Journal of Structural and Construction Engineering, 10(8), 2023, pp. 62-86

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigating The Mechanical Properties And Freezing Durability Of Yellow Colored Concrete With Different Weight Ratios Of Mush Clay Pigment (Limonite)

Amirhossein Bazaee[1], Babak Mansoori[2*], Roozbeh Aghamajidi[3], Mahmoudreza Golshan[4]

1- Instructor, Faculty Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran
2-Assistant Professor, Faculty Of Civil Engineering, Islamic Azad University, Firoozabad Branch, Meymand Center, Meymand, Iran
3- Assistant Professor, Faculty Of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan Branch, Sepidan, Iran
4- Instructor, Faculty Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

The Use Of Color Spectrums In The Urban Space Can Be Seen In The Facades Of Buildings, Flooring, Urban Furniture, Sidewalks And Streets. The Use Of Colored Concrete For Facade Construction And Decoration Design Can Be Welcomed For Many Reasons. Also, This Method Does Not Require The Use Of Other Materials To Cover The Work, In Which Case The Costs Of Facade Work Will Be Significantly Reduced. But Temperature Changes And The Cycle Of Melting And Freezing In Unstable Environmental Conditions Is One Of The Factors Of Concrete Failure. Therefore, In Addition To Beauty, Colored Concrete Must Be Resistant To Different Environmental And Atmospheric Conditions. Yellow Is One Of The Three Main Colors In The Color Wheel. In Architecture, Yellow Is A Practical Color And It Makes Spaces Appear Bright And Large Due To The Large Amount Of Light It Reflects. The Pigment Of Mung Bean Or Limonite Is A Type Of Mineral Soil That Has A Large Amount Of Iron Oxide. This Pigment Is Found In Dull Yellow Or Mustard Colors. In This Research, To Change The Color Of Concrete To Yellow, White Cement And Limonite Pigment Were Used In Different Weight Ratios Of 5%, 10%, 15% And 20% In Concrete. Further, To Check The Behavior And Durability Of Concrete, Compressive Strength Tests, Water Absorption In Hardened Concrete, And Durability Of Melting And Freezing Were Investigated. The Results Of This Research Showed That The Colorability Of 5% And 10% Limonite In Concrete Will Cause Pea And Cream Color And The Use Of 15% And 20% Will Cause Yellow Color. Also, The Use Of 10% Limonite In Concrete Increased The 28-Day Compressive Strength By 8%. But Due To The High Water Absorption Of Limonite, Its Freezing Durability Decreased Compared To The Control Sample.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 November 2022
Revise Date: 20 January 2023
Accept Date: 05 February 2023

Keywords:
Colored Concrete
Yellow Concrete
Limonite
Mash Clay Pigment Concrete
Facade

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368634.2967

*Corresponding author: Babak Mansoori
Email address: Babak.mansoori@iau.ac.ir

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

بررسی خواص مکانیکی و دوام یخ زدگی بتن رنگی زرد با نسبت‌های مختلف وزنی پیگمنت گِل ماش (لیمونیت)

امیرحسین بازایی[۱]، بابک منصوری[۲*]، روزبه آقامجیدی[۳]، محمودرضا گلشن[۴]

۱- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزآباد مرکز میمند، میمند، ایران

۳-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان، سپیدان، ایران

۴- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

استفاده از رنگ‌های متنوع در فضای شهری را می‌توان در نمای ساختمان‌ها، کفسازی، مبلمان شهری، پیاده‌روها و خیابان دید. ساخت بتن رنگی جهت اجرای نماسازی و طراحی دکوراسیون به دلایل بسیاری می‌تواند مورد استقبال قرار گیرد. حتی استفاده از این روش باعث حذف نماسازی کاذب و عدم نیاز به پوشش سطح می‌شود که در اینصورت هزینه‌های نماکاری به صورت چشمگیر کاهش می‌یابد. اما تغییرات دمایی و چرخه ذوب و انجماد در شرایط محیطی ناپایدار یکی از عوامل خرابی بتن است. بنابراین بتن رنگی علاوه بر زیبایی باید در برابر شرایط محیطی و جوی مختلف مقاوم باشد. رنگ زرد یکی از سه رنگ اصلی در چرخه رنگ است. در معماری، رنگ زرد رنگی کاربردی است و به دلیل نور زیادی که منعکس می‌کند فضاها را روشن و بزرگ جلوه می‌دهد. پیگمنت گل ماش یا لیمونیت نوعی خاک معدنی است که دارای مقدار زیادی اکسید آهن می‌باشد. این رنگدانه در رنگ‌های زرد مات یا خردلی یافت می‌شود. در این تحقیق برای ساخت بتن زرد رنگ، از سیمان سفید و لیمونیت در نسبت‌های مختلف وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به جای بخشی از سیمان استفاده شده است. در ادامه برای بررسی رفتار و دوام بتن آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب در بتن سخت شده و دوام ذوب و انجماد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان رنگ پذیری ۵٪ و ۱۰٪ لیمونیت در بتن باعث ایجاد رنگ نخودی و کرمی و استفاده از ۱۵٪ و ۲۰٪ باعث ایجاد رنگ زرد خواهد شد. همچنین استفاده از ۱۰٪ لیمونیت در بتن مقاومت فشاری ۲۸ روزه را تا ۸٪ افزایش می‌دهد. اما بدلیل جذب آب بالای لیمونیت، دوام یخ زدگی بتن در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن رنگی، بتن زرد، لیمونیت، پیگمنت گل ماش، نماسازی بتنی.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۱/۰۸/۲۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۱۶	۱۴۰۱/۱۱/۱۶	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2023.368634.2967

https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368634.2967

*نویسنده مسئول: بابک منصوری

پست الکترونیکی: Babak.mansoori@iau.ac.ir

۱- مقدمه

نمای بیرونی یک ساختمان همواره در معرض دید عموم قرار دارد، بنابراین سبک و مصالح نماسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بتن یکی از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت و ساز تلقی می‌شود. بتن علرغم اینکه از مقاومت بالایی برخوردار است، می‌توان با استفاده از مواد و تکنیک‌های مختلف ظاهر آن را عام پسند و زیبا جلوه داد. استفاده از بتن رنگی به عنوان نماسازی ساختمان یک سبک نسبتاً مدرن و ارزان قیمت است که از دیدگاه برخی طراحان، زیبایی منحصر بفردی دارد[۱]. همچنین استفاده از این روش به دلایل بسیاری می‌تواند مورد استقبال قرار گیرد. زیرا بتن تازه شکل پذیر است و می‌توان مطابق با نظر و سلیقه افراد به آن شکل و فرم دلخواه داد. تا قبل از کاربرد مدرن بتن اکسپوز در نماسازی، عمدتاً استفاده از مصالح سنگی یا سرامیکی مرسوم بوده و همچنان می‌باشد. نماهای سنگی از دید مردم برای سالیان زیادی به دلیل ظاهر، صلابت و محدود بودن گزینه‌های انتخابی مورد استفاده قرار گرفته. نماسازی سنگی و سنتی شامل عملیات نصب مصالح سنگین وزن بوده که این امر موجب افزایش وزن سازه و اتلاف معادن سنگ می‌گردد. همچنین ایراد دیگری که در نماسازی سنگی و سنتی به چشم می‌خورد، عدم پیوستگی مناسب بین لایه‌ی رویه (نما) و لایه زیرین (اسکلت سازه) می‌باشد[۲]. نمای بتنی از مقاومت و دوام مناسبی برخوردار است و در برابر تغییرات جوی ماندگاری خوبی دارد. استفاده از این روش باعث می‌شود نیازی به استفاده از مصالح دیگر برای پوشش کار نباشد که در اینصورت هزینه‌های نماکاری به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. خصوصاً مطابق ضوابط بلند مرتبه‌سازی برای کاهش وزن سازه (سبک سازی ساختمان) و جلوگیری از خطر سقوط مصالح جدا شونده در نما، استفاده از بتن رنگی می‌تواند موثر باشد[۵]. در برخی از پروژه‌های بزرگ که کاهش هزینه‌های ساخت اهمیت دارد نماکاری با بتن رنگی می‌تواند به عنوان یک پیشنهاد اقتصادی مطرح شود. حتی استفاده از این روش در طرح‌های دولتی برای انبوه‌سازی مانند مسکن مهر یا مسکن ملی می‌تواند بسیاری از هرینه‌ها را کاهش دهد. بطوریکه در برخی از کشورها مانند هندوستان برای کاهش هزینه‌های ساخت مسکن‌های دولتی در بخش وسیعی از شهرک‌سازی‌ها از بتن رنگی استفاده شده است[۶]. همچنین استفاده از بتن رنگی برای استتار[۱] سازه از منظر پدافند غیر عامل کاربرد دارد. بعنوان مثال ساخت آشیانه هواپیماهای جنگی، انبار مهمات و اماکن مهم نظامی با بتن‌های رنگی علاوه بر استتار سازه نیز امکان تقویت بتن در برابر عوامل محیطی و جوی را فراهم می‌سازد[۷].

رنگ در معماری و شهرسازی جایگاه ویژه‌ای دارد. استفاده از بتن رنگی در ساخت معابر و مبلمان‌های شهری هم کاربرد دارد. در یک حالت کلی بتن رنگی باعث ایجاد تصویر رنگی از مکان مورد نظر و زیباتر شدن بافت شهری خواهد شد. اصولاً در شهرهای امروز، توجه به مقوله رنگ و تاثیرات آن بر روحیه ساکنان شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته. در حالیکه می‌توان بر اساس یک تفکر سازمان یافته در ساختار شهرها، از مقیاس کوچک مانند نماسازی ساختمان تا مقیاس کلان شهرسازی به تدوین استاندارد و طراحی اصول فضاسازی شهری با استفاده از رنگ‌های مختلف پرداخت[۸]. در حال حاضر روش‌های زیادی برای تغییر رنگ خاکستری بتن به رنگ‌های متنوع وجود دارد. در طی سالیان اخیر با ایجاد تحقیقات گسترده روی تکنولوژی بتن، این ماده تقریباً در هر رنگی تولید می‌شود. یکی از روش‌های رایج در تولید بتن رنگی، افزودن رنگدانه به طرح اختلاط بتن است.

