

ساخت بتن مشکی با استفاده از دوده کربن و بررسی میزان جذب و نفوذ آب در آن

اشکان خدابنده‌لو*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

جبرائیل پادار

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

مهدی لطفی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

جمال عیوضی پور گاوگانی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی امکان ساخت بتن مشکی یک‌نواخت با استفاده از نسبت‌های وزنی مختلف دوده کربن و ارزیابی تأثیر آن بر خواص مکانیکی و دوام بتن، به‌ویژه جذب و نفوذ آب، با تمرکز بر کاربردهای نماسازی و محوطه‌سازی بوده است. در این تحقیق، بتن‌های حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ وزنی دوده کربن نسبت به سیمان ساخته شدند. برای ارزیابی عملکرد بتن، آزمایش‌های اسلامپ بتن، مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز، جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) و نفوذ آب در بتن سخت شده مطابق با استانداردهای معتبر انجام گرفت. مبنای طرح اختلاط بتن کنترل، روش وزنی ACI-211 بوده است. نتایج نشان داد که افزودن دوده کربن تا مقدار ۱۰٪ وزنی سیمان، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف می‌شود که این موضوع به افزایش تراکم بتن نسبت داده می‌شود. در مقادیر بالاتر (۱۵ و ۲۰٪)، کاهش نسبی مقاومت مشاهده شد که ناشی از کلوخگی دوده کربن است. همچنین با افزایش مقدار دوده کربن، میزان جذب آب اولیه و نهایی افزایش یافت. به‌طوری‌که جذب آب نهایی نمونه‌ها در بازه حدود ۲۰۴ تا ۲۰۹٪ قرار گرفت که همچنان در محدوده مجاز بتن‌های مناسب برای کاربردهای عمرانی است. در مجموع، دوده کربن علاوه بر ایجاد رنگ مشکی تیره و یک‌نواخت، عملکرد قابل قبولی از نظر خواص مکانیکی و دوام بتن از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بتن رنگی، دوده کربن، بتن مشکی، نفوذ آب، جذب آب

* نویسنده مسئول: a.khodabandehlou@iau.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، علاوه بر نقش سازه‌ای، در دهه‌های اخیر به طور فزاینده‌ای در نماسازی و طراحی فضاهای معماری مورد توجه قرار گرفته است. توسعه بتن‌های اکسپوز و رنگی امکان ایجاد نماهایی مدرن، یکپارچه و ماندگار را فراهم کرده و در عین حال، به دلیل شکل‌پذیری بتن تازه و مقاومت بالای آن در برابر عوامل محیطی، گزینه‌ای اقتصادی و توجیه‌پذیر برای پروژه‌های ساختمانی و شهری محسوب می‌شود [۱]. استفاده از بتن رنگی در کاربردهایی نظیر کفسازی معابر، جداول شهری، محوطه‌سازی، استادیوم‌ها و نماهای معماری، علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی، نقش مؤثری در ارتقای کیفیت بصری و هویت شهری ایفا می‌کند [۲].

در این میان، استفاده از رنگ‌های تیره، به ویژه رنگ مشکی، در نمای ساختمان با محدودیت‌ها و چالش‌هایی همراه است. سنگ‌های تیره به دلیل جذب بالای حرارت و نور، مستعد جداشدگی از ملات و بروز آسیب‌های سطحی هستند و به همین دلیل، استفاده از سنگ‌های سیاه در نما در برخی ضوابط شهری ممنوع اعلام شده است [۳]. از سوی دیگر، به کارگیری عناصر فلزی مشکی، هرچند از نظر ظاهری مطلوب است، اما به دلیل هزینه بالا و مقاومت محدود در برابر شرایط جوی نامطلوب مانند باران‌های اسیدی، گزینه‌ای پایدار و اقتصادی به شمار نمی‌آید [۴]. در نتیجه، توسعه بتن مشکی با دوام مناسب و هزینه قابل قبول می‌تواند به عنوان جایگزینی کارآمد برای مصالح متداول در نماسازی و محوطه‌سازی مطرح شود.

روش‌های مختلفی برای ایجاد رنگ در بتن وجود دارد که رنگ آمیزی سطحی یکی از رایج‌ترین آن‌هاست. با وجود سادگی اجرا، این روش از دوام محدودی برخوردار بوده و رنگ در برابر سایش، رطوبت، تابش خورشید و تغییرات دمایی به سرعت دچار افت کیفیت و جداشدگی می‌شود [۵]. در مقابل، استفاده از رنگ‌دانه‌ها در ترکیب بتن، راهکاری پایدارتر برای دستیابی به رنگ یک‌نواخت و ماندگار محسوب می‌شود. هرچند این روش ممکن است هزینه اولیه را افزایش دهد، اما به دلیل کاهش نیاز به ترمیم و نگهداری، در بلندمدت از توجیه اقتصادی بالاتری برخوردار است [۶].

رنگ‌دانه‌های معدنی، که عمدتاً از اکسید فلزات تولید می‌شوند، علاوه بر غیرسمی بودن و سازگاری زیست‌محیطی، می‌توانند بدون

ایجاد آلودگی، رنگ‌هایی پایدار و مقاوم در بتن ایجاد کنند [۷]. رنگ مشکی به دلیل ایجاد حس لوکس بودن، تضاد بصری قوی و هماهنگی با سبک‌های معماری مدرن، جایگاه ویژه‌ای در طراحی داخلی و خارجی دارد و استفاده از آن در محوطه‌سازی و نماسازی رو به افزایش است [۸].

ساخت بتن رنگی برای اولین بار در دهه ۵۰ میلادی با افزودن اکسید آهن مصنوعی به مخلوط بتن آغاز شد. لی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر اکسید آهن بر بتن را بررسی کرده و نشان دادند که افزودن ۴٪ اکسید آهن به جای سیمان، مقاومت فشاری بتن رنگی را به ۹۰ درصد مقاومت بتن بدون افزودنی می‌رساند [۹]. لویز و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان دادند که استفاده از اکسید آهن زرد با سیمان خاکستری، پایداری رنگ بتن را در محیط‌هایی با شرایط دمایی کنترل‌شده حفظ می‌کند [۱۰]. سیواچیدامبارام و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر ظرفیت رنگ‌دانه‌ها در بتن زرد پرداختند و مشخص کردند که آسیاب مرطوب رنگ‌دانه در مدت طولانی، مقاومت بتن را افزایش می‌دهد [۱۱]. لوینسون و همکاران (۲۰۱۸) کفپوش‌های بتنی روشن برای کاهش گرمای محیط شهری و تعدیل دمای زمین را پیشنهاد دادند و به این نتیجه رسیدند که بتن رنگی روشن بازتاب گرمایی بیشتری نسبت به بتن‌های اشباع دارد [۱۲]. در تحقیق قلع‌نویی و همکاران (۲۰۱۷)، بوکسیت به عنوان جایگزین جزئی سیمان برای تولید بتن سبز رنگ و کاهش اثرات زیست محیطی پالایشگاه‌ها به کار رفت و مشخص شد که استفاده از بوکسیت به میزان حداکثر ۵٪ وزنی سیمان به بهبود دوام بتن کمک می‌کند [۱۳]. ویشواکارما و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی معایب و مزایای بتن‌های رنگی، پیشنهاد کردند که برای دستیابی به بهترین نتایج، از رنگ‌دانه‌های مختلف همچون اکسید آهن، کربن، کبالت و کروم استفاده شود [۱۴]. عوض‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از پیگمنت زرد لیمونیت از معادن ایران، دریافتند که اکسید آهن مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد، اما مقادیر بالاتر پیگمنت موجب کاهش مقاومت کششی و سایشی می‌شود [۱۵]. بازاری و همکاران (۲۰۱۵) در تولید بتن زرد طبق استاندارد ملی ایران، افت مقاومت بتن را هنگام افزودن ۴٪ و ۶٪ رنگ‌دانه رنگی گزارش کردند [۱۶]. منصوری و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی خاک أخرا و نانو اکسید آلومین، کاهش دوام سایشی بتن رنگی در مقایسه با طرح‌های دیگر را با روش‌های مختلف بررسی و گزارش کردند

۲- مواد و روش‌ها

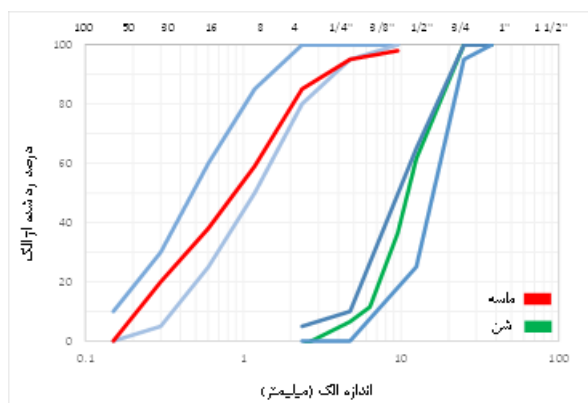
۲-۱- مصالح

سنگ‌دانه مورد استفاده جهت ساخت بتن در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد که از معدن منطقه دوکوهک استان فارس تهیه گردیده. مشخصات فیزیکی این سنگ‌دانه مطابق با جدول شماره ۱ می‌باشد. مدول نرمی ماسه مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ بدست آمد.

