بررسی تاثیر اکسید باریت بر خواص مکانیکی، رئولوژیکی و رنگی بتن خودتراکم

یحیی کاظمی[۱]، بابک منصوری[۲*]، علیرضا راسخی صحنه[۳]، محسن دادرس[۴]

۱- دانشجوی دکتری، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران yahya.kazemi@iau.ac.ir

۲*- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران babak.mansoori@iau.ac.ir

۳- استادیار گروه عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران alireza.rasekhi@iau.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران mohsen.dadras@iau.ac.ir

چکیده

بتن خودتراکم رنگی به دلیل ویژگی‌های منحصربفرد و جلوه بصری در معماری مدرن مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق اثر استفاده از اکسید باریت به‌عنوان رنگدانه معدنی در بتن خودتراکم بررسی شده است. هدف تحقیق تعیین تاثیر این ماده بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و رنگی بتن و معرفی درصد بهینه مصرف آن بوده است. در این مطالعه اکسید باریت در مقادیر ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ وزنی سیمان به طرح اختلاط افزوده شد. آزمایش‌های انجام شده شامل رفتار رئولوژی بتن خودتراکم، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، اندازه‌گیری میزان جذب آب اولیه و نهایی، تحلیل شاخص‌های رنگی انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت اکسید باریت از صفر به ۱۰٪، نسبت انسداد در آزمون جعبه L را از ۰/۹۳ به ۰/۸۱ کاهش یافته و افتی معادل ۱۲/۹٪ نسبت به نمونه شاهد ایجاد شده است. همچنین مقدار روشنایی رنگ سطح بتن از ۸۲٪ به ۷۳٪ کاهش یافته و تیره‌تر شدن حدود ۱۱٪ مشاهده شده است. نتایج مقاومت فشاری نشان داده است که در نسبت‌های پایین مصرف، به دلیل اثر فیلر و افزایش تراکم ریزساختار بتن بهبود نسبی مقاومت ایجاد شده و نمونه حاوی ۵٪ اکسید باریت با شاخص عملکرد ۰/۶۹۹ بهترین عملکرد را نشان داده است. در نسبت‌های بیش از ۷/۵٪ کاهش مقاومت به دلیل افزایش ناهمگنی در ماتریس سیمان مشاهده شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که استفاده از حدود ۵٪ اکسید باریت می‌تواند تعادل مناسبی میان کارایی، مقاومت و شدت رنگ در بتن خودتراکم ایجاد کند.

کلمات کلیدی

بتن خودتراکم، اکسید باریت، بتن رنگی، خواص رئولوژیکی، مقاومت فشاری، تحلیل رنگ.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین ماده در صنعت ساخت‌وساز به شمار می‌آید و در کنار مقاومت مکانیکی مناسب، قابلیت آن وجود دارد که با استفاده از افزودنی‌ها و روش‌های فنی، ویژگی‌های ظاهری آن ارتقا یافته و سطوحی یکنواخت و رنگی ایجاد شود. در این میان، بتن خودتراکم به دلیل جریان‌پذیری بالا و توانایی پر کردن کامل قالب بدون نیاز به ویبره، بستر مناسبی برای دستیابی به بتن‌های رنگی با کیفیت سطحی مطلوب فراهم می‌کند. این نوع بتن به علت شکل‌پذیری مناسب، امکان اجرای فرم‌ها و طرح‌های متنوع را افزایش داده و زمینه استفاده گسترده‌تر از بتن رنگی را در پروژه‌های معماری و مبلمان شهری مهیا می‌سازد. بهره‌گیری از بتن رنگی در این حوزه‌ها روشی نسبتاً مدرن و کم هزینه است که از دید بسیاری از طراحان می‌تواند جلوه‌ای مطلوب و متمایز ایجاد کند[۱]. استفاده از بتن رنگی علاوه بر ایجاد ظاهر موردنظر، موجب کاهش نیاز به مصالح پوششی و نماکاری نیز می‌شود. نقش رنگ در معماری و شهرسازی بسیار حائز اهمیت است و کاربرد بتن رنگی در معابر و عناصر شهری می‌تواند هماهنگی بصری محیط و کیفیت تجربه کاربران از فضا را بهبود بخشد. پیشرفت‌های اخیر در فناوری بتن موجب شده است که روش‌های گوناگونی برای تغییر رنگ بتن و تولید آن در طیف‌های مختلف رنگی در دسترس باشد و امکان استفاده گسترده‌تر از بتن رنگی در پروژه‌های مختلف فراهم گردد[۲].

بتن رنگی علاوه بر جنبه‌های معماری، باید دوام و مشخصات مکانیکی مناسبی در شرایط محیطی داشته باشد[۳]. تولید بتن رنگی عمدتاً با سیمان‌های رنگی یا افزودن رنگدانه‌ها انجام می‌شود. با توجه به تنوع محدود و هزینه تولید سیمان‌های رنگی، استفاده از رنگدانه‌ها راهکاری انعطاف‌پذیرتر است. در این میان، پیگمنت‌هایی نظیر اکسیدهای آهن، کبالت، کروم، باریت و تیتانیوم کاربرد فراوانی دارند. رنگدانه‌ها به دو گروه معدنی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. پیگمنت‌های شیمیایی علیرغم ایجاد رنگ‌های درخشان، در محیط بسیار قلیایی بتن و در برابر تابش فرابنفش پایداری کمتری دارند و اغلب به عنوان مصالح وارداتی با هزینه بالا تامین می‌شوند[۵,۴]. در مقابل، رنگدانه‌های معدنی حاصل از خردایش کانی‌های طبیعی، از ثبات شیمیایی، نوری و حرارتی بالایی در ماتریس بتن برخوردارند[۹-۶]. علاوه بر این، ابعاد ریز ذرات این کانی‌ها می‌تواند با پر کردن حفرات مویینه خمیر سیمان، تراکم ماتریس و دوام ساختار بتن را بهبود بخشد. وجود ذخایر طبیعی این کانی‌ها در کشور نیز امکان کاربرد گسترده و اقتصادی آن‌ها را در تولید بتن‌های ساختمانی و شهری توجیه می‌کند[۱۱,۱۰].

ساخت بتن رنگی برای نخستین بار در دهه ۱۹۵۰ میلادی با افزودن اکسید آهن به مخلوط بتن انجام شد. با گذشت زمان، استفاده از رنگدانه‌های مختلف در بتن مورد توجه محققان قرار گرفت[۱۲]. سیواچدامبارام و همکاران در سال ۲۰۱۹ ویژگی‌های رنگی و مخاطرات زیست محیطی استفاده از پیگمنت متاکائولینیت و هماتیت در بتن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ماده حاصل می‌تواند به عنوان رنگدانه مناسب در بتن رنگی استفاده شود[۲۲]. لوپز و همکاران در سال ۲۰۲۰ پایداری رنگ در ملات و بتن را بررسی کردند. نتایج نشان داد در شرایط کنترل شده دما و رطوبت، پایداری رنگ بتن حفظ شده و تغییر محسوسی در شدت رنگ مشاهده نمی‌شود[۲۱]. عوض‌نژاد و همکاران در سال ۱۴۰۱ کاربرد پیگمنت لیمونیت در رنگ‌پذیری بتن و برخی خواص مکانیکی و دوام سایشی آن را ارزیابی کردند. در این تحقیق پیگمنت لیمونیت در نسبت‌های ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین بخشی از سیمان شد. نتایج نشان داد وجود اکسید آهن در این پیگمنت می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد[۲۳]. منصوری و همکاران در سال ۱۴۰۱ استفاده از خاک اُخرا و نانو اکسید آلومین در رنگ‌پذیری بتن و تاثیر آن بر خواص مکانیکی و دوام سایشی را بررسی کردند. در این تحقیق خاک اُخرا در نسبت‌های ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ جایگزین بخشی از سیمان شد و نانو اکسید آلومین به میزان ۰/۵٪ وزنی سیمان به مخلوط افزوده گردید. نتایج نشان داد استفاده از خاک اُخرا به تنهایی موجب کاهش دوام سایشی می‌شود، اما ترکیب آن با نانو اکسید آلومین می‌تواند مقاومت سایشی بتن را افزایش دهد[۲۴]. گلشن و همکاران در سال ۱۴۰۱ تاثیر رنگدانه‌های پودری بر دوام سایشی و خواص مکانیکی بتن با هدف تولید کفپوش‌های بتنی رنگی شهری را مطالعه کردند. در این تحقیق رنگدانه‌های آبی، قرمز، زرد و سبز در نسبت‌های ۳٪، ۵٪ و ۷٪ جایگزین بخشی از سیمان شدند. نتایج نشان داد استفاده از ۷٪ رنگدانه زرد موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه تا حدود ۲۵٪ شد[۲۵]. آرودا و همکاران در سال ۲۰۲۲ پسماندهای معدنی در تولید رنگدانه پوزولانی برای بتن و ملات رنگی را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های مقاومت مکانیکی و پایداری رنگ نشان داد که این پیگمنت موجب افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود پایداری رنگ می‌شود[۱۵]. اسعد و همکاران در سال ۲۰۲۲ تاثیر رنگدانه‌ها بر خواص سازه‌ای تیرهای بتن آرمه رنگی را بررسی کردند. در این تحقیق