رنگ زرد یکی از سه رنگ اصلی در چرخه رنگ‌شناسی است. در روانشناسی معماری، رنگ زرد رنگی شاد است که فضاها را روشن و بزرگ جلوه می‌دهد. به همین دلیل این رنگ یک گزینه عالی برای ورودی‌ها محسوب می‌شود. همچنین رنگ‌آمیزی دیوارهای پیرامونی یا دیوار کانونی (دیوار شاخص) به رنگ زرد می‌تواند فضایی گرم و دلپذیر ایجاد کند. رنگ زرد به دلیل انعکاس بالای نور، بیشتر از سایر رنگ‌ها جلب توجه می‌کند. اما انتخاب الگوهای رنگی بسیار اهمیت دارد، بطوریکه انتخاب و چینش رنگ‌ها در کنار یکدیگر موضوع مهمی در طراحی داخلی یا خارجی است[۹].

[۱] هم رنگ شدن سازه با محیط اطراف

شکل ۱: استفاده از بتن زرد در نماسازی ساختمان[۱۰،۹]

بتن رنگی علاوه بر زیبایی باید در برابر عواملی همچون سایش، فشار، کشش و خمش دارای مقاومت باشد. همچنین بتن رنگی که برای نماسازی ساختمان به کار می‌رود باید در برابر شرایط محیطی و عوامل جوی (آب و هوایی) دارای دوام مناسب باشد[۱۰]. برای تولید بتن رنگی می‌توان از افزودنی‌های رنگی یا سیمان رنگی استفاده کرد. تولید سیمان‌های رنگی در ایران طی سال‌های اخیر بسیار محدوده بوده. علاوه بر آن، سیمان‌های رنگی موجود در بازار طیف رنگی وسیعی ندارند و صرفاً به چند رنگ اصلی محدود می‌شوند[۱۱]. اما استفاده از برخی افزودنی‌های رنگده در بتن علاوه بر افزایش مقاومت نیز منجر به کاهش هزینه ساخت خواهند شد. اکسیدهای آهن، کبالت، آزوریت، کروم و تیتانیوم از جمله افزودنی‌ها هستند[۱۲]. رنگ بتن‌های ساخته شده با این رنگدانه‌ها نیز وابسته به نسبت آب به سیمان، جنس ماده، کیفیت و شدت رنگ مورد نظر متغیر خواهد بود. بطوریکه با افزایش نسبت آب به سیمان، رنگ بتن کم رنگ‌تر و بالعکس خواهد شد. همچنین کیفیت مصالح بتن و مدت زمان عمل‌آوری آن از دیگر عوامل تاثیر گذار بر شدت رنگ بتن اثرگذار خواهد بود. شرایط جوی و آب و هوایی، تغییرات گسترده دما، میزان رطوبت محیط، نور خورشید، باران‌های اسیدی و عوامل مخرب محیطی 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. علاوه بر این رنگ خود سیمان نیز بر رنگ نهایی بتن تاثیر گذار است، زیرا سیمان‌های موجود در بازار رنگ‌های متفاوتی داشته و حتی ممکن است رنگ سیمان‌های تولیدی یک کارخانه نیز در طول زمان تغییر یابد[۱۴]. تغییرات دمایی و چرخه ذوب و انجماد در شرایط محیطی ناپایدار یکی از عوامل خرابی بتن است. هنگامی‌که آب موجود در منافذ بتن یخ می‌زند، می‌تواند حجم آن را تا ۹٪ افزایش دهد. بنابراین این افزایش حجم، منجر به ترک خوردن و انفصال بتن می‌گردد. همچنین بعد از ذوب شدن یخ بتن، فضای تخلخل برای ورود مقدار آب بیشتری فراهم می‌شود که در چرخه بعدی انجماد، بتن بیش از پیش تحت آسیب قرار می‌گیرد. این چرخه مدام تکرار می‌شود و هر بار، آسیب بیشتری به بتن وارد می‌شود[۴-۶].

مواد رنگی مورد استفاده جهت ساخت بتن رنگی، به طور کلی به دو گروه رنگ‌ها و رنگدانه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند و با یکدیگر تفاوت دارند. رنگ فقط سطح اجسام را رنگی می‌کند و در آب حل نمی‌شوند، اما رنگدانه با سایر عناصر ماده ترکیب شده و کل محصول را رنگی می‌کند. امروزه رنگدانه‌ها در صنایع مختلفی کاربرد دارند[۱۱]. رنگدانه‌ها به دو گروه رنگدانه شیمیایی[۲] و رنگدانه معدنی[۳] تقسیم بندی می‌شوند. رنگدانه‌های معدنی یا طبیعی پس از استخراج شدن از پوسته زمین، شکسته و در اندازه‌های مختلف عرضه می‌شوند. اندازه ذرات این رنگدانه‌ها در کیفیت رنگدهی و جلوگیری از ته نشین شدن ذرات تاثیر زیادی دارد. رنگدانه‌های معدنی در شکل‌های مختلفی از جمله سوزنی، مکعبی، کروی یا ورقه‌ای یافت می‌شوند. برخی از رنگدانه‌های معدنی در مقابل اسیدها، قلیاها، نور خورشید، گرما و سایر عوامل فیزیکی و شیمیایی پایدار هستند و خواص خود را حفظ می‌نمایند. واکنش شیمیایی بین رنگدانه و سیمان، بهترین نتیجه جهت حصول بتن تماماً رنگی و یکنواخت را در پی خواهد داشت. بطوریکه ذرات رنگدانه با واکنش هیدراتاسیون سیمان پیوند ایجاد نموده و به قسمتی ثابت از زمینه بتن تبدیل می‌شوند. عمدتاً رنگدانه‌های معدنی بدلیل سختی بالا و اندازه بسیار ریزی که دارند بعضاً باعث افزایش تراکم در بتن و

[۲] رنگدانه شیمیایی در کارخانه تولید و عرضه می‌شود.

[۳] رنگدانه معدنی بطور مستقیم از معادن طبیعی استخراج می‌شود.

در نتیجه افزایش دوام و مقاومت بتن را در بر خواهند داشت[۱۲]. همچنین بدلیل تنوع بالای این مواد می‌توان به طیف رنگی فراوانی در بتن دست یافت. رنگدانه‌های معدنی عمدتاً از نظر شیمیایی خنثی هستند و در برابر اسیدها و قلیاها کاملاً مقاوم هستند. بنابراین انتظار می‌رود تا ظاهر زیبای خود را تا سالیان متمادی حفظ نمایند[۹,۴,۲,۱]. رنگدانه‌های معدنی در مقایسه با رنگدانه‌های شیمیایی بسیار ارزان‌تر، در دسترس‌تر و فرآوری آن نیازی به دانش یا تکنولوژی خاصی ندارد. رنگ‌دانه‌های معدنی عمدتاً سمی نیستند و استفاده از آن ایجاد آلودگی مستقیم یا غیر مستقیم برای محیط زیست نخواهد داشت. رنگدانه‌های معدنی معمولاً حاوی اکسید فلزات هستند و عمدتاً رنگ لطیف‌تر و ماندگارتری را در بتن ایجاد می‌کنند[۹]. اما رنگدانه‌های شیمیایی رنگی براق‌تر و چشم‌گیرتر به بتن می‌دهند، ولی دوام آن‌ها کمتر بوده و با گذر زمان کم کم از بین می‌روند. همچنین تولید صنعتی رنگدانه شیمیایی در بتن پیچیده می‌باشد و مستلزم احداث کارخانجات تولیدی می‌باشد. در ایران عمدتاً رنگ‌های 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 خاک‌های رنگی کشور ایران به کشورهایی مانند امارات یا چین جهت بکارگیری در صنایع مختلف صادر می‌شود که نوعی خام فروشی محسوب می‌شود[۱۵].در استان‌های زنجان، کردستان، کرمان، یزد، هرمزگان و جزایر جنوبی معادن و منابع غنی از انواع مواد آلی و معدنی رنگی وجود دارند که با فرآوری و تبدیل آن به کالایی منحصر بفرد می‌توان آن محصول را صادر کرد و رونق اقتصادی و ارز آوری ایجاد کرد.

ساخت بتن رنگی برای اولین بار در دهه ۵۰ میلادی با اضافه نمودن اکسید آهن مصنوعی به مخلوط بتن خاکستری انجام شد[۲۱]. برخی از تحقیقاتی که برای ساخت بتن‌های رنگی در سراسر دنیا انجام گرفته عبارت است از:

(لی.ه.س)[۴] و همکاران در کره جنوبی در سال ۲۰۲۱، به بررسی و ساخت بلوک بتنی رنگی بوسیله نسبت‌های مختلف وزنی اکسید اکسید آهن پرداختند. در این تحقیق برای ساخت بتن‌های قهوه‌ای از اکسید آهن در نسبت‌های وزنی ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ سیمان استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۴٪ اکسید آهن به جای بخشی از سیمان، میزان مقاومت فشاری بتن را تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد.

(لوپز.ا)[۵] و همکاران در آرژانتین در سال ۲۰۲۰، به بررسی پایداری رنگ در ملات و بتن پرداختند. آن‌ها جهت حفظ دوام رنگ بتن و جلوگیری از تخریب آن از اکسید آهن زرد به همراه سیمان خاکستری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که رنگ بتن در مناطقی که تحت شرایط دما و رطوبت کنترل شده قرار می‌گیرند پایدار خواهد بود[۱۷].

(سیواچدامبارام.س)[۶] و همکاران در انگلستان در سال ۲۰۱۹، به بررسی ویژگی‌های رنگی و خطرات استفاده از پیگمنت متاکائولینیت و هماتیت در بتن پرداختند. در این تحقیق از اکسید آهن بازیابی شده از تصفیه خانه یک معدن ذغال سنگ متروکه استفاده گردید. این پیگمنت با حرارت دادن کائولینیت و پسماند اکسید آهن در دمای مناسب فرآوری گردید. سپس مواد بدست آمده از نظر خصوصیات رنگی و خصوصیات سمی بررسی گردید. نتیجه این تحقیق به مناسب بودن این ماده به عنوان رنگدانه‌ای برای بتن رنگی و یک استفاده بالقوه برای حجم زیادی از پسماند اکسید آهن جمع آوری شده از تصفیه خانه‌های معدنی ارائه می‌دهد[۱۸].

