

تحقیقات بتن
سال یازدهم، شماره سوم
پاییز ۹۷
ص ۲۸ - ۱۹
تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۴
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۱

تأثیر دوده سیلیسی و جایگزینی ماسه با کلینکر سیمان پرتلند در کاهش آثار منفی ناحیه انتقالی بتن

جعفر شفقت

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

علی الهوردی *

استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

چکیده

در این تحقیق برای ترمیم ناحیه انتقالی بتن از دو تکنیک استفاده شد. در تکنیک اول، ۱۸ درصد وزنی سیمان با دوده سیلیسی جایگزین و بتن پودری واکنش پذیر (RPC) تولید شد. در تکنیک دوم، در کنار استفاده از دوده سیلیسی، ماسه مصرفی در بتن به طور کامل با کلینکر سیمان پرتلند جایگزین شد که منجر به تولید بتن پودری-سنگدانه‌ای واکنش پذیر (Reactive Powder-Aggregate Concrete) تولید شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن پودری-سنگدانه‌ای واکنش پذیر (RPAC) و بتن RPC با بتن معمولی (NC) به ترتیب نشان‌دهنده افزایش ۱۷۴ و ۱۴۶ درصدی مقاومت فشاری در سن هفت روز بود. همچنین مقایسه نتایج عمق نفوذ کلر و میزان جذب آب بتن‌های RPAC و RPC با بتن NC نشان‌دهنده کاهش قابل ملاحظه عمق نفوذ کلر و میزان جذب آب در مقایسه با بتن NC بود. بررسی‌های بعمل آمده با میکروسکوپ الکترونی روبشی، حذف قابل ملاحظه نواقص ساختاری ناحیه انتقالی در بتن RPAC را نمایان ساخت.

واژه‌های کلیدی: بتن، ناحیه انتقالی، دوده سیلیسی، مقاومت فشاری، کلینکر سیمان پرتلند.

* نویسنده مسئول: ali.allahverdi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

وزنی، سبب افزایش مقاومت فشاری می شود [6]، اما با جایگزینی ۳۰ درصد، شاهد تضعیف بتن خواهیم بود [10]. گیوی و همکارانش، تأثیر اندازه ذرات خاکستر پسته برنج را در خواص بتن ارزیابی نمودند و مشاهده کردند هرچه خاکستر پسته برنج نرم تر باشد، نفوذپذیری آب در بتن، بیشتر کاهش می یابد و این به معنای کاهش بیشتر تخلخل و بهبود بیشتر ناحیه انتقالی است [11]. با توجه به اینکه کلینکر می تواند وارد واکنش هیدراتاسیون شده و ترکیبات چسباننده تولید کند، در این تحقیق، برای تولید نمونه های بتنی، در کنار استفاده از دوده سیلیسی، از کلینکر سیمان پرتلند نیز بجای ماسه به عنوان سنگدانه استفاده شد. برای بررسی تأثیر استفاده از دوده سیلیسی و جایگزینی ماسه با کلینکر سیمان پرتلند بر روی ابعاد ناحیه انتقالی، ریزساختار ملات تولیدی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. همچنین مقاومت های فشاری و خمشی، عمق نفوذ کلر، میزان جذب آب، درصد حجم تخلخل باز و زمان گیرش اندازه گیری شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- آماده سازی نمونه ها

فوق روان کننده مصرفی در این تحقیق، بر پایه پلی کربوکسیلات بود که در شرکت کلینیک فنی و تخصصی بتن و با نام تجاری Dezobuild D-10 تولید شده است. دوده سیلیسی مورد نیاز، از شرکت فرو آلیاژ ایران که در لرستان واقع شده است، تهیه شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیسی مصرفی در جدول (۱) آمده است.

در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ و کلینکر آن که در کارخانه سیمان تهران تولید شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان و کلینکر مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیسی مصرفی

ترکیبات شیمیایی (wt. %)			خصوصیات فیزیکی		
Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	رطوبت (wt. %)	دانسیته (kg/m ³)	نرمی بلین (m ² /kg)
۰/۸۲	۰/۴	۹۶/۱۲	۱/۹۸	۲۱۳	۱۸۰۰۰

