Journal of Structural and Construction Engineering, 12(07), 2025, pp. 195-216

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigation of Mechanical Properties of Colored (Black) Concrete with Different Weight Ratios of Bulky Oxide

Leila shahryari[1*], Mojtaba askari[2], azam amiri[3]

**1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Shi.C.,Islamic Azad University, Shiraz,Iran*
2-PhD Student, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
3-Master's Degree, Department of Civil Engineering, Shi.C.,Islamic Azad University, Shiraz,Iran

ABSTRACT

Currently, there are several methods for changing the color of concrete. One common method is surface painting, which has low durability and easily separates from the concrete surface, creating an unsightly appearance. In contrast, using pigments in the concrete mixing process, in addition to improving the mechanical properties of the concrete, creates a more beautiful color and appearance. Using this method, while maintaining environmental sustainability and reducing cement production and consumption, helps to utilize mineral waste. Producing colored concrete with waste additives or mineral waste can help realize innovative designs and is important in terms of economic costs, ease of implementation, and ease of use. In this research, to change the color of concrete to black, ball clay oxide was used in different weight ratios of 5%, 10%, 15%, and 20% of the cement weight. Then, the mechanical properties of concrete, including slump, compressive strength at different ages, tensile strength, flexural strength, and its collocability were investigated and compared. Furthermore, the microstructure of the samples was examined using scanning electron microscopy (SEM). The results of this research showed that ball clay oxide does not have a significant or detrimental effect on the slump, tensile, and flexural strength of concrete, and the use of up to 15% by weight of ball clay oxide can increase the compressive strength of concrete. Also, the use of ball clay oxide will cause a uniform and stable color change of concrete to black.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 February 2025
Revise Date: 22 June 2025
Accept Date: 16 July 2025

Keywords:
Colored concrete
black concrete
bulk oxide
mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.509302.3674

*Corresponding author: Leila Shahryari
Email address: Leila.shahryari@iau.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی خواص مکانیکی بتن رنگی (مشکی) با نسبت‌های مختلف وزنی اکسید بالکلی

لیلا شهریاری[۱*]، مجتبی عسکری[۲]، اعظم امیری[۳]

۱-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی ، شیراز، ایران
۲-دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
۳-کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی ، شیراز، ایران

چکیده

در حال حاضر، روش‌های متعددی برای تغییر رنگ بتن وجود دارد. یکی از روش‌های معمول، رنگ‌آمیزی سطحی بتن است، که دوام کمی داشته و به سادگی از سطح بتن جدا شده و ظاهری ناخوشایند ایجاد می‌کند. در حالیکه استفاده از رنگدانه‌ها در فرآیند اختلاط بتن، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی بتن، رنگ و جلوه زیباتری را ایجاد می‌کند. استفاده از این روش ضمن حفظ پایداری زیست‌محیطی و کاهش تولید و مصرف سیمان، به بهره‌وری از پسماندهای معدنی کمک می‌کند. تولید بتن رنگی با افزودنی‌های ضایعاتی یا پسماندهای معدنی می‌تواند به تحقق طرح‌های نوآورانه کمک کند و از نظر هزینه‌های اقتصادی، سهولت اجرا، و استفاده آسان، حائز اهمیت است. در این تحقیق برای تغییر رنگ بتن به مشکی، از اکسید بالکلی در نسبت‌های وزنی مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ از وزن سیمان استفاده شد. سپس، خواص مکانیکی بتن شامل اسلامپ، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و میزان رنگ‌پذیری آن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در ادامه بوسیله تصاویر الکترونی روبشی (SEM) ریزساختار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که اکسید بالکلی تأثیر محسوس یا مخربی بر اسلامپ، مقاومت کششی و خمشی بتن ندارد و استفاده از حداکثر ۱۵٪ وزنی اکسید بالکلی می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. همچنین استفاده از اکسید بالکلی موجب تغییر رنگ یکنواخت و پایدار بتن به مشکی خواهد شد.

کلمات کلیدی: بتن رنگی، بتن مشکی، اکسید بالکلی، خواص مکانیکی.

سابقه مقاله:						شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	10.22065/jsce.2025.509302.3674	
۱۴۰۳/۱۲/۰۹	۱۴۰۴/۰۴/۰۱	۱۴۰۴/۰۴/۲۵	۱۴۰۴/۰۴/۲۵	۱۴۰۴/۰۷/۳۰		10.22065/jsce.2025.509302.3674	

***نویسنده مسئول:** لیلا شهریاری
پست الکترونیکی: Leila.shahryari@iau.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از بتن رنگی، نمایی مدرن و زیبا را ایجاد می‌کند که زیبایی خاص خودش را دارد. همان‌طور که در عصر حاضر بتن اکسپوز به دلیل ماهیت مدرن و صنعتی خود، طرفداران بسیاری پیدا کرده. استفاده از بتن رنگی جهت اجرای نماسازی و طراحی دکوراسیون به دلایل بسیاری می‌تواند مورد استقبال قرار گیرد. زیرا ماهیت بتن تازه شکل پذیر است و می‌توان مطابق با نظر و سلیقه افراد به آن شکل و فرم دلخواه داد. نمای بتنی از مقاومت و امنیت بالایی برخوردار می‌باشد و در برابر تغییرات جوی ماندگاری بسیار خوبی دارد. همچنین استفاده از این روش باعث می‌شود نیازی به استفاده از مصالح دیگر برای پوشش کار نباشد که در اینصورت هزینه‌های نماکاری به صورت چشمگیر کاهش می‌یابد[۱]. خصوصاً مطابق با ضوابط بلند مرتبه‌سازی در زمینه سبک سازی ساختمان و پرهیز از مصالح جدا شونده در نما استفاده از بتن رنگی می‌تواند توجیه پذیر باشد. در برخی از پروژه‌های بزرگ که کاهش هزینه‌های ساخت اولویت دارد، بتن رنگی می‌تواند به عنوان اولین انتخاب برای نماکاری محسوب شود. بتن رنگی به صورت بتن اکسپوز رنگی، جداول خیابان‌ها، کفسازی مسیر عابر پیاده یا مسیر دوچرخه سواری، کفسازی استادیوم‌های ورزشی، کارخانجات و انبارها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲]. برای تولید بتن رنگی می‌توان از افزودنی‌های رنگده یا سیمان رنگی استفاده کرد. تولید سیمان‌های رنگی در ایران در طی سال‌های اخیر بسیار محدود شده است. علاوه بر آن، سیمان‌های رنگی موجود در بازار طیف رنگی وسیعی را پوشش نمی‌دهند و صرفاً به چند رنگ اصلی محدود می‌شود[۳]. اما برخی از افزودنی‌های رنگی بسیار مقاوم بوده و از نظر اقتصادی نیز به صرفه می‌باشند. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان به اکسید آهن، کبالت، آزوریت، کروم و سایر اشاره نمود[۴]. مقدار افزودنی مورد نیاز با توجه به کیفیت و شدت رنگ مورد نظر متفاوت است. شدت رنگ بتن‌ها وابسته به رنگدانه‌های مصرفی و نسبت آب به سیمان متغیر می‌باشد. از دیگر عوامل تاثیرگذار بر شدت رنگ، شرایط آب و هوایی می‌باشد. همچنین کیفیت مصالح سازنده بتن نیز بر روی رنگ نهایی بتن تاثیرگذار است. نور خورشید، تغییرات دمایی، باران‌های اسیدی، عوامل مخرب محیطی و شرایط جوی همگی عواملی در حفظ و پایداری رنگ بتن رنگی در طی سالیان طولانی می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد که باید قبل از استفاده گسترده از آن مورد بررسی قرار گیرد[۵]. بنابراین لازم است تا اثر مواد رنگده در بتن قبل از بتن‌ریزی حجیم مورد بررسی قرار گیرد. زیرا بتن رنگی علاوه بر زیبایی باید در برابر عواملی همچون سایش، فشار، کشش و خمش دارای مقاومت و دوام باشد.

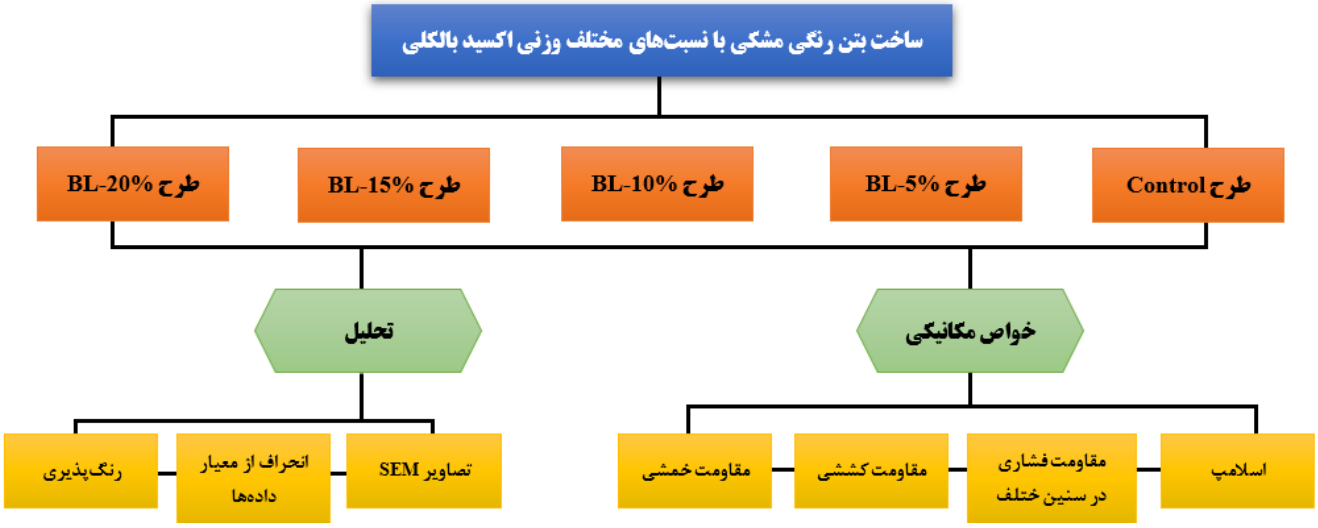
در اکثر شهرهای ایران، اجرای سنگ‌های با رنگ مشکی در نمای بیرونی ساختمان بدلیل انفصال و جداشدگی از ملات پشت، ناشی از جذب نور و گرمای بالا ممنوع است[۶]. در حالیکه استفاده از سایر مصالح رنگ مشکی مانند پروفیل‌های فولادی در نماسازی مانعی ندارد. اما دوام کم و قیمت بالای آن از جمله معایب سایر مصالح می‌باشد[۷]. بنابراین ایده خوبی است که بتوان با مشکی کردن رنگ بتن از آن در نماسازی استفاده کرد. زیرا بتن علاوه بر دسترسی راحت و قیمت ارزان‌تر، از دوام مناسبی برخوردار است[۸]. از طرفی رنگ مشکی به‌عنوان یک رنگ جذاب توانسته در دکوراسیون داخلی جایگاه ویژه‌ای به‌دست آورد. روانشناسی این رنگ در دکوراسیون داخلی نشان می‌دهد که استفاده از این رنگ می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی برای جلب توجه، ایجاد لوکسی و شیکی و ایجاد تناقض با رنگ‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده هوشمندانه از رنگ مشکی در ترکیب با رنگ‌های دیگر، می‌تواند فضاهایی زیبا و جذاب را بوجود آورد[۹].

