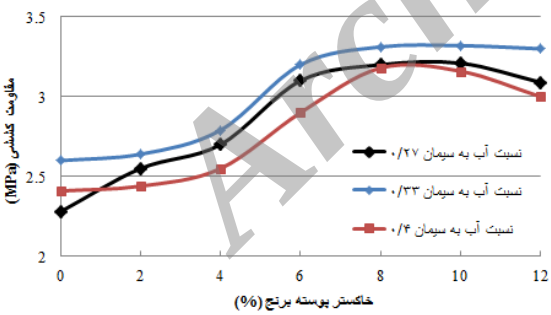
از نتایج به دست آمده در بخش فوق می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه خاکستر پوسته برنج برای طرح‌های حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج (سری ۳ تا ۵) بین ۸ تا ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین، می‌توان به این صورت استنباط نمود که شیب قبل از درصد بهینه خاکستر پوسته برنج در هر سه نسبت آب به سیمان بیشتر از شیب بعد از درصد بهینه می‌باشد. به طوری که بعد از درصد بهینه، شیب ملایمی دارد. در واقع باید مقدار ۱۲ درصد خاکستر پوسته برنج از نظر اقتصادی و اجرایی انتخاب شود. به این دلیل که مقاومت فشاری، کششی و خمشی به اندازه کمی نسبت به درصد بهینه کاهش پیدا کرده، در حالی که نفوذپذیری به شدت نسبت به درصد بهینه افزایش پیدا می‌کند. همچنین، از نتایج به دست آمده در بخش‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که زمانی که ماسه و خاکستر پوسته برنج با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت بتن متخلخل دارند و زمانی که این دو افزودنی به همراه الیاف در بتن متخلخل استفاده شوند تأثیر چشمگیری بر مقاومت کششی و خمشی داشته‌اند، البته به این نکته بایستی توجه کرد که ماسه و خاکستر پوسته برنج سبب کاهش چشمگیر تخلخل و نفوذپذیری می‌شوند.

۴-۴. اثر نسبت آب به سیمان

با توجه به تأثیر قابل توجه آب بر خصوصیات بتن، نسبت‌های مختلف آب به سیمان در طرح اختلاط بتن متخلخل در نظر گرفته شد. از این رو نمودارهای خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ترسیم شده است. نسبت‌های آب به سیمان در محدوده ۰/۲۷–۰/۴۰ انتخاب شد. به طوری که سایر اجزای تشکیل دهنده آن ثابت در نظر گرفته شد.



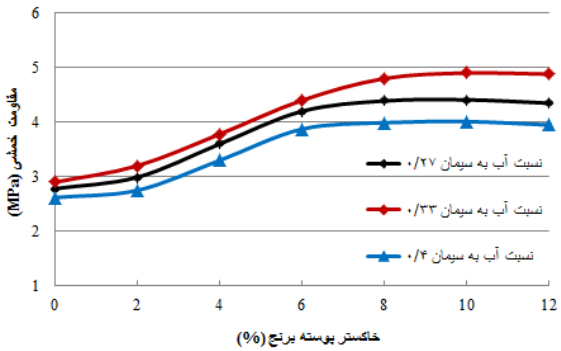
شکل ۱۲. تأثیر نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ بر مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج



شکل ۱۳. تأثیر نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ بر مقاومت کششی بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۴. تأثیر نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ بر مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج

این را می‌توان به وضوح مشاهده کرد که نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ بالاترین مقدار مقاومت فشاری را داشته است. همانطور که مشاهده می‌شود، وجود نقطه عطفی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ کل روند را به دو قسمت جداگانه تقسیم می‌کند. در قسمت اول، که نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۳۳ است، درصد افزایش مقاومت فشاری کمی بیشتر از درصد کاهش از نقطه عطف به بعد می‌باشد. همچنین، کمترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ است.

همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ و ۰/۴ در مقایسه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ مقاومت فشاری کمتری داشته است. در ارتباط با تغییرات مقاومت فشاری برای بتن متخلخل این گونه می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ احتمالاً شکست نمونه از خمیر سیمان بین سنگدانه رخ داده است که این شکست عمدتاً به دلیل مقدار آب موجود بوده که برای عمل هیدراسیون خمیر سیمان کافی نبوده است. در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ کارایی مخلوط افزایش یافته و منجر به این شده که مقدار آب موجود به طور کامل عمل هیدراسیون خمیر سیمان را انجام دهد و در نتیجه سبب ایجاد بتن مقاوم‌تری شود و در نهایت در نسبت آب به سیمان ۰/۴ مقدار زیاد آب، انقباض بتن متخلخل را در طول مدت عمل‌آوری بیشتر کرده و در نتیجه سبب شده هوای زیاد در بتن سخت شده به‌وجود آید و مقاومت فشاری بتن کاهش یابد.

همانطور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است، روند کسب مقاومت کششی و خمشی مشابه با مقاومت فشاری بوده، به طوری که در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ بالاترین مقدار مقاومت کششی و خمشی مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است، نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ نمودار های مقاومت کششی و خمشی را مشابه با مقاومت فشاری به دو بخش تقسیم می‌کند. به طوری که مقاومت کششی در نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۳۳ با شیب زیادی افزایش یافته و از این نقطه به بعد با شیب بسیار کمتری کاهش می‌یابد. البته در مقاومت خمشی روند کسب مقاومت برعکس مقاومت کششی بوده، به طوری که قبل از نقطه بهینه با شیب کمی افزایش یافته و بعد از آن با شیب بسیار تندی کاهش می‌یابد.

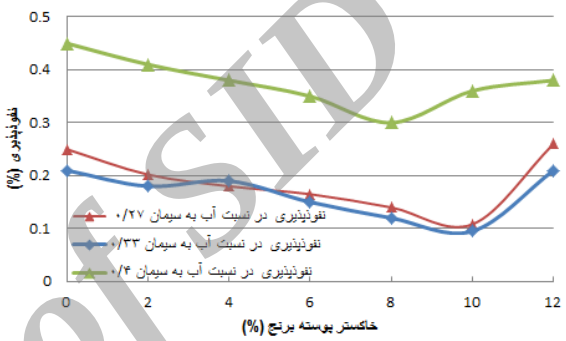
۴-۵. نتایج آزمایش تخلخل و نفوذپذیری

نتایج آزمایش تخلخل در بتن متخلخل حاوی ۳/۵ و ۷ درصد ماسه به ترتیب برابر ۲۶ و ۲۳ درصد بوده که در محدوده مجازی قرار دارد (آئین‌نامه ACI 522R-06). همچنین، نفوذپذیری و تخلخل بتن حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج در سه نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴ در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نفوذپذیری در محدوده ۰/۰۸ cm/s تا ۰/۴۸ cm/s و تخلخل در محدوده ۹ تا ۲۹ درصد می‌باشد که با توجه به این مقادیر، می‌توان از آن به عنوان یک لایه زهکش در روسازی استفاده کرد. همان طور که از نمودارهای نفوذپذیری و تخلخل مشاهده می‌شود، الیاف نسبت به خاکستر پوسته برنج تأثیر آنچنانی بر نفوذپذیری و تخلخل نداشته است. این در حالی است که با افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج، نفوذپذیری و تخلخل به سرعت در حال کاهش می‌باشند، هر چند از

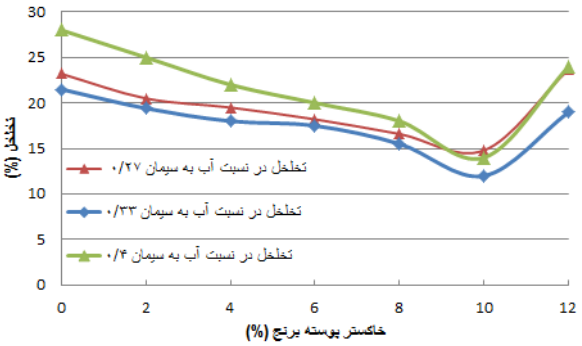
Archive of SID

www.SID.ir

مقدار خاکستر پوسته برنج بین ۸ تا ۱۰ درصد به بعد در سری‌های مختلف (سری ۳ تا ۵) این روند کاملاً برعکس شده است. واضح است که نفوذپذیری و تخلخل رابطه مستقیمی با یکدیگر داشته (آئین‌نامه ACI 522R-06)، به طوری که با افزایش مقدار تخلخل مقدار ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵. نفوذپذیری بتن متخلخل در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴



شکل ۱۶. تخلخل بتن متخلخل در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴

۵. نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج حاصل از بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن متخلخل حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج، نتایج زیر به عنوان یافته‌های این پژوهش ارائه می‌شود:

– یکی از بهترین راهکارها جهت کاهش هزینه‌های اقتصادی بتن و همچنین کاهش آلودگی محیط‌زیست، استفاده از خاکستر پوسته برتج در بتن متخلخل است. علاوه بر آن، این ماده سبب افزایش خصوصیات مکانیکی بتن هم می‌گردد.

– در ساختار بتن متخلخل به دلیل نبود ریزدانه یا کم بودن ریزدانه، دو عامل قفل و بست سنگ‌دانه‌ها و مقاومت پیوندی خمیر سیمان و سنگ‌دانه، تأمین‌کننده خصوصیات مقاومتی این نوع بتن است. پس با افزایش مقاومت پیوندی خمیر سیمان با استفاده از خاکستر پوسته برنج، خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل افزایش داده می‌شود. از طرفی، با افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج، فضای خالی و در نتیجه نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.

– با افزایش مقدار ماسه درون بتن متخلخل نفوذپذیری آن کاهش یافته و خصوصیات مکانیکی آن افزایش می‌یابد. البته در این پژوهش سعی بر این است که تعادلی بین نفوذپذیری و مقاومت بتن متخلخل برقرار شود.

– نتایج تخلخل و نفوذپذیری در کلیه طرح‌های اختلاط نشان می‌دهد که نفوذپذیری در محدوده ۰/۰۸ cm/s تا ۰/۴۸ cm/s و تخلخل در محدوده ۹ تا ۲۹ درصد می‌باشد که به اندازه کافی بالا بوده و می‌توان از بتن متخلخل به عنوان یک لایه زهکش در روسازی استفاده کرد.

– روند کسب مقاومت فشاری، کششی و خمشی در هر سه نسبت آب به سیمان در بتن متخلخل حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج مشابه بوده و به این ترتیب بوده که تا نقطه بهینه با شیب تندی افزایش‌یافته و از آن نقطه به بعد با شیب ملایمی کاهش می‌یابد.

– درصد بهینه خاکستر پوسته برنج در نمونه‌های حاوی الیاف ودر مقاومت فشاری، کششی و خمشی (طرح‌های ۳ تا ۵) بین ۸ تا ۱۰ می‌باشد.

– با توجه به اینکه نسبت آب به سیمان پارامتر تأثیرگذاری در خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل می‌باشد افزایش نسبت آب به سیمان منجر به افزایش خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل شده به طوری که درصد بهینه در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ بوده و در این

Archive of SID

www.SID.ir

نسبت، بالاترین مقدار خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی رخ داده است.

– در نمونه‌های حاوی الیاف (بدون خاکستر پوسته برنج)، مقاومت فشاری، کششی و خمشی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ به ترتیب ۵۰، ۳۷ و ۲۱ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد.

– در محدوده جایگزینی ۸ تا ۱۰ درصد خاکستر پوسته برنج و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ مقاومت فشاری در بتن متخلخل حاوی الیاف و خاکستر پوسته برنج ۳۶٪، در مقاومت کششی ۲۸٪ و همچنین مقدار مقاومت خمشی ۶۹٪ افزایش داشته است.

۶. مراجع

مدندوست، ر. و رحیمی پله شاه، پ. ۱۳۹۰. "بررسی ویژگی‌های بتن حاوی خاکستر پوسته برنج". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.

ACI 522R-06. 2006. "Pervious concrete". American Concrete Institute.

ASTM C39. 2004. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C496. 2004. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C78. 2004. "Standard test method for flexural strength of beam concrete specimens". Annual Book of ASTM Standards.

Salas, A., Delvasto, S., Mejía de Gutierrez, R. and Lange, D. 2009. "Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete". Cement and Concrete Res. 39: 773-778.

Aziz, M. A. E., Aleem, S. A. E., Heikal, M. and Didamony, H. E. 2005. "Hydration and durability of sulphate-resisting and slag cement blends in Caron's Lake water". Cement and Concrete Res. 35(8): 1592-1600.