جدول ۱- مشخصات شن و ماسه مصرفی

نوع سنگ‌دانه	حداکثر قطر سنگ‌دانه	مدول نرمی	مخصوص در حالت SSD	وزن جذب آب
mm	kg/m ³	%		
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۲۶۰۰	۲/۳
شن	۱۹	-	۲۶۳۰	۱/۵

روش اجرا و طبقه‌بندی الک‌های شماره‌بندی شده، مطابق استاندارد ASTM-C136 انجام گرفت که در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. همچنین میزان وزن و اندازه سنگ‌دانه‌ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد. در شکل شماره ۱ الگوی دانه‌بندی ماسه با منحنی قرمز رنگ، الگوی دانه‌بندی شن با منحنی سبز رنگ و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 با منحنی آبی رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی

سیمان مصرفی در این تحقیق از نوع تیپ ۲ فارس می‌باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی در این تحقیق بر اساس اطلاعات مندرج بر روی بسته‌بندی شرکت تولیدکننده ارائه

که ترکیب آخرا با نانو آلومین دوام را بهبود می‌بخشد [۱۷]. گلشن و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از رنگ‌دانه‌های پودری در بتن برای زیباسازی شهری، به این نتیجه رسیدند که درصدهای بالای رنگ‌دانه، بسته به نوع رنگ، می‌تواند تأثیر مثبت یا منفی بر مقاومت بتن داشته باشد. به طور مثال، استفاده از ۷٪ رنگ زرد مقاومت را ۲۵٪ افزایش داده و همین میزان رنگ سبز مقاومت فشاری را ۴۲٪ کاهش داده است [۱۸].

عوض نژاد و همکاران (۱۴۰۲) در ساخت بتن خودمتراکم رنگی از پیگمنت زرد استفاده کردند و مشاهده شد که افزودن این پیگمنت مقاومت فشاری اولیه بتن را تا ۲۰٪ افزایش داده است [۱۹]. قهرمانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز با افزودن رنگ‌دانه به بتن رنگی دریافتند که افزایش رنگ‌دانه بیش از ۲٪ وزنی سیمان منجر به افت مقاومت بتن و کاهش دوام می‌شود [۲۰].

با توجه به بررسی تحقیقات بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن رنگ‌دانه‌های معدنی و مصنوعی در بتن بسته به نوع ماده، مقادیر مصرف و روش اعمال، تأثیرات متفاوتی بر خواص مکانیکی و دوام بتن دارد. اگرچه رنگ‌دانه‌ها می‌توانند زیبایی و جذابیت ظاهری را افزایش دهند و در برخی موارد مقاومت و دوام بتن بهبود یابد، اما استفاده بیش از حد یا نادرست از این مواد اغلب منجر به کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود [۲۰-۱۲]. در نتیجه، انتخاب نوع و مقدار رنگ‌دانه‌ها باید با دقت و بر اساس آزمایشات صورت گیرد.

بخش عمده مطالعات پیشین در حوزه بتن‌های رنگی بر رنگ‌دانه‌هایی نظیر اکسیدهای فلزی متمرکز بوده و بررسی دوده کربن به عنوان رنگ‌دانه مشکی، به‌ویژه با تمرکز هم‌زمان بر رنگ‌پذیری و شاخص‌های دوام مرتبط با جذب و نفوذ آب، به‌صورت نظام‌مند گزارش نشده است. از آنجا که جذب و نفوذ آب از مهم‌ترین عوامل موثر بر دوام بتن، به‌ویژه در کاربردهای نمایی و محیط‌های در معرض رطوبت محسوب می‌شوند، ارزیابی این شاخص‌ها در کنار خواص مکانیکی برای توسعه بتن مشکی ضروری است. بر این اساس، در این تحقیق از دوده کربن در نسبت‌های وزنی مختلف سیمان برای تولید بتن مشکی استفاده شده و اثر آن بر رنگ‌پذیری، کارایی، مقاومت فشاری، جذب آب اولیه و نهایی و میزان نفوذ آب بتن به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است.

شده و جزئیات مربوطه در جداول شماره ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲- ساختار شیمیایی سیمان تپ ۲ فارس

نام عنصر	ساختار شیمیایی	مقدار %
دی اکسید سیلیسیم	SiO ₂	۲/۹۰
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃	۴/۷۰
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۳/۹۵
اکسید منیزیم	MgO	۲/۲۰
تری اکسید گوگرد	SO ₃	۱/۳۵
اکسید کلسیم	CaO	۶۰/۴۶
تری کلسیم سیلیکات	C ₃ S	۲۲/۶۸

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان تپ ۲ فارس

پارامتر	واحد	مقدار
سطح مخصوص	cm ² /gr	۲۸۵۰
انبساط اولیه	%	۰/۰۷
زمان گیرش اولیه	min	150
زمان گیرش ثانویه	min	185
مقاومت فشاری ۳ روزه		۱۸۵
مقاومت فشاری ۷ روزه	kg/cm ²	۳۰۴
مقاومت فشاری ۲۸ روزه		۴۲۰
وزن مخصوص	gr/cm ³	۳/۱۰

در برابر شرایط محیطی، اشعه فرابنفش و مواد مهاجم شیمیایی است. این ماده ماندگاری رنگ را تضمین می‌کند. دوده کربن علاوه بر قابلیت بالای رنگ‌دهی، ماده‌ای سبک است که وزن نهایی محصولات حاوی آن را تغییر چندانی نمی‌دهد [۲۲]. مشخصات شیمیایی و فیزیکی دوده کربن مصرفی در این تحقیق بر اساس اطلاعات مندرج بر روی بسته‌بندی شرکت تولیدکننده ارائه شده و جزئیات مربوطه در جداول شماره ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۲- دوده کربن مصرفی

جدول ۴- مشخصات شیمیایی دوده کربن مصرفی

نام عنصر	ساختار شیمیایی	مقدار %
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃	۸/۵۵
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۱/۴۸
اکسید منیزیم	MgO	۱۴/۰۳
اکسید سدیم	Na ₂ O	۲/۳۹
اکسید کربن	CO ₂	۶۳/۹۳
اکسید کلسیم	CaO	۴/۱۳
اکسید سدیم	SO ₃	۰/۱
اکسید تیتانیوم	TiO ₂	۱/۰۸
اکسید پتاسیم	K ₂ O	۴/۲۶
سایر	L.O.I	۰/۵

عمدتاً استفاده از رنگ‌دانه‌های پودری می‌تواند موجب کاهش روانی بتن گردد. همچنین در صورتی که عناصر ساخت بتن به خوبی مخلوط نشوند، رنگ‌دانه‌ها ته‌نشین شده و باعث عدم یک‌نواختی در رنگ‌پذیری خواهند شد [۱۸-۲۰]. ذرات ریز دوده کربن به دلیل تمایل به کلوخه شدن ممکن است هنگام ترکیب در بتن به طور یک‌نواخت پخش نشوند. بنابراین نیازمند استفاده از روان‌کننده‌هایی مانند ابرروان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی برای جلوگیری از چسبندگی و بهبود پخش‌شدگی است. در این تحقیق

دوده کربن^۱ ماده‌ای سیاه رنگ و ریزدانه است که بخش زیاد آن را کربن خالص تشکیل داده و به دلیل ویژگی‌های خاص خود، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند بتن، لاستیک، پلاستیک، رنگ‌سازی و جوهر دارد. اندازه ذرات آن معمولاً در ابعاد میکرو است و سطح ویژه بالای این ماده، آن را در ایجاد رنگ مشکی عمیق و یک‌نواخت در مواد ساخت‌وساز منحصربه‌فرد می‌کند [۲۱]. دوده کربن از سوختن ناقص یا شکست حرارتی هیدروکربن‌هایی مانند گاز طبیعی، مشتقات نفتی یا قیرهای سنگین در محیط‌های کنترل شده با اکسیژن محدود و دمای بالا تولید می‌شود. بسته به نوع فرآیند تولید، مانند فرآیند نفتی یا گازی، کیفیت و اندازه نهایی ذرات دوده متفاوت خواهد بود. عواملی چون دما، مواد اولیه، اکسیژن و سرعت خنک‌سازی در این فرآیندها، ویژگی‌های دوده را تعیین می‌کنند. ویژگی‌های دوده کربن شامل رنگ‌دهی بالا، مقاومت شیمیایی و فیزیکی قابل توجه

