AMNC
available online @ amnc.aut.ac.ir
نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین- ۴۰ (۱۴۰۱) ۳۰۴۷-۳۰۳۲

ساخت و بررسی تأثیر رنگدانه های شیمیایی بر مقاومت فشاری، کششی، سایشی و جذب آب بتن رنگی با تأکید بر زیباسازی شهری

فرهاد عوض نژاد [۱] ، محمودرضا گلشن [۲] ، حمیدرضا شیبانی [۳]

۱.گروه معماری و شهرسازی،دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران
۲.گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
۳.گروه معماری و شهرسازی،دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

چکیده

بتن یکی از مصالح شاخص در حوزۀ راه و ساختمان است، بهره‌مندی از بتن رنگی در پروژه‌های طراحی شهری می‌تواند در بهبود زیبا سازی شهری نقش بسزایی داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر چهار رنگدانه آبی،سبز،قرمز و زرد بر مقاومت فشاری، کششی، سایشی و جذب آب بتن رنگی با تأکید بر زیباسازی شهری است. بدین منظور نمونه‌هایی از بتن رنگی با ۳، ۵ و ۷ درصد رنگدانه ها و بتن معمولی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از رنگدانه زرد باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان به ترتیب ۱۰، ۱۹ و ۲۶ در صد خواهد شد. استفاده از رنگدانه سبز به ترتیب ۱۳، ۲۸ و ۴۲ درصد ، رنگدانه آبی به ترتیب ۶، ۱۱و ۲۴ درصد و رنگدانه قرمز به ترتیب ۶، ۹ و ۱۳ درصد باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خواهند شد. استفاده از رنگدانه باعث کاهش مقاومت سایشی بتن خواهد شد. این کاهش مقاومت در رنگدانه قرمز با درصد های ۳، ۵ و ۷ به ترتیب برابر ۹، ۱۶ و ۱۹،در رنگدانه زرد برابر ۹، ۱۳ و ۱۶، در رنگدانه سبز ۱۹، ۳۰ و ۳۷ و در رنگدانه آبی برابر ۱۳، ۲۲ و ۳۲ درصد خواهد شد. بنابراین می توان از بتن با رنگدانه زرد در کف سازی و معابر شهری استفاده نمود ولی از رنگدانه دیگر فقط در جداره شهری می توان استفاده نمود.

واژگان کلیدی
بتن رنگی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت سایشی، جذب آب

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۱۱/۰۴

عهده دار مکاتبات: FAvaznezhad@tvu.ac.ir

AMNC

Making and investigating the effect of chemical pigments on the compressive, tensile, abrasion and water absorption resistance of colored concrete with an emphasis on urban beautification

Farhad Avaz nejad [1], Mahmoud Reza Golshan [2], Hamidreza Sheibani[3]

1.Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
2.Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
3.Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

Concrete is one of the leading materials in the field of road and construction, the use of colored concrete in urban design projects can play a significant role in improving urban beautification. The purpose of this research is to investigate the effect of four pigments, blue, green, red and yellow, on the compressive, tensile, abrasion and water absorption resistance of colored concrete with an emphasis on urban beautification. For this purpose, samples of colored concrete with 3, 5 and 7% pigments and normal concrete were tested. The test results show that The use of yellow pigment will increase the compressive strength by 10, 19 and 26 percent respectively. The use of green pigment respectively 13, 28 and 42%, blue pigment respectively 6, 11 and 24% and red pigment respectively 6, 9 and 13% will reduce the compressive strength of concrete. The use of pigment will reduce the wear resistance of concrete. This resistance reduction in red pigment is equal to 9, 16 and 19 with percentages of 3, 5 and 7 respectively, in yellow pigment it is equal to 9, 13 and 16, in green pigment it is equal to 19, 30 and 37 and in blue pigment it is equal to . It will be 13, 22 and 32 percent. Therefore, concrete with yellow pigment can be used in flooring and urban roads, but other pigments can only be used in urban walls.