(لوینسون.ر)[۷] و همکاران در آمریکا در سال ۲۰۱۸، به بررسی و تهیه تولید کفپوش‌های بتنی رنگی جهت جایگزین نمودن آسفالت پشت بام ساختمان‌ها پرداختند. در این تحقیق تلاش گردید تا با کفپوش‌های بتنی در طیف رنگی روشن بتوان دمای ساختمان را کاهش داده و باعث صرفه جویی در انرژی، کاهش میزان گرمای شهری و کاهش سرعت گرم شدن زمین را کاهش داد. در این تحقیق با استفاده از یک پوشش دو لایه با هدف کاهش جذب نور و گرمای خورشید، اقدام به ساخت نمونه‌های بتنی در رنگ‌های مختلف زرد، قهوه‌ای، سبز، آبی در طیف‌های روشن تا تیره گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که جذب نور و گرمای خورشید در پوشش‌های قهوه‌ای تیره تا سبز روشن از ۰/۲۶ تا ۰/۵۷ ٪ متغیر می‌باشد[۱۹].

[4] Hyun Soo Lee
[5] Anahí López
[6] Sivachidambaram Sadasivam
[7] Ronnen Levinson

(قلعه نویی.ح)[8] و همکاران در پرتغال در سال ۲۰۱۷ میلادی، به بررسی و ساخت بتن خود تراکم[9] با استفاده از بوکسیت[10] (پسماند ناشی از پالایشگاه‌ها)[11] پرداختند. هدف این تحقیق علاوه بر تولید بتن رنگی، کاهش اثرات زیست محیطی پالایشگاه‌های آلومینا بوده. بدین ترتیب هفت طرح مخلوط بتن با نسبت‌های مختلف بوکسیت به عنوان جایگزین سیمان در نسبت‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ ٪ ساخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از بوکسیت تاثیر منفی در خصوصیات بتن نمی‌گذارد. همچنین استفاده از مقادیر کمتر از ۵ ٪ بوکسیت به جای سیمان، علاوه بر افزایش دوام بتن در برابر نفوذ یون سولفات نیز منجر به کاهش وزن بتن خواهد شد. در نهایت استفاده از بوکسیت می‌تواند برای ساخت بتن سبز رنگ با خصوصیات مشابه بتن معمولی موثر باشد[۲۱].

حیدری.م و همکاران در سال ۱۳۹۵ به مروری بر انواع مزایا و معایب ساخت بتن‌های رنگی پرداختند. در این تحقیق عنوان شد که برای ساخت بتن در رنگ‌های زرد تا قهوه‌ای از اکسید آهن، جهت ساخت بتن سیاه از پودر کربن، جهت ساخت بتن آبی از پودر اکسید کبالت و جهت ساخت بتن سبز از اکسید کروم استفاده شود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مصالح رنگی به میزان حداکثر 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 روان کننده استفاده گردد[۲۲].

ساقی.ح و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی اثر انواع رنگدانه‌های شیمیایی بر خصوصیات بتن 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. در این تحقیق به استفاده از سیمان سفید و روان کننده جهت بهبود نتیجه تاکید شده است. نتایج این تحقیق نشان داد بتن رنگی ساخته شده در سن ۷ روز تا ۱۰٪ کاهش مقاومت و در سن ۲۸ روز تا ۱۵٪ کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد نشان می‌دهد[۲۳].

شکیب.م و همکاران در سال ۱۳۹۳ به مطالعه موردی در خصوص ساخت بتن خودتراکم رنگی برای المان یادواره شهدای گمنام قم پرداختند. در این تحقیق برای ساخت بتن زرد رنگ از رنگدانه شیمیایی زرد به میزان ۳٪ وزنی سیمان و همچنین از مخلوط سیمان سفید و خاکستری به نسبت مساوی استفاده کردند. در این تحقیق برای ساخت بتن خودتراکم رنگی از افزودنی‌هایی مانند لزج کننده، پودر سنگ و جهت کاهش نسبت آب به سیمان برای افزایش کیفیت رنگ پذیری بتن از فوق روان کننده و نیز جهت افزایش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد از حباب ساز در بتن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که اکسید آهن موجود در رنگدانه زرد باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد.[۲۴].

امامی.آ و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی اثر رنگدانه‌های پودری بر خصوصیات مکانیکی، دوام و زیباشناسی بتن‌های رنگی پرداختند. در این تحقیق با استفاده از سیمان سفید و پودر کوارتزیت روشن مطابق با استاندارد ASTM-C979 و با حداکثر اندازه سنگدانه ۴/۷۵ میلیمتر، روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات و همچنین نسبت آب به سیمان ۰/۴ اقدام به ساخت ۵ طرح اختلاط متفاوت با استفاده از رنگدانه پودری در نسبت‌های وزنی ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ سیمان، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان از کاهش مقاومت فشاری بتن با افزودن مقادیر بیشتر پودر رنگدانه به جای سیمان نشان داد. بنابه به نتایج این تحقیق استفاده از پودر رنگی به نسبت بیش از ۲ ٪ وزنی جایگزین سیمان در بتن توصیه نمی‌شود[۲۵].

همچنین استانداردهای مختلفی برای ساخت بتن‌های رنگی وجود دارد که یکی از جامع‌ترین آن‌ها استاندارد ASTM-C979 می‌باشد. برخی از مهم‌ترین ضوابط این استاندارد عبارتند از[۲۸]:

۱. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن رنگی نباید کمتر از ۹۰٪ مقاومت نمونه شاهد (بدون افزودنی رنگی) باشد.
۲. حداکثر میزان استفاده از رنگدانه در بتن، باید برابر یا کمتر از ۱۰٪ وزنی جرم سیمان باشد.
۳. طرح اختلاط بتن رنگی می‌تواند مشابه با بتن معمولی و بر اساس روش ACI-211 باشد.

[8] Hossein Ghalehnovi
[9] Scc
[10] Bauxite
[11] بوکسید زباله‌ای سمی، غنی از رنگدانه‌های زرد است که به دلیل قلیایی بودن زیاد، محل دفن زباله و محیط اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۴. برای افزایش کیفیت رنگ بتن، استفاده از سیمان سفید توصیه می‌گردد.

۵. سنگدانه‌های مورد استفاده باید منطبق با استاندارد ASTM-C33 باشند. همچنین بهتر است از ماسه سیلیسی تمیز استفاده شود.

۶. محدوده اسلامپ بتن رنگی ۱۳±۱۰۰ میلیمتر باشد.

۷. حداقل عیار سیمان مصرفی ۳۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب باشد.

۸. برای افزایش کیفیت رنگ پذیری بتن، توصیه شده تا از سنگدانه کاملاً خشک استفاده گردد و میزان جذب آب سنگدانه در محاسبات طرح اختلاط لحاظ گردد.

۹. مقدار آب مورد نیاز برای روانی بتن رنگی، از ۱۱۰٪ مقدار آب نمونه شاهد (بدون افزودنی رنگی) بیشتر نشود.

با توجه به نتایج بدست آمده از سایر تحقیقات گذشته، می‌توان اذعان داشت که عمدتاً میزان استفاده از رنگدانه در بتن با توجه به نوع و خصوصیات شیمیایی آن ماده متغیر می‌باشد. بنابراین ضرورت دارد تا میزان استفاده از هر نوع رنگدانه در بتن بر اساس آزمایش و بهینه‌یابی مورد بررسی و سنجش قرار گیرد. از طرفی میزان ماندگاری و دوام رنگدانه‌های معدنی در دراز مدت (طی چندین سال) همواره از ابهامات استفاده از این روش است که تاکنون پاسخی برای آن یافت نشده است. در این تحقیق پس از معرفی مصالح مصرفی و تعیین استانداردهای روش کار جهت ساخت بتن رنگی زرد بوسیله رنگدانه معدنی، اقدام به تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب بتن سخت شده، دوام یخ زدگی، شاخص اقتصادی و بررسی انحراف از معیار داده‌ها گردید. یکی از نوآوری‌های این تحقیق استفاده از بتن رنگی زرد جهت استفاده در نماسازی مدرن می‌باشد بطوریکه در سبک معماری مدرن استفاده از بتن رنگی می‌تواند باعث کاهش هزینه ساخت و کاهش استفاده از سنگ، چوب یا سایر ادوات نماسازی گردد.

۳- مواد و مصالح

۳-۱- شن

درشت دانه مورد استفاده جهت ساخت بتن مورد آزمایش دراین تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد که از معدن مرادی (دوکوهک) تهیه گردیده است. مطابق با شرح جدول شماره ۱ نیز وزن مخصوص در حالت خشک نیز ۱۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۲/۳ ٪ می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص خشک
	mm	%	kg/m^3
بادامی و نخودی	۱۹	۲/۳	۱۳۵۰

۳-۲- ماسه

ماسه مورد استفاده برای ساخت بتن دراین آزمایش از نوع ماسه شکسته کوهی معدن مرادی (دوکوهک) مورد استفاده قرار گرفته. مشخصات فیزیکی این سنگدانه مطابق با شرح جدول شماره ۲ می‌باشد. ماسه مذکور دارای وزن مخصوص خشک ۱۶۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و میزان جذب آب آن طبق استاندارد ASTM-C128 نیز برابر با ۱/۵۷ ٪ می‌باشد. همچنین مدول نرمی ماسه استفاده شده در این تحقیق به استناد از استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ محاسبه گردید.

جدول ۲ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک	جذب آب
	mm		kg/m^3	%
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۱۶۵۰	۱/۵۷

۳-۳- سیمان سفید

سیمان سفید همان سیمان معمولی (خاکستری) است با این تفاوت که در فرآیند ساخت و تولید سیمان سفید، آهن و منیزیم به میزان کمتر از هشت درصد کاهش یافته و درنتیجه به رنگ سفید متمایل می شود. همچنین برای ساخت این سیمان از سنگ گچ، سنگ آهک، سنگ‌هایی با رنگدانه سفید مانند سنگ‌های کائولین، وست، فلدسپات استفاده می‌شود. برای افزایش کیفیت رنگ پذیری بتن در این تحقیق از سیمان سفید پرتلند نی‌ریز استفاده گردیده است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده‌این محصول می‌باشد ضمیمه شده است[۳۰].