مطالعات میکروسکوپی بر روی بتن نشان می دهد در فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه، ناحیه ای با تخلخل بالا و مواد چسباننده اندک وجود دارد که به آن ناحیه انتقالی سطح مشترک می گویند [1]. گرچه محققین برای ضخامت این ناحیه، عددهای مختلفی ارائه داده اند اما می توان ادعا کرد ضخامت ناحیه انتقالی برای بسیاری از بتن ها در محدوده ۶۰ - ۱۰ میکرون است [2]. ناحیه انتقالی سبب بروز آثار منفی زیادی در بتن می شود. از جمله اینکه غلظت بلورهای اترینگایت و پرتلندایت که خاصیت چسبانندگی ندارند در این ناحیه بیشتر از دیگر نواحی بتن است و در مقابل، ژل هیدرات سیلیکات کلسیم که اصلی ترین ترکیب سیمانی دارای خاصیت چسبانندگی در بتن است، در این ناحیه کمترین مقدار را دارد [3]. وجود ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه در بتن، موجب کاهش مقاومت های فشاری و خمشی و همچنین کاهش دوام بتن در محیط های مهاجم می شود [4]. به همین دلیل، دانشمندان در پی بهبود ریزساختار ناحیه انتقالی و کاهش آثار منفی ناشی از آن هستند.

نیلی و احسانی از نانو سیلیس و دوده سیلیسی برای بهبود ناحیه انتقالی استفاده کردند که مشخص شد با جایگزینی همزمان سیمان با نانو سیلیس و دوده سیلیسی به ترتیب به میزان ۳ و ۵ درصد، بهترین مقاومت فشاری برای بتن بدست می آید [5]. آزمایش های کوهن و همکارانش نشان داد که استفاده از دوده سیلیسی به تنهایی نیز در بهبود ناحیه انتقالی موثر است [6].

متاکائولین از دیگر موادی است که برای بهبود آثار منفی ناحیه انتقالی استفاده شده است [7,8]. دان و همکارانش مشاهده کردند که اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی متاکائولین به سیمان، سبب کاهش تخلخل شده و ناحیه انتقالی را متراکم می کند [7]. سرباره از دیگر مواد مکمل سیمانی است که برای بهبود خواص ناحیه انتقالی استفاده شده است. تحقیقات نشان داده است که جایگزین نمودن ۱۰ درصد وزنی سیمان با سرباره و تولید سیمان پرتلند سرباره ای موجب بهبود ناحیه انتقالی در بتن می شود [7].

خاکستر پسته برنج که یک ماده پوزولانی واکنش پذیر است، برای بهبود ریزساختار ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه در بتن با کارایی بالا (HPC) بکار رفته است [9]. تحقیقات نشان داده است که جایگزین کردن سیمان با خاکستر پسته برنج تا ۲۰ درصد

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان و کلینکر مصرفی

ترکیبات شیمیایی (wt. %)								خصوصیات فیزیکی		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	آهک آزاد	دانسیته (kg/m ³)	نرمی بلین (m ² /kg)
۲۲/۷۰	۴/۸۴	۳/۲۷	۶۲/۹۹	۳/۰۳	۲/۰۰	۰/۵۱	۰/۲۰	۰/۶۸	۳۱۱۲	۳۱۲
۲۲/۸۰	۵/۵۰	۳/۵۴	۶۳/۱۴	۲/۵۴	۲/۵۷	۰/۵۷	۰/۲۱	۰/۷۲	۳۲۱۵	-

در بتن‌های RPAC و RPC به میزان ۱۸ درصد جرمی سیمان، سیمان با دوده سیلیسی جایگزین شد [8]. همچنین نسبت جرمی آب به سیمان براساس کارپذیری یکسان در بتن‌های NC، RPC و RPAC به روش میز سیلان بدست آمد. طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در جدول (۴۳) آمده است. نمونه‌های بتنی بعد از تولید، به مدت یک روز در رطوبت بالای ۹۵ درصد نگهداری شده و سپس تا روز آزمایش در محلول آب آهک اشباع عمل آوری شدند.

جدول ۴- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی برحسب (kg/m³)

RPAC	RPC	NC	
۳۱۶/۳۱	۳۱۶/۳۱	۴۵۰	سیمان
۱۳۳/۶۹	۱۳۳/۶۹	۰	دوده سیلیسی
۲۲/۲۹	۲۲/۲۹	۰	فوق روان کننده
۱۹۳/۵	۱۳۹/۵	۲۴۵	آب
۱۵۲۴	۰	۰	کلینکر
۰	۱۶۹۰	۱۶۹۰	ماسه
۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۵۴۵	نسبت جرمی آب به سیمان
۲/۲۰۷	۲/۲۰۷	۲/۲۰۷	نسبت حجمی سنگدانه به سیمان

۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری و انجام آزمایش‌ها

۲-۲-۱- زمان گیرش و کارپذیری

زمان گیرش بتن‌ها، مطابق استاندارد ASTM C807 و با به کار بردن سوزن و یکات اندازه‌گیری شد [14]. همچنین کارپذیری نمونه‌های بتن تازه، با استفاده از میز سیلان مطابق استانداردهای ASTM C1437 و ASTM C230 اندازه‌گیری و مقایسه شد [15,16].