¹ Carbon Black

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی و طرح مخلوط

برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل ساخت ۶۰ نمونه بتن در طیف‌های رنگی مختلف می‌باشد. برای این منظور ۳۰ نمونه مکعبی ۱۵X۱۵X۱۵ سانتیمتری برای تعیین مقاومت فشاری ۷، ۲۸ روزه، تعداد ۱۵ نمونه مکعبی ۱۵X۱۵X۱۵ سانتیمتری جهت تعیین نفوذ آب در بتن سخت شده و تعداد ۱۵ نمونه مکعبی ۱۰X۱۰X۱۰ سانتیمتری ۲۸ روزه برای سنجش جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) در بتن سخت شده ساخته شد. کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، برای هر طرح مخلوط بر روی سه نمونه مستقل اجرا شده و مقادیر ارائه شده در جداول مقاله، میانگین نتایج به دست آمده می‌باشند.

بررسی نتایج حاصل از تکرار آزمون‌ها نشان داد که میزان پراکندگی داده‌ها محدود بوده و انحراف معیار تمامی آزمایش‌ها در محدوده قابل قبول (کمتر از ۵٪) قرار داشته است. اختلاف‌های جزئی مشاهده شده بین نتایج، ناشی از خطای ذاتی آزمایش‌های بتن بوده و هیچ ناپایداری یا پراکندگی غیرعادی در داده‌ها مشاهده نگردید. این موضوع بیانگر تکرارپذیری مناسب آزمایش‌ها و قابلیت اعتماد به روندهای ارائه شده در نتایج تحقیق می‌باشد. تعداد، سن و نوع نمونه‌های بتن، روش آزمایش و استاندارد مربوط به آن‌ها مطابق جدول شماره ۷ می‌باشد.

برای دستیابی به پخش یک‌نواخت رنگ‌دانه در بتن و حفظ روانی آن، از آبروان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. این ماده جزء جدیدترین نسل آبروان‌کننده به حساب می‌آید که با داشتن زنجیره‌های بلند جانبی در ساختار مولکولی علاوه بر دافعه شدید ذرات سیمان و پخش و یک‌نواخت کردن آن درون بتن با ایجاد ممانعت فضایی بین ذرات مانع از نزدیک شدن و چسبیدن دوباره ذرات شده و بیشترین اثر روان‌کنندگی را ایجاد می‌کند [۲۱].

جدول ۵- مشخصات فیزیکی دوده کربن مصرفی

# ۴۰۰	حداکثر اندازه اسمی
۳۷ μ	
۲/۹ gr/cm ³	چگالی
۱/۸	سختی موهس
> ۳٪	جذب آب
سیاه	رنگ
پودر	شکل ظاهری

جدول ۶- مشخصات فیزیکی آبروان‌کننده مصرفی

وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	pH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
۱/۱ gr/cm ³	ASTM C1017	۰/۱٪	۵/۵۸	مایع	۰/۱ تا ۳٪ وزن سیمان

جدول ۷- مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	شرح آزمایش	استاندارد	نمونه ۷ روزه	نمونه ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتیمتر)
۱	اسلامپ	ASTM-C143	-	-	-
۲	مقاومت فشاری	BS-EN-12390-3	۱۵	۱۵	۱۵x۱۵x۱۵ مکعبی
۳	جذب آب بتن	ASTM-C642	-	۱۵	۱۰x۱۰x۱۰ مکعبی
۴	نفوذ آب در بتن	BS-EN-12390-8	-	۱۵	۱۵x۱۵x۱۵ مکعبی

جدول ۸- طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	دوده کربن	آبروان‌کننده	آب
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	lit/m ³
۱	BL-C	۴۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۰	۴	۱۴۰
۲	BL-5%	۴۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۲۰	۴	۱۴۰
۳	BL-10%	۴۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۴۰	۴	۱۴۰
۴	BL-15%	۴۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۶۰	۴	۱۴۰
۵	BL-20%	۴۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۸۰	۴	۱۴۰

سانتیمتر و در نمونه‌های با سن ۲۸ روزه تست انجام گرفت. برای انجام این آزمایش، نمونه‌ها پس از رسیدن به سن آزمایش، از محیط عمل‌آوری خارج و سطوح آن‌ها بوسیله پارچه خشک شدند. سپس در خشک کن (آون) به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد، قرار داده شدند. نمونه‌ها پس از خروج از آون، در دمای محیط بیرون قرار گرفته و سپس وزن شدند (جرم M_0). سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت درون آب قرار گرفته و پس از خروج از آب از بتن، مجدداً وزن آن‌ها اندازه‌گیری و درج شد (جرم M_i). نتایج جذب آب اندازه‌گیری شده برای هر نمونه به عنوان افزایش جرم نمونه بر اثر غرق شدن در آب و بر حسب درصد وزن خشک نمونه ارائه می‌گردد. میزان جذب آب بتن بر حسب درصد از رابطه شماره ۱ بدست می‌آید [۱۷-۱۵]. همچنین شکل شماره ۳ خشک شدن نمونه‌ها را در آون نشان می‌دهد.

$$a = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

۲-۴- اندازه‌گیری نفوذ آب در بتن

دوام بتن در محیط‌های گوناگون، به طور قابل توجهی متأثر از میزان نفوذپذیری آن نسبت به مواد مختلف، به ویژه آب است. نفوذپذیری بتن در برابر آب از اهمیت بسزایی برخوردار است، چرا که آب به دلیل ابعاد مولکولی کوچک و قطبیت خود، قادر به نفوذ به درون حفرات ریز و ترک‌های مویینه در ساختار بتن می‌باشد. علاوه بر این، آب به عنوان یک حلال قوی، توانایی حل کردن طیف وسیعی از ترکیبات معدنی و آلی را داراست که این امر می‌تواند به مکانیسم‌های تخریب بتن دامن بزند. آب از طریق مکانیسم‌های متعددی می‌تواند به بتن آسیب برساند. نفوذ آب به درون بتن می‌تواند منجر به تغییر رنگ، لکه‌گذاری و کاهش کیفیت ظاهری سطح نمایان بتن شود که این مسئله با توجه به اهمیت جنبه‌های زیبایی‌شناختی در بتن، بسیار حائز اهمیت است. همچنین آب با حل کردن مواد مضر نظیر کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و سایر مواد شیمیایی مهاجم، شرایط لازم برای زوال و تخریب سطحی بتن را فراهم می‌کند. این مواد می‌توانند با اجزای سیمانی بتن واکنش داده و منجر به فرسایش سطحی، ایجاد حفره، انبساط، ترک‌خوردگی و در نهایت، تخریب لایه‌های سطحی بتن گردند. علاوه بر این، نفوذ آب در بتن نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام

نتایج سایر تحقیقات گذشته در مورد بتن‌های رنگی نشان می‌دهد مقدار استفاده از پیگمنت‌های معدنی در بتن از ۱٪ تا ۲۰٪ وزنی عیار سیمان متغیر است و با توجه به نوع رنگ‌دانه باید بهینه‌یابی شود [۲۰-۱۵]. در این تحقیق ابتدا از نسبت‌های ۵/۲، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ استفاده گردید که با توجه به نوع رنگ حاصله، تصمیم گرفته شد که نسبت‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ برای انجام آزمایشات انتخاب گردد. زیرا نسبت‌های کمتر از ۱۰٪ خاصیت رنگ‌دهی بالایی نداشتند. مبنای طرح مخلوط کنترل در این تحقیق استاندارد وزنی ACI-211 است که بر اساس نوع مصالح سنگی و سیمان، به روش سعی و خطا بهینه‌یابی شد. نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و برای حفظ اسلامپ بتن و افزایش کیفیت رنگ، از آبر روان کننده بر پایه کربوکسیلات به میزان ۱٪ وزنی سیمان استفاده شد. در جدول شماره ۸ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف آورده شده است. با توجه به ریزدانه بودن و سطح ویژه بالای ذرات دوده کربن و تمایل ذاتی آن به کلوخه‌شدن، در این تحقیق برای حصول پراکندگی یک‌نواخت رنگ‌دانه در مخلوط بتن، کنترل توالی اختلاط و استفاده از آبر روان کننده پلی‌کربوکسیلاتی در نظر گرفته شد. بدین منظور، در مرحله نخست سنگ‌دانه‌ها به همراه بخشی از آب و نیمی از دوده کربن به مخلوط کن افزوده شده و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند تا ذرات رنگ‌دانه به صورت اولیه بر سطح سنگ‌دانه‌ها توزیع گردد. سپس سیمان، باقیمانده دوده کربن و آب طرح مخلوط اضافه شده و پس از یک دقیقه اختلاط، آبر روان کننده به تدریج به مخلوط افزوده شد.