ساخت بتن رنگی برای اولین بار در دهه ۵۰ میلادی با اضافه نمودن اکسید آهن مصنوعی به مخلوط بتن خاکستری انجام شد. لی و همکاران در سال ۲۰۲۱، مطالعات خود را بر روی تاثیر پیگمنت‌های اکسید آهن بر خصوصیات بلوک‌های بتنی قرار دادند. در این تحقیق برای ساخت بلوک‌های بتنی قهوه‌ای رنگ از اکسید آهن قهوه‌ای و سیمان سفید استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۴٪ پودر اکسید آهن به جای سیمان باعث کسب مقاومت فشاری ۹۰ درصدی بتن رنگی نسبت به نمونه بدون افزودنی می‌شود[۱۰]. لوپز و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی پایداری رنگ در ملات و بتن پرداختند. در این تحقیق جهت حفظ دوام بتن رنگی و جلوگیری از تخریب آن طی گذشت زمان از پودر اکسید آهن زرد به همراه سیمان خاکستری استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که رنگ بتن در محیط‌هایی که تحت شرایط دما و رطوبت کنترل شده هستند و تغییرات دمایی گسترده‌ای وجود ندارد، پایدارتر می‌باشد[۱۱]. سیواچدامبارام و همکاران در سال ۲۰۱۸، به بررسی میزان رنگدهی پیگمنت متاکائولینیت و هماتیت در بتن پرداختند. در این تحقیق از

اکسید آهن بازیافت شده از تصفیه خانه یک معدن ذغال سنگ متروکه استفاده گردید. نتیجه این تحقیق به مناسب بودن این ماده به عنوان رنگدانه‌ای برای بتن و یک استفاده بالقوه برای کاهش حجم پسماند اکسید آهن جمع‌آوری شده از تصفیه خانه‌های معدن ارائه می‌دهد[۱۲]. قلعه‌نویی و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی، به بررسی تولید بتن خود متراکم با استفاده از بوکسیت (پسماند ناشی از پالایشگاه‌ها) پرداختند. در این تحقیق هفت طرح مخلوط بتن با نسبت‌های مختلف بوکسیت به عنوان جایگزین سیمان در نسبت‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ ٪ طراحی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از بوکسیت اثر محسوسی بر عملکرد بتن نمی‌گذارد[۱۳]. حیدری و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مروری بر انواع معایب و مزایای بتن‌های رنگی پرداختند. در این تحقیق عنوان شده که برای ساخت بتن‌های رنگی دارای طیف رنگی زرد تا قهوه‌ای از اکسید آهن، جهت ساخت بتن سیاه از پودر کربن، جهت ساخت بتن بتن آبی پودر اکسید کبالت و جهت ساخت بتن سبز از اکسید کروم استفاده شود. در این تحقیق توصیه شده که اضافه نمودن پودر رنگدانه به میزان ۱۰٪ وزنی سیمان، بهترین نتیجه را در بر خواهد داشت. همچنین برای رنگ‌پذیری بهتر و یکدست شدن رنگ در بتن از سیمان سفید و برای دستیابی به مقاومت بهتر و جلوگیری از ترک‌های سطحی از فوق‌روان‌کننده استفاده گردد[۱۴]. ساقی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر رنگدانه‌های پودری بر خصوصیات بتن رنگی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از پودرهای رنگی مصنوعی برای تولید بتن زرد رنگ مطابق استاندارد ملی آبا به میزان ۴٪ و ۶٪ وزنی سیمان استفاده کردند. نتایج این تحقیق اُفت ۱۰٪ مقاومت فشاری ۷ روزه و اُفت ۱۵٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد نشان داد[۱۵]. عوض‌نژاد و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی کاربرد پیگمنت لیمونیت در رنگ‌پذیری بتن و بررسی برخی خواص مکانیکی و دوام سایشی بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که اکسید آهن موجود در پیگمنت ماش می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد[۱۶]. منصوری و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی کاربرد خاک اُخرا و نانو اکسید آلومین در رنگ پذیری بتن و بررسی برخی خواص مکانیکی و دوام سایشی بتن پرداختند. در این تحقیق برای تغییر رنگ بتن به قرمز، از اکسید باریت در نسبت‌های وزنی ۲/۵ ٪، ۵٪، ۷/۵ ٪ و ۱۰٪ به جای بخشی از سیمان استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خاک رنگی اُخرا باعث کاهش دوام سایشی بتن خواهد شد[۱۷]. گلشن و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی رنگدانه‌های پودری بر دوام سایشی بتن و برخی از خواص مکانیکی آن با تأکید بر بهبود پالت رنگی شهرها پرداختند. در این تحقیق با هدف ساخت کفپوش‌های بتنی رنگی جهت زیباسازی شهری از رنگدانه‌های پودری آبی، قرمز، زرد و سبز در نسبت‌های مختلف وزنی ۳، ۵ و ۷٪ به جای بخشی از سیمان در بتن استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد رنگدانه‌های استفاده شده در بعضی درصدهای وزنی باعث افزایش و در بعضی دیگر باعث کاهش مقاومت و دوام بتن می‌شوند[۱۸]. شکیب و همکاران در سال ۱۳۹۳ به مطالعه موردی در خصوص ساخت بتن خودمتراکم رنگی برای المان یادواره شهدای گمنام پرداختند. نتایج این تحقیق اشاره به افزایش مقاومت فشاری بتن رنگی به میزان ۲۰ ٪ به دلیل وجود اکسید آهن در ساختار پودر پیگمنت زرد را در سنین اولیه نشان می‌دهد[۱۹]. امامی و همکاران در سال ۱۳۹۲ به بررسی تاثیر رنگدانه‌های پودری بر خصوصیات مکانیکی، دوام و زیباشناسی بتن‌های رنگی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان از اُفت مقاومت فشاری بتن با افزودن مقادیر بیشتر پودر رنگدانه جایگزین سیمان را نشان می‌دهد[۲۰]. حاتمی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تاثیر مواد رنگی با مدول نرمی مختلف بر خواص مکانیکی و شدت رنگ بتن خود تراکم رنگی پرداختند. در این تحقیق برای ساخت بتن خودتراکم زرد رنگ از اکسید آهن و اکسید تیتانیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که ظرافت رنگدانه به طور قابل توجهی بر استحکام فشاری و خمشی بتن تأثیر می‌گذارد[۲۱]. با توجه به پیشینیه موضوع می‌توان دریافت که عمدتاً میزان استفاده از مواد رنگی در بتن با توجه به نوع و خصوصیات شیمیایی آن بسیار متغیر است. بنابراین ضرورت دارد تا میزان استفاده از هر رنگدانه یا ماده رنگده معدنی در بتن بر اساس آزمایش یا توصیه کارخانه سازنده محصول صورت گیرد. زیرا با توجه به نوع و ویژگی محصول، روش ساخت، میزان خلوص و عنصر شیمیایی آن میزان رنگدهی و اثرگذاری آن متفاوت است. شکل شماره ۱ نمایی از چند ساختمان که با بتن رنگ مشکی ساخته شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱ استفاده از رنگ مشکی در نمای ساختمان [۳۵]