ماسه مورد استفاده از ماسه شسته شده معادن اطراف آمل در حاشیه رودخانه هراز تهیه شد. با توجه به اینکه محققین، در بتن‌های پودری واکنش‌پذیر اکثراً از سنگدانه‌های کوچکتر از ۱ میلی‌متر استفاده می‌کنند، حداکثر اندازه سنگدانه در ماسه مصرفی برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل اینکه بر اساس تحقیقات پینگ و همکارانش [12] سنگدانه‌های با اندازه ریزتر، ناحیه انتقالی کمتری دارند لذا حداقل اندازه سنگدانه نیز در حد ۰/۲۵ میلی‌متر محدود شده است تا حداقل امکان در نمونه‌ها، ناحیه انتقالی بزرگتری ایجاد شود و اثرات ناحیه انتقالی، قابلیت ارزیابی بیشتری داشته باشد. کلینکر نیز با توزیع اندازه ذرات کاملاً مشابه با ماسه تهیه شد و مورد استفاده قرار گرفت. توزیع اندازه ذرات ماسه و کلینکر در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- توزیع دانه‌بندی ماسه و کلینکر مصرفی

درصد	اندازه سنگدانه (mm)
۳۷/۲۵	۱ - ۰/۶۸
۲۰/۷۵	۰/۶۸ - ۰/۵۵
۴۲	۰/۵۵ - ۰/۲۵

برای تولید بتن معمولی (NC^۱) مطابق با استاندارد ASTM C192 عمل شد [13] به‌طوری‌که ابتدا سیمان با آب مخلوط شده و سپس سنگدانه به آن اضافه شد. همچنین برای تولید نمونه‌های بتن پودری-سنگدانه‌ای واکنش‌پذیر (RPAC^۲) و بتن پودری واکنش‌پذیر، ابتدا فوق روان کننده به میزان ۳ درصد جرمی چسباننده (سیمان و دوده سیلیسی) در آب حل شد. سپس دوده سیلیسی و بعد سیمان به محلول آب و فوق روان کننده اضافه شد و در نهایت سنگدانه به مخلوط افزوده و همزده شد.

¹ Normal concrete

² Reactive powder-aggregate concrete

۲-۲-۲- مقاومت‌های فشاری و خمشی

که حاوی کلر بود، نقره نیترات سفید رنگ رسوب کرد. بر اساس این تغییر رنگ، عمق نفوذ کلر اندازه‌گیری و مقایسه شد.

با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری و خمشی با مدل CM111، مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۶۰ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شد. برای این منظور آزمون‌های ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر ساخته شد. ابتدا مطابق با استاندارد ASTM C348 هر آزمون با یک بار اندازه‌گیری مقاومت خمشی، به دو نیم تقسیم شد [17]. سپس هر یک از دو نیمه، مطابق با استاندارد ASTM C109 برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری استفاده شد [18]. برای اندازه‌گیری مقاومت هر نمونه در هر سن، دو آزمون مورد استفاده قرار گرفت. این بدان معنی است که هر داده گزارش شده برای مقاومت خمشی، میانگین دو عدد و هر داده گزارش شده برای مقاومت فشاری، میانگین چهار عدد است.

۲-۲-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی

۲-۲-۵- آزمایش میزان جذب آب و حجم تخلخل باز
برای اندازه‌گیری میزان جذب آب و حجم تخلخل باز بتن‌ها، دو آزمون با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری ساخته شد. این آزمون‌ها ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس بر طبق استاندارد ASTM C 642 برای اندازه‌گیری درصد جذب آب و درصد حجم تخلخل باز بکار رفتند [19]. مطابق با این استاندارد برای اندازه‌گیری میزان جذب آب ابتدا آزمون عمل‌آوری شده در آن خشک شد و وزن آزمون خشک (A) اندازه‌گیری شد. سپس آزمون مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت. بعد از این مدت، از آب خارج شده و خشک و توزین شد. دوباره به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت و سپس از آب خارج، خشک و توزین شد. این کار تا جایی ادامه پیدا کرد که اختلاف وزن آزمون در دو اندازه‌گیری متوالی از ۰/۵ درصد وزن آزمون، کمتر شود. با تحقق این شرط وزن آزمون خشک اشباع شده با آب (B) اندازه‌گیری شد. با استفاده از رابطه (۱) میزان جذب آب محاسبه شد.