زنجره‌های جانبی بلند در ساختار مولکولی آبر روان کننده پلی‌کربوکسیلاتی با ایجاد دافعه الکترواستاتیکی و ممانعت فضایی، از تجمع مجدد ذرات دوده کربن جلوگیری کرده و موجب پخش یک‌نواخت آن در ماتریس سیمانی می‌شوند [۲۲]. این روش اختلاط، علاوه بر بهبود یک‌نواختی رنگ، از افت شدید کارایی بتن جلوگیری نمود.

۲-۳- اندازه‌گیری جذب آب در بتن

در این تحقیق جهت تعیین میزان جذب آب در حالت اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) در نمونه‌های مورد آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-C642 بر روی نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$

ارزيابي ميزان نفوذ آب در بتن از استاندارد بریتانیایی BS-EN-12390-8 بهره‌گیری شده است. در این روش، نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵X۱۵X۱۵ سانتیمتر در دستگاه نفوذپذیری قرار داده شده و تحت فشار آب معادل ۵ کیلوگرم در هر سانتیمتر مربع (۵ بار) به مدت ۷۲ ساعت نگهداری شد. پس از این مدت، مقدار آب مصرفی که گردید، به صورت میلیمتر در دستگاه ثبت می‌شود، اندازه‌گیری و ثبت پس از پایان آزمایش نفوذپذیری، نمونه از دستگاه خارج شد. سپس نمونه به‌طور عمود بر سطحی که تحت فشار آب بود، به دو قسمت تقسیم گردید و حداکثر و مساحت عمق نفوذ آب در شرایط آزمایش ثبت شد. شکل شماره ۳ مربوط به آزمایشات انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

آن در شرایط دمایی متغیر، به‌ویژه در سیکل‌های یخبندان-ذوب ایفا می‌کند. با افزایش میزان آب نفوذ کرده به داخل بتن، پتانسیل تخریب ناشی از یخ‌زدگی و انبساط آب در منافذ بتن افزایش می‌یابد. این امر منجر به ایجاد تنش‌های داخلی و در نهایت، ترک‌خوردگی، پوسته شدن و از بین رفتن کیفیت سطحی بتن می‌شود [۲۴-۲۶]. از این رو، طراحی مخلوط بتن و انتخاب مصالح مناسب، با در نظر گرفتن شرایط محیطی مورد بهره‌برداری و الزامات زیبایی‌شناختی، از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این رویکرد، کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل مخرب محیطی است تا دوام، عمر مفید و زیبایی ظاهری سطوح نمایان بتن اکسپوز تضمین گردد. در این تحقیق، برای



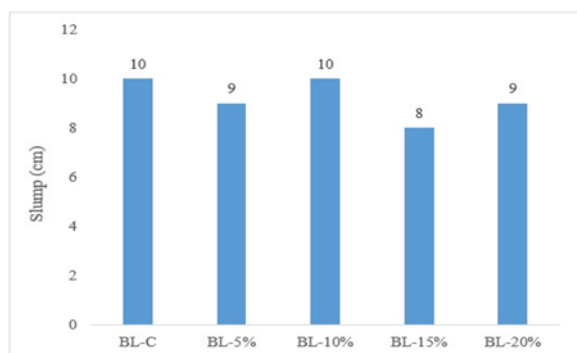
شکل ۳- تصویری از آزمایشات انجام شده در این تحقیق

۳- یافته‌ها

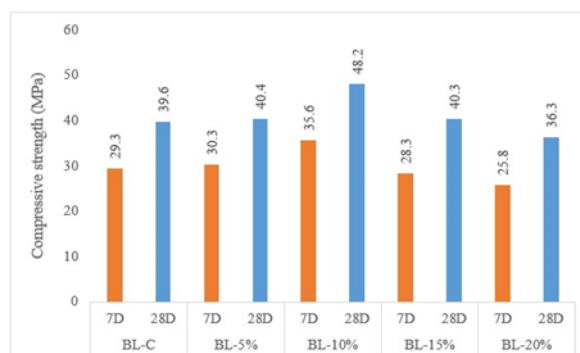
۳-۱- اسلامپ و مقاومت فشاری

۷، ۲۸ روزه از استاندارد BS-EN-12390-3 استفاده گردید. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که افزودن دوده کربن به میزان حداکثر ۱۰٪ وزنی سیمان، مقاومت فشاری بتن را در تمام سنین افزایش می‌دهد. بنظر می‌رسد این امر ناشی از افزایش تراکم در بتن صورت می‌گیرد. اما افزودن مقادیر بیش از آن احتمال کلوخگی ماده و تشکیل ناحیه ضعف در بتن را افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که در طرح ۲۰٪، ۱۵- BL شاهد کاهش مقاومت فشاری در تمام سنین خواهیم بود. با این وجود در طرح‌های ۲۰٪، ۱۵- BL، اُفت مقاومت شدیدی نخواهیم داشت و در تمامی سنین مقاومت فشاری تقریباً مشابه با طرح BL-C می‌باشد. جدول شماره ۹ میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سنین مختلف نشان می‌دهند.

طبق دستورالعمل ASTM-C979 محدوده مجاز اسلامپ بتن رنگی، بهتر است 100 ± 13 میلیمتر قرار گیرد [۱۷، ۱۶]. میزان اسلامپ طرح‌های دارای نسبت‌های مختلف وزنی دوده کربن، اختلاف محسوسی نسبت به یکدیگر نداشتند و نتایج بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد. میزان اختلاف اندکی که بین نتایج وجود دارد ناشی از خطای کار آزمایشگاهی می‌باشد که قابل چشم‌پوشی است. استفاده از ژل ابروان کننده در این تحقیق جهت حفظ کارایی یا روانی بتن بسیار موثر بوده. در غیر این صورت انتظار می‌رفت تا در اثر افزودن دوده کربن در بتن، میزان اسلامپ تا حد زیادی کاهش یابد. در ادامه برای تعیین مقاومت فشاری در سنین



شکل ۵- مقایسه میزان اسلامپ نمونه‌ها



شکل ۴- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها

جدول ۹- نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ و مقاومت فشاری نمونه‌ها

نام طرح مخلوط	وزن مخصوص kg/m ³	اسلامپ cm	مقاومت فشاری (MPa)		تغییرات نسبی (%)	
			۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
BL-C	۲۴۴۰	۱۰	۲۹/۳	۳۹/۶	-	-
BL-5%	۲۴۶۰	۹	۳۰/۳	۴۰/۴	۳/۵	۲/۱
BL-10%	۲۴۸۰	۱۰	۳۵/۶	۴۸/۲	۲۱/۵	۲۱/۶
BL-15%	۲۵۰۰	۹	۲۸/۳	۴۰/۳	-۳/۴	۱/۹
BL-20%	۲۵۲۰	۹	۲۵/۸	۳۶/۳	-۱۱/۹	-۸/۴

۳-۲- میزان جذب آب بتن

در جدول شماره ۱۰ میزان جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) نمونه‌ها و تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه خشک شده، درج شده است. طبق نتایج با افزایش میزان دوده کربن، میزان جذب آب اولیه و نهایی افزایش می‌یابد.