امروزه راه‌های بسیاری برای تغییر رنگ بتن وجود دارد. یکی از روش‌های مرسوم، رنگ‌آمیزی سطح بتن است. اما استفاده از این روش دوام چندانی ندارد و به سادگی رنگ از سطح بتن جدا شده و ظاهری ناخوشایند ایجاد می‌کند. همچنین لازم است تا در طول سال سطح بتن مجدداً رنگ آمیزی شود. از طرفی رنگ آمیزی سطح بتن در محیط‌های مرطوب (به دلیل وجود رطوبت در سطح) با مشکلات فراوانی مواجه خواهد بود. در کل سطح بتن رنگ آمیزی شده تحت سایش ناشی از عبور و مرور، باران‌های اسیدی، اشعه‌های ساطع شده از نور خورشید، تغییرات دمایی یا فصلی و غیره تحت زوال شدید قرار گرفته و عمر بسیار کمی‌دارند. در حالیکه استفاده از رنگدانه در اختلاط بتن از دوام و زیبایی بیشتری برخوردار است. استفاده از این روش در ابتدا ممکن است ایجاد هزینه نماید اما در مقابل هزینه‌های بازدید دوره‌ای، نگهداری، پوشش کاری، نقاشی و پرداختکاری مجدد را کاهش می‌دهد که در نتیجه استفاده از آن‌ها بسیار اقتصادی‌تر تلقی می‌شود[۲۳,۲۲]. در ایران عمدتاً رنگ‌ها یا رنگدانه‌های شیمیایی بصورت وارداتی از کشورهای چین، هند و آلمان تامین می‌شود که این مسئله موجب برون رفت ارز از کشور خواهد شد. در حالیکه سالانه چندین هزار تُن از انواع رنگدانه‌های معدنی در کشورمان، به کشورهایی مانند امارات یا چین جهت بکارگیری در صنایع مختلف صادر می‌شود که نوعی خام فروشی محسوب می‌شود. همچنین رنگ‌دانه‌های معدنی عمدتاً سمی نیستند و استفاده از آن ایجاد آلودگی مستقیم یا غیرمستقیم برای محیط زیست نخواهد داشت. رنگدانه‌های معدنی اکسید شده یا طبیعی معمولاً حاوی اکسید فلزات هستند و عمدتاً رنگ لطیف‌تر و ماندگارتری را در بتن ایجاد می‌نمایند. علاوه بر آن در جهت حفظ و توسعه پایدار و استفاده از پسماند معدنی، کاهش حجم تولید و مصرف سیمان از دیگر مزایای استفاده از این روش خواهد بود[۲۶,۲۵]. تولید بتن رنگی با افزودنی‌های ضایعاتی یا پسماندهای معدنی برای رسیدن به یک طرح نوآورانه توام با دانش فنی، سهولت در اجرا، هزینه اقتصادی مقرون به صرفه و استفاده راحت از آن اهمیت فراوانی دارد. واضح است که استفاده از معادن و غنائم کشور و بکارگیری آن در ساخت و تولید محصولات و فناوری‌های روز برای ساخت بسیاری از اماکن شهری می‌تواند در جهت جذب توریسم و زیبایی منطقه شهری مورد استفاده قرار گیرد. شاهدیم که در بسیاری از مناطق دنیا، منازل مسکونی در طیف‌های رنگی بسیار متنوع وجود دارد که همه ساله پذیرای گردشگران زیادی برای بازدید در این مناطق خواهند بود. در این تحقیق برای تغییر رنگ بتن به مشکی از اکسید بالکلی در نسبت‌های مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی عیار سیمان استفاده شد. سپس آزمایشات اسلامپ، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، مقاومت خمشی انجام شد. همچنین جهت بررسی تاثیر اکسید بالکلی بر روی خواص مکانیکی و واکنش هیدراسیون سیمان، اقدام به تحلیل انحراف از معیار داده‌ها بر ساسا مقاومتفشاری بتن و عکس‌برداری الکترونی روبشی (SEM) گردید. در نهایت طبق استانداردهای مرجع رنگ‌شناسی اقدام به مقایسه و دسته‌بندی رنگ‌های حاصل گردید. شکل شماره ۲ فلوچارت روند انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲ فلوچارت روند انجام تحقیق

۲- مواد و مصالح

۲-۱- شن

شن مصرفی جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی‌با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد و از معدن دوکوهک استان فارس تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) ۲۶۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۱/۵ ٪ می‌باشد. جدول شماره ۱ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD
	mm	٪	kg/m³
مخلوط بادامی‌و نخودی	۱۹	۱/۵	۲۶۳۰

۲-۲- ماسه

ماسه مصرفی جهت ساخت بتن در این تحقیق از معادن موجود در منطقه دوکوهک فارس تهیه شده است. ماسه مصرفی دارای حداکثر اندازه اسمی ۰- ۴/۷۵ میلیمتر و بوده که وزن مخصوص ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) ۲۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و جذب آب ۲/۳٪ و مدول نرمی ۳/۱ می‌باشد. جدول شماره ۲ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm	نرمی	kg/m³	%
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۲۶۰۰	۲/۳

۲-۳- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق تیپ ۲ فارس‌نو می‌باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مربع است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر کاتالوگ شرکت سازنده این سیمان می‌باشد ضمیمه شده است[۳۶].

جدول ۳ ساختار شیمیایی سیمان تیپ ۲ فارس‌نو [۳۶]

SiO_2	AL_2O_3	FE_2O_3	MgO	SO_3	C_aO	C_3S
٪۲/۹۰	٪۴/۷۰	٪۳/۹۵	٪۲/۲۰	٪۱/۳۵	٪ ۶۰/۴۶	٪ ۲۲/۶۸

۲-۴- اکسید بالکلی

بالکلی[1] یا رس صنعتی به خاک‌های رسوبی دانه‌ریز و پلاستیکی گفته می‌شود که مانند کائولن است با این تفاوت که پلاستیسیته و مقاومت آن در برابر حرارت بالا می‌باشد. قسمت‌هایی از بالکلی بدلیل نزدیکی به سطح پوسته زمین دچار هوازدگی می‌شود که به آن اکسید بالکلی می‌گویند. منشاء این ماده طبیعی است و رنگ آن بین زرد تا مشکی متغیر است. این تغییر رنگ، به حضور سایر کانی‌های موجود در آن مانند کربن و سایر موادی که با آن رسوب کرده‌اند، بستگی دارد. هر چه میزان کربن موجود در ساختار بالکلی بیشتر باشد رنگ آن تیره‌تر است و هر چه میزان کربن آن کمتر باشد رنگ آن رو به زردی می‌رود. بالکلی یک فیلر مناسب و ارزان قیمت نیز به حساب می‌آید. ارزش این ماده معدنی انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت در برابر آتش است. این ماده در بسیاری صنایع مانند تولید کاشی، سرامیک و چینی بهداشتی مورد استفاده قرار بگیرد. ویژگی نسوز بودن بالکلی باعث شده است که بصورت عمده در تنورهای آجرپزی سنتی و شرکت های کاشی و سرامیک سازی به عنوان خاک نسوز مورد استفاده قرار بگیرد. معادن بالکلی در استان‌های یزد، اصفهان و فارس به وفور یافت می‌شود. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده مطابق جدول شماره ۴ و ۵ می‌باشد[۲۸,۲۷]. همچنین شکل شماره ۳ اکسید بالکلی مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ خصوصیات شیمیایی اکسید بالکلی

نام عنصر	ساختار شیمیایی	مقدار ٪
اکسید آلومینیوم	AL_2O_3	۲۸/۵۵
اکسید آهن	Fe_2O_3	۱/۴۸
اکسید منیزیم	MgO	۴/۰۳
اکسید سدیم	Na_2O	۲/۳۹
اکسید کرین	CO_2	۵۳/۹۳
اکسید کلسیم	Cao	۴/۱۳

[1] Ball Clay

اکسید سدیم	SO_3	۰/۱
اکسید تیتانیوم	TiO_2	۱/۰۸
اکسید پتاسیم	K_2O	۴/۲۶
سایر	L.O.I	۱۱/۵۸

جدول ۵ خصوصیات فیزیکی اکسید بالکلی

اندازه اسمی مش	حداکثر اندازه اسمی (میکرومتر)	چگالی (gr/cm^3)	سختی موهس	جذب آب	رنگ
# ۴۰۰	µ ۳۷	۲/۹	۴	< ۲ ٪	سیاه

شکل ۳ اکسید بالکلی مصرفی جهت ساخت بتن رنگی مشکی

۲-۵- آبر روان کننده

بدلیل آنکه رنگدانه‌ها معمولاً بصورت پودر در بتن استفاده می‌شوند، باید همراه آب به کار روند و در آب حل شوند. از این رو استفاده از پودرهای رنگی می‌تواند موجب کاهش روانی بتن گردند[۸,۵]. همچنین در صورتیکه عناصر ساخت بتن به خوبی مخلوط نشوند، رنگدانه‌ها ته‌نشین شده و باعث عدم یکنواختی در رنگ‌پذیری خواهند شد. بنابراین در ساخت بتن با رنگدانه‌های معدنی استفاده از افزودنی-های کاهنده آب مانند انواع روان‌کننده جهت اطمینان از روانی، حفظ کیفیت رنگ‌پذیری و شفافیت در رنگ ضرورت دارد[۹,۴,۱]. در این تحقیق برای دستیابی به پخش یکنواخت رنگدانه در بتن و حفظ روانی آن، از آبرروان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات، استفاده شد. این ماده جزء جدیدترین نسل آبرروان‌کننده 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 روان کنندگی را ایجاد می‌کند[۳۴]. جدول شماره ۶ خواص فیزیکی آبرروان کننده مصرفی را نشان می‌دهد.

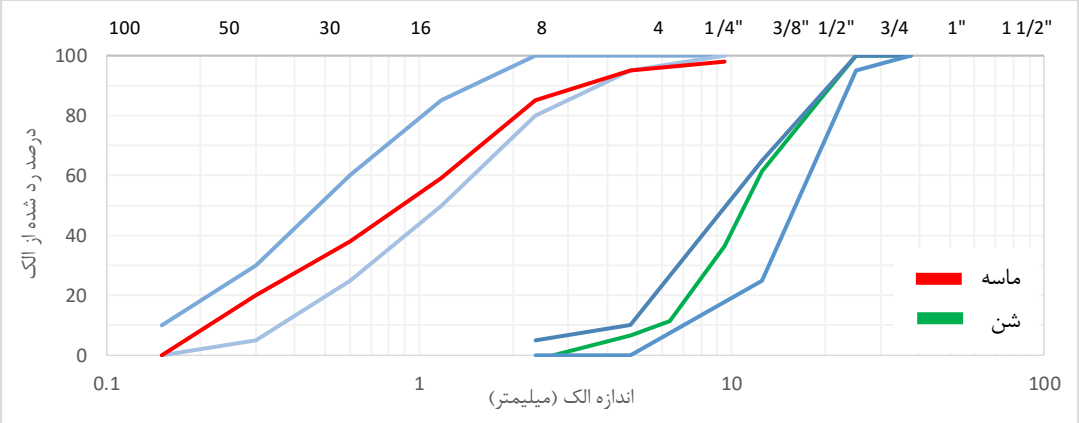
جدول ۶ خصوصیات فیزیکی ابر روان کننده برپایه کربوکسیلات [۴۴]

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	۰/۱ تا ۳ ٪ وزن سیمان

۳- دانه بندی

در آزمایش دانه بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی باایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شماره‌بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. قابل ذکر است که برای دانه بندی مصالح درشت دانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده دانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM-C136 دانه بندی از الک‌های سیمی‌استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده گردید که در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود[۳۰]. در منحنی دانه‌بندی، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.