۳-۲-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی
برای انجام مطالعات تکمیلی با میکروسکوپ الکترونی روبشی، از قطعات باقیمانده آزمون‌های مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز استفاده شد. ابتدا قطعات انتخاب شده به کمک کاغذ سمباده زیر و سپس کاغذ سمباده نرم به خوبی صیقل داده شد. سپس قطعات حاصل، پولیش داده شده و به مدت سه روز در آن در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس خشک شدند. قبل از قراردادن قطعات در داخل میکروسکوپ ابتدا سطوح آنها با لایه نازکی از طلا پوشش داده شد. برای مطالعه ریز ساختار بتن‌ها، از مُد BSE میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

رابطه (۱)
$$\text{میزان جذب آب (\%)} = 100 * \frac{B-A}{A}$$

بعد از توزین آزمون خشک اشباع شده با آب، آزمون مورد نظر به مدت ۵ ساعت در آب جوش قرار گرفت. سپس از آب جوش خارج شده و سطح آن با حوله خشک شد و وزن آزمون جوشانده شده خشک (C) اندازه‌گیری شد. در ادامه آزمون مورد نظر در آب غوطه‌ور و توزین شده و وزنش (D) تعیین شد. با استفاده از رابطه (۲) درصد حجم تخلخل باز به دست آمد:

۲-۲-۴- آزمایش نفوذ کلر

رابطه (۲)
$$\text{Volume of permeable pore space (void) (\%)} = 100 * \frac{C-A}{C-D}$$

برای تعیین عمق نفوذ کلر، آزمون‌هایی با ابعاد ۴×۴×۸ سانتی‌متر ساخته شده و به مدت ۲۸ روز در شرایط گفته شده در قسمت آماده‌سازی نمونه‌ها، نگهداری شدند. سپس به جز یکی از جوه با سطح مقطع ۴×۴ سانتی‌متر، بقیه سطوح با استفاده از قیر، آب‌بندی شد. آزمون‌های آب‌بندی شده، در محلول آب نمک با غلظت ۱۵ درصد وزنی که از کلسیم اکسید اشباع شده بود قرار گرفتند. بعد از ۱۴ و ۲۸ روز، آزمون‌ها از محلول خارج و با برش طولی به دو نیمه با ابعاد ۲×۴×۸ سانتی‌متر تقسیم شدند. برای آشکارسازی کلر نفوذ کرده در آزمون‌ها، محلول نیترات با غلظت ۰/۱ مول بر لیتر بر روی سطوح برش داده شده پاشیده شد. در بخشی از آزمون

۳- نتایج و بحث

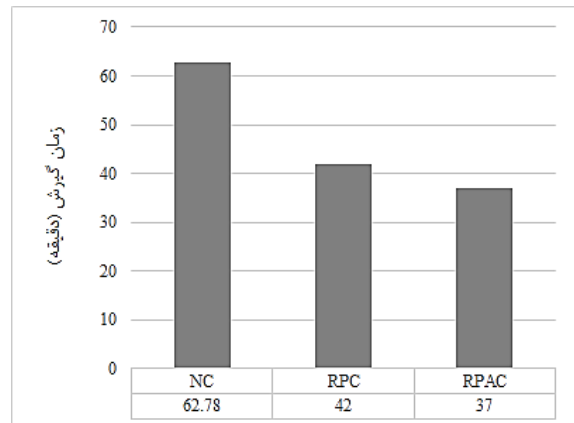
۳-۱- زمان گیرش

در شکل (۱) زمان گیرش نمونه‌های بتنی نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود زمان گیرش بتن‌های RPC و RPAC، به ترتیب ۳۳ و ۴۱ درصد کمتر از بتن NC است. این نتیجه نشان دهنده تاثیر دوده سیلیسی و کلینکر بر آغاز زود هنگام واکنش‌های هیدراتاسیون در سطح دانه‌های کلینکر می‌باشد، چراکه کلینکر و دوده سیلیسی،

مقاومت خمشی در بتن RPC در سن ۳ روزه ۵۸ درصد است و همانند مقاومت فشاری با گذشت زمان این درصد نیز کم می‌شود و از سن ۶۰ روز به بعد به حدود ۳۶ درصد می‌رسد. این افزایش مقاومت به این دلیل است که دوده سیلیسی از آنجا که دارای سیلیس آمورف می‌باشد با هیدروکسید کلسیم که خاصیت چسباندگی ندارد و حاصل هیدراتاسیون آلیت و بلیت است، واکنش داده و ژل چسباننده هیدرات سیلیکات کلسیم تولید می‌کند. همچنین دوده سیلیس به دلیل نرمی بسیار بالا، دارای خاصیت پرکنندگی است به طوری که با پر کردن تخلخل بتن، موجب افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی می‌شود [2].