جدول ۱۰- نتایج مربوط به آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن

نام طرح	نمونه خشک	وزن		وزن نمونه اشباع		درصد جذب آب
		گرم	گرم	گرم	دقیقه	
BL-C	۲۲۴۰	۲۲۵۰	۲۲۹۳	۰/۴۴	۲/۳۱	
BL-5%	۲۱۴۷	۲۱۵۸	۲۲۰۰	۰/۵۱	۲/۴۱	
BL-10%	۲۱۶۱	۲۱۷۵	۲۲۱۹	۰/۶۴	۲/۶۱	
BL-15%	۲۱۳۰	۲۱۴۸	۲۱۹۰	۰/۸۴	۲/۷۴	
BL-20%	۲۱۶۵	۲۱۸۷	۲۲۲۹	۱/۰۱	۲/۸۷	

۰/۸۴ و ۱/۰۱٪ و میزان جذب آب نهایی به ترتیب ۲/۴۱، ۲/۶۱، ۲/۷۴ و ۲/۸۷٪ افزایش یافته است. آبا به منظور سنجش کیفیت بتن در آزمایش جذب آب، بتن‌های با جذب آب ۵٪ و بالاتر را در رده ضعیف، ۳ تا ۵٪ را در رده متوسط و کمتر از ۳٪ را در رده خوب دسته‌بندی کرده است. همچنین در این آیین‌نامه، برای پایایی بتن در محیط‌های خورنده و دریایی مانند سازه‌های بتنی در تماس با خلیج فارس و دریای عمان، حداکثر میزان جذب آب را در قسمت‌هایی که در ناحیه جزر و مد و ناحیه پاشش فوق‌العاده شدید و سازه‌های نگهدارنده‌های آب و تصفیه خانه فاضلاب ۳/۵٪ تعیین کرده است [۱۹ و ۱۸]. بنابراین کلیه طرح‌های مورد بررسی در این تحقیق در محدوده مجاز قرار دارند و افزودن دوده کربن، دوام بتن را در برابر شرایط و عوامل جوی نامساعد کاهش نمی‌دهد. شکل شماره ۶ میزان جذب آب اولیه و نهایی بتن را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

۳-۳- میزان نفوذ آب در بتن

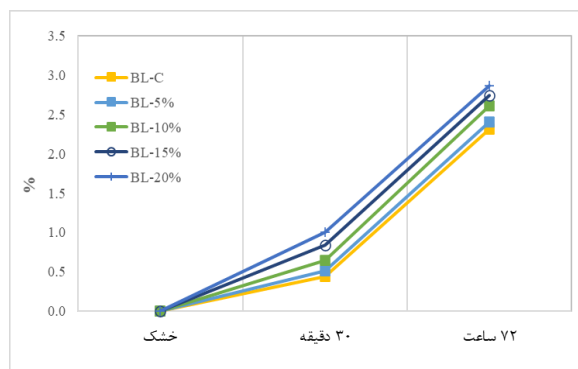
طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که حداکثر عمق نفوذ آب در نمونه BL-C برابر با ۴/۹ سانتیمتر و مساحت نفوذ آب ۳۹/۷۵ سانتیمتر مربع می‌باشد.

این مهم در اثر جذب آب بالاتر دوده کربن نسبت به سیمان و سنگ‌دانه اتفاق می‌افتد. به‌طوری‌که در طرح شاهد و BL-5، 10، 15، 20٪ میزان جذب آب اولیه به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۵۱، ۰/۶۴،

مشخص گردید که با افزایش اکسید بالکی در بتن میزان نفوذ آب در بتن افزایش یافته است. جدول شماره ۱۱ و شکل شماره ۷ میزان عمق و مساحت نفوذ آب در نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

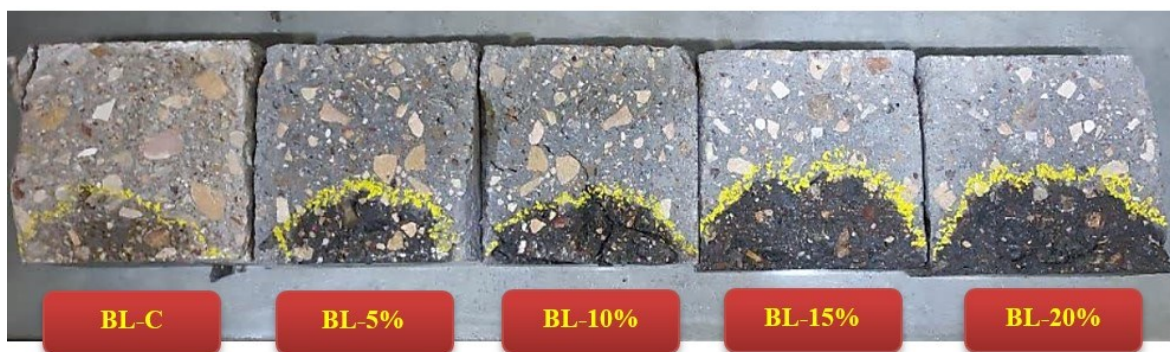
جدول ۱۱- مقایسه عمق و مساحت نفوذ آب در نمونه‌های مورد

نام طرح مخلوط	بررسی		
	تغییرات نسبی (%)	مساحت نفوذ آب	حداکثر عمق نفوذ آب
	%	cm ²	cm
BL-C	۰	۳۹/۷۵	۴/۹
BL-5%	۲۰	۴۷/۷۵	۴/۹
BL-10%	۳۷	۵۴/۶۲	۴/۴
BL-15%	۹۰	۷۵/۹۲	۶/۶
BL-20%	۱۰۱	۷۹/۹۵	۶/۶



شکل ۶- مقایسه میزان جذب آب اولیه و نهایی بتن

همچنین در طرح BL-5% حداکثر عمق نفوذ آب ۴/۹ سانتیمتر و مساحت نفوذ آب ۴۷/۷۵ سانتیمتر مربع می‌باشد. در نمونه BL-10% حداکثر عمق نفوذ آب ۴/۴ سانتیمتر و مساحت نفوذ آب برابر با ۵۴/۶۲ سانتیمتر مربع است. در نمونه BL-15, 20% حداکثر عمق نفوذ آب ۶/۶ سانتیمتر و مساحت نفوذ آب به ترتیب ۷۵/۹۲ و ۷۹/۹۵ سانتیمتر مربع می‌باشد. بنابه نتایج بدست آمده



شکل ۷- میزان نفوذ آب در بتن سخت شده

گرفت. در این حالت مشاهده گردید که نمونه مرطوب و رزین خورده دارای رنگ شارپ و چشم‌نوازی است. اما پس از گذشت حدود ۱۰ روز، رنگ نمونه‌های بتنی رو به سفیدی رفته و کیفیت خود را از دست دادند. این مرحله بوسیله رزین با نام‌های تجاری مختلف تکرار شد اما در نهایت بدست آمده، تغییری ایجاد نشد. شکل شماره ۸ مربوط به نمونه‌های مورد مقایسه در بخش "الف" می‌باشد.

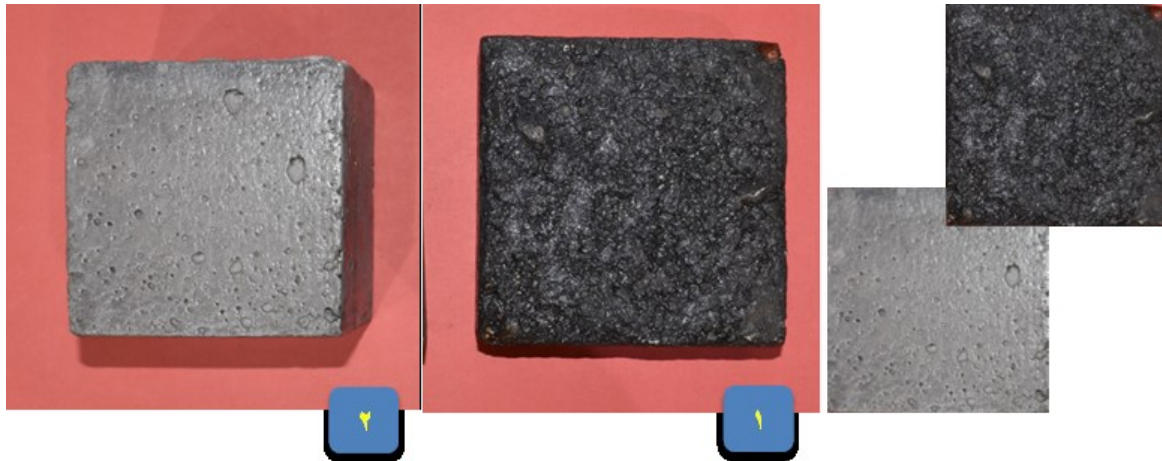
ب) در حالت دوم نمونه‌های بتنی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری از حوضچه آب خارج گردید و به مدت ۶۰ روز در محیط بیرون زیر نور مستقیم خورشید در دمای ۲۵+ تا ۴۸+ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها بوسیله رزین مات پوشش داده شدند و