ACCEPTED MANUSCRIPT

رنگدانه‌ها در مقادیر ۱/۵٪ تا ۳٪ وزنی سیمان به مخلوط افزوده شدند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و بارگذاری خمشی و برشی نشان داد که در طرح‌های حاوی ۳٪ رنگدانه، مقاومت فشاری حدود ۲۰٪ تا ۳۱٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد[۱۶]. النمر و همکاران در سال ۲۰۲۲ تاثیر رنگدانه‌های معدنی بر خواص مکانیکی بتن رنگی را بررسی کردند. در این تحقیق رنگدانه‌ها در مقادیر ۰٪، ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ جایگزین بخشی از سیمان شدند. نتایج نشان داد افزایش رنگدانه تا ۵٪ در برخی طرح‌ها موجب حفظ یا بهبود مقاومت شد، در حالیکه مقدار ۷/۵٪ در برخی نمونه‌ها باعث کاهش مقاومت گردید[۱۷]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۲ ساخت بلوک‌های بتنی رنگی با استفاده از اکسید آهن را بررسی کردند. در این تحقیق اکسید آهن در نسبت‌های ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ جایگزین بخشی از سیمان شد. نتایج نشان داد استفاده از ۴٪ اکسید آهن موجب کاهش مقاومت فشاری بتن تا حدود ۱۰٪ نسبت به نمونه شاهد شد[۲۰]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۴ عملکرد بتن خودتراکم رنگی تحت شرایط محیطی مختلف را بررسی کردند. در این تحقیق ۴ نوع رنگدانه اکسید آهن استفاده شد. نتایج نشان داد افزودن رنگدانه‌ها موجب کاهش جریان اسلامپ بتن می‌شود. اما اکسید آهن زرد و قرمز موجب افزایش مقاومت فشاری شدند، بطوریکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی ۲٪، ۴٪ و ۶٪ اکسید آهن زرد به ترتیب ۷٪، ۱۱٪ و ۱۵٪ بیشتر از نمونه شاهد بود[۱۹]. روزا و همکاران در سال ۲۰۲۵ استفاده از رنگدانه‌های معدنی در بهبود ویژگی‌های ظاهری و مکانیکی بتن خودتراکم مبتنی بر آهک هیدرولیکی طبیعی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این رنگدانه‌ها موجب ایجاد رنگ یکنواخت در بتن خودتراکم شده و در برخی طرح‌ها مقاومت فشاری و خمشی نیز افزایش یافت[۱۸]. شهریاری و همکاران در سال ۲۰۲۵ خواص مکانیکی بتن رنگی (مشکی) با نسبت‌های مختلف وزنی اکسید بالکلی را بررسی کردند. در این تحقیق اکسید بالکلی در نسبت‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ از وزن سیمان استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از حداکثر ۱۵٪ وزنی اکسید بالکلی می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد[۱۴]. خدابنده‌لو و همکاران در سال ۲۰۲۶ بتن مشکی با استفاده از دوده کربن را تولید کردند. در این تحقیق بتن‌های حاوی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی دوده کربن نسبت به سیمان ساخته شدند. نتایج نشان داد افزودن دوده کربن تا مقدار ۱۰٪ وزنی سیمان، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود و با افزایش مقدار دوده کربن، میزان جذب آب اولیه و نهایی افزایش یافت[۱۳].

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات بر رنگدانه‌های متداول نظیر اکسیدهای آهن و کربن و عموماً در بتن‌های معمولی متمرکز بوده‌اند و اطلاعات مدونی درباره رفتار ترکیبی سایر اکسیدهای معدنی در بتن خودتراکم وجود ندارد. علاوه بر این، در اکثر تحقیقات انجام شده، رنگدانه‌ها صرفاً به عنوان عامل رنگ‌زا ارزیابی شده‌اند و نقش هم‌زمان آن‌ها به عنوان پرکننده ریزدانه در ساختار خمیر سیمان سفید و تاثیر آن بر رفتار رئولوژیکی، مکانیکی و جذب آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، اکسید باریت به عنوان یک ماده معدنی با رنگ خاص، در تولید بتن خودتراکم رنگی تاکنون مورد ارزیابی جامع قرار نگرفته است و محدوده بهینه مصرف آن برای ایجاد تعادل میان روانی، مقاومت مکانیکی و پایداری رنگ مشخص نیست. بنابراین، در این تحقیق تاثیر نسبت‌های مختلف اکسید باریت بر مشخصات بتن تازه، خواص مکانیکی، جذب آب و کیفیت رنگ بتن خودتراکم به صورت هم‌زمان ارزیابی شده است تا ضمن تعیین دوز بهینه مصرف، عملکرد این ماده به عنوان یک افزودنی رنگی و پرکننده تبیین گردد.

باریت کانی سولفاتی با پایداری شیمیایی بالا، خنثی و مقاوم در برابر حرارت است که کاربرد گسترده‌ای در صنعت رنگ‌سازی دارد [۲۶]. این کانی به طور طبیعی سفید یا شیری‌رنگ است، اما به دلیل وجود ناخالصی‌های معدنی می‌تواند طیف‌های پایداری از رنگ‌های صورتی تا گلبهی ایجاد کند. همچنین دسترسی به ذخایر و پسماندهای باریت در کشور، کاربرد اقتصادی آن را به عنوان یک افزودنی معدنی توجیه می‌کند. هدف از انجام این تحقیق، دستیابی به طیف رنگی مات و ملایم صورتی تا گلبهی در بستر بتن خودتراکم بر پایه سیمان سفید و ارزیابی پایداری آن است. انتخاب اکسید باریت به عنوان ماده رنگ‌زا بر پایه ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاص این کانی انجام گرفته است. باریت طبیعی به واسطه حضور مقادیر اندک ناخالصی‌های معدنی می‌تواند طیف‌های پایدار رنگی نظیر صورتی و گلبهی ایجاد کند و در مقایسه با رنگدانه‌های متداول مصنوعی، دارای ثبات رنگی بالا در محیط‌های قلیایی و پایداری در برابر تابش فرابنفش است. علاوه بر خاصیت رنگ‌زایی، باریت به دلیل وزن مخصوص بالا و ساختار دانه‌بندی ریز خود، به عنوان یک پرکننده معدنی عمل کرده و می‌تواند با پر کردن منافذ مویینه در خمیر سیمان، فشردگی ریزساختار بتن خودتراکم را بهبود بخشد. از این رو، اکسید باریت جهت ایجاد هم‌زمان اثر رنگ‌بخشی و بهبود ریزساختار مکانیکی و رئولوژیکی بدون تحمیل افت مقاومت ناشی از مصرف رنگدانه‌های شیمیایی انتخاب شد. نوآوری اصلی این تحقیق در ارزیابی همزمان عملکرد اکسید باریت در بتن خودتراکم از جنبه‌های کارایی تازه، مقاومت مکانیکی، دوام و ویژگی‌های ریزساختاری این ماده در تولید بتن‌های رنگی با پایداری ساختاری مناسب می‌باشد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲- مواد و مصالح

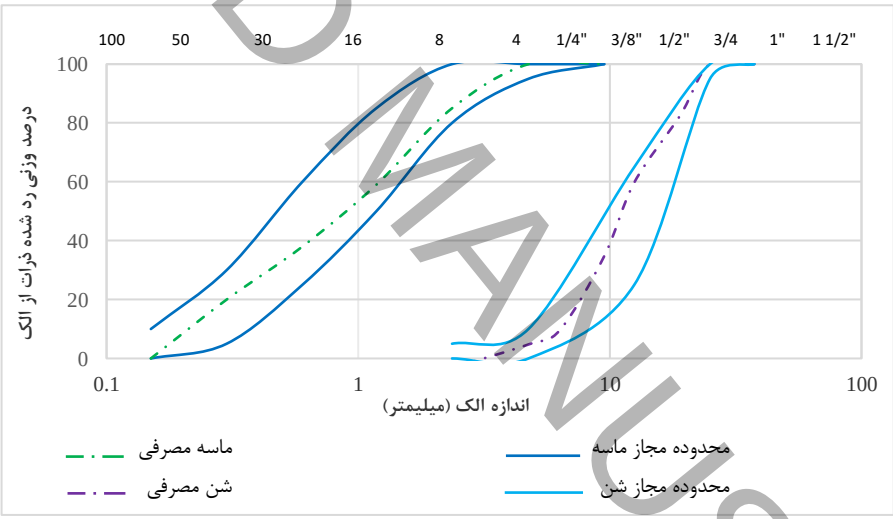
۲ـ۱ ـ سنگدانه

در این تحقیق جهت ساخت بتن، از سنگدانه منطقه دوکوهک/فارس استفاده شد. وزن مخصوص سنگدانه و میزان جذب آب آن طبق استاندارد ASTM-C128 اندازه‌گیری شد. همچنین درصد سایش شن با آزمایش لس‌آنجلس مطابق استاندارد ASTM-C535 صورت گرفت. دانه‌بندی مصالح نیز طبق ASTM-C136 با الک‌های استاندارد تعیین و نتایج با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه شد. جدول شماره ۱ مشخصات سنگدانه مصرفی را نشان می‌دهد. شکل شماره ۱ نمودار دانه‌بندی سنگدانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 1. Properties of the gravel used in concrete production.

معیار	شن	ماسه
حداکثر اندازه	۱۹ میلیمتر	۴/۷۵ میلیمتر
سایش	٪۱۷	-
مدول نرمی	-	۳
وزن مخصوص SSD	۲۶۳۰ kg/m^3	۲۶۰۰ kg/m^3
میزان جذب آب	٪۱/۶	٪۲/۳



شکل ۱ دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد

Figure 1. Particle-size distributions of the gravel and sand used in concrete production and their compliance with the standard limits

۲ـ۲ ـ سیمان

در این تحقیق برای افزایش کیفیت رنگ پذیری بتن از سیمان سفید پرتلند ساوه استفاده شد. این سیمان برابر با ۳/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی این سیمان در جدول شماره ۲ و ۳ درج شده که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیمان سفید ساوه

Table 2. Physical properties of Saveh white cement.

سطح مخصوص (بلین)	انبساط اولیه (اتوکلاو)	زمان گیرش (min)		مقاومت فشاری (kg/cm^2)			وزن مخصوص
cm^2/gr	٪	اولیه	نهایی	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	gr/cm^3
۲۸۰۰	۰/۰۷	۱۵۰	۱۸۵	۱۲۰	۲۵۰	۳۷۰	۳/۱

جدول ۳ ساختار شیمیایی سیمان سفید ساوه

Table 3. Chemical composition of Saveh white cement.

نام	٪
C_3S	۶۱
C_2S	۱۲
SO_3	۲/۸
MgO	۰/۸
Fe_2O_3	۰/۱۸
Al_2O_3	۴/۴
SiO_2	۱۶/۵
Na_2O	۰/۱۷
K_2O	۰/۱۳
L.O.I	۱/۸

۲ـ۳ ـ اکسید باریت

اکسید باریت مورد استفاده در این تحقیق، از بخش‌های هوازده و لایه‌های با عیار پایین ذخایر باریت حاصل گردیده که در فرآیندهای استخراج و فرآوری معدنی به عنوان نوعی باطله و پسماند شناخته می‌شود. در زون‌های سطحی و هوازده کانسار، حضور اکسیدها و ترکیبات فرعی آهن در کنار ذرات باریت، طیفی از رنگ‌های متمایل به صورتی و گلبهی را در این ماده ایجاد می‌کند که این رفتار با باریت خالص و سفید صنعتی متفاوت است. این پودر میکرونیزه بر اساس استانداردهای صنعت رنگ و کامپوزیت، در رده رنگدانه‌های گسترش‌دهنده و فیلری قرار می‌گیرد و به دلیل منشأ معدنی، پایداری حرارتی، عدم انحلال در آب، مقاومت در برابر محیط قلیایی بتن و پایداری نوری، گزینه‌ای مناسب برای ایجاد رنگ‌های پاستلی و عمل به عنوان ریزپرکننده است[۲۶]. این محصول از شرکت جهان پودر دلیجان تهیه شد و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن مطابق اطلاعات واحد تولید کننده در جدول شماره ۴ و ۵ آورده شده است. همچنین شکل شماره ۲ پودر اکسید باریت مورد استفاده را نشان می‌دهدمی‌دهد.