مطابق با شکل‌های (۲) و (۳) جایگزین نمودن ماسه با کلینکر سیمان پرتلند در کنار استفاده از دوده سیلیسی و تولید بتن RPAC، موجب افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی می‌شود. به طوری که در سنین ۳ و ۷ روزه مقاومت فشاری بتن RPAC به ترتیب ۱۳۳ و ۱۷۴ درصد از مقاومت فشاری بتن NC بیشتر است. این درصد افزایش در مقاومت فشاری، با افزایش سن آزمون‌ها کاهش می‌یابد تا اینکه در سنین ۶۰ و ۹۰ روزه به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. همچنین افزایش مقاومت خمشی در بتن RPAC در سن ۳ روزه ۸۰ درصد است و همانند مقاومت فشاری با گذشت زمان این درصد نیز کم می‌شود و از سن ۲۸ روز به بعد به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی در اثر جایگزینی ماسه با کلینکر به این دلیل است که در بتن RPAC، کلینکر سیمان پرتلند که به عنوان سنگدانه استفاده شده است، وارد واکنش هیدراتاسیون شده و با تولید ترکیبات چسباننده منجر به کاهش تخلخل در ناحیه انتقالی و ترمیم ریزساختار این ناحیه می‌گردد.

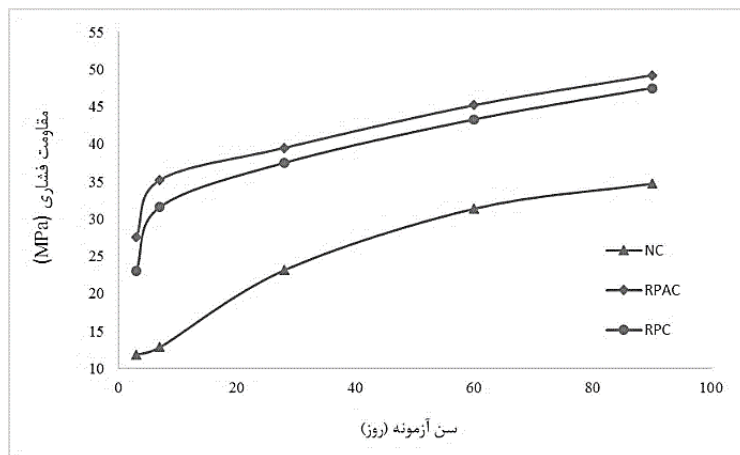
واکنش‌پذیر هستند و در دقایق ابتدایی اختلاط مواد، با انجام واکنش هیدراتاسیون، سبب کاهش زمان گیرش می‌شوند. کاهش زمان گیرش در نمونه‌های بتنی RPC و RPAC، می‌تواند در برخی موارد محدودیت‌های کاربردی ایجاد نماید. در چنین مواردی ممکن است استفاده از عوامل کندکننده گیرش ضروری باشد.



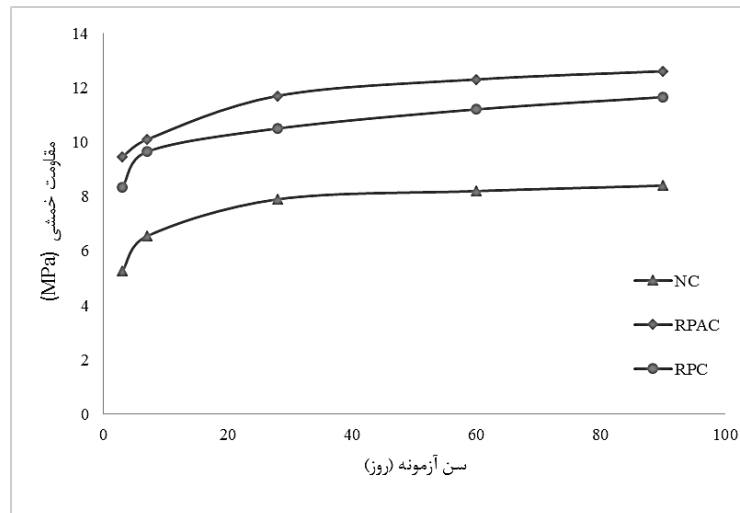
شکل ۱- زمان گیرش بتن RPAC و بتن NC بر حسب دقیقه.