Keywords

Colored concrete, compressive strength, tensile strength, abrasion resistance, water absorption.

۱-مقدمه

بتن رنگی، در چند دهۀ اخیر از جمله طرح‌های نوین تحقیقاتی در حوزۀ راه و ساختمان محسوب می‌شود. ساخت و پرداخت آسان بتن رنگی و طیف وسیع کاربردی آن موجب شده است موردتوجه قرار بگیرد [۱-۵]. در عمده سازه‌های شاخص شهری همچون پل‌ها، المان‌ها ، بناهای عمومی، فضاهای شهری و همچنین در صنعت ساختمان از بتن استفاده می‌شود که علاوه بر کارکرد سازه‌ای نقش نمای اصلی را نیز ایفا می‌کند، حال آنکه بتن رنگی به‌واسطه رنگین‌بودن و پالت رنگی نامحدود خود موجب غنای بصری و زیباسازی شهری نیز می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که رنگ یکی از جنبه های مهم زندگی شهری است که فضاهای شهری را سامان می‌بخشد و باعث افزایش کیفیت و کارایی زندگی شهری می‌شود[۶-۱۰]. پالت رنگی بتن تا قبل از استفاده رنگ‌دانه‌های بتن به دو رنگ سیاه و سفید محدود می‌شد. با تولید رنگ‌دانه‌های بتن، پالت رنگی متنوع و گسترده‌ای در اختیار مصالح از جنس بتن قرار گرفت[۱۱]. روش تولید بتن رنگی اساساً تفاوتی با تولید بتن معمولی ندارد و رنگ‌دانه به‌آسانی به مخلوط اضافه می‌شود. البته باید همۀ الزامات در آیین‌نامه‌های ASTM C494، AASHTO M 194، ACI 303 و ASTM C979 رعایت شوند [۱۲-۱۵]. لازمۀ یک بتن سخت‌شده، داشتن مقاومت فشاری کافی و رضایت‌بخش است. مقاومت فشاری فقط به این منظور نیست که بتن بتواند یک تنش فشاری معین را تحمل کند بلکه به دلایل بسیاری، خواص مطلوب بتن، متناسب با مقاومت فشاری آن است و در کل مقاومت فشاری را به‌عنوان یک شاخص از کیفیت کلی به کار می‌برند [۴]. لی هیون سو[1] و همکارانش در پژوهشی، تأثیر رنگدانه های اکسید آهن بر خصوصیات بلوک‌های بتنی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای ساخت بتن‌های قهوه‌ای رنگ به وسیله اکسید آهن و افزودن جایگزین بخشی از سیمان در بتن اقدام بعمل آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که تا ۴٪ اضافه نمودن پودر اکسید آهن به جای سیمان باعث کسب مقاومت فشاری ۹۰ درصدی بتن رنگی نسبت به نمونه بدون افزودنی خواهد شد[۱۶]. در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از رنگ‌دانۀ بتن که باعث زیبایی و دیگر خواص در بتن می‌شود علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت سایشی و آزمایش جذب آب بتن معمولی بررسی شده و به مطالعۀ و آزمایش آن‌ها (با میزان ۳٪، ۵٪، ۷٪ رنگ‌دانه بتن و یک نمونه

1-Hyun Soo Lee

شکل ۱: نمونه‌هایی از کاربرد بتن رنگی در فضاهای شهری [۱۷].

ساخته‌شده بتن معمولی) پرداخته شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر شامل ساخت تعداد ۶۵ نمونه بتن رنگی در طیف‌های قرمز، زرد، سبز و آبی مطابق با جدول شماره (۱) است. بدین ترتیب تعداد ۲۶ نمونهٔ مکعبی ۱۵X۱۵X۱۵ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، تعداد ۱۳ نمونهٔ استوانه‌ای ۱۵X۳۰ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت کششی ۲۸ روزه به روش برزیلی، تعداد ۱۳ نمونهٔ مکعبی ۱۰X۱۰X۱۰ سانتی‌متر ۲۸ روزه برای سنجش جذب آب بتن سخت‌شده و تعداد ۱۳ نمونهٔ مکعبی ۵X۱۰X۱۰ سانتی‌متر ۲۸ روزه برای سنجش دوام بتن در برابر سایش تهیه و ساخته شده است.