جدول ۴ مشخصات شیمیایی اکسید باریت مصرفی

Table 4. Chemical composition of the barite oxide used.

نام	سهم (٪)
BaO	۶۳
SO_3	۲۴
SiO_2	۸
Fe_2O_3	۱/۸
Al_2O_3	۰/۵
CaO	۰/۴

ACCEPTED MANUSCRIPT

MgO	۰/۴
MnO	۰/۲
TiO_2	۰/۲
L.O.I	۱/۵

جدول ۵ مشخصات فیزیکی اکسید باریت مصرفی

Table 5. Physical characteristics of consumed barite oxide

ویژگی/اندازه	ویژگی
پودر جامد	شکل ظاهری
صورتی/گلبهی	رنگ
< ۱٪	میزان ناخالصی
۳/۳ gr/cm^3	وزن مخصوص
۰/۳ mm	حداکثر اندازه ذرات
< ٪۰/۵	میزان جذب آب
۳/۵	سختی موهس
۱/۱ m^2/g	سطح ویژه



شکل ۲ اکسید باریت مورد استفاده جهت ساخت بتن رنگی خودتراکم

Figure 2. Barite oxide used to make colored self-compacting concrete

۲ـ۴ ـ آبرروان کننده

در این تحقیق برای بهبود روانی بتن و ایجاد پخش یکنواخت رنگدانه معدنی از فوق روان کننده TP100 با پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. از آنجا که رنگدانه‌های معدنی به صورت پودر به مخلوط بتن افزوده می‌شوند، مصرف آن‌ها معمولاً باعث افزایش جذب آب، کاهش روانی و سخت‌تر شدن اختلاط می‌شود. این موضوع می‌تواند پخش یکنواخت رنگ را مختل کند و در نهایت باعث تفاوت شدت رنگ در بخش‌های مختلف بتن شود. فوق روان کننده TP100 نسل جدید افزودنی‌های پایه پلی‌کربوکسیلات است که با پخش بهتر ذرات سیمان و جلوگیری از تجمع آن‌ها، موجب افزایش روانی بتن بدون نیاز به افزایش آب می‌شود. استفاده از این ماده علاوه بر بهبود اختلاط، به توزیع یکنواخت‌تر رنگدانه در کل حجم بتن کمک می‌کند و در نتیجه کیفیت رنگ، شفافیت و یکنواختی سطح نهایی را بهبود می‌بخشد. این محصول بصورت آماده از شرکت توسعه بتن خریداری شد و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن مطابق اطلاعات واحد تولید کننده در جدول شماره ۶ آورده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۶ خصوصیات فیزیکی فوق روان کننده TP100

Table 6. Physical properties of TP100 superplasticizer

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	pH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی رنگ	۱/۱ gr/cm^3	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۵/۵۸	مایع	حداکثر ۳٪ وزنی سیمان

۳- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی جهت ساخت بتن خودتراکم رنگی با نسبت‌های مختلف وزنی اکسید باریت، مجموعاً متشکل از ۵ طرح اختلاط و ۷۵ آزمونه بود. در بخش بتن تازه، آزمایش‌های رئولوژیکی شامل جریان اسلامپ و زمان T_{50} جهت ارزیابی قابلیت پرکنندگی و سرعت جریان آزاد بتن مورد استفاده قرار گرفت. همچنین آزمایش قیف V به منظور سنجش میزان لزجت و مقاومت در برابر جدایی‌شدگی مصالح انجام شد. برای بررسی توانایی عبور بتن از میان میلگردها و موانع بدون وقوع انسداد، آزمایش‌های جعبه L و جعبه U و آزمایش حلقه J جهت تعیین ظرفیت عبور و مقاومت بتن در برابر مسدودشدگی در شرایط متراکم انجام شد. جهت بررسی رفتار مکانیکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، آزمایش مقاومت کششی در سن ۹۰ روز به روش برزیلی انجام شد. در ادامه آزمایش جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) برای ارزیابی تخلخل و دوام بتن صورت گرفت. هر آزمون، ۳ مرتبه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. همچنین میزان انحراف نتایج، اختلاف و پراکندگی آن‌ها جهت تحلیل دقیق‌تر محاسبه شد. جزئیات روش‌های آزمایش و مشخصات آزمونه‌ها در جدول شماره ۷ گزارش شده است.

جدول ۷ برنامه آزمایشگاهی ساخت نمونه‌های بتن در این تحقیق

Table 7. Laboratory program for making concrete samples in this research

ردیف	شرح آزمایش	استاندارد آزمایش	تعداد نمونه	نوع / ابعاد بتن
۱	جریان اسلامپ	BS-EN-12350-8	-	بتن تازه
۲	زمان T_{50}			
۳	آزمایش قیف V	BS-EN-12350-9		
۴	آزمایش جعبه L	BS-EN 12350-10		
۵	آزمایش جعبه U	BS-EN 12350-11		
۶	آزمایش حلقه J	BS-EN 12350-12		
۷	مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه	BS-EN 12390-3	۴۵ عدد	نمونه ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتری
۸	مقاومت کششی	ASTM-C496	۱۵ عدد	نمونه ۱۵×۳۰ سانتیمتری
۹	جذب آب بتن سخت شده	ASTM-C642	۱۵ عدد	نمونه ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتری

انحراف معیار یکی از شاخص‌های آماری مهم برای سنجش میزان پراکندگی داده‌ها حول مقدار میانگین است. مقادیر کوچک این شاخص نشان‌دهنده تمرکز و یکنواختی بیشتر داده‌ها بوده، در حالیکه مقادیر بزرگ‌تر بیانگر پراکندگی بیشتر داده‌ها از میانگین می‌باشد. از این پارامتر آماری برای ارزیابی میزان تغییرپذیری متغیرها و همچنین بررسی یکنواختی و قابلیت تکرار نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این تحقیق، انحراف معیار نتایج با استفاده از روابط (۱) تا (۳) محاسبه شده است[۲۷].

در رابطه شماره ۱، اختلاف هر داده از مقدار میانگین محاسبه می‌شود[۲۷]:

$$A = \frac{\sum \chi_i}{N} \qquad (1)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

از رابطه شماره ۲ مربع اختلاف میزان هر داده محاسبه می‌شود[۲۷]:

$$m = (\chi_i - A)^2 \quad (۲)$$

از رابطه شماره ۳ انحراف معیار نمونه محاسبه می‌شود[۲۷]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{N - 1}} \quad (۳)$$

که در آن:

x_i: مقدار هر داده

N: تعداد نمونه‌ها

m: تعداد کل داده

A: میانگین داده

۴- طرح اختلاط

بر اساس الزامات استاندارد ASTM-C979، حداکثر مقدار مجاز مصرف رنگدانه در بتن برابر با ٪۱۰ وزنی مواد سیمانی تعیین شده است[۲۹]. از این رو، در تحقیق حاضر به منظور بررسی تاثیر افزودن اکسید باریت بر ویژگی‌های بتن خودتراکم، برنامه طرح اختلاط بر مبنای نسبت‌های وزنی ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ٪۱۰ اکسید باریت نسبت به وزن سیمان تنظیم شده است. اکسید باریت به عنوان افزودنی پودری به مخلوط بتن اضافه گردید. به همین دلیل، عیار سیمان سفید در تمامی طرح‌ها به طور ثابت برابر با ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار پودر سنگ نیز معادل ۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب حفظ شده است. نسبت آب به سیمان در کلیه طرح‌ها ۰/۴۵ ثابت در نظر گرفته شده و نسبت فوق روان‌کننده پایه کربوکسیلاتی به مواد سیمانی نیز برابر با ٪۳ وزنی لحاظ گردیده است. این مقدار بر اساس توصیه واحد تولیدی محصول و همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه جهت دستیابی به روانی مناسب بتن خودتراکم انتخاب گردید. مقادیر دقیق مصالح مصرفی برای هر یک از طرح‌های اختلاط در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

Table 8. Mixture design used for the experiment

ردیف	نام	سیمان سفید	پودر سنگ	ماسه	شن	اکسید باریت	مواد سیمانی (سیمان+اکسید باریت)	آب	فوق روان کننده
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
۱	CONTROL	۴۵۰	۹۰	۱۱۰۰	۶۰۰	۰	۴۵۰	۲۰۲/۵	۱۳/۵
۲	KZ-2.5%	۴۵۰	۹۰	۱۱۰۰	۶۰۰	۱۱/۲	۴۶۱/۲	۲۰۲/۵	۱۳/۸
۳	KZ-5%	۴۵۰	۹۰	۱۱۰۰	۶۰۰	۲۲/۵	۴۷۲/۵	۲۰۲/۵	۱۴/۱
۴	KZ-7.5%	۴۵۰	۹۰	۱۱۰۰	۶۰۰	۳۳/۷	۴۸۳/۷	۲۰۲/۵	۱۴/۵
۵	KZ-10%	۴۵۰	۹۰	۱۱۰۰	۶۰۰	۴۵	۴۹۵	۲۰۲/۵	۱۴/۸

در تحقیق حاضر، به منظور کنترل دقیق نسبت آب به مواد سیمانی، تمامی سنگدانه‌های مصرفی شامل شن و ماسه پیش از فرآیند اختلاط به طور کامل خشک شدند و بدون رطوبت سطحی مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله نخست، شن، ماسه، نیمی از آب مصرفی و نیمی از اکسید باریت به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. این اقدام موجب شد سنگدانه‌ها از ابتدای فرآیند، ذرات رنگی را جذب