۳-۲- مقاومت‌های فشاری و خمشی

در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن‌های NC، RPC و RPAC با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به این دو شکل، مشخص می‌شود که استفاده از دوده سیلیسی در بتن NC و تولید بتن RPC، در کلیه سنین منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی می‌شود. به طوری که در سنین ۳ و ۷ روزه مقاومت فشاری بتن RPC به ترتیب ۹۵ و ۱۴۶ درصد از مقاومت فشاری بتن NC بیشتر است. این درصد افزایش در مقاومت فشاری، با افزایش سن آزمون‌ها کاهش می‌یابد تا اینکه در سنین ۶۰ و ۹۰ روزه به حدود ۳۶ درصد می‌رسد. همچنین افزایش



شکل ۲- مقاومت فشاری آزمون‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۶۰ و ۹۰ روز.

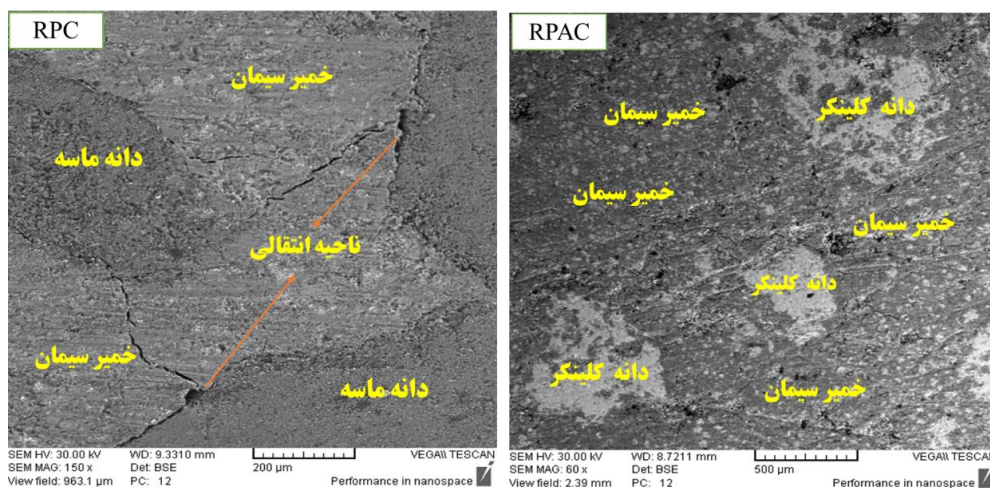
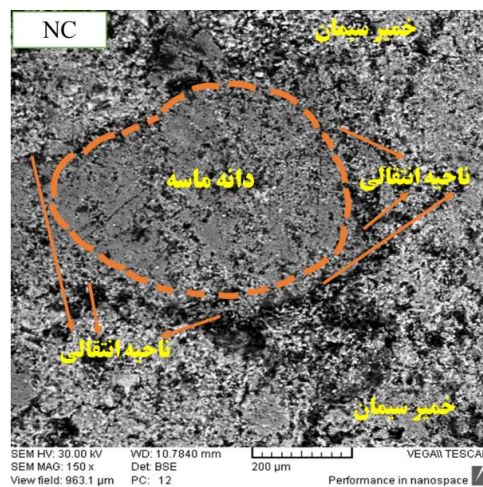


شکل ۳- مقاومت خمشی آزمون‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۶۰ و ۹۰ روز.

متخلخل است. چنانچه ملاحظه می‌شود، در بتن NC علاوه بر تخلخل شدید در ناحیه انتقالی، خمیر سیمان نیز تخلخل نسبتاً بالایی دارد در حالیکه در بتن RPC تخلخل ناحیه انتقالی کاهش یافته است.

۳-۳- ابعاد ناحیه انتقالی

در شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بتن‌های NC، RPC و RPAC نشان داده شده است. در تصویر مربوط به بتن NC، یک سنگدانه مشاهده می‌شود که اطراف آن به شدت



شکل ۴ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار بتن‌های RPAC و NC

تأثیر دوده سیلیسی و جایگزینی ماسه با کلینکر سیمان پرتلند ...

اصلاحات ریزساختاری نه تنها منشا افزایش قابل ملاحظه مقاومت‌های مکانیکی بتن می‌گردد، بلکه می‌تواند باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خواص کاربردی و دوامی بتن گردد.