شکل ۴ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

۴- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق شامل ساخت ۶۰ نمونه بتن در طیف رنگی مختلف می‌باشد. برای این منظور ۴۵ نمونه مکعبی ۱۵x۱۵x۱۵ سانتیمتری برای تعیین مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، تعداد ۵ نمونه استوانه‌ای ۳۰x۱۵ سانتیمتری جهت تعیین مقاومت کششی ۲۸ روزه به روش برزیلی، تعداد ۵ نمونه مکعب مستطیل ۱۰x۱۰x۵۰ سانتیمتری جهت تعیین مقاومت خمشی و تعداد ۵ نمونه مکعبی ۱۵x۱۵x۱۵ سانتیمتری جهت بررسی رنگ‌پذیری بتن ساخته شد. لازم به توضیح است که برای سنجش مقاومت فشاری از سه آزمونه برای هر رده بتن استفاده گردید و میانگین آن، بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. سایر آزمایشات مذکور بر روی نمونه ۲۸ روزه انجام شد. تعداد، سن و نوع نمونه‌های بتن، روش آزمایش و استاندارد مربوط به آن‌ها مطابق جدول شماره ۹ می‌باشد. شکل شماره ۵ برخی از نمونه‌های ساخته شده رنگی (مشکی) و معمولی را جهت انجام آزمایشات نشان می‌دهد.

جدول ۹ مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	شماره استاندارد	تعداد نمونه	ابعاد/حجم نمونه‌گیری	نوع نمونه	شرح آزمایش
۱	ASTM-C136	۱ سری	۳ کیلوگرم	توده	الک سنگدانه

۲	ASTM-C33	۱ سری	۳ کیلوگرم	توده	دانه بندی سنگدانه
۳	ASTM-C128	۱ سری	۱ کیلوگرم	توده	تعیین جذب آب و چگالی سنگدانه
۴	ASTM-C143	۱ سری	-	توده	اسلامپ
۵	BS-EN-12390-3	۴۵ عدد	۱۵*۱۵*۱۵ سانتیمتر	مکعبی	مقاومت فشاری
۶	ASTM-C496	۵ عدد	۱۵*۳۰ سانتیمتر	استوانه‌ای	مقاومت کششی
۷	ASTM-C293	۵ عدد	۱۰*۱۰*۵۰ سانتیمتر	مکعب مستطیل	مقاومت خمشی
۱۰	RGB, HSB, RAL	۵ عدد	۱۵*۱۵*۱۵ سانتیمتر	مکعبی	رنگ پذیری بتن

شکل ۵ برخی از نمونه‌های ساخته شده قبل از عمل‌آوری در حوضچه آب

۵- طرح اختلاط

مطابق استاندارد ASTM-C979 حداکثر مقدار مجاز استفاده از رنگدانه‌ها حداکثر ۱۰٪ وزنی سیمان می‌باشد و تا این میزان روی مقاومت فشاری بتن اثر سویی نخواهد داشت. همچنین 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[۱۷,۱۶,۱۳]. در این تحقیق ابتدا از دوزهای ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ استفاده گردید و با توجه به نوع رنگ بتن تصمیم گرفته شد که دوزهای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ برای انجام آزمایشات انتخاب گردد. زیرا دوزهای 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 آبرروان‌کننده بر پایه کربوکسیلات به میزان ۱٪ وزنی سیمان استفاده شد. در جدول شماره ۱۰ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۱۰ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	اکسید بالکلی	آبر روان کننده	آب
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	lit/m³
۱	Control	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	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

در این تحقیق سنگدانه‌های مصرفی اعم از شن و ماسه به مدت ۷ روز در دمای محیط بالای ۳۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته و بصورت کاملاً خشک و بدون رطوبت مورد استفاده قرار گرفتند. سپس برای افزایش کیفیت رنگ بتن ابتدا شن، ماسه، نیمی از آب و نیمی از پیگمنت رنگی (اکسید بالکلی) اضافه و به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. این کار باعث می‌شود تا سنگدانه‌ها از ابتدا رنگ مربوطه را به خود جذب نمایند و باعث افزایش کیفیت رنگ‌پذیری و یکنواختی رنگ در بتن گردند. سپس سیمان، باقیمانده اکسید بالکلی و باقیمانده آب طرح مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. در انتها آبرروان‌کننده به آرامی اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. پس از آن آزمایش وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و سپس قالب‌گیری انجام شد.

۶- یافته‌ها

۶-۱- رنگ پذیری

کد یا شناسه‌ی رنگ روشی برای تعیین دقیق رنگ و تشخیص آن است. این موضوع به خصوص برای معماران و طراحان اهمیت ویژه‌ای داد. در این تحقیق تلاش گردید تا میزان رنگ پذیری بتن رنگی ساخته شده با اکسید بالکلی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در ادامه میزان و شدت رنگ بدست آمده با استاندارد HSB[2] مورد ارزیابی قرار گیرد. نوع رنگ هر نمونه‌ی بتنی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار iColor Pickerاسکن و مشخص شده است. این برنامه قادر است تا کد هر رنگ را طبق دامنه‌ی رنگ‌شناسی HSB شناسایی و تعیین کند تا طراحان و بهره وران بتوانند با تغییر در مقادیر مصالح مصرفی، به رنگ دلخواه و مورد نظر خود دست یابند. فضای رنگی HSB بر اساس سه پارامتر رنگ مایه، اشباع و روشنایی آن توصیف و دسته بندی می‌شود[۱۶]. در این روش عدد اول از سمت چپ عبارت HSB که به اختصار Hنامیده می‌شود نوع رنگ را مانند قرمز، آبی یا زرد معرفی می‌کند که گستره آن مابین اعداد ۰ تا ۳۶۰ درجه تقسیم بندی می‌شود. عدد میانی بیانگر Saturation که به اختصار S نامیده می‌شود نشان‌دهنده شدت رنگ است. درجات آن بین اعداد ۰ تا ۱۰۰ تعریف شده است. عدد صفر در واقع بدون رنگ است و ۱۰۰ شدت و وضوح رنگ را نشان می‌دهد. (بین آن سایه‌هایی از خاکستری بین سیاه و سفید ایجاد می‌شود). عدد اول از سمت راست Brightness که به اختصار B نامیده می‌شود میزان درخشش یا روشنایی که بین اعداد ۰ تا ۱۰۰ تعریف می‌شود[۱۷,۱۳].

شکل شماره ۶ رنگ نهایی بتن را پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. طبق تصویر، کیفیت رنگ و قدرت پخش آن در طرح BL-15% و BL-20% بصورت چشمی تفاوت زیادی ندارد. شناسه رنگ طرح Control طبق استاندارد RGB به ترتیب ۱۳۲، ۱۳۲ و ۱۳۵ تعیین شد. همچنین طبق پالت دایره رنگ شناسی HSB، رنگ حاصله ۲۰۰ درجه با شدت ۲٪ و روشنایی ۵۳٪ تعیین گردید. این طرح طبق استاندارد RAL، به رنگ "خاکستری" با کد ۹۰۲۳ نامیده می‌شود. شناسه رنگ طرح BL-5% طبق استاندارد RGB به ترتیب ۷۵، ۸۰ و ۹۰ تعیین شد. همچنین طبق پالت دایره رنگ شناسی HSB، رنگ حاصله ۲۲۴ درجه با شدت ۲۰٪ و روشنایی ۳۷٪ تعیین گردید. این طرح طبق استاندارد RAL، به رنگ "خاکستری تیره" با کد ۷۰۱۵ نامیده می‌شود. شناسه رنگ طرح BL-10% طبق استاندارد RGB به ترتیب ۶۱، ۶۱ و ۷۷ تعیین شد. همچنین طبق پالت دایره رنگ شناسی HSB، رنگ حاصله ۲۴۰ درجه با شدت ۲۱٪ و روشنایی ۳۰٪ تعیین گردید. این طرح طبق استاندارد RAL، به رنگ "خاکستری تخته سنگ" با کد ۷۰۱۹ نامیده می‌شود. شناسه رنگ طرح BL-15% طبق استاندارد RGB به ترتیب ۳۴، ۳۹ و ۷۰ تعیین شد. همچنین طبق پالت دایره رنگ شناسی HSB، رنگ حاصله ۲۳۲ درجه با شدت ۵۱٪ و روشنایی ۲۷٪ تعیین گردید. این طرح طبق استاندارد RAL، به رنگ "کبالت" با کد ۵۰۱۳ نامیده می‌شود. شناسه رنگ طرح BL-

[2] Hue, Saturation, Brightness

20% طبق استاندارد RGB به ترتیب ۲۳، ۲۸ و ۵۱ تعیین شد. همچنین طبق پالت دایره رنگ شناسی HSB، رنگ حاصله ۲۲۹ درجه با شدت ۵۵٪ و روشنایی ۲۰٪ تعیین گردید. این طرح طبق استاندارد RAL، به رنگ "کبود" با کد ۵۰۰۳ نامیده می‌شود.