ACCEPTED MANUSCRIPT

کنند و توزیع یکنواخت رنگدانه‌ها در کل حجم مخلوط حاصل شود. در مرحله بعد، سیمان سفید به همراه باقیمانده اکسید باریت و باقیمانده آب به مخلوط افزوده شد و فرآیند اختلاط به مدت ۱ دقیقه دیگر ادامه یافت. در انتها، فوق روان کننده به آرامی به ترکیب اضافه شد و برای دستیابی به روانی مطلوب و پایداری فاز خمیری، کل اجزا به مدت ۲ دقیقه دیگر تحت اختلاط نهایی قرار گرفتند. پس از تکمیل فرآیند ساخت، بلافاصله آزمایش‌های مربوط به خواص رئولوژیکی بتن تازه و اندازه‌گیری وزن مخصوص برای تمامی طرح‌های اختلاط انجام شد. نمونه‌های بتن پس از ریختن در قالب‌های استاندارد، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط دمایی کنترل‌شده ۱±۲۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از حصول گیرش نسبی و خروج از قالب، به حوضچه‌های آب منتقل شدند. فرآیند عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب تا سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز ادامه یافت. شکل شماره ۳ برخی از تصاویر مربوط به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳ برخی از تصاویر مربوط به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

Figure 3. Some images related to the experiments conducted in this research

۵- یافته‌ها

۵-۱ ـ رنگ‌پذیری

کد یا شناسه رنگ طبق استاندارد رنگ شناسی روشی برای انتخاب و تشخیص هر رنگ می‌باشد. شناسه رنگی به طراحان و معماران کمک می‌کند تا در زمینه مدلسازی رایانه‌ای برای طراحی رنگ بتن در نرم افزارهای کامپیوتری قبل از اقدام به ساخت، شبیه‌سازی کنند. در این تحقیق تلاش گردید تا شناسه رنگ نهایی بتن به همراه روش تهیه و طرح مخلوط آن ارائه گردد تا با توجه به طیف رنگ درخواستی، میزان استفاده از رنگدانه در بتن مشخص گردد. بنابراین شناسه رنگ راهی آسان و در عین حال کاملاً دقیق برای دستیابی به رنگ دلخواه است[۳]. در این تحقیق برای استخراج و تحلیل دقیق مشخصات نوری نمونه‌های بتنی، از نرم‌افزار تخصصی Color Grab استفاده شد. با توجه به اینکه بافت بتن دارای ناهمواری‌های سطحی است، برای جلوگیری از خطای احتمالی، فرآیند نمونه‌برداری با حذف اثرات نویز محیطی انجام شد و به منظور دستیابی به یک عدد ثابت و قابل اتکا که نماینده واقعی کل سطح قطعه باشد، از روش میانگین‌گیری پیکسلی در نواحی مرکزی هر نمونه استفاده شد که این رویکرد باعث می‌شود اثرات ناهمواری بافتی بتن در تحلیل نهایی خنثی شده و داده‌های خالص نوری استخراج گردند. پس از انجام اسکن‌های مکرر، مختصات رنگی هر قطعه در فضای HSL استخراج شد. فضای رنگی HSL[1] بر پایه سه مولفه بنیادی تعریف می‌شود. اولین مولفه، فام رنگ (H) است که نشان‌دهنده نوع رنگ بر روی چرخه

[1] Hue Saturation Lightness

ACCEPTED MANUSCRIPT

استاندارد رنگی است و بازه آن از ۰ تا ۳۶۰ درجه می‌باشد. مولفه دوم شدت یا غلظت رنگ (S) است که با مقیاس ۰ تا ۱۰۰٪ تعریف می‌شود. مولفه سوم روشنایی رنگ (L) است و میزان روشنایی یا تیرگی موجود در رنگ را از ۰ تا ۱۰۰٪ مشخص می‌کند.

برای محاسبه میزان اثرگذاری رنگدانه بر ویژگی‌های بصری بتن، در این تحقیق از روش تحلیل تفاضلی نسبت به یک نقطه مرجع استفاده شده است که این رویکرد اجازه می‌دهد تغییرات به صورت درصدی بیان گردند. با توجه به اینکه هدف تحقیق بررسی روند تغییرات رنگ پس از افزودن اولین نسبت رنگدانه است، نمونه KZ-2.5% که اولین قطعه دارای رنگ محسوب می‌شود به عنوان مرجع رنگی در نظر گرفته شد و سایر نمونه‌های بعدی با آن مقایسه شده. این روش نشان می‌دهد که با هر میزان افزایش نسبت اکسید باریت، چه مقدار بر غلظت رنگی آن افزوده شده است.

برای محاسبه درصد تغییر روشنایی ار رابطه شماره (۴) استفاده شد[۲۹]:

$$\Delta L = \frac{L_n - L_{ref}}{L_{ref}} \times 100 \qquad (۴)$$

در این رابطه، ΔL بیانگر درصد تغییر روشنایی در هر مرحله است. متغیر L_n نشان‌دهنده مقدار روشنایی استخراج شده از نمونه مورد نظر و L_{ref} مقدار روشنایی نمونه KZ-2.5% است. عدد حاصل از این فرمول اگر منفی باشد، نشان‌دهنده کاهش روشنایی و تیره شدن رنگ بتن است.

برای محاسبه درصد تغییر اشباع یا خلوص رنگ از رابطه شماره (۵) پیروی شده است[۲۹]:

$$\Delta S = \frac{S_n - S_{ref}}{S_{ref}} \times 100 \qquad (۵)$$

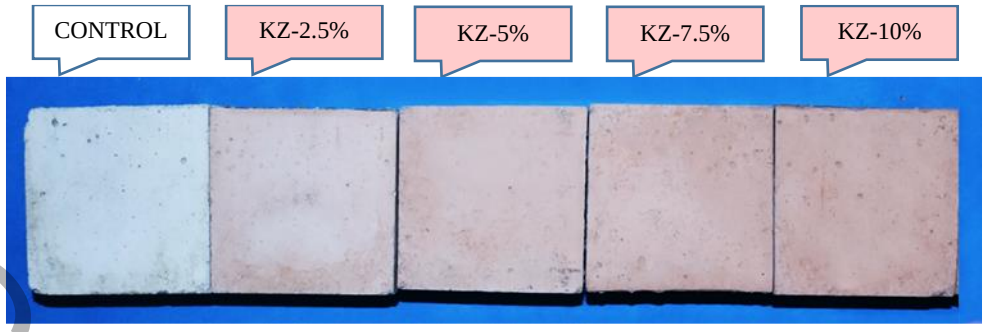
در این فرمول، ΔS نشان دهنده درصد تغییر در میزان غلظت رنگ بتن است. پارامتر S_n مقدار غلظت استخراج شده از نمونه در حال آزمایش و S_{ref} مقدار اشباع در نمونه KZ-2.5% است. از آنجایی که افزایش پیگمنت باعث افزایش غلظت رنگ بتن می‌شود، اعداد حاصل از این فرمول در این تحقیق مثبت گزارش شده‌اند که بیانگر غنی‌تر شدن رنگ در بافت سیمانی است. این روش برای اثبات غیرخطی بودن تغییرات رنگ را فراهم می‌کنند، زیرا نشان می‌دهند که با افزایش نسبت اکسید باریت، نرخ تغییرات در نمونه‌های دارای مقادیر بالاتر نسبت به نمونه‌های میانی کاهش می‌یابد که این پدیده در رنگ شناسی به عنوان نزدیک شدن به نقطه اشباع نوری شناخته می‌شود. بر این اساس مشخص می‌شود که بیشترین تاثیر بر اشباع رنگ در مراحل میانی رخ داده و در مراحل پایانی، با وجود افزایش اکسید باریت، تغییرات روشنایی به سمت ثبات میل کرده است که این خود گواهی بر توزیع صحیح و جذب کامل رنگدانه‌ها در نمونه‌های تولید شده است[۲۹]. نتایج حاصل از استخراج کدهای HSL و تحلیل آماری تغییرات نسبت به مرجع رنگی در جدول شماره ۹ و شکل شماره ۴ مقایسه رنگ‌پذیری نمونه‌های دارای مقادیر مختلف اکسید باریت را نمایش می‌دهد.

جدول ۹ نتایج تحلیل رنگ نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی اکسید باریت

Table 9. Color analysis results of self-compacting concrete samples containing barite oxide

ردیف	نام	فام رنگ hue	غلظت رنگ Saturation	روشنایی رنگ Lightness	تغییر روشنایی ٪	تغییر غلظت ٪
۱	CONTROL	۲۰۶	٪۴۵	٪۸۲	–	–
۲	KZ-2.5%	۲۵۵	٪۱۲	٪۸۰	٪۰	٪۰
۳	KZ-5%	۳۲۶	٪۱۳	٪۷۷	-٪۳/۷۵	٪۲/۵۴
۴	KZ-7.5%	۳۴۰	٪۱۴	٪۷۵	-٪۶/۲۵	٪۲۱/۱۸
۵	KZ-10%	۳۴۶	٪۱۵	٪۷۳	-٪۸/۷۵	٪۲۷/۹۶

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۴ مقایسه رنگ‌پذیری نمونه‌های دارای مقادیر مختلف اکسید باریت

Figure 4. Comparison of color fastness of samples with different amounts of barite oxide

۵ـ۲ ـ جریان اسلامپ

مطابق نتایج جدول شماره ۱۰، افزایش نسبت اکسید باریت از ۰٪ تا ۱۰٪ موجب کاهش تدریجی قطر جریان اسلامپ (تا ۱۷/۸٪) و افزایش زمان T_{50} شـده اسـت، هرچند تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز اسـتاندارد EFNARC باقی مانده اسـت. کاهش روانی و افزایش گرانروی مخلوط با افزودن اکسید باریت ناشی از سطح ویژه بالاتر ذرات میکرونیزه و چگالی زیاد این کانی است. ذرات ریز باریت بخشی از آب آزاد مخلوط را جذب کرده و با افزایش اصـطکاک داخلی میان ذرات، مقاومت در برابر جاری‌شـدن را افزایش می‌دهند. از سـوی دیگر، روند صعودی انحراف معیار در قطر و زمان جریان ا سلامپ با افزایش باریت، بیانگر افزایش ح سا سیت و کاهش یکنواختی رفتار رئولوژیکی مخلوط در دوزهای بالاتر است که به دشواری در توزیع همگن ذرات سنگین باریت در ماتریس خمیر سیمان مربوط می‌شود.