۳-۴- عمق نفوذ کلر

در شکل (۵) به عنوان نمونه، تصاویر آزمون‌های بتنی NC و RPAC که برای اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر استفاده شدند، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با توجه به اینکه در اثر پاشیدن محلول نقره نیترات بر روی سطح برش داده شده بتن، نقره کلرید سفید رنگ رسوب می‌کند، می‌توان عمق نفوذ را بر اساس تغییر رنگ، اندازه‌گیری نمود [21].

همچنین در تصویر مربوط به بتن RPAC، در فصل مشترک سنگدانه (کلینکر) و خمیر سیمان، اثری از وجود تخلخل مشاهده نمی‌شود. به عبارتی واکنش هیدراتاسیون سطح دانه‌های کلینکر باعث پیوستگی دانه کلینکر با خمیر سیمان و تا حد زیادی حذف ناحیه انتقالی شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در تصویر بتن‌های RPAC و RPC، تخلخل خمیر سیمان نیز به دلیل واکنش پوزلانی دوده سیلیسی و تشکیل مقادیر نسبتاً زیاد هیدرات‌های سیلیکات کلسیم ثانویه تا حد زیادی کاهش یافته است. بنابراین واکنش‌های هیدراتاسیون کلینکر و پوزلان در بتن‌های RPC و RPAC از طریق کاهش شدید تخلخل در خمیر سیمان و در ناحیه انتقالی اصلاحات ریزساختاری چشمگیری ایجاد می‌کند. این



شکل ۵- آزمون‌های مورد استفاده از بتن NC و بتن RPAC در آزمایش اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر

دوده سیلیسی بر روی کاهش عمق نفوذ کلر از اثر استفاده از کلینکر به عنوان سنگدانه بیشتر است. چراکه وقتی از کلینکر به عنوان سنگدانه استفاده شود، صرفاً تخلخل ناحیه انتقالی تقریباً از بین می‌رود اما در اثر استفاده از دوده سیلیسی در بتن، علاوه بر کاهش تخلخل ناحیه انتقالی هر چند به میزان اندک، تخلخل خمیر سیمان نیز تا حد زیادی ترمیم می‌شود.

۳-۵- میزان جذب آب و حجم تخلخل باز

در جدول (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان جذب آب و درصد حجم تخلخل باز آزمون‌های بتنی آمده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد مطابق با انتظار، بتن‌های RPAC و RPC نسبت به بتن NC تخلخل باز کمتری دارند و همین امر سبب می‌شود جذب آب این بتن‌ها نیز کمتر از بتن معمولی باشد.

بر همین اساس، نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر در آزمون‌های NC، RPC و RPAC بعد از ۱۴ و ۲۸ روز در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- عمق نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بعد از ۱۴ و ۲۸ روز

برحسب میلی‌متر

روزه	روزه	
۱۴ روزه	۲۸ روزه	NC
۲۴	۲۸	RPC
۸	۹	RPAC
۵	۷	

چنانچه ملاحظه می‌شود، استفاده از دوده سیلیسی و نیز جایگزین نمودن کلینکر با ماسه موجب کاهش عمق نفوذ کلر می‌شود. همچنین با توجه به جدول (۶) مشاهده می‌شود که تأثیر استفاده از

[5] M. Nili, A. Ehsan, Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume, *Materials and Design*, 75 (2015) 174–183.

[6] M. Cohen, A. Goldman, W. Chen, The role of silica fume in mortar: transition zone versus bulk paste modification, *Cement and concrete research*, 24 (1997) 95-98.

[7] P. Duan, Z. Shui, W. Chen, C. Shen, Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, *Construction and building materials* 44 (2013) 1–6

[8] مهتاب پیشه‌ور، مطالعه تأثیر ناحیه انتقالی سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان در خواص کیفی بتن، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، استاد راهنما دکتر علی الهوردی، مهر ۱۳۹۰.

[9] D. Bui, J. Hu, P. Stroeven, Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete, *Cement and concrete composites*, 27 (2005) 357–366.

[10] H. Chao-Lung, B. Anh-Tuan, C. Chun-Tsun, Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete, *Construction and building materials*, 25 (2011) 3768–3772.

[11] A. Givi a, S. Rashid, F. Aziz, M. Salleh, Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete, *Construction and building materials*, 24 (2010) 2145–2150.