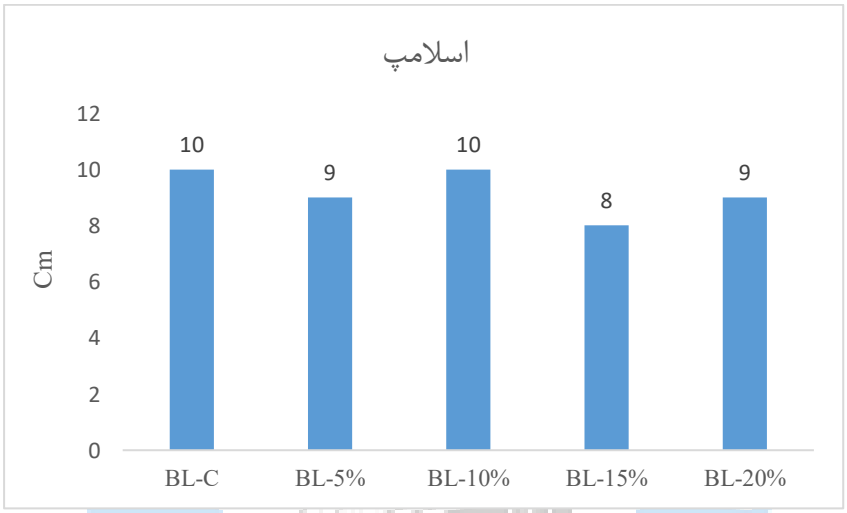
Control	BL-5%	BL-10%	BL-15%	BL-20%
RGB: 132,132, 135	RGB: 75, 80, 94	RGB: 61,61, 77	RGB: 34, 39, 70	RGB: 23, 28, 51
HSB:200°, 2%, 53%	HSB: 224°, 20%, 37%	HSB: 240°, 21%, 30%	HSB: 232°, 51%, 27%	HSB: 229°, 55%, 20%
RAL: 9023 Gray	RAL: 7015 Dark Gray	RAL: 7019 Slate Gray	RAL: 5013 Cobalt	RAL: 5003 Sapphire

شکل ۶ مقایسه رنگ پذیری نمونه‌های دارای مقادیر مختلف اکسید بالکلی و دسته بندی کد رنگ آن‌ها

۶-۲- اسلامپ بتن

اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی میزان جریان‌پذیری یا روانی بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز است. یکی از ارکان مهم و اساسی بتن مناسب، میزان روانی یا اسلامپ آن می‌باشد بطوریکه با در نظر گرفتن نوع کاربری بتن باید اسلامپ یا روانی آن بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلیمتر تنظیم گردد. مطابق توصیه دستورالعمل ASTM-C979 محدوده مجاز اسلامپ بتن رنگی، بهتر است ۱۳±۱۰۰ میلیمتر قرار گیرد[۱۷,۱۶]. میزان اسلامپ طرح‌های دارای نسبت‌های مختلف وزنی اکسید بالکلی، 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 چشم-پوشی است. استفاده از ژل آبرروان کننده در این تحقیق جهت حفظ کارایی یا روانی بتن بسیار موثر بوده. لذا با توجه به آنکه اکسید بالکلی از دسته رس‌ها می‌باشد، انتظار می‌رفت تا در اثر افزودن این ماده در بتن، میزان اسلامپ تا حد زیادی کاهش یابد. در سایر تحقیقات گذشته استفاده از سایر مواد کاهنده آب مانند انواع روان کننده برای حفظ روانی بتن رنگی با استفاده از رنگدانه معدنی توصیه شده است[۱۷,۱۶,۱۳,۱]. در غیر اینصورت و در صورت عدم استفاده از آبر روان کننده قطعاً میزان روانی نمونه‌های دارای اکسید بالکلی در محدوده مجاز قرار نمی‌گرفت. شکل شماره ۷ روند آزمایش اسلامپ و شکل شماره ۸ میزان اسلامپ طرح‌ها و مقایسه نتایج را با یکدیگر را نشان می‌دهد.

شکل ۷ آزمایش اسلامپ برخی از نمونه‌ها



شکل ۸ مقایسه اسلامپ طرح مخلوط‌های مورد مقایسه

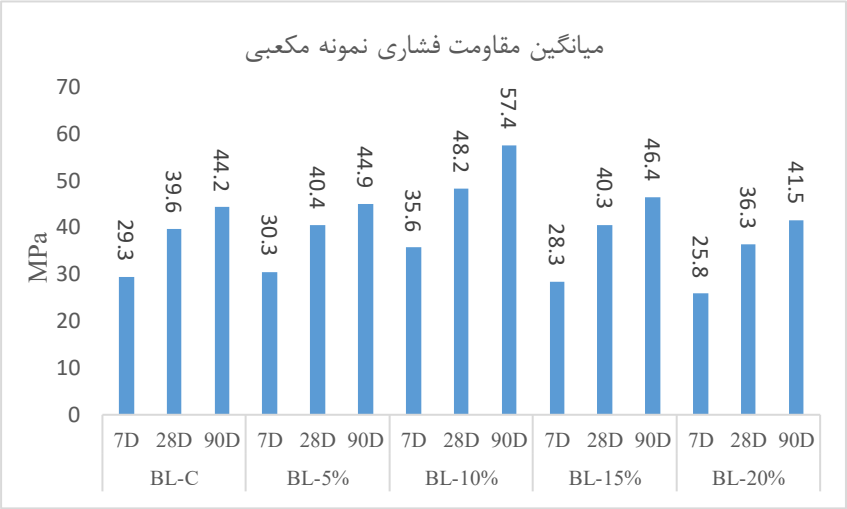
۶-۳- مقاومت فشاری

در این تحقیق برای تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه از استاندارد BS-EN-12390-3 استفاده گردید. نتایج این بخش از تحقیق نشان دادکه افزودن اکسید بالکلی 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. از طرفی دیگر اکسید بالکلی در ساختار خود، حاوی مقادیر زیادی از آلومینات می‌باشد که در مواجه با آب تشکیل هیدروکسیدکلسیم می‌دهد. بنابراین اکسید بالکلی همانند یک ماده پوزولانی عمل کرده و مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد. اما افزودن مقادیر بیش از آن احتمال کلوخگی ماده و تشکیل ناحیه ضعف در بتن را افزایش می‌دهد. بطوریکه در طرح BL-15%, 20% شاهد کاهش مقاومت فشاری در تمام سنین خواهیم بود. با این وجود در طرح‌های BL-15%, 20%، اُفت مقاومت شدیدی نخواهیم داشت و در تمامی سنین مقاومت فشاری تقریباً مشابه با طرح Control می‌باشد. بنظر می‌رسد اگر بتوان با ایجاد سازوکاری مناسب جلوی کلوخگی اکسید بالکلی را گرفت، همچنان می‌توان روند رشد مقاومت فشاری بتن را افزایش داد. شکل شماره ۹ و جدول شماره ۱۰ میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سنین مختلف نشان می‌دهند.

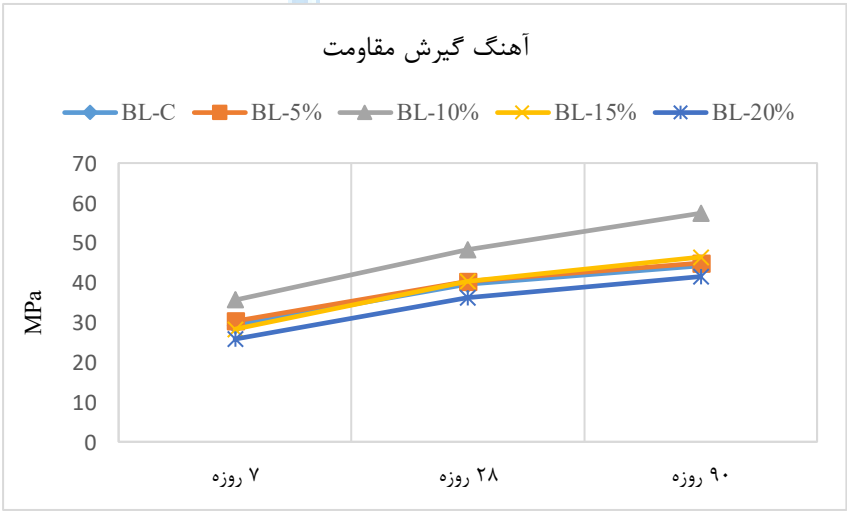
در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار اکسید بالکلی بر روی مقاومت فشاری بتن، از روش ارزیابی انحراف معیار داده‌ها استفاده شد. در این راستا ارتباط میان نتایج بین مقاومت فشاری طرح‌های متفاوت در سنین مختلف و میزان تغییرات بین نتایج آزمونه‌ها بررسی شده و در جدول شماره ۷ ارائه شد. قابل ذکر است که میانگین هر سه آزمونه ۷ روزه طرح مخلوط Control و پس از آن میانگین هر سه

آزمونه ۲۸ روزه طرح مخلوط BL-5% دارای کمترین میزان انحراف از معیار (V) و ضریب تغییر (S) و نیز میانگین هر سه آزمونه ۷ روزه طرح مخلوط BL-15% دارای بیشترین میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر در بتن می‌باشند. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که افزودن مقادیر بالای پودر اکسید بالکلی در بتن عاملی برای افزایش میزان انحراف از معیار یا افزایش میزان ضریب تغییر باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که ذرات ریز اکسید بالکلی در مخلوط بتن ایجاد تشکیل کلوخه نموده و ناحیه ضعف در بتن ایجاد نمایند. پیشنهاد شده که ضریب تغییرات مساوی یا کوچکتر از ۱۰٪ در بتن، نشان دهنده کنترل کیفیت مناسب می‌باشد.