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، میزان اختلاط اجزای بتن (طرح اختلاط) به روش آئین‌نامهٔ ACI-211 محاسبه شد که بر اساس نوع و جنس مصالح، به روش سعی و خطا بهینه‌یابی شده است[۱۸].

۲-۲- مصالح مصرفی

۲-۲-۱- سنگ‌دانه

همه سنگ‌دانه‌های مصرفی از جنس گرانیت و بدون هرگونه سنگ‌دانه سوزنی یا پولکی‌شکل هستند. برای جلوگیری از نفوذ خاک در بتن، همهٔ سنگ‌دانه‌های مصرفی شستشو شده‌اند و عاری از هرگونه گل‌ولای بوده است. همهٔ الزامات استفاده از سنگ‌دانه طبق استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۳۰۲ (برگرفته از استاندارد ASTM C 33/C 33M) [۱۹] رعایت شده است [۲۰].

جدول ۱: طرح اختلاط استفاده‌شده برای انجام آزمایش

ردیف	نام	سیمان‌سفید	ماسه	شن	رنگ‌دانه	آب	فوق روان‌کننده	توضیحات
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	
۱	Control	۴۵۰	۱۲۸۰	۷۲۰	۰	۲۲۵	۴/۵	شاهد
۲	Red-3%	۴۳۶/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۱۳/۵	۲۲۵	۴/۵	قرمز
۳	Red-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵	
۴	Red-7%	۴۱۸/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۳۱/۵	۲۲۵	۴/۵	
۵	Yellow-3%	۴۳۶/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۱۳/۵	۲۲۵	۴/۵	زرد
۶	Yellow-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵	
۷	Yellow-7%	۴۱۸/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۳۱/۵	۲۲۵	۴/۵	
۸	Green-3%	۴۳۶/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۱۳/۵	۲۲۵	۴/۵	سبز
۹	Green-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵	
۱۰	Green-7%	۴۱۸/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۳۱/۵	۲۲۵	۴/۵	
۱۱	Blue-3%	۴۳۶/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۱۳/۵	۲۲۵	۴/۵	آبی
۱۲	Blue-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵	
۱۳	Blue-7%	۴۱۸/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۳۱/۵	۲۲۵	۴/۵	

جدول ۲: مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های آزمایش‌شده

ردیف	شرح آزمایش	شمارهٔ استاندارد	نمونهٔ ۷ روزه	نمونهٔ ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتی‌متر)
۱	تعیین مقاومت فشاری بتن	ASTM-C109	۱۳	۱۳	۱۵x۱۵x۱۵ مکعبی
۲	تعیین مقاومت کششی	ASTM-C496	-	۱۳	۱۵x۳۰ استوانه‌ای
۳	جذب آب بتن سخت‌شده	ASTM-C642	-	۱۳	۱۰x۱۰x۱۰ مکعبی
۴	تست سایش بتن	ASTM-C779	-	۱۳	۵x۱۰x۱۰ مکعبی

الف- SSD کردن سنگ‌دانه

همه سنگ‌دانه‌های مصرفی پس از شستشو به مدت ۲۴ ساعت درون آب غوطه‌ور شده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت از آب خارج شده‌اند و درون ظروفی که در برابر حرارت مقاوم باشند به ضخامت ۲ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند. سپس در دستگاه Oven[1] در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به حالت SSD[2] درآمده‌اند [۲۱].

ب- دانه‌بندی سنگ‌دانه

دانه‌بندی سنگ‌دانه یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت بتن است. برای دانه‌بندی سنگ‌دانه طبق استاندارد ASTM C136 عمل شده است [۲۲].