جدول ۳ ساختار شیمیایی سیمان سفید نی‌ریز [۳۰]

SiO_2	AL_2O_3	FE_2O_3	MgO	SO_3	CaO	K_2O	Na_2O	IR	LOI
٪ ۲۲/۷	٪ ۴/۱	٪ ۶/۳	٪ ۰/۹	٪ ۲/۷	٪ ۶۶/۷	٪ ۰/۵	٪ ۰/۵	٪ ۰/۷	٪ ۳

۴-۳- پیگمنت گل ماش (لیمونیت)

رنگدانه معدنی لیمونیت[12] که با نام محلی گِل ماش شناخته می‌شود، نوعی خاک معدنی است که دارای مقادیر بالایی اکسید آهن می‌باشد و طی فرآیندی به حالت پودر یکدست در می‌آید. این ماده معمولاً بطور مستقیم از رسوبات استخراج می‌شود و فرآوری کمی روی آن انجام می‌گیرد. لیمونیت به رنگ زرد مات یا خردلی یافت می‌شود. لیمونیت مورد استفاده در این تحقیق از نوع معدنی بوده که از معادن جزیره ابوموسی تهیه شده است. این ماده دارای خلوص تقریباً ۵۰٪ می‌باشد که پس از فرآوری در کارخانه در اندازه مش ۴۰۰ الی ۸۰۰ خردایش می‌شود. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی‌این محصول مطابق با جدول شماره ۴ و ۵ است[۳۲].

جدول ۴ خصوصیات شیمیایی پیگمنت ماش (لیمونیت) [۳۲]

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	L.O.I	Total
٪ ۲۶/۹۱	٪ ۴۹/۵۴	٪ ۶/۰۱	٪ ۱۰/۹۳	٪ ۰/۲۵	٪ ۴/۸۲	٪ ۹۸/۴۶

جدول ۵ خصوصیات فیزیکی پیگمنت ماش (لیمونیت) [۳۲]

وزن مخصوص	اندازه دانه	سختی موهس	فرمول مولکولی	رنگ ظاهری
gr / cm^2	µm	m^2/gr		

[12] Natural Yellow Iron Oxide

۳/۵	۱۸ - ۳۵	۵ - ۵/۵	Fe_2O_3	زرد - خردلی

شکل ۲ پیگمنت گل ماش (لیمونیت) مورد استفاده

۵-۳- آبر روان کننده

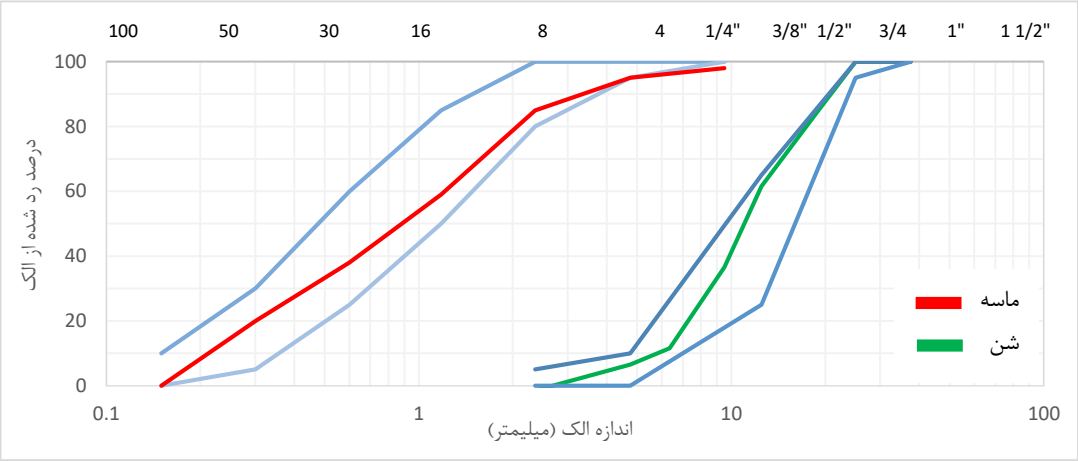
بدلیل آنکه رنگدانه‌های معدنی معمولاً بصورت پودر در بتن استفاده می‌شوند، باید همراه آب به کار روند و در آب حل شوند. از این افزایش نسبت آب به سیمان می‌تواند موجب کاهش مقاومت بتن گردد[۸,۵]. همچنین در صورتیکه عناصر ساخت بتن به خوبی مخلوط نشود، رنگدانه‌ها ته نشین شده و باعث ایجاد کلوخه (ناحیه ضعف) در بتن خواهند شد که در اینصورت کاهش شدید مقاومت بتن را در بر خواهد داشت. بنابراین در ساخت بتن با رنگدانه‌ها استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب مانند انواع روان کننده جهت حصول روانی، حفظ کیفیت رنگ پذیری و شفافیت در نوع رنگ ضروری بنظر می‌رسد[۹,۴,۱].در مطالعات گذشته، لزوم استفاده از روان کننده برای ساخت بتن رنگی بدلیل حفظ کیفیت و اثر مطلوب پخش رنگ و پایداری آن در مدت زمان طولانی مورد بررسی قرار گرفته است[۵-۱]. استفاده از روان کننده‌ها یا کاهنده‌های آب، جهت جلوگیری از کلوخه شدن ذرات رنگدانه در بتن و افزایش کیفیت و دستیابی به روانی مطلوب، مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای رسیدن به پخش یکنواخت و پایدار رنگدانه در بتن از آبر روان کننده SP400 بر پایه پلی کربوکسیلات، استفاده گردید. این ماده جزء جدیدترین نسل آبر روان کننده به حساب می‌آید که با داشتن زنجیره‌های بلند جانبی در ساختار مولکولی علاوه بر دافعه شدید ذرات سیمان با ایجاد فضایی بین ذرات مانع از نزدیک شدن و چسبیدن دوباره ذرات شده و بیشترین اثر روان کنندگی را ایجاد می‌کند[۳۱]. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق و به شرح جدول شماره ۶ می‌باشد.

جدول ۶ خصوصیات فیزیکی ابر روان کننده SP400 [۳۱]

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 ۱ ٪ وزن سیمان

۴- سنگدانه

تقسیم بندی سنگدانه‌های مصرفی برای ساخت بتن در ابعاد و اندازه‌های معین در مقادیر مختلف وزنی به دانه‌بندی سنگدانه مشهور است. هدف از این کار، توزیع ذرات و دانه‌های سنگی طی ابعاد و اندازه مختلف جهت تراکم بهتر در ساخت بتن است. در آزمایش دانه‌بندی سنگدانه، مصالح سنگی با ایجاد لرزه از الک‌های شماره‌بندی شده عبور می‌کنند و اندازه و وزن سنگدانه باقیمانده روی هر الک مشخص می‌گردد. در این تحقیق روش اجرا و طبقه‌بندی الک‌های شماره‌بندی شده، مطابق استاندارد ASTM-C136 انجام گرفت و در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است. همچنین میزان وزن و اندازه سنگدانه‌ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد. در منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها، محور قائم نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد[۱۱]. در شکل شماره ۳ الگوی دانه‌بندی ماسه با منحنی قرمز رنگ، الگوی دانه‌بندی شن با منحنی سبز رنگ و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 با منحنی آبی رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۳ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده مجاز ASTM-C33

۵- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی جهت ساخت بتن زرد با لیمونیت، مجموعاً متشکل از ۵ طرح اختلاط و ۳۵ آزمونه می‌باشد. آزمایشات انجام شده شامل آزمایش روانی (اسلامپ)، مقاومت فشاری، جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و ثانویه (۷۲ساعت) در بتن سخت شده و تعیین دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد می‌باشد. برای سنجش مقاومت فشاری از دو آزمونه استفاده گردید و میانگین آن، بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. همچنین جهت تعیین دوام بتن در برابر یخ زدگی نیز از میانگین دو آزمونه بعد از گذشت ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد استفاده شد. سایر آزمایشات مذکور بر روی یک نمونه ۲۸ روزه انجام شد. تعداد، سن و نوع آزمونه‌ها، روش آزمایش و استاندارد مربوط به آن‌ها مطابق جدول شماره ۷ می‌باشد.

جدول ۷ مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	شرح آزمایش	شماره استاندارد	نمونه ۷ روزه	نمونه ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتیمتر)
۱	تعیین اسلامپ	ASTM C143	-	-	-
۲	تعیین مقاومت فشاری بتن	BS-EN-12390	۱۰	۱۰	۱۵x۱۵x۱۵ مکعبی
۳	جذب آب در بتن سخت شده	ASTM-C642	-	۵	۱۰x۱۰x۱۰ مکعبی
۴	تعیین دوام یخ زدگی	ASTM-C666-B	-	۱۰	۱۵x۱۵x۱۵ مکعبی

۶- طرح اختلاط

مطابق توصیه استاندارد ASTM-C979 طرح اختلاط بتن رنگی همانند بتن معمولی می‌باشد با این تفاوت که از رنگدانه یا سیمان رنگی به جای بخشی از سیمان معمولی استفاده می‌شود. بنابراین در این تحقیق از استاندارد وزنی ACI-211 بعنوان مبنای طرح اختلاط استفاده شد که با توجه به نوع مصالح بهینه سازی گردید. برای افزایش کیفیت رنگ بتن از سیمان سفید با عیار ۴۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب استفاده شد. در ادامه برای تغییر رنگ بتن به زرد، از پودر لیمونیت (گل ماش) در نسبت‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، و ۲۰٪ به جای بخشی از سیمان استفاده گردید. همچنین حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلیمتر و بصورت کاملاً خشک در بتن استفاده شد. نسبت آب به سیمان ۰/۵ و برای حفظ روانی و بهبود پخش رنگ در تمامی طرح مخلوط‌ها از آبر روان کننده بر پایه کربوکسیلات به میزان ثابت وزنی ۱٪ سیمان استفاده گردید. در جدول شماره ۸ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۸ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

ردیف	نام	سیمان سفید	ماسه	شن	لیمونیت	آب	فوق روان کننده
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
۱	CONTROL	۴۵۰	۱۲۸۰	۷۲۰	۰	۲۲۵	۴/۵
۲	LI-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵
۳	LI-10%	۴۰۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۴۵	۲۲۵	۴/۵
۴	LI-15%	۳۸۲/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۶۷/۵	۲۲۵	۴/۵
۵	LI-20%	۳۶۰	۱۲۸۰	۷۲۰	۹۰	۲۲۵	۴/۵

شکل ۴ مدت زمان و ترتیب اختلاط اجزای بتن در این تحقیق [ماخذ: نگارندگان]

در این تحقیق سنگدانه‌های مورد استفاده 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 رنگدانه (پیگمنت گل ماش) اضافه و به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. این کار باعث گردید تا سنگدانه‌ها از ابتدا رنگ مربوطه را به خود جذب نموده و کیفیت رنگ‌پذیری بتن را افزایش دهند. سپس سیمان، باقیمانده لیمونیت و باقیمانده آب طرح مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. در انتها آبر روان کننده به آرامی اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. در شکل ۴ ترتیب و مدت زمان اختلاط مصالح با یکدیگر نمایش داده شده است. پس از آن آزمایش وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام گرفته و قالب-گیری شدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد قرار گرفته و بعد از آن به مدت ۷ و ۲۸ روز در حوضچه آب عمل-آوری شدند.