۳-۴- رنگ‌پذیری

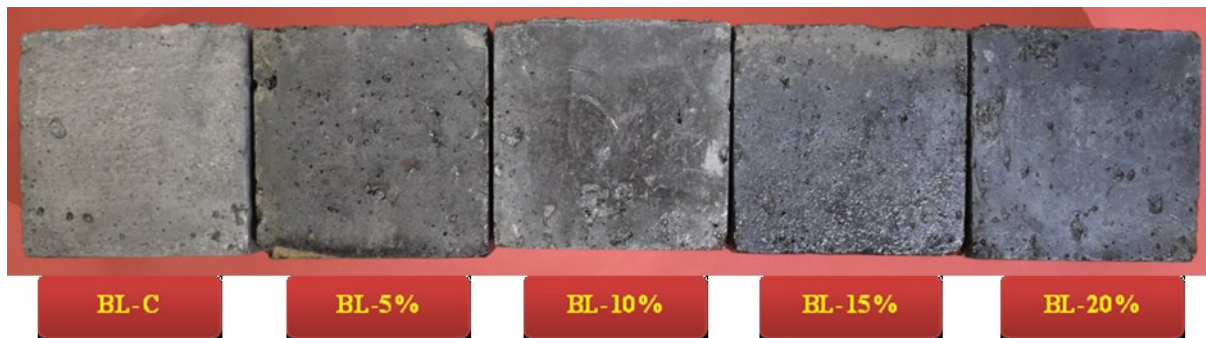
در این تحقیق نمونه‌ها در دو مقطع متفاوت تحت آنالیز قرار گرفتند که بدین شرح می‌باشد:

الف) از آنجایی که در تحقیقات پیشین توصیه شده که برای نمایش کیفیت رنگ بتن رنگی از رزین یا سایر محلول‌های جلادهنده استفاده شود [۲۰-۱۵]، در این تحقیق از رزین مات مخصوص سنگ و بتن استفاده شد. بدین ترتیب نمونه‌های بتن پس از ۲۸ روز عمل‌آوری بلافاصله از حوضچه آب خارج گردید و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتن تا آب سطحی آن خشک شود. سپس در حالیکه همچنان رطوبت در بتن وجود داشت سطح آن به‌وسیله رزین آغشته گردید و رنگ حاصله مورد مقایسه قرار

رنگ حاصله مورد مقایسه قرار گرفتند. در حالت دوم هیچ اثری از اُفت کیفیت رنگ مشاهده نشد. شکل شماره ۹ مربوط به نمونه‌های مورد مقایسه در بخش "ب" می‌باشد. شکل شماره ۱۰ ناحیه برش خورد نمونه شاهد و سایر نمونه‌های رنگی را نشان می‌دهد که هدف از آن بررسی رنگ بتن در ناحیه داخلی آن می‌باشد. مشخص است که رنگ بتن در تمام نواحی بیرونی و داخلی ایجاد شده است. ارزیابی تغییرات رنگ در این تحقیق به صورت کیفی و بر اساس مقایسه بصری شدت تیرگی، یک‌نواختی رنگ و پایداری ظاهری نمونه‌ها تحت شرایط نوری یکسان انجام شده و از مقیاس‌های عددی رنگ‌سنجی استفاده نشده است.



شکل ۸- (۱) نمونه بتن ۲۸ روزه مرطوب (۲) نمونه بتن آغشته به رزین پس از گذشت ۱۰ روز از عمل‌آوری



شکل ۹- مقایسه رنگ نمونه‌های ساخته شده با نسبت‌های مختلف وزنی دوده کربن



شکل ۱۰- مقایسه درون بتن طرح رنگی شده با دوده کربن با بتن معمولی (بتن برش خورده)

۳-۵- تصاویر الکترونی روبشی

تشکیل محصولات جدید یا واکنش شیمیایی فعال مشاهده نمی شود که بیانگر ماهیت غیرپوزولانی دوده کربن مصرفی است.

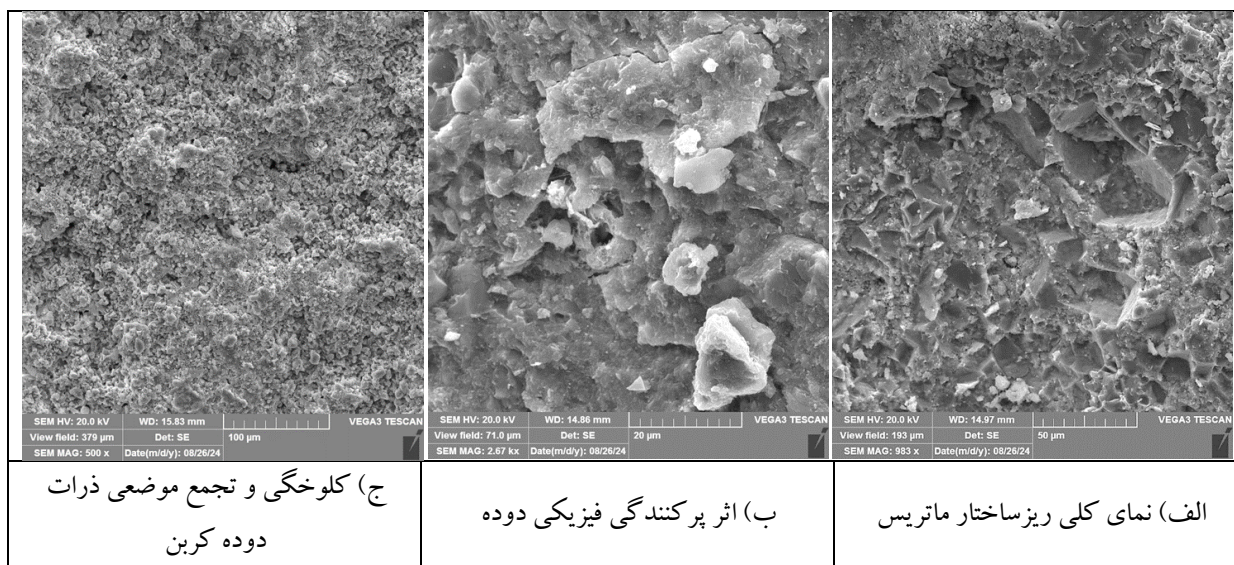
در تصویر (ج)، در بزرگنمایی بالا، نواحی مشخصی از تجمع و کلوخگی ذرات دوده کربن قابل مشاهده است. این خوشه های متراکم، یک نواختی ماتریس سیمانی را در مقیاس موضعی مختل کرده و باعث ایجاد ناپوستگی های ریز و افزایش تخلخل باز می شوند. وجود این نواحی می تواند مسیرهای ترجیحی برای نفوذ آب ایجاد کرده و عامل افزایش جذب و نفوذ آب در بتن های حاوی مقادیر بالاتر دوده کربن باشد. این تصویر نشان می دهد که با افزایش مقدار دوده کربن، اثر منفی کلوخگی می تواند بر اثر مثبت پرکنندگی غلبه کند.

هر سه تصویر SEM مربوط به یک نمونه بتن حاوی دوده کربن هستند که به ترتیب با تمرکز بر نمای کلی ریزساختار، اثر پرکنندگی فیزیکی و پدیده کلوخگی ذرات ارائه شده اند. این تصاویر نشان می دهند که تغییرات خواص مکانیکی و دوام بتن ناشی از یک تعادل ریزساختاری بین پر شدن ریزمنافذ توسط ذرات ریز دوده کربن و تجمع موضعی آن ها در مقادیر بالاتر است. شواهد SEM تایید می کند که اثر دوده کربن در بتن مورد بررسی صرفاً فیزیکی بوده و واکنش پوزولانی فعالی در ریزساختار مشاهده نمی شود.

تصاویر الکترونی روبشی (SEM) ارائه شده، ریزساختار بتن حاوی دوده کربن را در مقیاس های مختلف نشان می دهند.

در تصویر (الف)، نمای کلی ریزساختار بتن حاوی دوده کربن در بزرگنمایی پایین ارائه شده است. ماتریس سیمانی پیوسته و نسبتاً متراکم بوده و محصولات هیدراسیون به صورت یک نواخت در سطح نمونه توزیع شده اند. عدم مشاهده ترک های درشت یا ناپوستگی های گسترده نشان می دهد که حضور دوده کربن، در سطح بررسی شده، منجر به اختلال کلی در ساختار بتن نشده است. این تصویر، کیفیت مناسب اختلاط، تراکم و عمل آوری نمونه بتن حاوی دوده کربن را تایید می کند.