همچنین طبق شکل شماره ۱۰ که مربوط به آهنگ کسب مقاومت فشاری در سنین مختلف می‌باشد، مشخص گردید که افزودن اکسید بالکلی در بتن تاثیری در روند رشد مقاومت در سنین مختلف نخواهد داشت. بطوریکه در تمامی طرح‌ها آهنگ رشد مقاومت در سنین ۷ تا ۹۰ روزه بصورت یکسان و مشابه با یکدیگر می‌باشد. همچنین شکل شماره ۱۱ میزان انحراف از معیار داده طرح‌ها را مقایسه می‌کند.



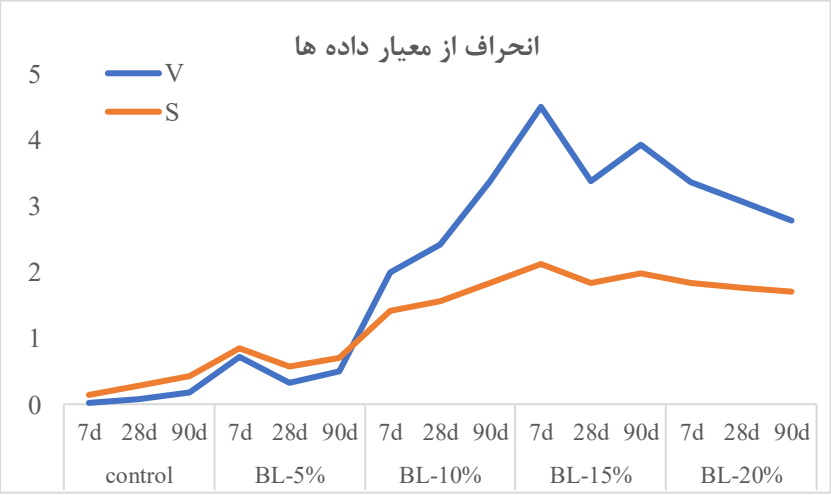
شکل ۹ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها



شکل ۱۰ مقایسه آهنگ گیرش بتن در سنین مختلف

جدول ۷ نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها در تمام سنین و انحراف از معیار داده

نام طرح	سن نمونه	مقاومت فشاری مکعبی			میانگین مقاومت نمونه مکعبی	میانگین مقاومت نمونه استوانه‌ای	تغییرات	درصد ضریب تغییرات (V)	انحراف از معیار (S)
		MPa			MPa	MPa	٪		
BL-C	۷ روزه	۲۹/۴	۲۸/۷	۲۹/۸	۲۹/۳	۲۳/۳	-	۰/۳۱۰	۰/۵۵۷
	۲۸ روزه	۳۹/۸	۳۸/۷	۴۰/۳	۳۹/۶	۳۱/۷	-	۰/۶۷۰	۰/۸۱۹
	۹۰ روزه	۴۴	۴۳/۸	۴۴/۸	۴۴/۲	۳۵/۳	-	۰/۲۸۰	۰/۵۲۹
BL-5%	۷ روزه	۳۳/۶	۳۰/۵	۲۶/۹	۳۰/۳	۲۵/۳	۳/۵	۱۱/۲۴	۳/۳۵
	۲۸ روزه	۴۰/۲	۴۳/۵	۳۷/۶	۴۰/۴	۳۵/۴	۲/۱	۸/۷۴	۲/۹۵
	۹۰ روزه	۴۷/۸	۴۴/۵	۴۲/۳	۴۴/۹	۳۹/۹	۱/۵	۷/۶۶	۲/۷۶
BL-10%	۷ روزه	۳۵/۸	۳۸/۶	۳۲/۴	۳۵/۶	۳۰/۶	۲۱/۵	۹/۶۴	۳/۱۰
	۲۸ روزه	۵۱/۲	۴۴/۷	۴۸/۶	۴۸/۲	۴۳/۲	۲۱/۶	۱۰/۷۰	۳/۲۷
	۹۰ روزه	۵۴/۸	۵۷/۲	۶۰/۳	۵۷/۴	۵۲/۴	۲۹/۹	۷/۶۰	۲/۷۵
BL-15%	۷ روزه	۲۸/۷	۳۲/۴	۲۳/۸	۲۸/۳	۲۳/۳	-۳/۴	۱۸/۶۰	۴/۳۱
	۲۸ روزه	۳۵/۸	۴۰/۵	۴۴/۷	۴۰/۳	۳۵/۳	۱/۹	۱۹/۸۲	۴/۴۵
	۹۰ روزه	۵۰/۳	۴۶/۸	۴۲/۱	۴۶/۴	۴۱/۴	۵/۰	۱۶/۹۳	۴/۱۱
BL-20%	۷ روزه	۲۴/۱	۳۱/۲	۲۲/۱	۲۵/۸	۲۰/۸	-۱۱/۹	۲۲/۸۷	۴/۷۸
	۲۸ روزه	۴۰/۲	۳۲/۱	۳۶/۵	۳۶/۳	۳۱/۳	-۸/۴	۱۶/۴۴	۴/۰۵
	۹۰ روزه	۳۵/۸	۴۱/۲	۴۷/۵	۴۱/۵	۳۶/۵	-۶/۱	۳۴/۲۹	۵/۸۵



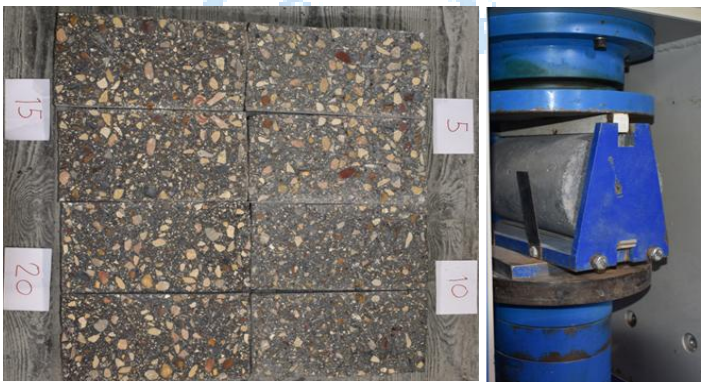
شکل ۱۱ مقایسه میزان انحراف از معیار داده

شکل شماره ۱۳ نحوه شکست نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. در این تصویر نمونه پس از شکست بصورت ساعت شنی درآمده که نشان از شکست سالم و اصولی است. همچنین در این تصویر مشخص است که تحت فشار، بتن هم از ناحیه خمیره سیمان و هم از ناحیه سنگدانه تواماً شکسته شده که نشان از عدم ضعف خمیره سیمان در بتن می‌باشد.

شکل ۱۲ شکست نمونه بتنی تحت آزمایش مقاوم فشاری و نمایش درشت دانه (شن که در اثر فشار شکسته شده)

۶-۴- مقاومت کششی

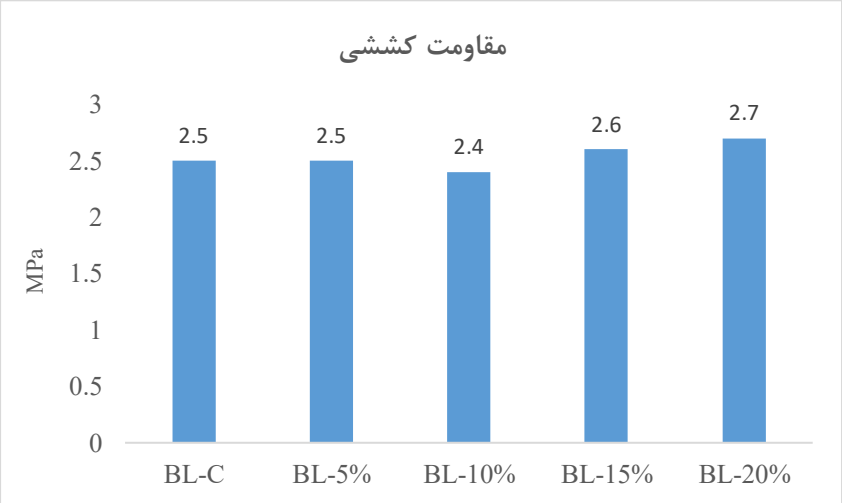
در این تحقیق آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM-C496 انجام شد و نتایج آن به شرح جدول و شکل شماره ۸ و ۱۴ می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزودن اکسید بالکلی تاثیر محسوسی بر روی رشد یا اُفت مقاومت کششی بتن نداشته و اندک اختلافی که بین نتایج وجود دارد، ناشی از خطای کار آزمایشگاهی می‌باشد. در حالیکه در سایر تحقیقات گذشته که از سایر مواد رنگی معدنی (مانند اُخرا، سنتز آهن و غیره) در بتن استفاده شده گزارش شده که استفاده از این مواد باعث کاهش مقاومت کششی بتن می‌شود[۱۶,۱۳]. در حالیکه اکسید بالکلی اثر مخربی بر روی چسبندگی مصالح بتنی در اثر کشش ندارد. شکل شماره ۱۳ آزمایش مقاومت کششی بر روی بتن در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلین

جدول ۸ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌ها

ردیف	نام طرح مخلوط	مقاومت کششی MPa
۱	BL-C	۲/۵
۲	BL-5%	۲/۵
۳	BL-10%	۲/۴
۴	BL-15%	۲/۶
۵	BL-20%	۲/۷