[12] X. Ping, J. Beaudoin, R. Brousseau, “Effect of aggregate size on transition zone properties at the Portland cement paste interface”, *Cement and concrete research*, Vol. 21, 999-1005, 1991.

[13] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, 2016.

[14] ASTM C807, Standard test method for time of setting of hydraulic cement mortar by modified vicat needle, 2003.

[15] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, 2015.

[16] ASTM C230, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, 2003.

[17] ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2014.

[18] ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar (using 50 mm cube specimens), 2008.

جدول ۶- میزان جذب آب و حجم تخلخل باز نمونه‌های بتنی

حجم تخلخل باز (درصد)	میزان جذب آب (درصد وزنی)	
۱۶/۸۲	۹/۴۷	NC
۴/۹۸	۲/۳۴	RPC
۱۴/۱۲	۷/۰۳	RPAC

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از دوده سیلیسی و جایگزین کردن ماسه با کلینکر سیمان پرتلند، ناحیه انتقالی را در بتن‌های RPC و RPAC تا حد زیادی حذف می‌کند، ضمن اینکه هیدرات‌های سیلیکات کلسیم ثانویه ناشی از واکنش دوده سیلیسی باعث کاهش چشمگیر تخلخل در خمیر سخت شده می‌گردد. اصلاح قابل ملاحظه ریزساختار ناحیه انتقالی و خمیر سخت شده سیمان در بتن‌های RPC و RPAC سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت‌های فشاری و خمشی در این بتن نسبت به بتن‌ها می‌شود. همچنین این اصلاحات ریزساختاری موجب کاهش عمق نفوذ کلر و میزان جذب آب در بتن‌های RPC و RPAC می‌گردد. بنابراین بتن‌های RPC و RPAC با دارا بودن برتری‌های کاربردی نسبت به بتن NC می‌توانند در محیط‌هایی حاوی ترکیبات مهاجم مانند دریا و یا جاهایی که با مقاومت‌های بالایی نیاز است، استفاده شود.

۵- منابع

[1] L. Jiang, The interfacial zone and bond strength between aggregate and cement pastes incorporating high volumes of fly ash, *Cement and concrete composites* 21 (1999) 313 – 316.

[2] A. Leemann, B. Munch, P. Gasser, L. Holzer, Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete, *Cement and concrete research* 36 (2006) 1425 – 1433.

[3] D. Bentz, A three – dimensional cement hydration and Microstructure program. I. Hydration rate, Heat of hydration and chemical shrinkage, NISTIR 5756, U.S. Department of commerce, (1995).

[4] M. Lutz, P. Monteiról, R. Zimmermann, Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar, *Cement and concrete research*, 27 (1997) 1113-1122.

[19] ASTM C 642, Standard test method for specific gravity, absorption and voids in hardened concrete, 1990.

[20]. D. Saje, F. Saje, B. M. Saje, J. Lopatic, "Time Development of Compressive Strength of Silica Fume Concrete", Proceeding of 3rd International Symposium nontraditional cement and concrete, 683-692, Brno, 2008.

[21] Fuqiang He, Caijun Shi, Qiang Yuan, Changping Chen, Keren Zheng, AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, Construction and Building Materials 26 (2012) 1-8.

The use of silica fume and replacement sand with Portland cement clinker to remove transition zone in concrete

Jafar Shafaghat

Graduate student at the Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology, Narmak, Tehran

Ali Allahverdi *

Professor, Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology, Narmak, Tehran

Abstract:

Between the interface of cement paste and aggregate in concrete, there is a region with high porosity which is said to interfacial transition zone (ITZ). Transition zone causes the reduction of compressive strength and flexural strength, increased permeability and consequently increase the vulnerability of concrete against sulphates and chlorides penetration. Therefore, researchers have sought ways to improve the negative effects resulting from the ITZ. In this study, were used two techniques to removal ITZ. In the first technique was replaced 18% by weight of cement and silica fume and was produced reactive powder concrete (RPC). In the second technique, along with silica fume, Portland cement clinker was replaced completely with sand, which has led to production Reactive Powder-Aggregate Concrete (RPAC). Comparison of normal concrete (NC) compressive strength with RPAC and RPC showed that the 174 and 146% increase in compressive strength at the 7 days. Then, size of the ITZ were examined by using scanning electron microscopy. The depth of chloride penetration, water absorption and volume of open porosity of RPC and RPAC were compared with NC. The results showed reduced water absorption and chloride penetration depth.

Keywords: RPAC, Transition zone in concrete, Silica fume, Compressive strength, Portland cement clinker.

* Corresponding Author: ali.allahverdi@iust.ac.ir