۷- یافته‌ها

۷-۱- رنگ پذیری

کد یا شناسه رنگ طبق استاندارد رنگ شناسی روشی برای انتخاب و تشخیص هر رنگ می‌باشد. این موضوع خصوصاً برای معماران و طراحان اهمیت ویژه‌ای داد. 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. قابل ذکر است که نوع رنگ هر نمونه بتنی توسط نرم افزار iColor Picker اسکن و مشخص گردیده. این برنامه قادر است تا شناسه هر رنگ را طبق دامنه رنگ شناسی RGB[۱۳]، HSV[۱۴] و RAL [۱۵]شناسایی و تعیین کند تا طراحان و بهره‌برداران بتوانند سریعاً رنگ را شناسایی یا مطابق آن با تغییر در مقادیر استفاده از رنگدانه در بتن به رنگ دلخواه و مورد نظر خود دست یابند. همچنین 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 شکل شماره ۵ اثر افزودن لیمونیت در رنگ بتن مشخص و با یکدیگر مقایسه شده است.

شناسه سه رقمی RGB بیانگر میزان استفاده از سه رنگ (از چپ به راست به ترتیب) قرمز، سبز و آبی برای ترکیب و رسیدن به رنگ مورد نظر کاربر می‌باشد که در بازه ۰ تا ۲۵۵ متغیر است[۱۸].

[۱۳] عبارت RGB از مخفف رنگ های قرمز (RED)، سبز (GREEN)، آبی (BLUE) گرفته شده است.

[۱۴] مخفف Hue,Saturation,Brightness یک فضای رنگی را بر اساس دو پارامتر رنگ و روشنایی آن توصیف می‌کند.

[۱۵] مخفف ReichsAusschuss für Lieferbedingungen یک سیستم کد گذاری جهانی برای تعریف رنگ‌ها است.

شناسه دو رقمی HSB به ترتیب (از چپ به راست) بیانگر رنگ و روشنایی می‌باشد. میزان رنگ شناسی این سیستم از ۰ تا ۳۶۰ درجه و روشنایی آن از ۰ تا ۱۰۰ درصد را پوشش می‌دهد[۱۹].

سیستم رنگ شناسی RAL یک سیستم کد گذاری جهانی برای تعریف رنگ‌ها منطبق بر استاندارد آلمان می‌باشد. در این سیستم عدد اول سایه رنگ را مشخص می‌کند[۲۰].

میزان پخش رنگ لیمونیت در بتن پس از عمل آوری نمونه‌ها نشان می‌دهد که رنگ نمونه دارای نسبت‌های ۵٪ و ۱۰٪ لیمونیت در طیف رنگ کرمی یا نخودی و رنگ نمونه دارای نسبت‌های ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت در طیف رنگی خردلی و زرد مات می‌باشد.

۱: بتن دارای سیمان سیاه

۲: بتن دارای سیمان سفید

۳: بتن دارای ۵٪ لیمونیت

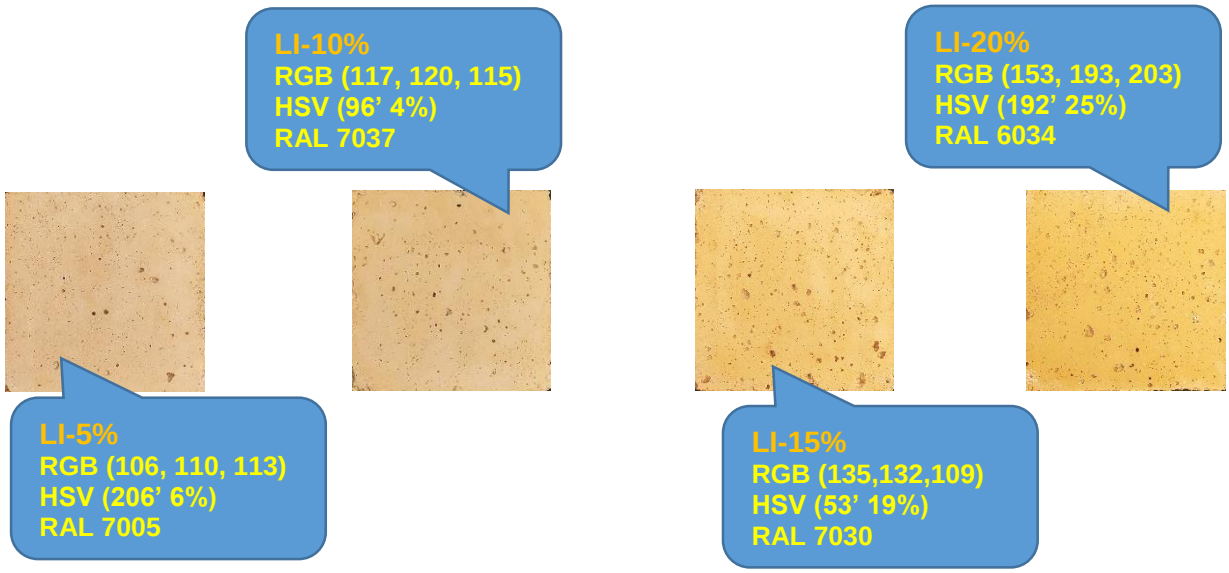
۴: بتن دارای ۱۰٪ لیمونیت

۵: بتن دارای ۱۵٪ لیمونیت

۶: بتن دارای ۲۰٪ لیمونیت

شکل ۵ مقایسه رنگ پذیری نمونه‌های دارای مقادیر مختلف لیمونیت

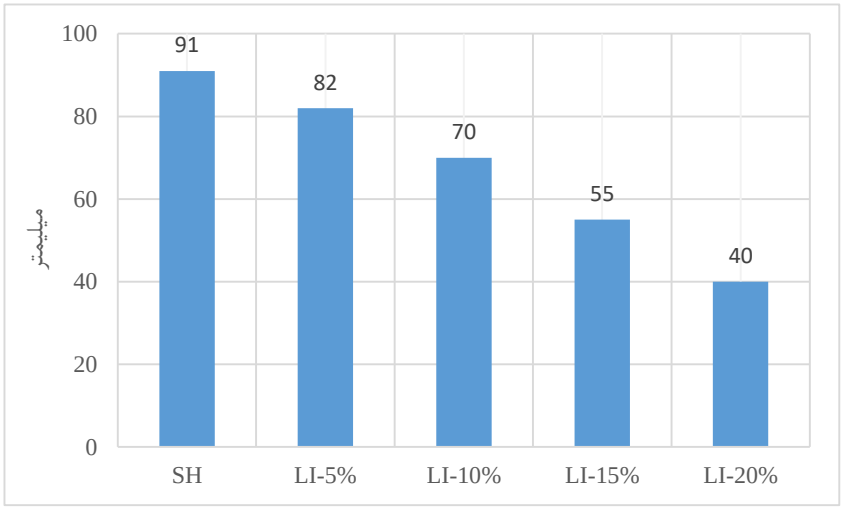
در شکل شماره ۶ هر کدام از رنگ‌های بدست آمده در بتن مطابق استاندارد رنگ شناسی RGB کدگذاری شده است.



شکل ۶ کدگذاری و دسته بندی شناسه رنگ بتن پس از افزودن نسبت‌های مختلف لیمونیت در بتن

۲-۷- روانی (اسلامپ)

اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی میزان جریان‌پذیری یا روانی بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز است. میزان اسلامپ در نمونه‌های دارای نسبت‌های مختلف وزنی لیمونیت بدلیل جذب آب بالای این ماده، کاهش می‌یابد. مطابق شکل شماره ۷ که میزان روانی هر طرح مخلوط را نمایش می‌دهد مشخص است که هر چه میزان استفاده از لیمونیت در بتن بیشتر باشد به همان میزان روانی بتن کاهش می‌یابد. بطوریکه طرح مخلوط دارای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی لیمونیت باعث کاهش ۹٪، ۲۳٪، ۳۹٪ و ۵۶٪ روانی بتن در مقایسه با طرح مخلوط شاهد گردیده است. همچنین شکل شماره ۸ روند آزمایش اسلامپ بتن رنگی را نمایش می‌دهد.



شکل ۷ مقایسه روانی طرح مخلوط‌های مورد مقایسه

شکل ۸ آزمایش اسلامپ بر روی طرح‌های مورد آزمایش

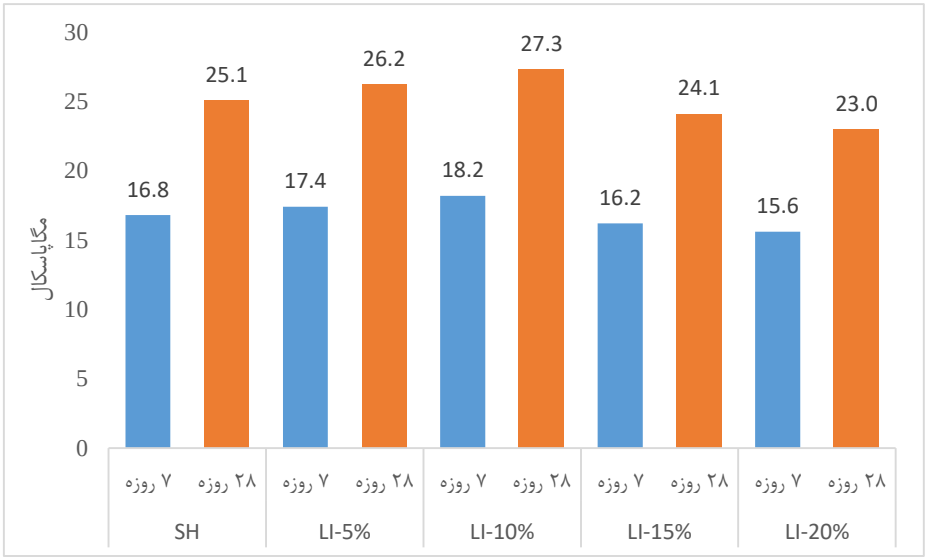
۳-۷- مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک هیدرولیکی دیجیتال با سرعت بارگذاری ۰/۸ بر ثانیه استفاده گردید. نمونه‌های مکعبی ۱۵x۱۵x۱۵ سانتیمتری بعد از ۷ و ۲۸ عمل‌آوری در حوضچه آب مورد آزمایش فشاری قرار گرفتند. میزان مقاومت فشاری بدست آمده در هر طرح مخلوط مطابق جدول شماره ۹ می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن مقادیر ۵٪ و ۱۰٪ لیمونیت در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه خواهد شد. از مهم‌ترین علل بروز این افزایش مقاومت می‌توان به وجود اکسید آهن در ساختار لیمونیت اشاره نمود که دارای مقاومت بالایی می‌باشد. همچنین اندازه ریز ذرات لیمونیت باعث افزایش تراکم و کاهش تخلخل بتن گردیده که سبب گردیده مقاومت فشاری بتن افزایش یابد. در طرح مخلوط‌های دارای ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت در بتن شاهد کاهش مقاومت فشاری ۷

و ۲۸ روزه بتن بتن می‌باشیم که این کاهش مقاومت را می‌توان به کاهش وزن سیمان و کاهش میزان چسبندگی بین عناصر تشکیل دهنده بتن نسبت داد. شکل شماره ۹ میزان تغییرات مقاومت فشاری را در طرح‌ها و سنین مختلف نمایش و با سایر طرح‌های دیگر مقایسه می‌نماید.