جدول ۱۰ نتایج جریان اسلامپ، زمان T_{50} و میزان انحراف از معیار داده

Table 10. Slump flow results, T_{50} time and deviation from the data standard

نام طرح	D	T_{50}	تغییرات	وضعیت ارزیابی	S-D	S-T
	cm	sec	٪	طبق EFNARC		
CONTROL	۷۸	۳	۰	قبول	۰/۱۲	۰/۳۵
KZ-2.5%	۷۵	۳/۵	۱/۴	قبول	۰/۱۸	۰/۳۹
KZ-5%	۷۲	۴	۸/۲	قبول	۰/۲۳	۰/۴۸
KZ-7.5%	۶۸	۴/۵	۱۳/۷	قبول	۰/۲۷	۰/۵۶
KZ-10%	۶۵	۵	۱۷/۸	قبول	۰/۲۸	۰/۵۷

D: قطر جریان اسلامپ T_{50}: مدت زمان جاری شدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر S-D: انحراف از معیار داده در قطر جریان اسلامپ
S-T: انحراف از معیار داده در زمان پهن شدگی

۵ـ۳ ـ قیف V

نتایج آزمایش قیف V (جدول شماره ۱۱) بیانگر افزایش گرانروی مخلوط‌های بتنی متنا سب با افزایش اک سید باریت ا ست. بر این اساس، زمان تخلیه مخلوط‌ها با افزودن باریت روند صعودی نشان می‌دهد. به طوری که طرح‌های حاوی باریت تا ۷/۵٪ در محدوده مجاز ۶ تا ۱۲ ثانیه اسـتاندارد EFNARC قرار دارند، اما افزایش دوز باریت به ۱۰٪ موجب خروج طرح از محدوده مجاز و افزایش محسـوس زمان تخلیه شده است. این رفتار ناشی از نقش بازدارنده ذرات میکرونیزه باریت بر جریان‌یافتن بتن است. چگالی بالا و سطح ویژه زیاد این ذرات منجر به افزایش تقاضای آب، بالا رفتن تنش تسلیم و در نتیجه افزایش گرانروی خمیر شده است. از دیدگاه آماری نیز، اگرچه انحراف معیار داده‌ها در تمامی طرح‌ها در محدوده بسیار مطلوب و تکرارپذیری آزمایش تایید شده است، اما روند صعودی جزئی در این شاخص با افزایش باریت، بیانگر تاثیر این ماده بر کاهش یکنواختی توزیع ذرات و افزایش ا صطکاک داخلی در غلظت‌های بالا ا ست که می‌تواند منجر به نوسانات جزئی در رفتار رئولوژیکی مخلوط گردد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۱ نتایج آزمایش قیف V و میزان انحراف از معیار داده

Table 11. V-funnel test results and standard deviation of the data

نام طرح مخلوط	V	تغییرات	وضعیت ارزیابی طبق EFNARC	S-V
	Sec	٪		
CONTROL	۷	۰	قبول	۰/۲
KZ-2.5%	۸	۱۴/۲	قبول	۰/۲
KZ-5%	۱۰	۴۲/۸	قبول	۰/۳
KZ-7.5%	۱۲	۷۱/۴	قبول	۰/۳
KZ-10%	۱۵	۱۱۴/۲	مردود	۰/۴
V: مدت زمان تخلیه S-V: انحراف از معیار داده در مدت زمان تخلیه				

۵ـ۴ ـ جعبه L

نتایج آزمایش جعبه L (جدول شماره ۱۲) حاکی از روند نزولی نسبت انسداد (h_2/h_1) با افزایش میزان اکسید باریت در طرح‌ها است. با این وجود، نسبت‌های بدست آمده برای تمامی نمونه‌ها در محدوده پذیرش استاندارد EFNARC (۰/۸ تا ۱) قرار دارد که نشان‌دهنده حفظ قابلیت عبور بتن در تمامی دوزهای مصرفی است. کاهش نسبی در قابلیت عبور مخلوط‌ها، ناشی از افزایش لزجت پلاستیک و تشدید اصطکاک داخلی در ماتریس سیمانی است. ذرات ریز و متراکم باریت با افزایش سطح ویژه و تقاضای آب در مخلوط، حرکت روان بتن در میان میلگردها را محدودتر می‌کنند. تحلیل آماری انحراف معیار نیز موید تکرارپذیری مطلوب آزمایش‌ها است. با این حال، افزایش تدریجی این شاخص در طرح‌های حاوی دوز بالای باریت، بیانگر تاثیر این ماده بر کاهش یکنواختی توزیع ذرات در غلظت‌های بالا است. پدیده‌ای که ناشی از حساسیت رفتار جریان مخلوط به نوسانات جزئی در توزیع آب آزاد و برخورد ذرات باریت با موانع در فرآیند عبور است.

جدول ۱۲ نتایج آزمایش جعبه L و میزان انحراف از معیار داده

Table 12. L-box test results and standard deviation of the data

نام طرح مخلوط	h_2/h_1	تغییرات	وضعیت ارزیابی طبق EFNARC	S-H
		٪		
CONTROL	۰/۹۳	۰	قبول	۰/۲۵
KZ-2.5%	۰/۹۱	۲/۱	قبول	۰/۲۸
KZ-5%	۰/۸۸	۵/۳	قبول	۰/۲۹
KZ-7.5%	۰/۸۴	۹/۶	قبول	۰/۳۱
KZ-10%	۰/۸۱	۱۲/۹	قبول	۰/۳۲
h_2/h_1: نسبت انسداد S-H: انحراف از معیار داده در نسبت انسداد				

۵ـ۵ ـ جعبه U

مطابق نتایج آزمایش جعبه U (جدول شماره ۱۳)، میزان اختلاف ارتفاع (ΔH) با افزایش نسبت اکسید باریت روند افزایشی نشان داد. بر این اساس، طرح‌های حاوی باریت تا ۷/۵٪ در محدوده مجاز استاندارد EFNARC (حداکثر ۳۰ میلی‌متر) قرار دارند، در حالی که مصرف ۱۰٪ باریت منجر به خروج مخلوط از محدوده مجاز و کاهش توانایی پرکنندگی شده است. این روند افزایشی بیانگر تاثیر مستقیم اکسید باریت بر افزایش تنش تسلیم و لزجت پلاستیک خمیر است. حضور ذرات ریز با سطح ویژه بالا و چگالی زیاد موجب افزایش تقاضای آب در مخلوط، اصطکاک داخلی بیشتر و در نهایت محدودیت در تراز شدن دو سمت جعبه می‌شود. از دیدگاه آماری،

ACCEPTED MANUSCRIPT

بررســـی انحراف معیار داده‌ها نشـــان‌دهنده تکرارپذیری مطلوب و دقت بالای آزمایش در تمامی طرح‌ها اســـت و تغییرات ناچیز در این شاخص حاکی از پایداری رفتار آزمایشگاهی و قابلیت اطمینان نتایج است.

جدول ۱۳ نتایج آزمایش جعبه U و میزان انحراف از معیار داده

Table 13. U-box test results and standard deviation of the data

نام طرح مخلوط	Δh	تغییرات	وضعیت ارزیابی طبق EFNARC	SU
	mm	٪		
CONTROL	۱۰	۰	قبول	۰/۲۱
KZ-2.5%	۱۵	۵۰	قبول	۰/۲۳
KZ-5%	۲۲	۱۲۰	قبول	۰/۲۲
KZ-7.5%	۳۰	۲۰۰	قبول	۰/۲۳
KZ-10%	۴۱	۳۱۰	مردود	۰/۲۵
Δh: اختلاف ارتفاع S-H: انحراف از معیار داده در نسبت انسداد				

۵ـ۶ ـ حلقه J

نتایج آزمایش حلقه J (جدول شـماره ۱۴) حاکی از تاثیر معنادار اکسـید باریت بر کاهش قابلیت عبور و افزایش پتانسـیل انسـداد مخلوط‌ها است. در حالی که نمونه‌های شاهد و طرح‌های با نسبت جایگزینی پایین در محدوده مجاز استاندارد EFNARC قرار دارند، با افزایش میزان اکسید باریت، کاهش قطر جریان و افزایش اختلاف ارتفاع مشاهده می‌شود. به طوری که در طرح‌های با دوز بالا، مخلوط به دلیل عبور از آستانه مجاز انسداد، معیارهای آیین‌نامه‌ای را تامین نمی‌کند. این افت عملکرد، ناشی از افزایش ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم ماتریس بتنی در اثر حضور ذرات باریت است که به دلیل سطح ویژه بالا، موجب تشدید اصطکاک داخلی و کاهش انرژی جنبشی جریان در عبور از فواصل میلگردها می‌شود. تحلیل آماری انحراف معیار نیز موید کاهش تکرارپذیری آزمایش با افزایش اکسید باریت اســـت. افزایش پراکندگی نتایج در تکرارهای آزمایش، ناشـــی از ناهمگنی ســـاختاری و بروز رفتارهای جریانی نامنظم و گســـیختگی‌های موضـــعی در جریان بتن اســـت که به دلیل توزیع غیریکنواخت ذرات متراکم باریت در غلظت‌های بالا رخ می‌دهد و پایداری نتایج را در هر نوبت اختلاط تحت تاثیر قرار می‌دهد.