Beeldens, A., Van Gemert, D. and Caestecker, C. 2003. "Porous concrete: Laboratory versus field experience". In: Proc. 9th Intl. Symp. Concrete Roads, Istanbul, Turkey.

Bui, D. D., Hu, J. and Stroeven, P. 2005. "Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete". Cement and Concrete Comp. 27(3): 357-366.

Deepa, G. N., Fraaij, A., Klaassen, A. A. K. and Kentgens, A. P. M. 2008. "A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes". Cement and Concrete Res. 38: 861-869.

Ferguson, B. K. 2005. "Pervious Pavements". Taylor and Francis Group, New York.

Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K. 2008. "Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete". Constr. Build. Mater. 22: 1675-1683.

Goldman, A. and Bentur, A. 1993. "The influence of microfillers on enhancement of concrete strength". Cement and Concrete Res. 23: 962-972.

Habeeb, G. A. and Fayyadh, M. M. 2009. "Rice husk ash concrete: The effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage". Aust. J. Basic Appl. Sci. 3(3): 1616-1622.

Hesami, S., Ahmadi, S. and Nematzade, M. 2014a. "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement". Constr. Build. Mater. 53: 680-691.

Hesami, S., Ahmadi, S. and Sadeghi, V. 2014b. "Evaluation of polyphenylene sulfide and steel fibers on mechanical properties of pervious concrete pavement". Intl. J. Pave. Res. Technol.

Jauberthie, R., Rendell, F., Tamba, S. and Cisse, I. 2000. "Origin of the pozzolanic effect of rice husks". Constr. Build. Mater. 14: 419-423.

Jiang, Z., Sun, Z. and Wang, P. 2005. "Effects of some factors on properties of porous pervious concrete". J. Build. Mater. 8: 513-519.

Kevernm J., Wang, K., Suleiman, M. T. and Schaefer, V. 2005. "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates". Proc. of 2005 Mid-Continent.

Lian, C., Zhuge, Y. and Beecham, S. 2011. "The relationship between porosity and strength for porous concrete". Constr. Build. Mater. 25: 4294-4298.

Lian, C., Zhuge, Y. 2010. "Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. Constr. Build. Mater. 24(12): 2664-2671.

Montes, F., Valavala, S. and Haselbach, L. 2005. "A new test method for porosity measurements of portland cement pervious concrete". J. ASTM Intl. 2(1): 13.

Naji Givi, A., Suraya, A. R., Farah Nora, A. A. and Mohamad Amran, M. S. 2010. "Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: A review". J. Amer. Sci. 6(3): 157-165.

Narayanan, N., Jason, W. and Jan, O. 2006. "Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance". Cement Concrete Res. 36: 2074-2085.

Archive of SID

www.SID.ir

National Ready Mixed Concrete Association. 2004. "Freeze Thaw Resistance of Pervious Concrete". Silver Spring, MD, pp. 1-17.
Ramezanianpour M. Mahdikhani M, Ahmadibeni, Gh. 2009. "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes". Intl. J. Civil Eng. 7(2): 83-91.
Schaefer, V. R., Wang, K., Sulieman, M. T. and Kevern, J. T. 2006. "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates". Final Report, Iowa Department of Transportation, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa Concrete Paving Association.
Scrivener, K. L., Bentur, A. and Pratt, P. L. 1988. "Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes". Adv. Cement Res. 1(4): 230-237.
Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S. and Koh, K. T. 2012. "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced Concrete". Cement Concrete Comp. (34): 172-184.
Sonebi, M. and Bassuoni, M. T. 2013. "Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modeling". Constr. Build. Mater. 38: 147-154.
Tagnit-Hamou, A., Vanhove, Y. and Petrov, N. 2005. "Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes". Cement Concrete Res. 35(2): 364-370.
Tennis, P. D., Leming, M. L. and Akers, D. J. 2004. "Pervious Concrete Pavements". EB302 Portland Cement Association, Skokie Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Maryland, Silver Spring.
Yang, J. and Jiang, G. 2003. "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials". Cement and Concrete Res. 33: 381-386.
3M Company. 3M Scotchcast™. 2004. Polyolefin fibers comparative technical data. 3M Technical Report.

Archive of SID

www.SID.ir