در تصویر (ب) با افزایش بزرگنمایی، حضور ذرات بسیار ریز دوده کربن در فضاهای بین محصولات هیدراسیون سیمان به وضوح مشاهده می شود. این ذرات در ریزمنافذ و نواحی خالی بین فازهای C-S-H مستقر شده و نقش پرکنندگی فیزیکی ایفا می کنند. استقرار این ذرات موجب کاهش تخلخل مؤثر و افزایش تراکم موضعی ماتریس سیمانی شده است. این ریزساختار، مکانیسم افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده در بتن حاوی دوده کربن تا مقادیر بهینه را به طور مستقیم توجیه می کند. در این مقیاس، هیچ شواهدی از



شکل ۱۱- تصویر الکترونی روبشی (SEM) نمونه های حاوی دوده کربن

۴- بحث

رنگی یک نواخت و حجمی در بتن می شود که در برابر فرسایش سطحی پایدارتر است. توزیع یک نواخت رنگ در نواحی داخلی و بیرونی نمونه ها بیانگر ادغام مناسب دوده کربن در ماتریس بتن

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از دوده کربن به عنوان رنگ دانه معدنی، در مقایسه با رنگ آمیزی سطحی، منجر به ایجاد

در حالی که اعمال رزین پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها منجر به پایداری مناسب رنگ در شرایط محیطی و تابش مستقیم خورشید شده است.

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رفتار مقاومت فشاری و دوام بتن حاوی دوده کربن، از الگوی گزارش شده برای اغلب رنگ‌دانه‌های معدنی و مصنوعی پیروی می‌کند. افزایش مقاومت فشاری در مقادیر کم دوده کربن (حداکثر ۱۰٪ وزنی سیمان) با نتایج ارائه شده توسط عوض‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱) و گلشن و همکاران (۱۴۰۱) همخوانی دارد که این رفتار را به بهبود تراکم و اثر پرکنندگی ذرات ریز نسبت داده‌اند. در مقابل، افت یا عدم بهبود مقاومت در درصد‌های بالاتر رنگ‌دانه، که توسط بازاری و همکاران (۲۰۱۵) و قهرمانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز گزارش شده است، به پدیده کلوخگی و تضعیف ناحیه واسط سنگ‌دانه و ماتریس سیمان مربوط می‌شود. از سوی دیگر، افزایش جذب و نفوذ آب در بتن‌های حاوی دوده کربن در تحقیق حاضر، با مطالعاتی که از رنگ‌دانه‌های غیرپوزولانی استفاده کرده‌اند مطابقت دارد، در حالی که تفاوت آن با برخی تحقیقات که بهبود دوام را گزارش نموده‌اند، ناشی از ماهیت پوزولانی افزودنی‌های مورد استفاده در آن مطالعات می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج تحقیق حاضر نه تنها با ادبیات موجود سازگار است، بلکه نقش تعیین‌کننده نوع و مقدار رنگ‌دانه را در کنترل هم‌زمان خواص مکانیکی و دوام بتن به‌روشنی تبیین می‌کند.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مصرف دوده کربن تا حدود ۱۰٪ وزنی سیمان می‌تواند تعادل مناسبی بین رنگ‌پذیری، مقاومت فشاری و دوام بتن اکسپوز ایجاد کند، در حالی که افزایش بیش از این مقدار، ریسک افزایش نفوذپذیری و کلوخگی را به همراه دارد.

۵- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش اسلامپ نشان داد که افزودن دوده کربن در بازه ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی سیمان، تغییر معناداری در روانی بتن ایجاد نکرد که این رفتار ناشی از جبران افزایش سطح ویژه و تمایل ذرات ریز دوده کربن به جذب آب توسط ابرروان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی است.

- مقاومت فشاری بتن حاوی ۵٪ و ۱۰٪ وزنی دوده کربن در سنین

بوده و این ویژگی آن را به گزینه‌ای مناسب برای بتن تبدیل می‌کند.

بررسی نتایج بتن تازه نشان داد که با افزودن دوده کربن در بازه ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی سیمان، تغییر محسوسی در اسلامپ ایجاد نشد. این رفتار ناشی از استفاده از ابرروان‌کننده بوده که افزایش سطح ویژه و تمایل ذرات ریز دوده کربن به جذب آب را جبران کرده است. در نتیجه، افزودن دوده کربن در حضور ابرروان‌کننده، تأثیر منفی بر کارایی بتن تازه نداشته است.

نتایج مقاومت فشاری بتن تازه نشان داد که افزودن دوده کربن تا سطح ۱۰٪ وزنی سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه شده است که این افزایش به بهبود تراکم و اثر پرکنندگی ذرات ریز دوده کربن نسبت داده می‌شود. در مقابل، در مقادیر ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی سیمان کاهش مقاومت فشاری مشاهده شد که به تمایل دوده کربن به کلوخگی و ایجاد نواحی ضعف در ماتریس بتن مربوط است. با این حال، افت مقاومت در این مقادیر شدید نبوده و مقادیر به‌دست آمده همچنان در محدوده‌ای نزدیک به نمونه شاهد قرار دارند.

نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که با افزایش میزان دوده کربن از ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی سیمان، جذب آب اولیه از ۰/۴۴٪ به ۱/۰۱٪ و جذب آب نهایی از ۲/۳۱٪ به ۲/۸۷٪ افزایش یافته است. این افزایش به جذب آب ذاتی بالاتر دوده کربن و تغییر در ساختار منافذ بتن نسبت داده می‌شود. با وجود این روند افزایشی، تمامی طرح‌های مخلوط دارای جذب آب کمتر از ۳٪ بوده و در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای قرار دارند که نشان می‌دهد افزودن دوده کربن، دوام بتن را در شرایط متعارف کاهش نمی‌دهد.

بررسی نتایج نفوذ آب نشان داد که با افزایش درصد دوده کربن، عمق و مساحت نفوذ آب افزایش یافته است، به گونه‌ای که در طرح‌های BL-10% کاهش نسبی نفوذ آب مشاهده شد، اما در طرح‌های BL-15% و BL-20% افزایش قابل توجهی در نفوذپذیری ثبت گردید. این رفتار بیانگر وجود یک بازه بهینه مصرف دوده کربن است که در آن اثر تراکم بر اثرات منفی افزایش تخلخل غلبه می‌کند.

نتایج ارزیابی رنگ‌پذیری نشان داد که اعمال رزین بر روی نمونه‌های مرطوب اگرچه در کوتاه‌مدت موجب افزایش جلوه بصری می‌شود، اما در بلندمدت باعث افت کیفیت رنگ می‌گردد،

- در طرح 10%-BL کاهش نسبی نفوذ آب نسبت به برخی طرح‌های دیگر مشاهده شد که این رفتار بیانگر غالب بودن اثر تراکم و پرکنندگی ذرات ریز دوده کربن بر افزایش تخلخل در این درصد مصرف است.

- افزایش قابل توجه نفوذ آب در طرح‌های 15%-BL و 20%-BL نشان می‌دهد که در مقادیر بالاتر دوده کربن، اثرات منفی کلوخگی و توزیع غیریک‌نواخت ذرات بر بهبود تراکم غلبه کرده و نفوذپذیری بتن افزایش یافته است.

۶- مراجع

- [1] Marcello R.R., Galato S., Peterson M., Riella H.G., Bernardin A.M. (2018). Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, 1280–1294.
- [2] Silva R.D.A., Castro C.D., Viganico E.M., Peter C.O. (2020). Selective precipitation/UV production of magnetite particles obtained from the iron recovered from acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 22–37.
- [3] Dominguez E.A., Ullmann R. (2016). Ecological bricks made with clays and steel dust pollutants. *Applied Clay Science*, 237–250.
- [4] Rules and regulations for reviewing the detailed plan for the Shiraz Historical and Cultural Region. (1402).
- [5] Essaidi N., Samet B., Baklouti S., Rossignol S. (2019). The role of hematite in aluminosilicate gels based on metakaolin. *Canadian Geotechnical Journal*, 1–11.
- [6] Hosseini-Zori M., Bondioli F., Manfredini T., Taheri-Nassaj E. (2018). Effect of synthesis parameters on a hematite-silica red pigment obtained using a coprecipitation route. *Dyes and Pigments*, 53–58.
- [7] Patakfalvi R., Dékány I. (2014). Synthesis and intercalation of silver nanoparticles in kaolinite/DMSO complexes. *American Society of Civil Engineers*, 149–159.
- [8] Okada K., Watanabe N., Jha V.K., Kameshima Y., Yasumori A., Mackenzie K.J.D. (2013). Uptake of various cations by amorphous $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ prepared by solid-state reaction of kaolinite with CaCO_3 . *Proceedings of the Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Buenos Aires, 550–565.
- [9] Lee S.S., Song H.Y., Lee Y.S., Lee K.P. (2021). Study on the strength and flow properties of non-cement inorganic composite using blast furnace slag

و ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد افزایش یافت که این افزایش به بهبود تراکم ماتریس سیمانی و اثر پرکنندگی فیزیکی ذرات بسیار ریز دوده کربن در حفرات خمیر سیمان نسبت داده می‌شود.