جدول ۱۴ نتایج آزمایش حلقه J و میزان انحراف از معیار داده

Table 14. J-ring test results and standard deviation of data

نام طرح	D_J	P_J	تغییرات D_J	تغییرات P_J	وضعیت ارزیابی طبق EFNARC	$S\text{-}D_J$	$S\text{-}P_J$
	cm	cm	٪	٪			
CONTROL	۷۵	۴	۰	۰	قبول	۰/۳۱	۰/۱۳
KZ-2.5%	۷۱	۷	-۵/۳	۷۵	قبول	۰/۳۲	۰/۱۳
KZ-5%	۶۷	۹	-۱۰/۶	۱۲۵	قبول	۰/۳۵	۰/۱۲
KZ-7.5%	۶۱	۱۱	-۱۸/۶	۱۷۵	مردود	۰/۳۷	۰/۱۴
KZ-10%	۵۶	۱۴	-۲۵/۳	۲۵۰	مردود	۰/۴۱	۰/۱۲

D_J: قطر جریان با حلقه P_J: میزان اختلاف ارتفاع محاسبه شده $S\text{-}D_J$: انحراف از معیار داده در قطر جریان با حلقه
$S\text{-}P_J$: انحراف از معیار داده در میزان اختلاف ارتفاع محاسبه شده

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵ـ۷ ـ مقاومت فشاری

مطابق نتایج مقاومت فشاری (جدول شماره ۱۵ و شکل شماره ۵)، جایگزینی اکسید باریت تا سطح ۵٪ وزنی سیمان منجر به بهبود مقاومت فشاری در تمامی سنین مورد بررسی شده است. این روند صعودی ناشی از نقش پرکنندگی ذرات ریز اکسید باریت در بهبود تراکم ریزساختار و تقویت ناحیه انتقال میان خمیر و سنگدانه است. با این حال، افزایش جایگزینی تا ۷/۵٪ موجب تعدیل نرخ رشد مقاومت شده و در طرح ۱۰٪، افت عملکرد نسبت به نمونه شاهد مشاهده می شود. این افت در نسبت‌های بالای جایگزینی به دلیل ازدحام ذرات، تشکیل کلوخه‌های میکروسکوپی و اخلال در فرآیند هیدراسیون سیمان است که پیوستگی ماتریس را تضعیف می‌کند. تحلیل آماری انحراف معیار نشان‌دهنده افزایش پراکندگی داده‌ها با بالا رفتن میزان اکسید باریت است که ناشی از چالش توزیع یکنواخت ذرات در غلظت‌های بالا می‌باشد. همچنین، بررسی روند زمانی مقاومت‌ها بیانگر آن است که در سنین بالا (۹۰ روزه)، به دلیل تکمیل فرآیند هیدراسیون و پر شدن حفرات موئینه، یکنواختی ساختار بهبود یافته و انحراف معیار کاهش می‌یابد. در حالی که در سنین اولیه، اختلالات ناشی از مانع فیزیکی ذرات باریت بر نرخ رشد کریستال‌های هیدراتاسیون، پراکندگی بیشتری در نتایج ایجاد کرده است.

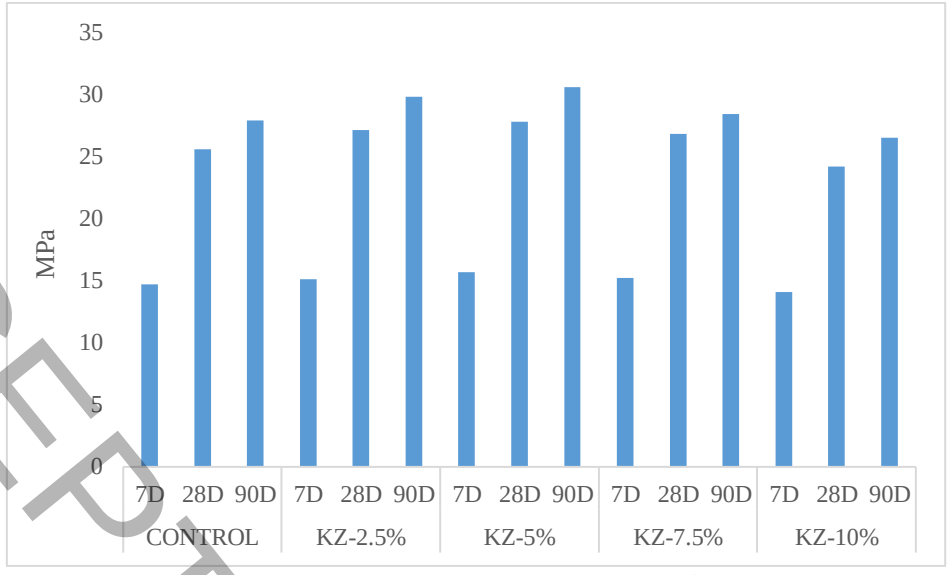
جدول ۱۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و میزان انحراف از معیار داده

Table 15. Compressive strength test results and standard deviation of data

ردیف	نام طرح	AGE	AVG CS	S-CS	تغییرات
		Days	Mpa		٪
۱	CONTROL	۷ روزه	۱۴/۷	۰/۳۴	-
		۲۸ روزه	۲۵/۶	۰/۳۱	-
		۹۰ روزه	۲۷/۹	۰/۲۵	-
۲	KZ-2.5%	۷ روزه	۱۵/۱	۰/۳۸	۲/۷
		۲۸ روزه	۲۷/۱	۰/۳۳	۵/۹
		۹۰ روزه	۲۹/۸	۰/۳۲	۶/۸
۳	KZ-5%	۷ روزه	۱۵/۷	۰/۴۸	۶/۸
		۲۸ روزه	۲۷/۸	۰/۴۱	۸/۶
		۹۰ روزه	۳۰/۶	۰/۳۸	۹/۷
۴	KZ-7.5%	۷ روزه	۱۵/۲	۰/۵۶	۳/۴
		۲۸ روزه	۲۶/۸	۰/۵۲	۴/۷
		۹۰ روزه	۲۸/۴	۰/۴۹	۱/۸
۵	KZ-10%	۷ روزه	۱۴/۱	۰/۶۲	-۴/۱
		۲۸ روزه	۲۴/۲	۰/۵۹	-۵/۵
		۹۰ روزه	۲۶/۵	۰/۵۴	-۵/۰

AGE: سن نمونه AVG SC: میانگین مقاومت فشاری S-CS: انحراف از معیار داده در مقاومت فشاری

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و روند کسب مقاومت در سنین مختلف

Figure 5. Compressive strength test results and strength acquisition trend at different ages

۵ـ۸ ـ مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی (جدول شماره ۱۶) بیانگر روند نزولی مقاومت کششی با افزایش نسبت جایگزینی اکسید باریت است. برخلاف مقاومت فشاری که تا نسبت‌های معینی با بهبود همراه بود، رفتار کششی بتن حساسیت بالایی نسبت به حضور این ماده نشان می‌دهد. ماهیت شیمیایی غیرفعال ذرات اکسید باریت و عدم توانایی آن‌ها در ایجاد پیوندهای شیمیایی مستحکم با محصولات هیدراتاسیون سیمان، سبب شده است که این ذرات در نقش فیلرهای غیرچسبنده عمل کنند. این وضعیت ضمن ایجاد نقاط تمرکز تنش در ماتریس سیمانی، مسیر اشاعه ترک‌های ریز را در حین اعمال بار کششی تسهیل نموده و منجر به افت پیوستگی داخلی بتن می‌گردد. تحلیل شاخص‌های آماری نیز مؤید افزایش پراکندگی داده‌ها متناسب با افزایش میزان اکسید باریت است. این پراکندگی ناشی از چالش توزیع یکنواخت ذرات در غلظت‌های بالا و تمایل آن‌ها به کلوخه شدن در حین اختلاط است. تشکیل این توده‌های متراکم و غیریکنواخت، یکپارچگی ماتریس را مختل کرده و منجر به بروز ضعف‌های موضعی در ساختار می‌گردد. امری که باعث شده است در طرح‌های با نسبت جایگزینی بالا، علاوه بر کاهش مقاومت میانگین، تکرارپذیری آزمایش نیز به دلیل ماهیت تصادفی توزیع کلوخه‌ها در سطح مقطع گسیختگی، تحت تاثیر قرار گیرد.

جدول ۱۶ نتایج آزمایش مقاومت کششی و میزان انحراف از معیار داده

Table 16. Tensile strength test results and standard deviation of data

نام طرح	AVG TS	S-T	تغییرات
	Mpa		٪
CONTROL	۳/۳	۰/۳۳	-
KZ-2.5%	۳/۱	۰/۳۴	-۷/۹
KZ-5%	۲/۷	۰/۳۷	-۱۵/۸
KZ-7.5%	۲/۵	۰/۳۸	-۲۱/۱
KZ-10%	۲/۲	۰/۴۴	-۲۸/۹
AVG TS: میانگین مقاومت کششی S-T: انحراف از معیار داده در مقاومت کششی			

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵ـ۹ ـ جذب آب در بتن سخت شده

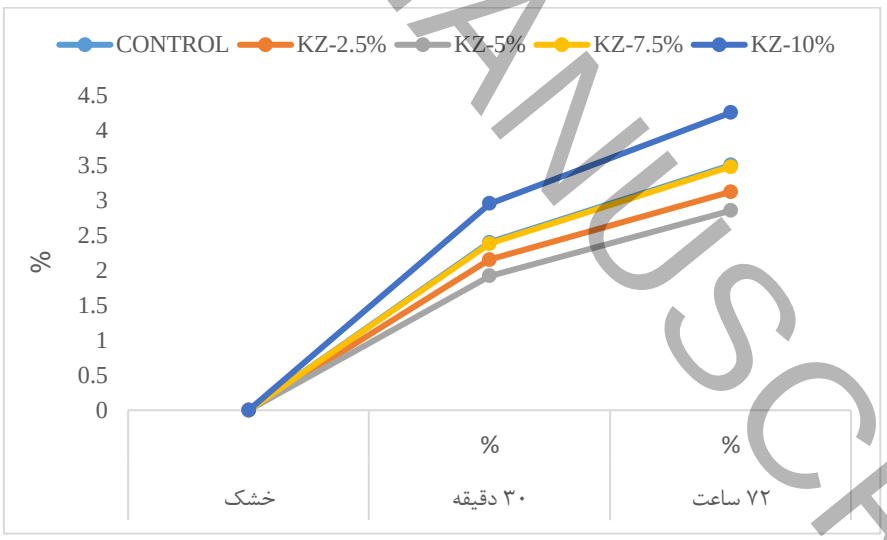
نتایج آزمایش جذب آب (جدول شماره ۱۷ و شکل شماره ۶) رفتار سهموی نفوذپذیری را در نمونه‌های این تحقیق نشان می‌دهد. استفاده از اکسید باریت تا سطح ۵٪ وزنی سیمان، با کاهش جذب آب اولیه و نهایی همراه بوده است. این بهبود عملکرد ناشی از نقش پرکنندگی ذرات میکرونی باریت است که با مسدودسازی حفرات موئینه و بهبود تراکم ناحیه انتقال، نفوذپذیری ماتریس را کاهش می‌دهد. در مقابل، عبور از این آستانه و مصرف ۱۰٪ باریت، روند جذب آب را صعودی کرده است. تجمع ذرات و تشکیل کلوخه‌های میکرو سکوپی در دوزهای بالا، نه تنها مسیرهای نفوذ جدیدی در ساختار ایجاد می‌کند، بلکه با ایجاد اختلال در فرآیند هیدراسیون و کاهش یکنواختی، تخلخل کل را افزایش می‌دهد. از دیدگاه رده‌بندی کیفی و دوام، تنها طرح حاوی ۵٪ اکسید باریت در رده کیفی خوب قرار گرفته و الزامات جذب آب برای سازه‌های در تماس با محیط‌های خورنده دریایی را تامین می‌کند. سایر طرح‌ها در رده کیفی متوسط طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین تحلیل آماری انحراف معیار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت باریت، تشکیل کلوخه‌های متراکم و ناهمگنی در غلظت‌های بالا موجب افزایش پراکندگی نتایج نسبت به طرح شاهد و کاهش تکرارپذیری آزمایش گردیده است.