جدول ۹ مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

ردیف	نام طرح	سن نمونه	مقاومت فشاری	رشد مقاومت
		Days	Mpa	%
۱	CONTROL	۷ روزه	۱۶/۸	-
		۲۸ روزه	۲۵/۱	-
۲	LI-5%	۷ روزه	۱۷/۴	۳/۵
		۲۸ روزه	۲۶/۲	۴/۳
۳	LI-10%	۷ روزه	۱۸/۲	۸/۳
		۲۸ روزه	۲۷/۳	۸/۷
۴	LI-15%	۷ روزه	۱۶/۲	-۳/۵
		۲۸ روزه	۲۴/۱	-۳/۹
۵	LI-20%	۷ روزه	۱۵/۶	-۷/۱
		۲۸ روزه	۲۳/۰	-۸/۳



شکل ۹ مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

شکل ۱۰ سنجش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مکعبی دارای لیمونیت

۴-۷- انحراف از معیار داده‌ها

میزان انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه میزان از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالیکه انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. به طور کلی واریانس و انحراف معیار، معیارهای پراکندگی هستند که درجه تغییر پذیری، گسترش یا پراکندگی یک متغیر را تعیین می‌کنند[۲۷]. در این تحقیق میزان انحراف از معیار داده‌ها از طریق رابطه ذیل الذکر محاسبه شده است.

در ابتدا از رابطه شماره ۱ میزان میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش تعیین می‌شود[۲۷]:

$$A = \frac{\Sigma xi}{N} \qquad (۱)$$

Σx_i = مجموع مقاومت فشاری نمونه‌ها

N= تعداد نمونه‌ها

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

$$m = (x_i - A)^2 \quad (۲)$$

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

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

در نهایت از رابطه شماره ۴ میزان ضریب تغییر محاسبه می‌شود[۲۷]:

$$V = \frac{S}{A} \times 100 \quad (۴)$$

مطابق جدول شماره ۱۰همانطور که ملاحظه می‌گردد نتایج هر دو سری بتن تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشد. قابل ذکر است که میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر در طرح LI-5% که دارای ۵٪ لیمونیت در بتن می‌باشد نسبت به سایر طرح‌ها کمتر و نمونه‌های طرح LI-15% که دارای ۱۵٪ لیمونیت می‌باشند در مقایسه با طرح‌های دیگر دارای از انحراف معیار و ضریب تغییر بالاتری دارند. بطوریکه میزان انحراف معیار نمونه ۷ روزه این طرح برابر با ۰/۴۵۳ و میزان ضریب تغییر آن ۱/۲۶ ٪ بدست آمده است. با عنایت از نتایج بدست آمده می‌توان اذعان داشت که افزودن مقادیر بالای لیمونیت در بتن عاملی برای افزایش میزان انحراف از معیار یا افزایش میزان ضریب تغییر نخواهد بود. بنابراین افزودن لیمونیت در بتن خلالی در روند هیدراتاسیون سیمان یا روند گیرش سیمان نخواهد شد. همچنین میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر در تمامی نمونه‌ها نشان دهنده کیفیت خوب آزمونه‌های بتنی ساخته شده می‌باشد. زیرا در ضوابط پذیرش مقاومت فشاری بتن انحراف معیار ۴ تا ۶ مگاپاسکال قابل پذیرش است[۲۷]. علاوه بر آن پیشنهاد شده که ضریب تغییرات مساوی یا کوچکتر از ۱۰٪ در بتن، نشان دهنده کنترل کیفیت مناسب می‌باشد[۲۸].

جدول ۱۰ مقایسه و محاسبه میزان واریانس و انحراف از معیار داده‌ها

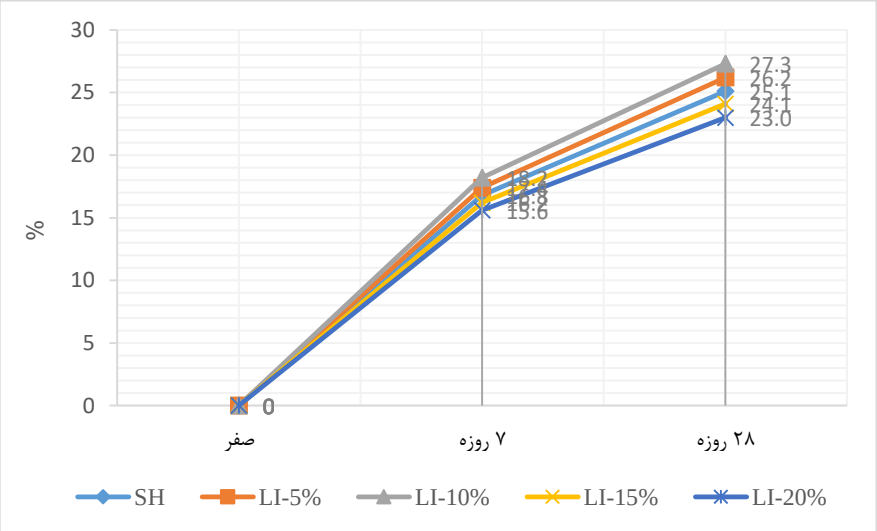
ردیف	نام طرح	سن نمونه	انحراف معیار	درصد ضریب تغییرات
		روز	S	V
۱	CONTROL	۷	۰/۱۷۰	۰/۱۷
		۲۸	۰/۱۶۳	۰/۱۱
۲	LI-5%	۷	۰/۲۱۹	۰/۲۸
		۲۸	۰/۲۴۷	۰/۲۳
۳	LI-10%	۷	۰/۳۷۵	۰/۷۷
		۲۸	۰/۲۹۰	۰/۳۱
۴	LI-15%	۷	۰/۴۵۳	۱/۲۶
		۲۸	۰/۳۶۱	۰/۵۴
۵	LI-20%	۷	۰/۱۹۸	۰/۲۵
		۲۸	۰/۲۹۰	۰/۳۶

۵-۷- جذب آب بتن سخت شده

این آزمایش علاوه بر اندازه‌گیری میزان جذب آب نیز معیاری برای سنجش تخلخل در بتن می‌باشد. در این تحقیق آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده مطابق استاندارد ASTM-C642 بر روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام گرفته است. بدین ترتیب ابتدا نمونه‌های بتنی به مدت ۲۴ ساعت در آون[16] و در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته تا رطوبت آن‌ها از بین رفته و کاملاً خشک شوند. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعت (جذب آب ثانویه) در حوضچه آب قرار گرفته و وزن هر کدام از آن‌ها توزین گردید. نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۱ می‌باشد. به استناد از این نتایج، میزان جذب آب اولیه و ثانویه نمونه‌ها با افزایش درصد لیمونیت در بتن رنگی بیشتر خواهد شد که این عامل متاثر از جذب آب بالای لیمونیت در بتن می‌باشد. شکل شماره ۱۱ میزان جذب آب اولیه و ثانویه هر طرح را مقایسه و نمایش می‌دهد. بنابه توصیه سایر تحقیقات گذشته، میزان جذب آب اولیه بتن کمتر از ۲٪ مناسب ارزیابی می‌شود. همچنین حداکثر میزان جذب آب نهایی بتن، در شرایط محیطی فوق العاده شدید و در محیط‌هایی که سازه در معرض آب دریا می‌باشد بین ۵٪ تا ۵/۵ ٪ توصیه شده است[۱۸].

جدول ۱۱ مقایسه میزان درصد آب جذب شده بتن سخت شده در تمامی‌طرح‌ها

ردیف	نام طرح	وزن نمونه خشک	وزن نمونه پس از جذب اولیه	وزن نمونه پس از جذب ثانویه	وزن نمونه پس از جذب اولیه	وزن نمونه پس از جذب ثانویه
		گرم	گرم	گرم	٪	٪
۱	CONTROL	۲۰۳۵	۲۰۹۳	۲۱۳۰	۲/۸	۴/۵
۲	LI-5%	۲۱۲۵	۲۱۹۶	۲۲۳۲	۳/۲	۴/۸
۳	LI-10%	۲۱۸۵	۲۲۶۸	۲۳۱۰	۳/۷	۵/۴
۴	LI-15%	۲۲۰۴	۲۳۰۰	۲۳۴۲	۴/۲	۵/۹
۵	LI-20%	۲۲۵۵	۲۳۶۳	۲۴۰۶	۴/۶	۶/۳



شکل ۱۱ مقایسه میزان درصد آب جذب شده بتن سخت شده در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

[16] Owen

۶-۷- دوام یخ زدگی

برای تعیین دوام بتن در برابر چرخه یخبندان استانداردهای متعددی وجود دارد که مهم‌ترین آن دستورالعمل ASTM-C666 به دو شیوه A و B است. در روش A نمونه‌های بتن به تعداد معینی در مجاورت آب در دمای ۱۸- تا ۴+ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد. در روش B روش آزمایش دقیقاً مشابه روش A است، با این تفاوت که یخبندان نمونه‌ها در مجاورت آب و ذوب آن در مجاورت هوا انجام می-شود. بعد از اتمام چرخه‌های ذوب و یخبندان میزان تخریب نمونه‌ها با معیارهای مختلفی سنجیده می‌شود که شامل موارد عمده زیر است[۹]:

۱- تغییر در مقاومت فشاری: کاهش بیش از ۱۰٪ نشان دهنده تخریب است.