- بیشترین افزایش مقاومت فشاری در طرح 10%-BL مشاهده شد که بیانگر غلبه اثر پرکنندگی بر سایر اثرات منفی احتمالی و بهبود پیوستگی در ناحیه واسط سنگ‌دانه و ماتریس (ITZ) در این درصد مصرف است.

- در طرح‌های 15%-BL و 20%-BL کاهش نسبی مقاومت فشاری نسبت به طرح 10%-BL مشاهده گردید که این رفتار ناشی از تمایل دوده کربن به کلوخگی، توزیع غیریک‌نواخت ذرات و ایجاد نواحی ضعف موضعی در ماتریس بتن است.

- با وجود کاهش مقاومت در درصد‌های بالاتر دوده کربن، مقادیر مقاومت فشاری در این طرح‌ها همچنان در محدوده‌ای نزدیک به بتن شاهد باقی ماند که نشان می‌دهد اثرات منفی کلوخگی به‌طور کامل بر ساختار باربر بتن غالب نشده است.

- نتایج آزمایش جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) نشان داد که با افزایش میزان دوده کربن از ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی سیمان، جذب آب اولیه از ۰/۵۱٪ به ۱/۰۱٪ افزایش یافت که این رفتار به سطح ویژه بالا و خاصیت خیس‌شوندگی ذرات دوده کربن نسبت داده می‌شود.

- جذب آب نهایی (۷۲ ساعت) نیز با افزایش مقدار دوده کربن از ۲/۴۱٪ در طرح 5%-BL به ۲/۸۷٪ در طرح 20%-BL افزایش یافت که بیانگر توسعه شبکه منافذ موئینه پیوسته‌تر در بتن‌های حاوی دوده کربن است.

- افزایش هم‌زمان جذب آب اولیه و نهایی نشان می‌دهد که دوده کربن، به عنوان یک افزودنی غیرپوزولانی، در واکنش‌های شیمیایی هیدراسیون مشارکت نداشته و اثر آن بر دوام بتن عمدتاً از نوع فیزیکی و مرتبط با ساختار منافذ است.

- با وجود روند افزایشی جذب آب، تمامی طرح‌های مخلوط دارای جذب آب کمتر از ۳٪ بودند که نشان می‌دهد افزایش تخلخل ایجاد شده در اثر افزودن دوده کربن، منجر به افت غیرقابل قبول دوام بتن از دیدگاه آیین‌نامه‌ای نشده است.

- نتایج آزمایش نفوذ آب نشان داد که با افزایش درصد دوده کربن، عمق و مساحت نفوذ آب در بتن افزایش می‌یابد که این رفتار ناشی از افزایش تخلخل باز و پیوستگی مسیرهای نفوذ در ساختار بتن است.

- cycle. *Concrete Materials and Structures*, 9(1), 1–17.
- [21] Fathi H., Fardin-Tala K., Hosseini S., Amiri A. (2016). Investigation of mechanical properties of paint coatings containing metal oxides. *Experimental Research in Civil Engineering*, 3, 91–102.
- [22] Erdem E., Aydın G.M., Kılınçarslan R. (2024). Production of high-strength and colored concrete using textile waste reactive dyestuffs as superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 418, 135382.
- [23] Ghadban R.A.R., Abdulrehman M.A. (2024). Effect of adding red and yellow pigments to geopolymer concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(2), 222–232.
- [24] Akbulut Z.F., Guler S., Osmanoğlu F., Kıvanç M.R., Khan M. (2024). Evaluating sustainable colored mortars reinforced with fly ash: A comprehensive study on physical and mechanical properties under high-temperature exposure. *Buildings*, 14(2), 453.
- [25] Jesus C.F., Junior E.A., Braga N.T.S., Junior J.S., Barata M.S. (2023). Coloured concrete produced from low-carbon cements: Mechanical properties, chromatic stability and sustainability. *Journal of Building Engineering*, 67, 106018.
- [26] Yao G., Sun W., Yang Y., Wang M., Li R., Zheng Y. (2023). Multi-volume variable scale bitmap data object classification algorithm for architectural concrete color difference detection. *Journal of Intelligent Construction*, 1(2), 1–17.
- [27] Mohammadi Y., Shafiei S. (2025). Investigation of the positive effects of wollastonite and microsilica on mechanical properties and permeability of composite concrete in normal and sulfated mixtures. *Concrete Research*, 18(2), 133–143.
- [28] Hashemi S.A., Sadrinejad I. (2025). Study of mechanical properties of concretes containing recycled aggregate and expanded clay lightweight aggregate. *Concrete Research*, 18(1), 63–75.
- [29] Hajati-Madarai A., Rajabi-Jourshari M. (2024). Comparing the effect of using lightweight fine aggregates with superabsorbent polymer on shrinkage caused by drying of self-compacting concrete. *Concrete Research*, 17(4), 45–59.
- and red mud. *Advanced Materials Research*, 491–495.
- [10] Lopza A., Elsherabi C. (2019). Investigating color stability in mortar and concrete. *Journal of Construction and Concrete Research*, 602–620.
- [11] Sivachidambaram S., Gradio A. (2019). Color and semi-pigment characteristics of metakaolinite and hematite for colored concrete. *Journal of Construction and Concrete Research*, 890–905.
- [12] Levinson R., Grati O. (2018). Investigating and preparing colored concrete floors to replace asphalt on building roofs. *Cement and Concrete Research*, 410–429.
- [13] Ghalehnovi M., Khodabakhshian A., De Brito J., Shamsabadi E.A. (2018). Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*, 42–60.
- [14] Vishwakarma V., Ramachandran D. (2018). Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review. *Construction and Building Materials*, 96–110.
- [15] Awadnejad F., Golshan M.R., Sheibani H.R. (2022). Manufacturing and investigation of the effect of chemical pigments on compressive, tensile, abrasion resistance and water absorption of colored concrete with emphasis on urban beautification. *Advanced Materials and New Coatings*, 10(40), 3032–3047.
- [16] Bazaei M., Agha-Majidi R., Golshan M.R. (2023). Investigation of mechanical properties and frost durability of yellow colored concrete with different weight ratios of clay mash pigment (limonite). *Structural Construction Engineering*, 10(8), 62–86.
- [17] Mansouri A., Agha-Majidi R., Bazaei G.Z., Ghazaleh G. (2023). Application of ochre soil and nano alumina in the colorability and abrasion durability of colored concrete. *Structural Construction Engineering*, 10(8), 179–201.
- [18] Golshan M.R., Awadnejad F., Sheibani H.R. (2023). Laboratory investigation of compressive, tensile and abrasion resistance of concrete with limonite mineral pigment with emphasis on urban beautification. *Paint Science and Technology*, 17(1), 51–63.
- [19] Awadnejad F., Golshan M.R., Sheibani H.R. (2023). Effect of turquoise pigment amount on physical properties of concrete used in Iranian architecture and urban development. *Color Science and Technology*, 17(3), 203–220.
- [20] Ghahraman M., Sazgar A., Mansouri A. (2024). Investigation of durability and construction of red colored concrete with different weight ratios of ochre powder and white cement against freezing

Production of Black Concrete Using Carbon Black and Evaluation of Water Absorption and Penetration

Ashkan Khodabandehlou *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.

Jabraeil Padar

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.

Mehdi Lotfi

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran..

Jamal Eivazipourgavgani

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran..

Abstract

The objective of this study was to investigate the feasibility of producing uniform black concrete using different weight percentages of carbon black and to evaluate its effects on the mechanical properties and durability of concrete, particularly water absorption and water penetration, with a focus on architectural façade and landscaping applications. In this research, concrete mixtures containing 5, 10, 15, and 20 wt.% carbon black relative to cement were produced. To assess concrete performance, tests including slump of fresh concrete, compressive strength at 7 and 28 days, initial water absorption (30 minutes), final water absorption (72 hours), and water penetration in hardened concrete were conducted in accordance with relevant standard specifications. The mix design of the control concrete was based on the ACI 211 weight-based method. The results indicated that the incorporation of carbon black up to 10 wt.% of cement increased the compressive strength of concrete at different curing ages, which was attributed to enhanced concrete densification. At higher contents (15 and 20 wt.%), a relative reduction in compressive strength was observed, mainly due to agglomeration of carbon black particles. Furthermore, increasing the carbon black content led to an increase in both initial and final water absorption. The final water absorption of the specimens ranged from approximately 2.4% to 2.9%, which remains within the acceptable limits for concretes suitable for civil engineering applications. Overall, carbon black not only provided a deep and uniform black coloration but also demonstrated acceptable performance in terms of mechanical properties and durability of concrete.

Keywords: Colored Concrete, Carbon Black, Black Concrete, Water Penetration, Water Absorption.

* Corresponding Author: a.khodabandehlou@iau.ac.ir