جدول ۱۷ نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی و میزان انحراف از معیار داده

Table 17. Initial and final water absorption test results and deviation from the data standard

نام طرح	جذب آب اولیه	تغییرات	$S\text{-}W_1$	جذب آب نهایی	تغییرات	ارزیابی مطابق آبا	$S\text{-}W_2$
	٪	٪		٪	٪		
CONTROL	۲/۴۰	۰	۰/۱۱	۳/۵۰	۰	متوسط	۰/۲۶
KZ-2.5%	۲/۱۵	-۱۰/۴	۰/۱۶	۳/۱۲	-۱۰/۸	متوسط	۰/۲۵
KZ-5%	۱/۹۲	-۲۰/۰	۰/۱۴	۲/۸۵	-۱۸/۵	خوب	۰/۲۳
KZ-7.5%	۲/۳۸	-۰/۸۳	۰/۱۵	۳/۴۸	-۰/۵۷	متوسط	۰/۲۷
KZ-10%	۲/۹۵	۲۲/۹	۰/۱۶	۴/۲۵	۲۱/۴	متوسط	۰/۲۵

$S\text{-}W_1$: انحراف معیار داده در جذب آب اولیه $S\text{-}W_2$: انحراف معیار داده در جذب آب نهایی



شکل ۶ نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی و روند تغییرات آن طی مدت زمان مختلف

Figure 6. Results of the initial and final water absorption test and its changes over different periods of time

۵ـ۱۰ ـ ریزساختار

شکل شماره ۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) را برای بررسی ریزساختار بتن حاوی اکسید باریت نشان می‌دهد. این تصاویر امکان مشاهده مورفولوژی محصولات هیدراتاسیون سیمان، نحوه توزیع ذرات فیلر و ویژگی‌های ریزساختاری ماتریس سیمانی را

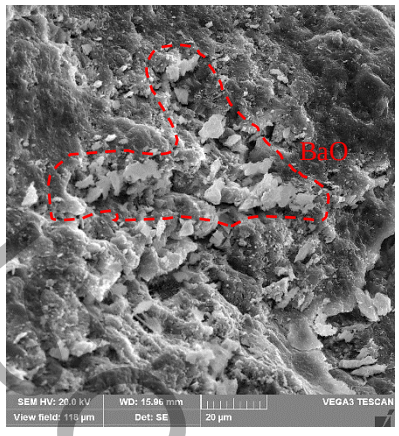
ACCEPTED MANUSCRIPT

فراهم می‌کنند. همچنین به منظور تحلیل ریزساختاری و شناسایی شیمیایی فازهای موجود، آنالیز عنصری (EDS) بر روی سطح مقطع نمونه انجام شد.

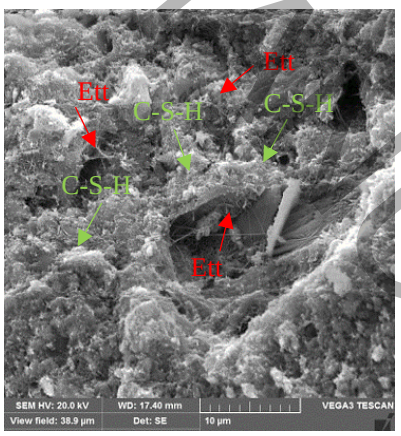
در تصویر (الف)، نمای کلی از سطح مقطع بتن حاوی نسبت‌های بالای اکسید باریت مشاهده می‌شود که نشان دهنده یک ساختار نسبتاً ناهمگن و تجمیع ذرات اکسید باریت است. در این مقیاس، توزیع ذرات پودری در ماتریس سیمان مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش مقدار اکسید باریت به ۱۰٪، ذرات تمایل شدیدی به تجمع و تشکیل خوشه‌های بزرگ پیدا کردند. آنالیز عنصری در این نواحی، حضور متراکم عنصر باریت را ثابت کرد که این امر حاکی از عدم پراکندگی ایده‌آل رنگدانه در کل حجم مخلوط بود. وجود این تجمعات منجر به ایجاد نواحی ضعیف در ماتریس می‌شود و یکپارچگی ساختار میکروسکوپی بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در تصویر (ب) مورفولوژی محصولات هیدراتاسیون شامل فازهای سوزنی‌شکل اترینگایت و ژل C-S-H را در کنار ذرات اکسید باریت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این واکاوی نشان داد که اگرچه اکسید باریت به واسطه سطح ویژه بالا موجب کاهش آب آزاد در بتن تازه می شود، اما این امر منجر به توقف فرآیند هیدراتاسیون نگردیده است. نکته حائز اهمیت در نسبت‌های بالای جایگزینی، اشغال فضای رشد کریستال‌ها توسط ذرات باریت است که با تضعیف اتصالات بین‌ذره‌ای، بستر رشد تخلخل‌های میکرونی را فراهم نموده است. این ناپیوستگی در ماتریس و عدم تراکم فازهای جامد، دلیل زیرساختی افزایش نفوذپذیری و تنزل خواص مکانیکی در طرح KZ-10% محسوب می‌شود.

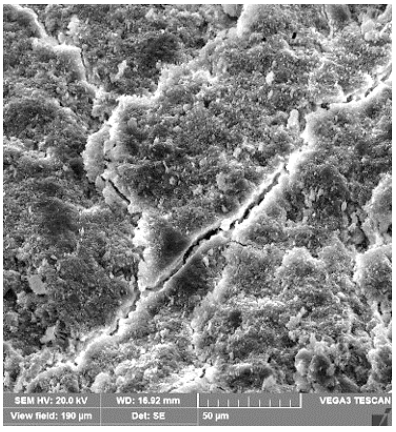
در تصویر (ج)، عیوب ساختاری و آسیب‌های فیزیکی موجود در خمیر سیمان مشاهده می‌شود. در این بخش، ترک ممتد به همراه مجموعه‌ای از ریزترک‌های جانبی در ماتریس بتن مشاهده می‌شود. شکل‌گیری این ترک‌ها به دلیل بالا بودن اصطکاک داخلی ناشی از حضور ذرات باریت و همچنین تنش‌های ناشی از جذب آب سطحی توسط این مواد مرتبط است. بر اساس مشاهدات، ناحیه انتقالی بین کلوخه‌های اکسید باریت و محصولات هیدراتاسیون سیمان به عنوان آسیب‌پذیرترین بخش در برابر تمرکز تنش عمل می‌کند و بستر مناسبی را برای آغاز گسیختگی‌های میکرونی فراهم می‌آورد که این موضوع با نتایج کاهش مقاومت در آزمایش‌های مکانیکی مطابقت دارد.



الف) بررسی ریز ساختار با تمرکز بر روی ساختار ناهمگن و تجمیع ذرات اکسید باریت



ب) بررسی ریز ساختار با تمرکز بر روی مورفولوژی محصولات هیدراتاسیون



ج) بررسی ریز ساختار با تمرکز بر روی عیوب ساختاری و آسیب‌های فیزیکی

شکل ۷ تصویر ریزساختار (SEM) بتن با تمرکز بر روی قسمت‌های مختلف

Figure 7. Microstructure (SEM) image of concrete with focus on different parts

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- بحث

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از اکسید باریت به عنوان یک رنگدانه معدنی در بتن خودتراکم، تعادلی میان ویژگی‌های زیباشناختی، کارایی و مقاومت ایجاد می‌کند. در بخش رئولوژی، مشاهده گردید که با افزایش نسبت جایگزینی اکسید باریت، کارایی بتن تازه به دلیل افزایش اصطکاک داخلی بین ذرات و بالا رفتن ویسکوزیته خمیر دچار افت تدریجی می شود، به طوری که نسبت انسداد در آزمون جعبه L از مقدار ۰/۹۳ در نمونه شاهد به ۰/۸۱ در نمونه حاوی ۱۰٪ اکسید باریت رسید. این روند با یافته‌های محققانی همچون گلشن و همکاران (۱۴۰۲) که بر روی اثر رنگدانه‌های معدنی در بتن خودتراکم مطالعه کرده‌اند همخوانی دارد. چرا که آن‌ها نیز گزارش کردند افزودن پودرهای معدنی با سطح ویژه بالا موجب افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش نسبت انسداد می شود[۱۳]. در حالی که در بسیاری از تحقیقات پیشین از اکسید آهن استفاده شده و افت روانی به دلیل جذب آب بالای ذرات پیگمنت گزارش شده است[۱۸]. در این تحقیق مشخص شد که اکسید باریت رفتار متفاوتی در ماتریس بتن ایجاد می‌کند و افت روانی آن با شدت کمتری نسبت به رنگدانه‌های سنتزی مشابه رخ می‌دهد. با این حال تمامی طرح‌های اختلاط تا محدوده ۷/۵٪ مصرف افزودنی موفق شدند در بازه استاندارد EFNARC باقی بمانند که نشان دهنده پتانسیل بالای اکسید باریت برای حفظ پایداری بتن خودتراکم است.

در حوزه خواص مکانیکی، نتایج حاکی از آن است که اکسید باریت در نسبت‌های پایین به دلیل خاصیت فیلرگونه و پرکنندگی حفره‌های ریزساختار بتن، موجب بهبود نسبی مقاومت فشاری می‌شود که این یافته با نتایج مطالعاتی که از اکسید آهن یا رنگدانه‌های معدنی به عنوان فیلر استفاده کرده‌اند قرابت دارد. زیرا در هر دو حالت، بهبود تراکم ساختار خمیر سیمان عامل اصلی ارتقای مقاومت محسوب می شود[۲۲,۲۰]. اما در نسبت‌های بالاتر از ۵٪، به دلیل ایجاد ناهمگنی در ماتریس سیمان و احتمالاً تضعیف ناحیه انتقالی بین سنگدانه و خمیر، روند کاهشی آغاز می‌گردد. برخلاف تحقیقاتی که بر روی اکسید آهن انجام شده و در آن‌ها مقاومت فشاری حتی در نسبت‌های بالا حفظ می‌گردد، در این تحقیق با عبور از مرز ۷/۵٪ مصرف اکسید باریت روند کاهشی مشاهده شد که این موضوع با نتایج تحقیقات پیشین بر روی بتن‌های رنگی که در مقادیر زیاد باعث تضعیف پیوند خمیر و سنگدانه می‌شوند مطابقت دارد[۲۴].