شکل ۱۴ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌ها

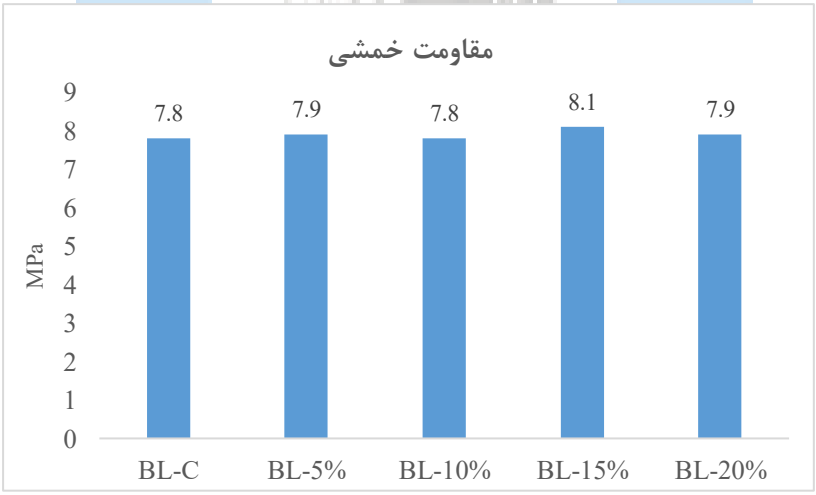
۶-۵- مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی که طبق استاندارد ASTM-C293 انجام شده به شرح جدول و شکل شماره ۹ و ۱۶ می‌باشد. نتیجه این آزمایش نشان داد که افزودن اکسید بالکلی در بتن اثر محسوسی بر روی رفتار خمشی بتن ندارد و میزان اختلاف اندکی که بین نتایج وجود دارد ناشی از خطای تجهیزات آزمایشگاهی می‌باشد. البته راهکار دیگر برای افزایش مقاومت خمشی آن است که از الیاف استفاده شود. شکل شماره ۱۵ آزمایش مقاومت خمشی بر روی بتن در این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ آزمایش خمشی سه محوره

جدول ۹ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌ها

ردیف	نام طرح مخلوط	مقاومت خمشی MPa
۱	BL-C	۷/۸
۲	BL-5%	۷/۹
۳	BL-10%	۷/۸
۴	BL-15%	۸/۱
۵	BL-20%	۷/۹

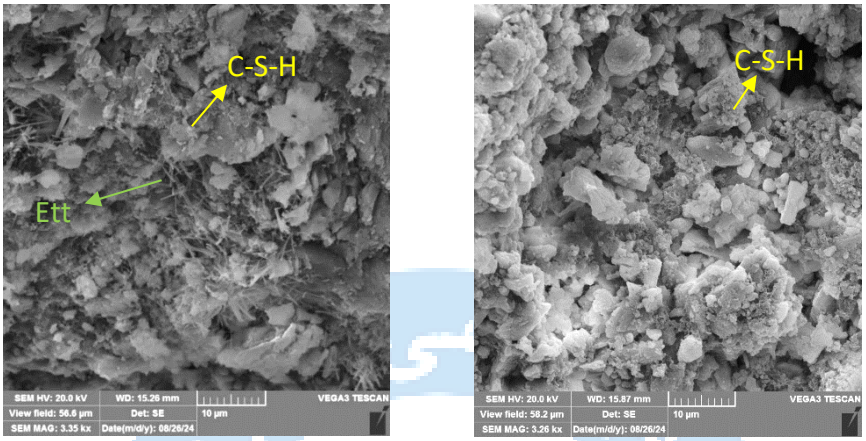


شکل ۱۶ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌ها

۶-۶- تصاویر الکترونی روبشی

شکل شماره ۱۷ تصویر الکترونی روبشی (SEM) را نشان می‌دهد. در این شکل (الف و ب) خمیره سیمان طرح Control (بدون افزودنی) با طرح BL-20% (حاوی ۲۰٪ اکسید بالکلی) مقایسه شده است. در شکل (الف)، اترینگایت‌های سوزنی ناشی از هیدراتاسیون

سیمان به عنوان نشانه‌ای از واکنش مناسب و کامل هیدراتاسیون مشخص است. در حالیکه در شکل (ب)، اکسید بالکلی به عنوان یک مانع در تشکیل اترینگایت‌ها عمل کرده است. اترینگایت‌ها یکی از عوامل مهم در افزایش مقاومت فشاری بتن می‌باشند و عدم تشکیل آن‌ها باعث تضعیف مقاومت فشاری می‌شود. استفاده بیش از حد اکسید بالکلی می تواند این نتیجه را ایجاد کند. همچنین در هر دو تصویر، ژل هیدروکسید کلسیم (C-S-H) به صورت گروهی تشکیل شده است.



الف ب

شکل ۱۷ مقایسه ریزساختار خمیره سیمان طرح CONTROL (تصویر الف) با طرح BL-20% (تصویر ب)

۶-۷- ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی

رنگ‌آمیزی سطح بتن به دلیل قرار گرفتن مستقیم رنگ در معرض عوامل محیطی اغلب پس از چند سال کارایی خود را از دست می‌دهد و نیاز به رنگ‌آمیزی مجدد دارد. اما در روش استفاده از رنگدانه‌های معدنی (مانند اکسید بالکلی)، رنگ به‌صورت یکنواخت در ماتریس بتن پخش می‌شود و حتی پس از سایش یا زوال سطحی، رنگ در لایه‌های عمیق‌تر بتن باقی می‌ماند. این مزیت، ماندگاری و زیبایی طولانی‌مدت این روش را تضمین می‌کند. رنگ‌آمیزی سطحی بتن معمولاً شامل استفاده از رنگ‌های شیمیایی است که می‌تواند دارای مواد مضر برای محیط زیست باشد و در طول زمان، ذرات آن به محیط آزاد شوند. این در حالی است که رنگدانه‌های معدنی، خصوصاً آن‌هایی که منشأ طبیعی دارند (مانند اکسید بالکلی)، کمترین اثر آلایندگی را دارند و می‌توانند از پسماندهای معدنی تولید شوند. رنگ‌آمیزی سطحی بتن هیچ‌گونه تأثیری بر خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، خمشی یا کششی ندارد و تنها به جنبه زیباشناختی معطوف است. از سوی دیگر، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از رنگدانه‌های معدنی مانند اکسید بالکلی، علاوه بر تأمین رنگ مشکی با کیفیت و ماندگار، می‌تواند تراکم بتن را افزایش داده و حتی بهبودهایی در مقاومت فشاری آن ایجاد کند. این امر به دلیل ویژگی‌های ذرات این نوع رنگدانه‌ها نظیر اندازه ریزدانه و خواص پوزولانی آن‌هاست که می‌تواند موجب افزایش تراکم ماتریس بتن شود. استفاده از رنگدانه‌های معدنی در تولید بتن رنگی، به‌ویژه بتن مشکی، علاوه بر ایجاد زیبایی و کاربردهای مدرن، به دلیل ماندگاری بالا، سهولت نگهداری، بهبود خواص مکانیکی و بهره‌وری اقتصادی، در مقایسه با رنگ‌آمیزی سطحی بتن از مزیت‌های بیشتری برخوردار است[۱۷,۱۶,۱۳]. این رویکرد نه‌تنها راهکاری مناسب از نظر اقتصادی و فنی به شمار می‌رود، بلکه گزینه‌ای پایدارتر و محیط‌زیستی‌تر برای توسعه ساخت‌وسازهای مدرن به ویژه در داخل کشور محسوب می‌شود.

۷- بحث

با عنایت به نتایج بدست آمده مشخص گردید که اکسید بالکلی خاصیت رنگ دهی بسیار بالایی دارد و افزودن آن به جای بخشی از سیمان، رنگ بتن را کاملاً تغییر می‌دهد. اگرچه اکسید بالکلی از دسته رس‌ها می‌باشد و انتظار می‌رفت میزان جذب آب بالایی داشته باشد اما نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از این ماده اثر محسوس و مخربی بر روی اسلامپ بتن تازه نخواهد داشت. ذرات ریز اکسید بالکلی باعث افزایش تراکم در بتن شده و مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. اما از طرفی اکسید بالکلی میل به چسبندگی و تشکیل کلوخه دارد که منجر به تشکیل ناحیه ضعف و شکست زودرس در بتن می‌شود. بنابراین استفاده بهینه و لزوم استفاده از آبرروان کننده بیش از پیش توصیه می‌شود. استفاده از اکسید بالکلی تاثیری بر روی مقاومت کششی و خمشی بتن ندارد و بنظر می‌رسد مانعی برای چسبندگی بین میلگرد و بتن ایجاد نمی‌کند. در نهایت برای افزایش کیفیت رنگ حاصله در بتن می‌بایست از انواع رزین یا مواد جلاء دهنده استفاده شود که علاوه بر زیبایی ظاهری و رنگ‌دهی مطلوب، باعث ایجاد یک لایه محافظ روی سطح بتن شده که مانع نفوذ مواد خورنده در بتن می‌شود. البته با توجه به نوع مواد پوشش دهنده و عوامل جوی و نوع کاربری، باید در طی مدتی تجدید و مرمت شوند در غیر اینصورت پس از گذشت زمان، این مواد اثر محافظتی و پوششی خود را از دست می‌دهند. این مهم می‌تواند یک مزیت برای استفاده از رنگدانه‌های معدنی در مقایسه با رنگدانه‌های شیمیایی باشد. نتایج سایر تحقیقات گذشته استفاده از رنگدانه شیمیایی در بتن را مسبب اُفت مقاومت فشاری بتن گزارش کرده‌اند[۱۳,۱]. با این حال استفاده از فوق روان کننده یا آبر روان کننده جهت حفظ اسلامپ بتن، جلوگیری از ته‌نشین شدن رنگدانه و پخش کاملاً یکدست برای جلوگیری از کلوخگی آن در ترکیب بتن ضرورت دارد. با توجه به مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق و سایر تحقیقات گذشته که در حوزه ساخت بتن رنگی با مواد یا افزودنی شیمیایی گزارش شده است، می‌توان اذعان داشت که استفاده از اکسید بالکلی برای ساخت بتن مشکی مشروط به در نظر گرفتن نوع کاربری و شرایط محیطی، توجیه‌پذیر است. بدین ترتیب استفاده از این ماده علرغم اینکه افزایش مقاومت فشاری و کاهش هزینه‌های ساخت را بدنبال دارد، مخاطرات زیست محیطی کمتری دارد و نیاز مصرف کننده را در خصوص ساخت و مصرف بتن رنگی را مرتفع می‌سازد. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق و جمع‌بندی آن می‌توان طرح BL-15% که از ترکیب اکسید بالکلی به میزان ۱۵٪ وزنی عیار سیمان مصرفی در بتن برخوردار می‌باشد، بعنوان بهینه‌ترین طرح مخلوط بتن رنگی مشکی ضمن در نظر گرفتن مشخصات مکانیکی و قدرت رنگ‌پذیری بتن انتخاب کرد.