نمودار منحنی دانه‌بندی

برای رسم نمودار منحنی دانه‌بندی ابتدا باید جدول دانه‌بندی را تکمیل کرد. نمودار منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه استفاده‌شده در نمودار شماره (۱) مشخص شده ا

ج-مدول نرمی ماسه

مدول نرمی مصالح مورداستفاده در پژوهش طبق جدول شماره(۴) انجام گرفته است.

د- وزن مخصوص سنگ‌دانه

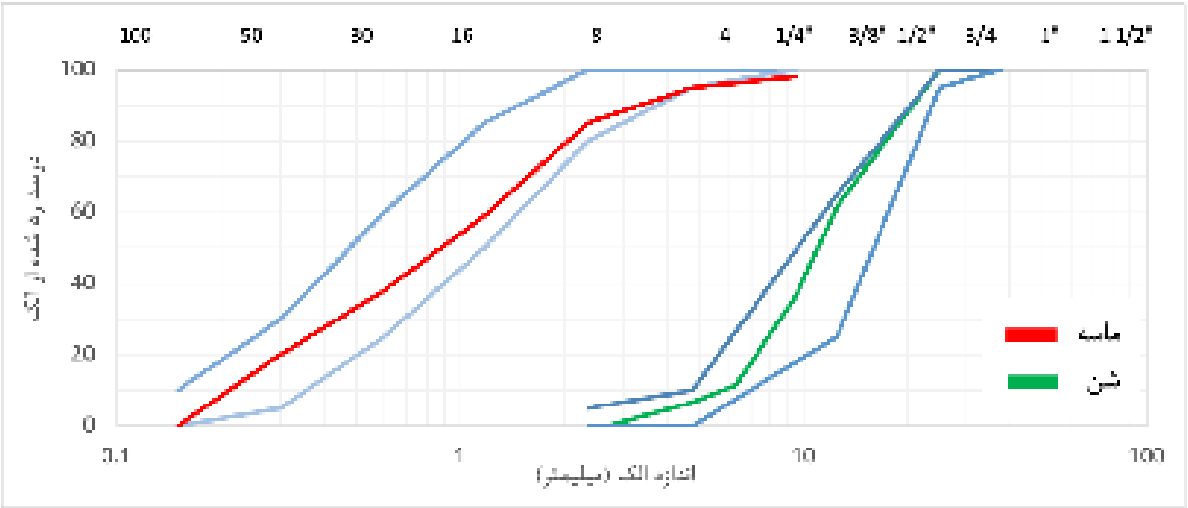
وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM C128 /

۱- دستگاه گرمخانه
۲- سنگ‌دانه با منافذ اشباع با سطحی خشک

جدول ۳: مشخصات دانه‌بندی سنگ‌دانه (مأخذ: نگارندگان)

شماره الک	طول ضلع الک برحسب میلی‌متر	وزن مصالح باقیمانده بر روی الک برحسب گرم	درصد مصالح باقی‌مانده روی الک	درصد مصالح ردشده از الک
۳/۴"	۱۹	۰	۰	۱۰۰
۱/۲"	۱۲/۵	۹۰/۵	۹/۰۵	۹۵/۹۵
۴	۴/۷۵	۲۱۰	۲۱	۶۹/۹۵
۸	۲/۳۶	۱۷۴/۵	۱۷/۴۵	۵۲/۵
۱۶	۱/۱۸	۱۵۶/۵	۱۵/۶۵	۳۶/۸۵
۳۰	۰/۶	۱۲۴	۱۲/۴	۲۴/۴۵
۵۰	۰/۳	۱۱۸/۵	۱۱/۸۵	۱۲/۶
۱۰۰	۰/۱۵	۸۱	۸/۱	۴/۵
Pan*	-	۴۵	۴/۵	۰

*زیر الک



نمودار ۱: دانه‌بندی شن و ماسه استفاده‌شده برای ساخت بتن و انطباق آن با محدودهٔ استاندارد ASTM-C33