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از اکسید باریت در ابعاد میکرونیزه و به عنوان رنگدانه، جلوه بصری پایداری فراهم می‌سازد. ماهیت شیمیایی اکسید باریت، نقشی کلیدی در حفظ کیفیت بافت سطحی بتن ایفا می‌کند و باعث می‌شود که محصول نهایی علاوه بر دارا بودن طیف رنگی گلبهی، از نظر مقاومت در سطح استانداردهای لازم باقی بماند. نتایج این تحقیق و تحلیل شاخص رنگ‌پذیری نشان داد که روند تغییرات رنگ بتن به صورت غیرخطی بوده و پس از یک نقطه مشخص دچار اشباع رنگی می‌شود که این یافته برخلاف برخی مطالعات گذشته است که تغییرات رنگی را صرفاً خطی فرض می‌کردند. همچنین نفوذپذیری بتن حاوی اکسید باریت در نسبت‌های تا سطح ۵٪ در مقایسه با سایر بتن‌های رنگی حاوی پیگمنت‌های آلی وضعیت مطلوب‌تری دارد که این امر ناشی از سازگاری بهتر این کانی طبیعی با ساختار شیمیایی سیمان است.

نتایج این تحقیق راه را برای استفاده از اکسید باریت در تولید قطعات پیش ساخته بتنی، مبلمان شهری و نماهای معماری مدرن هموار می سازد. با توجه به ثبات رنگی مشاهده شده و بهبود نسبی جذب آب در سطوح مصرف تا ۵٪، می‌توان این نوع بتن را برای محیط‌های با رطوبت متوسط و پروژه‌هایی که جنبه‌های بصری در آن‌ها اولویت بالایی دارد توصیه کرد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، توصیه می شود که در صورت نیاز به رنگ‌های اشباع‌تر و استفاده از نسبت‌های بالای ۷/۵٪، حتماً مقدار ابرروان‌کننده برای جبران افت جریان اسلامپ تعدیل شود تا از بروز پدیده انسداد در مقاطع با آرماتوربندی متراکم جلوگیری گردد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اثرات بلندمدت هوازدگی و مقاومت این رنگدانه در برابر اشعه ماوراء بنفش مورد بررسی قرار گیرد تا پایداری رنگی آن در مقیاس دوره‌های طولانی بهره‌برداری مشخص شود. این تحقیق نشان داد که اکسید باریت علاوه بر ویژگی رنگ‌زایی، به عنوان یک فیلر معدنی در بهبود ساختار منفذی بتن در نسبت‌های مصرف کنترل‌شده (تا ۵٪) عمل می‌کند.

در پایان لازم به تاکید است که تمامی یافته‌ها، رفتارها و داده‌های ارائه شده در این بخش، حاصل ارزیابی یک طرح اختلاط مشخص با مصالح مصرفی معین (نوع سیمان، دانه‌بندی سنگدانه‌ها و نوع فوق‌روان‌کننده) در مقیاس آزمایشگاهی است. بنابراین، مقادیر و حدود رفتاری بدست آمده قابل تعمیم مستقیم به تمامی بتن‌های خودتراکم با طرح‌ها و مصالح دیگر نبوده و استفاده از این نتایج در شرایط کارگاهی و پروژه‌های دیگر، مستلزم ارزیابی مجدد با مصالح بومی همان پروژه خواهد بود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۷- نتیجه‌گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- با افزایش نسبت اکسید باریت از ۰ تا ۱۰٪، نسبت انسداد در آزمون جعبه L از ۰/۹۳ به ۰/۸۱ کاهش یافت که نشان‌دهنده افت حدود ۱۲/۹٪ قابلیت عبورپذیری نسبت به نمونه شاهد است.

۲- علی‌رغم کاهش کارایی، تمامی طرح‌های اختلاط تا سطح ۱۰٪ مصرف اکسید باریت در محدوده الزامات استاندارد EFNARC باقی ماندند که بیانگر حفظ ماهیت خودتراکمی مخلوط‌ها است.

۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲/۵ و ۵٪ اکسید باریت نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت نشان داد که این بهبود ناشی از اثر فیلر و کاهش تخلخل موئینه در ریزساختار خمیر سیمان بود.

۴- در درصدهای بیش از ۷/۵٪، روند مقاومت فشاری کاهشی شد که این پدیده به ایجاد ناهمگنی در ماتریس سیمان و تضعیف ناحیه انتقالی بین سنگدانه و خمیر نسبت داده شد.

۵- تحلیل رنگ‌سنجی نشان داد با افزایش نسبت اکسید باریت، روشنایی (L) از ۸۲٪ در نمونه‌های با نسبت پایین به ۷۳٪ در نسبت‌های بالاتر کاهش یافت که بیانگر تیره‌تر شدن حدود ۱۱٪ سطح بتن است.

۶- نتایج جذب آب نشان داد در محدوده بهینه مصرف، نفوذپذیری بتن نسبت به نمونه‌های رنگی حاوی پیگمنت‌های آلی کمتر بوده و ساختار متراکم‌تری حاصل شده است.

۷- استفاده از اکسید باریت در نسبت ۵٪ به عنوان یک فیلر معدنی موثر، موجب بهبود همزمان شاخص‌های مکانیکی، رئولوژیکی و رنگی بدون خروج از محدوده استاندارد اجرایی شد.

۸- در نسبت‌های بالاتر از ۷/۵٪، ضرورت افزایش مقدار ابرروان‌کننده برای جبران افت کارایی و خواص رئولوژی به عنوان یک راهکار اجرایی پیشنهاد گردید.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از شرکت جهان پودر دلیجان، شرکت توسعه بتن تابا و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

۸- منابع

[1] Arruda, E. S., Barata, M. S., Secco, P., & Carvalho, E. S. (2022). The use of red mud and kaolin waste in the production of a new building material: Pozzolanic pigment for colored concrete and mortar. Matéria, 27(3), e20220149.

[2] Assaad, J. J., & Saade, J. (2022). Effect of pigments on structural properties of colored reinforced concrete beams. Advances in Civil Engineering Materials, 11(1), 17–32. [IN PERSIAN]

[3] Avaznejad, F., Golshan, M. R., & Sheibani, H. R. (2022). Manufacturing and investigation of the effect of chemical pigments on the mechanical, tensile, abrasion resistance and water absorption of colored concrete with emphasis on urban beautification. Advanced Materials and New Coatings, 10(40), 3032–3047. [IN PERSIAN]

[4] Avaznejad, 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. [IN PERSIAN]

[5] 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. [IN PERSIAN]

ACCEPTED MANUSCRIPT

[6] De La Rosa, Á., Ruiz, G., & Moreno, R. (2025). Mineral additions as pigments and mechanical property enhancers in self-compacting natural hydraulic lime concrete. Journal of Building Engineering, Article 113393.
[7] EFNARC. (2015). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. European Federation of National Associations Representing Concrete.
[8] El Nemr, A. M., Shawky, M. A., & El Khafif, M. (2022). The effect of mineral pigments on mechanical properties of concrete. Journal of Civil Engineering and Construction, 11(3), 139–152.
[9] Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, A. E. M., & Mohamed, B. (2018). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and flowable concrete. Alexandria Engineering Journal, 57(1), 295–307.
[10] Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., & Uyulgan, B. (2013). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. Cement and Concrete Research, 43, 1719–1726.
[11] 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.
[12] 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, 170, 42–60.
[13] Golshan, M. R., Avaznejad, 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. [IN PERSIAN]
[14] 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, 159, 53–58.
[15] 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.
[16] Khodabandehloo, J., Padar, G., Lotfi, A., Eyvazipour Gavgany, S., & Jamal, M. (2026). Production of black concrete using carbon black and evaluation of its water absorption and permeability. Concrete Research. [IN PERSIAN]
[17] Lee, S. S., Song, H. Y., Lee, Y. S., & Lee, K. P. (2021). Strength and flow properties of non-cement inorganic composite using blast furnace slag and red mud. Advanced Materials Research, 1151, 491–495.
[18] Levinson, R., & Grati, O. (2018). Investigating and preparing colored concrete floors to replace asphalt on building roofs. Cement and Concrete Research, 108, 410–429.
[19] Li, Z. J., Mao, J. B., Tao, H. Y., He, Z. H., Xie, Y. D., & Li, J. (2024). Performance evaluation of pigmented fair-faced concrete under various environments: Mechanical properties, apparent properties, and color stability. Case Studies in Construction Materials, 21, e03978.
[20] Lopez, A., Tobes, J. M., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2020). Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete. Cement and Concrete Composites, 32, 754–761.
[21] López, A., & Elsherabi, C. (2019). Investigating color stability in mortar and concrete. Journal of Construction and Concrete Research, 602–620.
[22] Mansouri, A., Aghamajidi, R., Roozbeh, A., Bazaei, M., Ghadoumizadeh, M., & Ghazaleh, M. (2023). Application of ochre soil and nano aluminum oxide in concrete colorability and investigation of some mechanical properties and wear durability of concrete. Journal of Structural and Construction Engineering, 10(8), 179–201. [IN PERSIAN]
[23] Marcello, R. R., Galato, S., Peterson, M., Riella, H. G., & Bernardin, A. M. (2018). Inorganic pigments made from recycling of coal mine drainage treatment sludge. Journal of Environmental Management, 222, 1280–1294.
[24] Senff, L., Hotza, D., & Labrincha, J. (2021). Effect of red mud addition on rheological behavior and hardened-state characteristics of cement mortars. Construction and Building Materials, 25, 163–170.
[25] Shahriari, A., Askari, M., & Amiri, S. (2025). Investigation of the mechanical properties of colored (black) concrete with different weight ratios of ball clay. Journal of Structural and Construction Engineering, 12(7), 195–216. [IN PERSIAN]
[26] 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.
[27] Turk, K. (2017). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. Construction and Building Materials, 154, 326–334.

ACCEPTED MANUSCRIPT