۲- تغییر در وزن نمونه: کاهش بیش از ۵٪ نشان دهنده تخریب است.

۳- تغییر در پاسخ امواج : با عبور امواج ماورای صوت از نمونه در قبل و بعد از آزمایش اگر به میزان ۴۰٪ اُفت در سرعت امواج عبوری مشاهده شود، نمونه تخریب شده است.

۴-تغییر در طول ابعادی نمونه: کرنش‌های نمونه با ابزارهای دقیق سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار آن از میزان توصیه شده تجاوز کند، نمونه به حالت تخریب رسیده است.

در این تحقیق برای انجام آزمایش سنجش دوام بتن در معرض چرخه ذوب و انجماد، از استاندارد ASTM-C666-B (حالت ذوب و انجماد سریع با فریزر) تبعیت شده است. در این روش، نمونه‌ها تحت شرایط دمای حداقل ۱۸- و حداکثر ۴+ و طی ۳۰۰ چرخه تکرار قرار گرفتند. همچنین هر چرخه ذوب و انجماد به مدت ۵ ساعت در نظر گرفته شد که نمونه‌های بتنی به مدت ۲/۵ ساعت به حالت انجماد (۱۸- درجه) و ۲/۵ ساعت به حالت ذوب (۴+ درجه) قرار گرفتند. بعد از اتمام چرخه‌های ذوب و انجماد نیز نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در معرض آفتاب قرار گرفته تا رطوبت سطحی آن‌ها خشک شود. در نهایت میزان تخریب نمونه‌ها با معیار اُفت وزن و اُفت مقاومت سنجیده می‌شود.

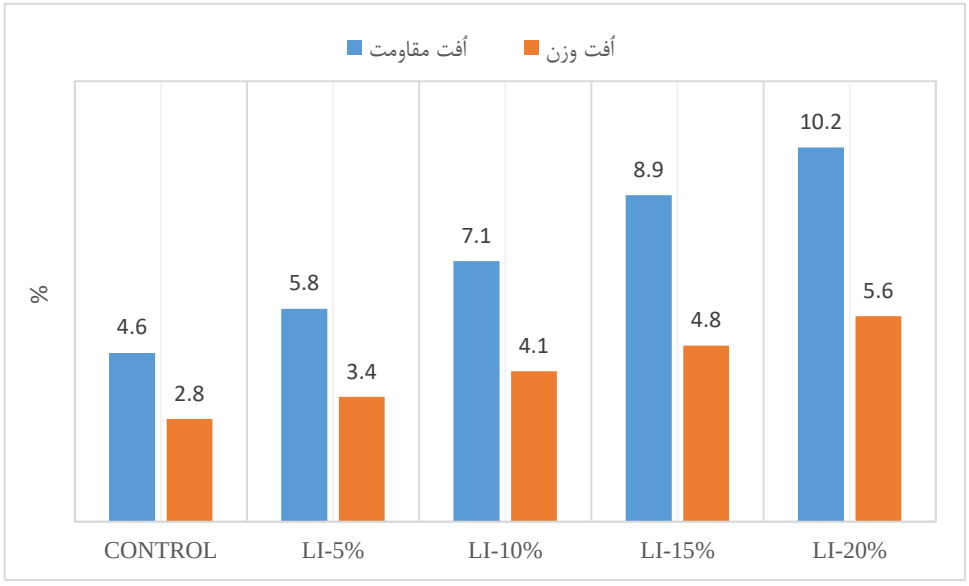
نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۲ می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده طرح‌های LI-5%, 10%, 15% ,20% در مقایسه با نمونه شاهد، دچار کاهش وزنی به میزان به ترتیب ۳/۴ ٪، ۴/۱ ٪، ۴/۸ ٪، ۵/۶ ٪ و نیز با کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۵/۸ ٪، ۷/۱ ٪، ۸/۹ ٪، ۱۰/۲ ٪ مواجه شدند. در تمامی نمونه‌ها میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت در اثر چرخه انجماد، ارتباط مستقیمی با تخلخل و نفوذ آب در منافذ بتن دارد. بطوریکه در اثر تغییرات دمایی، آب موجود در منافذ بتن منبسط و منقبض خواهد شد که در نهایت با افزایش و کاهش پیاپی حجم بتن، سطح بتن دچار ترک و در نهایت زوال می‌گردد. شکل شماره ۱۲ نحوه شکست بتن برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ذوب و انجماد مکرر را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲ مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن نمونه‌ها در اثر چرخه ذوب و انجماد

ردیف	نام طرح	مقاومت فشاری پس از سیکل انجماد	اُفت مقاومت	وزن نمونه پس از سیکل انجماد	اُفت وزن
		مگاپاسکال	٪	گرم	٪
۱	CONTROL	۲۴/۰	۴/۶	۷۰۲۶	۲/۸
۲	LI-5%	۲۴/۸	۵/۸	۷۱۰۲	۳/۴

۳	LI-10%	۲۵/۵	۷/۱	۷۱۶۸	۴/۱
۴	LI-15%	۲۲/۱	۸/۹	۷۲۳۵	۴/۸
۵	LI-20%	۲۰/۹	۱۰/۲	۷۳۱۰	۵/۶

شکل ۱۲ آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن رنگی پس از قرار گیری در چرخه انجماد و نمایش ترک‌های سطحی در پوسته



شکل ۱۳ مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض چرخه ذوب و انجماد

۷-۷- شاخص اقتصادی

یکی از ارکان‌های اصلی که در بهینه‌سازی و توسعه پایدار طرح اختلاط بتن باید مورد توجه قرار گیرد، شاخص اقتصادی است. با عنایت به رویکرد کاربردی این تحقیق، در این بخش اقدام به بررسی شاخص اقتصادی و مقایسه هزینه ساخت طرح اختلاط بتن رنگی با

فرض استفاده از رنگدانه معدنی و شیمیایی گردیده. بدیهی است که میزان رنگدهی رنگدانه‌های شیمیایی با رنگدانه‌های معدنی یکسان نیست. لذا جهت مقایسه هزینه ساخت از نتایج سایر تحقیقات گذشته استفاده شد. به استناد از نتایج بدست آمده، میزان استفاده از رنگدانه شیمیایی برای کسب رنگ مشابه با رنگ نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، حدود ۳٪، ۵٪ و ۷٪ وزنی سیمان می‌باشد. بطوریکه استفاده از ۵٪ رنگدانه شیمیایی زرد عملکردی مشابه با افزودن ۱۵٪ رنگدانه معدنی خواهد داشت[۴-۱۲-۲۵-۲۹]. بنابراین جهت مقایسه از حیث مقایسه هزینه ساخت برای تهیه یک متر مکعب بتن رنگی با فرض قیمت در زمستان سال ۱۴۰۱ مطابق با جدول شماره ۱۳مقایسه شده است. واضح است که هزینه‌های ساخت بتن در آزمایشگاه بیشتر از ساخت همان بتن در مقیاس کارگاه یا کارخانه می‌باشد. اما با توجه به عدم دسترسی به هزینه‌های ساخت کارخانه، ناچار به محاسبه این شاخص در مقیاس آزمایشگاهی با استناد به نتایج اخذ شده و تحقیقات میدانی خواهیم بود. در جدول شماره ۱۳ میزان هزینه برای ساخت یک متر مکعب بتن رنگی از حاصلضرب مقدار مصرف هر یک از اجزاء در قیمت آن جزء و جمع آن‌ها محاسبه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده مشخص گردید که استفاده از حداکثر ۲۰٪ رنگدانه معدنی، کمتر از ۳٪ هزینه ساخت بتن را افزایش می‌دهد. در حالیکه استفاده از ۷٪ رنگدانه شیمیایی برای حصول رنگ مشابه با نمونه معدنی نیز تا ۱۷۷٪ هزینه ساخت بتن را افزایش می‌دهد. همچنین نوسانات قیمت رنگدانه شیمیایی تحت تاثیر ارز خارجی بسیار متغیر و تاثیرگذار می‌باشد.

جدول ۱۳ مقایسه شاخص اقتصادی و هزینه ساخت هر متر مکعب بتن رنگی با رنگدانه معدنی و رنگدانه شیمیایی

ردیف	نام طرح	سیمان	ماسه	شن	آبر روان کننده	رنگدانه	جمع کل	تغییر	توضیحات
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	lit/m³	kg/m³	kg/m³	٪	
۱	Control	۷۲۰/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۰	۱/۲۹۷/۰۰۰	۰	بدون رنگدانه
۲	Li-5%	۶۸۴/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۴۵/۰۰۰	۱/۳۰۶/۰۰۰	۰/۷	۵٪ رنگدانه معدنی
۳	Li-10%	۶۴۸/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۹۰/۰۰۰	۱/۳۱۵/۰۰۰	۱/۴	۱۰٪ رنگدانه معدنی
۴	Li-15%	۶۱۲/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۱۳۵/۰۰۰	۱/۳۲۴/۰۰۰	۲	۱۵٪ رنگدانه معدنی
۵	Li-20%	۵۷۶/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۱۸۰/۰۰۰	۱/۳۳۳/۰۰۰	۲/۷	۲۰٪ رنگدانه معدنی
۶	Yellow-3%	۶۹۸/۴۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۹۴۵/۰۰۰	۲/۲۲۰/۰۰۰	۷۱	۳٪ رنگدانه شیمیایی
۷	Yellow-5%	۶۸۴/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۱/۵۷۵/۰۰۰	۲/۸۳۶/۰۰۰	۱۱۸	۵٪ رنگدانه شیمیایی
۸	Yellow-10%	۶۶۶/۰۰۰	۱۹۲/۰۰۰	۹۳/۶۰۰	۲۹۲/۵۰۰	۲/۳۶۲/۰۰۰	۳/۶۰۵/۰۰۰	۱۷۷	۷٪ رنگدانه شیمیایی

هر کیلو سیمان سفید ۱/۶۰۰ تومان
هر کیلو ماسه ۱۵۰ تومان
هر کیلو شن ۱۳۰ تومان

هر لیتر آبرروان کننده ۶۵/۰۰۰ تومان
هر کیلو لیمونیت (گل ماش) ۲/۰۰۰ تومان
هر کیلو رنگدانه شیمیایی ۷۰/۰۰۰ تومان

۸- بحث

یافته‌های این تحقیق نشان داد که لیمونیت، رنگدهی شدیدی در بتن نخواهد داشت و صرفاً با استفاده از مقادیر بالای ۱۵٪ به جای سیمان شاهد تغییر رنگ ملموس در بتن خواهیم بود. بطوریکه استفاده از ۲۰٪ لیمونیت در بتن باعث ایجاد رنگ زرد روشن در بتن خواهد شد.