۸- نتیجه گیری

با توجه به اهداف این تحقیق و براساس یافته‌های آن، می‌توان بطور خلاصه به نتایج زیر استنباط کرد:

۱. استفاده از اکسید بالکلی به میزان حداقل ۱۵٪ وزنی عیار سیمان می‌تواند باعث تغییر رنگ بتن به مشکی شود.
۲. استفاده از اکسید بالکلی تاثیری بر روی اسلامپ بتن تازه ندارد. البته مشروط بر آنکه آبرروان کننده کربوکسیلات استفاده شود.
۳. استفاده از اکسید بالکلی اثر محسوس یا مخربی بر روی مقاومت کششی بتن ندارد.
۴. استفاده از اکسید بالکلی اثر محسوس یا مخربی بر روی مقاومت خمشی بتن ندارد.
۵. استفاده از اکسید بالکلی، میزان تراکم بتن را افزایش می‌دهد. همچنین استفاده به اندازه از این ماده بدلیل خاصیت پوزولانی که دارد می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد.
۶. استفاده از اکسید بالکلی به میزان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان می‌تواند به ترتیب ۱/۵٪، ۳۰٪ و ۵٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه را افزایش دهد.
۷. استفاده از اکسید بالکلی به میزان ۲۰٪ وزنی سیمان، مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن را به میزان ۶٪ کاهش می‌دهد.
۸. استفاده از اکسید بالکلی در بتن تاثیری بر روی آهنگ رشد مقاومت سیمان در سنین مختلف ندارد.
۹. استفاده بیش از حد اکسید بالکلی (مقادیر ۱۵٪ وزنی و بیشتر) ریسک تشکیل کلوخه و ایجاد ناحیه ضعف در بتن را افزایش می‌دهد.

منابع

1. Awadnejad, Golshan, & Sheibani. (2022). Manufacturing and investigation of the effect of chemical pigments on the compressive, tensile, abrasion resistance and water absorption of colored concrete with emphasis on urban beautification. Advanced Materials and New Coatings, 10(40), 3032-3047.
2. Ghahraman, Sazgar, & Mansouri. (2024). Investigation of durability and construction of red colored concrete with different weight ratios of ochre powder and white cement against freezing cycle. Concrete Materials and Structures, 9(1), 1-17.
3. R.R. Marcello, S. Galato, M. Peterson, H.G. Riella, A.M. (2018). Bernardin, Inorganic Pigments Made From The Recycling Of Coal Mine Drainage Treatment Sludge, J.Environ. Manag. 1280–1294.
4. R.D.A. Silva, C.D. Castro, E.M. Viganico, C.O. Peter, (2020). Selective Precipitation/Uv Production Of Magnetite Particles Obtained From The Iron Recovered From Acid Mine Drainage, Miner. Eng. 22–37.
5. E.A. Dominguez, R. Ullmann, (2016). Ecological Bricks Made With Clays And Steel Dust Pollutants, Appl. Clay Sci. 237–250.
6. N. Essaidi, B. Samet, S. Baklouti, S. Rossignol, (2019). The Role Of Hematite In Alumi Nosilicate Gels Based On Metakaolin. Canadian Geotechnical Journal. 1–11.
7. M. Hosseini-Zori, F. Bondioli, T. Manfredini, E. Taheri-Nassaj, (2018). Effect Of Synthesis Parameters On A Hematite-Silica Red Pigment Obtained Using A Coprecipitation Route, Dyes Pigment. Marine Georesources & Geotechnology 53–58.
8. R. Patakfalvi, I. Dékány, (2024). Synthesis And Intercalation Of Silver Nanoparticles In Kaolinite/Dmso Complexes, Appl. American Society Of Civil Engineers 149–159.
9. K. Okada, N. Watanabe, V.K. Jha, Y. Kameshima, A. Yasumori, K.J.D. Mackenzie, (2023). Uptake Of Various Cations By Amorphous Caal2si2o8 Prepared By Solid-State Reaction Of Kaolinite With Caco, Panamerican Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Buenos Aires. 550–565.
10. S.S. Lee, H.Y. Song, Y.S. Lee, K.P. Lee, (2021). A Study On The Strength And Flowing Properties Of The Non-Cement Inorganic Composite By Using Blast Furnace Slag And Red Mud, Adv. Mater. Res. 491–495.
11. Lopza.A, Elsherabi.C, (2019). Investigating Color Stability In Mortar And Concrete, Journal Of Constructional Concrete Research. 602-620.
12. Sivachidambaram.S, Gradio.A, (2019). Color And Semi-Pigment Characteristics Of Metakaolinite And Hematite For Colored Concrete, Journal Of Constructional Concrete Research. 890-905.
13. M. Ghalehnovi, A. Khodabakhshian, J. De Brito, E.A. Shamsabadi,(2018). Durability Performance Of Structural Concrete Containing Silica Fume And Marble Industry Waste Powder, J. Cleaner Prod. 42–60. (In Persian)
14. Heydari.M, Mohamadi.H, (1395). Review Of The Advantages And Disadvantages Of Colored Concrete, 8th National Concrete Conference. (In Persian)
15. Saghi.H, Alizadeh.H, (1403). Investigating The Effect Of Powder Pigments On The Properties Of Colored Concrete, The Third Congress Of New Concrete Technologies. (In Persian)
16. Farhad Awadnejad, Mahmoud Reza Golshan, Sheibani, Hamid Reza. (1402). Laboratory investigation of compressive, tensile and abrasion resistance of concrete with mineral pigment mung bean (limonite) with emphasis on urban beautification. Paint Science and Technology, 17(1), 51-63.
17. Mansouri, Babak, Agha Majidi, Roozbeh, Bazaei, Amir Hossein and Ghaddomizadeh, Ghazaleh. (1402). Application of ochre soil and nano alumina oxide in the colorability of concrete and investigation of some mechanical properties and abrasion durability of concrete. Structural Engineering, 10(8), 179-201. doi: 10.22065/jsce.2023.375610.2986
18. Golshan.M., Awadnejad.F., Bazaee.A. (1401) Making Concrete In Four Main Colors And Investigating Some Of Its Mechanical Properties And Durability. Journal Of Color Science And Technology, Volume 16, Page 110-93. (In Persian)
19. Shakib.M, Bazaee.A, (1403). A Case Study Regarding The Construction Of Colored Self-Compacting Concrete For The Memorial Element Of The Anonymous Martyrs, The 10th International Conference On Civil Engineering And Architecture. (In Persian)
20. Emami.A, Oji.F, (1400). Investigating The Effect Of Powder Pigments On The Mechanical Properties, Durability And Aesthetics Of Colored Concrete, The 7th Concrete Congress And New Achievements In Construction Materials.

21. Hatami.R, Grati.O, (2020). Investigating And Preparing The Production Of Colored Concrete Floors To Replace The Asphalt On The Roofs Of Buildings, Cem. Concr. Res. 410-429.
22. W.M. Mayes, A.P. Jarvis, I.T. Burke, M. Walton, V. Feigl, O. Klebercz, K. Gruiz, (2021). Dispersal And Attenuation Of Trace Contaminants Downstream Of The Ajka Bauxite Residue (Yellow Mud) Depository Failure, Hungary, Environ. Sci. Technol. 5147–5155.
23. V. Vishwakarma, D. Ramachandran,(2018). Green Concrete Mix Using Solid Waste And Nanoparticles As Alternatives–A Review, Constr. Build. Mater. 96– 103.
24. J. Pera, R. Boumaza, J. Ambroise, (2017). Development Of A Pozzolanic Pigment From Red Mud, Cem. Concr. Res. 1513–1522.
25. Z. Pan, L. Cheng, Y. Lu, N. Yang, (2022). Hydration Products Of Alkali-Activated Slag–Red Mud Cementitious Material, Cem. Concr. Res. 357–362.
26. X. Liu, N. Zhang, H. Sun, J. Zhang, L. Li, (2021). Structural Investigation Relating To The Cementitious Activity Of Bauxite Residue—Red Mud, Cem. Concr. Res. 847–853.
27. L. Senff, D. Hotza, J. Labrincha, (2021). Effect Of Red Mud Addition On The Rheological Behaviour And On Hardened State Characteristics Of Cement Mortars, Constr. Build. Mater. 163–170.
28. D.V. Ribeiro, J.A. Labrincha, M.R. Morelli, (2022). Effect Of The Addition Of Red Mud On The Corrosion Parameters Of Reinforced Concrete, Cem. Concr. Res. 124–133.
29. R.R. Rathod, N.T. Suryawanshi, P.D. Memade, (2023). Evaluation Of The Properties Of Red Mud Concrete, Iosr J. Mech. Civ. Eng. 31–34.
30. V. Corinaldesi, S. Monosi, M.L. Ruello, (2022). Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC, Construct. Build. Mater. 289–293.
31. 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.
32. 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(02), 222-232.
33. 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.
34. 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.
35. Google. (n.d.). Black concrete buildings [Image]. Google Images. https://www.google.com/imghp (Retrieved June 2025).
36. Farsnov Cement Co. (2023). https://www.farsnov.com