افزودن حداکثر ۱۰٪ وزنی لیمونیت به جای سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. این عامل ناشی از وجود اکسید آهن در ساختار لیمونیت می‌باشد که نوعی مزیت برای استفاده از این رنگدانه بحساب می‌آید. درحالیکه سایر تحقیقات، استفاده از رنگدانه شیمیایی را جهت ساخت بتن رنگی عاملی برای کاهش مقاوت فشاری دانسته‌اند[۶,۵,۴,۳,۱].

لیمونیت میزان جذب آب بالایی دارد. به همین دلیل میزان جذب آب نهایی بتن را افزایش داده و میزان اسلامپ بتن را کاهش می‌دهد. بنابراین برای حفظ روانی بتن، جلوگیری از چسبندگی رنگدانه و عدم تشکیل کلوخه لیمونیت، افزایش کیفیت پخش رنگ، استفاده از سایر مواد افزودنی روان کننده در بتن توصیه می‌شود.

برای افزایش دوام بتن رنگی در برابر چرخه ذوب و انجماد توصیه می‌شود از سایر افزودنی‌های حباب‌زا، ضدیخ یا ژل نانو سیلیس و یا پوشش‌های پلیمری سطحی برای محافظت از بتن استفاده شود. این مواد با ایجاد حباب‌های ریز در بتن یا ایجاد یک لایه محافظ روی سطح خارجی بتن باعث افزایش پایایی در برابر تغییرات دمایی گسترده خواهد شد.

استفاده از لیمونیت برای ساخت بتن زرد، نخودی یا خردلی مشروط به در نظر گرفتن پارامترهای دوام یا ارائه طرح‌های تقویتی توجیه پذیر است. بدین ترتیب استفاده از این ماده علرغم افزایش مشخصات مکانیکی بتن، هزینه‌های ساخت بتن رنگی را کاهش داده ضمن آنکه خطرات زیست محیطی کمتری بدنبال دارد.

استفاده از رنگدانه معدنی مانند لیمونیت برای ساخت بتن رنگی زرد بسیار ارزانتر از استفاده از سایر رنگدانه‌های شیمیایی خواهد بود. بطوریکه افزودن ۲۰٪ لیمونیت در بتن تنها حدود ۳٪ قیمت ساخت بتن را در هر متر مکعب افزایش می‌دهد اما استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی برای دستیابی به رنگی مشابه نیز می‌تواند تا ۱۷۷٪ هزینه را در هر متر مکعب افزایش دهد.

۹- نتیجه گیری

۱-افزودن حداکثر میزان ۱۰٪ لیمونیت جایگزین سیمان در بتن ۲۸ روزه باعث رشد مقاومت فشاری ۸٪ خواهد شد.

۲- افزودن ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت جایگزین سیمان در بتن ۲۸ روزه باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان کمتر از ۱۰٪ خواهد شد.

۳- استفاده از لیمونیت در بتن باعث افزایش میزان جذب آب در بتن خواهد شد. بطوریکه افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت می‌تواند جذب آب نهایی بتن را به ترتیب ۴/۸ ٪، ۵/۴ ٪، ۵/۹ ٪، ۶/۳ ٪ افزایش دهد.

۴- استفاده از حداکثر ۱۵٪ لیمونیت در بتن، جهت پایایی و دوام بتن در برابر چرخه انجماد بلامانع می باشد. اما مقادیر بیش از آن باید با ایجاد سازوکاری تقویت گردد.

۵- استفاده از ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت در بتن پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد، مقاومت فشاری را به میزان ۵/۸ ٪، ۷/۱ ٪، ۸/۹ ٪، ۱۰/۲ ٪ کاهش می‌دهد.

۶- استفاده از ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ لیمونیت در بتن به ترتیب باعث افزایش ۱/۴٪، ۲٪ و ۲/۷٪ قیمت ساخت بتن در هر متر مکعب بتن می‌شود که از منظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه‌تر از سایر رنگدانه‌های شیمایی می‌باشد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شهر شیراز و آزمایشگاه بتن "دانشکده شهید باهنر شیراز" جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

[1] 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.

[2] 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.

[3] E.a. Dominguez, r. Ullmann, (2016). Ecological bricks made with clays and steel dust pollutants, appl. Clay sci. 237-250.

[4] 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.

[5] 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.

[6] R. Patakfalvi, i. Dékány, (2014). Synthesis and intercalation of silver nanoparticles in kaolinite/dmso complexes, appl. American society of civil engineers 149-159.

[7] K. Okada, n. Watanabe, v.k. Jha, y. Kameshima, a. Yasumori, k.j.d. Mackenzie, (2013). 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.

[8] K.a. Gruber, t. Ramlochan, a. Boddy, r.d. Hooton, m.d.a. (2011). Thomas, increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin international journal of physical modelling in geotechnics. 479-484.

[9] D.d. Vu, p. Stroeven, v.b. Bui, (2010). Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended portland cement mortar and concrete, structural safety. 471-478.

[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] Levinson.r, grati.o, (2018). Investigating and preparing the production of colored concrete floors to replace the asphalt on the roofs of buildings, cem. Concr. Res. 410-429.

[14] W.m. Mayes, a.p. Jarvis, i.t. Burke, m. Walton, v. Feigl, o. Klebercz, k. Gruiz, (2011). Dispersal and attenuation of trace contaminants downstream of the ajka bauxite residue (yellow mud) depository failure, hungary, environ. Sci. Technol. 5147-5155.

[15] 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.

[16] Heydari.m, mohamadi.h, (1395). Review of the advantages and disadvantages of colored concrete, 8th national concrete conference.

[17] Saghi.h, alizadeh.h, (1393). Investigating the effect of powder pigments on the properties of colored concrete, the third congress of new concrete technologies.

[18] Shakib.m, bazaee.a, (1393). 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.

[19] Emami.a, oji.f, (1390). 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.

[20] V. Vishwakarma, d. Ramachandran,(2018). Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives-a review, constr. Build. Mater. 96- 103.

[21] J. Pera, r. Boumaza, j. Ambroise, (2017). Development of a pozzolanic pigment from red mud, cem. Concr. Res. 1513-1522.

[22] Z. Pan, l. Cheng, y. Lu, n. Yang, (2012). Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, cem. Concr. Res. 357-362.

[23] X. Liu, n. Zhang, h. Sun, j. Zhang, l. Li, (2011). Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue–red mud, cem. Concr. Res. 847-853.
[24] L. Senff, d. Hotza, j. Labrincha, (2011). Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars, constr. Build. Mater. 163-170.
[25] D.v. Ribeiro, j.a. Labrincha, m.r. Morelli, (2012). Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete, cem. Concr. Res. 124-133.
[26] R.r. Rathod, n.t. Suryawanshi, p.d. Memade, (2013). Evaluation of the properties of red mud concrete, iosr j. Mech. Civ. Eng. 31-34.
[27] Ahmadian.m.rm ,dalvand.a, (2013). Statistical and laboratory investigation of the effect of microsilica on the impact resistance of wing strength concrete. 8th national congress of civil engineering, faculty of civil engineering, babol. Iran.
[28] H.e. Elyamany, a.e.m. Abd elmoaty, b. Mohamed, (2018). effect of filler types on physical mechanical and microstructure of self compacting concrete and flow-able concrete, j alex engineering 295-307.
[29] EFNARC, (2015). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation of National Associations Representing for Concrete 63.
[30] H. Figueiras, S. Nunes, J.S. Coutinho, C. Andrade, (2016). Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar, Cement Concr. Compos. 209–226.
[31] K. Turk, (2017). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume, Construct. Build. Mater. 326–334.
[32] B. Felekoglu, K. Tosun, B. Baradan, A. Altun, B. Uyulgan, (2013). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, Cement Concr. Res, 1719-1726.
[33] V. Corinaldesi, S. Monosi, M.L. Ruello, (2012). Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC, Construct. Build. Mater. 289–293.
[34] A. Lopez, J.M. Tobes, G. Giaccio, R. Zerbino, (2010). Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete, Cement Concr. Compos. 754–761.
[35] M. Collepardi, A. Passuelo, (2008). The best SCC stable, durable, colorable, in Proceedings of the 4th Int'l ACI/CANMET Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing, FURNAS Centrais El´etricas S. A. - Civil Engineering Technological Center, Brazil.
[36] G. Schopwinkel, R. Tebbe, German Standard DIN 53 237. (2006), pigments for colouring cement-based and lime-based building materials, in: Proceedings of the 2nd Int'l Workshop on Concrete Block Paving, Bayer AG, Germany. 306–318.
[37] A.M. Veit, E. Konnecke, (2011). Suggestions for improving coloured concrete products (orig. title: vorschl¨age zur Verbesserung farbiger Betonwaren), Concr Precasting Plant and Technology 1–9.
[38] S.M. Bruce, G.H. Rowe, (2011), The influence of pigments on mix designs for block paving units, in: Proceedings of the 4th Int'l Conference on Concrete Block Paving, Pave New Zealand, New Zealand, 117–124.
[39] M.A. Legodi, D. de Waal, (2007), The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste, Dyes Pigments 161–168.
[40] A.E. Jungk, A.M. Veit, (2005), Colouring of concrete blocks, the state of an art, in: Proceedings of 3rd Int'l Conference on Concrete Block Paving, Germany, 273–275.
[41] G.V. Szadkowski, (2003), The effect of pigments on the quality of concrete blocks, in: Proceedings of the 1st Int'l Conference on Concrete Block Paving, Germanym 155–156.
[42] Astm c136, (2014). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, astm international, west conshohocken, u.s.a.
[43] Astm c666,(2019). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing., u.s.a.
[44] Astm c496,(2019). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, astm international, west conshohocken, u.s.a.
[45] Astm c109/c109m-20, standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. Or [100-mm] cube specimens)
[46] Physical and chemical properties of neyriz white cement. Www.neyrizcement.ir (in persian)

[47] Physicochemical properties of normal carboxylate based superplasticizer super plast sp400. Www.sivanland.com (in persian)
[48] Physical and chemical properties of pigment mash (limonite). Www.powder-delijan.ir (in persian)