جدول ٤: مدول نرمی ماسه

درصدهای مانده	وزن مانده روی الک		نمونهٔ الک
	همهٔ الک‌ها	یک الک	
۲۴/۳	۲۱۰	۲۱۰	۴
۴۴/۵	۳۸۴/۵	۱۷۴/۵	۸
۶۲/۶	۵۴۱	۱۵۶/۵	۱۶
۷۶/۹	۶۶۵	۱۲۴	۳۰
۹۰/۶	۷۸۳/۵	۱۱۸/۵	۵۰
–	–	۸۱	۱۰۰
–	–	–	Pan
۲۹۸/۹	–	۸۶۴/۵	وزن الک
۲۹۸/۹÷۱۰۰=۲/۹۸			مدول نرمی

C127 و میزان جذب آب در جدول شماره (۵) ارائه شده است [۲۳ و ۲۴].

۲-۲-۲- سیمان سفید

سیمان مورداستفاده در طرح اختلاط، سیمان سفید پرتلند نی‌ریز با نرمی ۲۲۹۵۰ gr/cm است. مشخصات شیمیایی سیمان در جدول شماره (۶) موجود است.

۲-۲-۳- آب

آب نقش بسیار مهم در بتن دارد به همین جهت استفاده از آب مناسب در بتن همواره مورد توجه قرار گرفته است. آب به‌کاررفته در ساخت بتن باید پاک و عاری از هرگونه ناخالصی باشد. همچنین میزان اسیدی یا باز بودن (pH) آب باید بین ۶ تا ۸ باشد [۲۵]. آب مورداستفاده در پژوهش حاضر آب آشامیدنی شهرستان شیراز بوده که با آزمایش‌های انجام‌شده طبق استاندارد ASTM D1067 میزان غلظت یون هیدروژن یا pH آب ۷/۸۰ است [۲۶].

۲-۲-٤- افزودنی

الف- فوق روان‌کننده

در این پژوهش از افزودنی فوق روان‌کننده بر پایهٔ پلی کربوکسیلیک اتر[1] (طبق استاندارد ASTM C494 و ASTM C107) که رنگی شفاف مایل به قهوه‌ای دارد، استفاده شده است [۱۳ و ۲۷].

ب- رنگ‌دانه

رنگ بتن استفاده‌شده در این پژوهش به‌صورت پودر بوده و در طیف‌های قرمز، زرد، سبز و آبی است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی رنگ‌دانه‌های مصرفی در جدول ۸ و۹ ارائه شده است. حداقل زمان مخلوط‌شدن رنگ‌دانه در بتن ۳ دقیقه است. در هنگام استفاده از رنگ‌دانه باید نکات ایمنی رعایت شود. این پودرها به هیچ عنوان سمی نی‌بستند. طبق استاندارد ASTM حداکثر میزان استفاده از این پودر ۱۰٪ است که در غیر این صورت بتن با کاهش مقاومت همراه می‌شود. در پژوهش حاضر با میزان ۳٪، ۵٪، ۷٪ رنگ‌دانه بتن و

1-PCE

جدول ۵: مشخصات وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ‌دانه	حداکثر قطر سنگ‌دانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص خشک
شن	mm	%	kg/m³
	۱۹	۲/۳	۱۳۵۰
ماسه	۴/۷۵	۱/۵۷	۱۶۵۰

جدول ٦: ساختار شیمیایی سیمان سفید نی‌ریز (مأخذ: www.neyrizcement.ir)

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

جدول ۷: خصوصیات فیزیکی فوق روان‌کنندهٔ SP400(مأخذ:www.neyrizcement.ir)

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی‌رنگ	۱gr/cm^3/۱	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۵/۵۸	مایع	۰/۱تا۱ درصد وزن سیمان

همچنین یک نمونه ساخته‌شده بدون رنگ‌دانه (نمونه شاهد) مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته است.

۳- یافته‌ها

۳-۱-اسلامپ

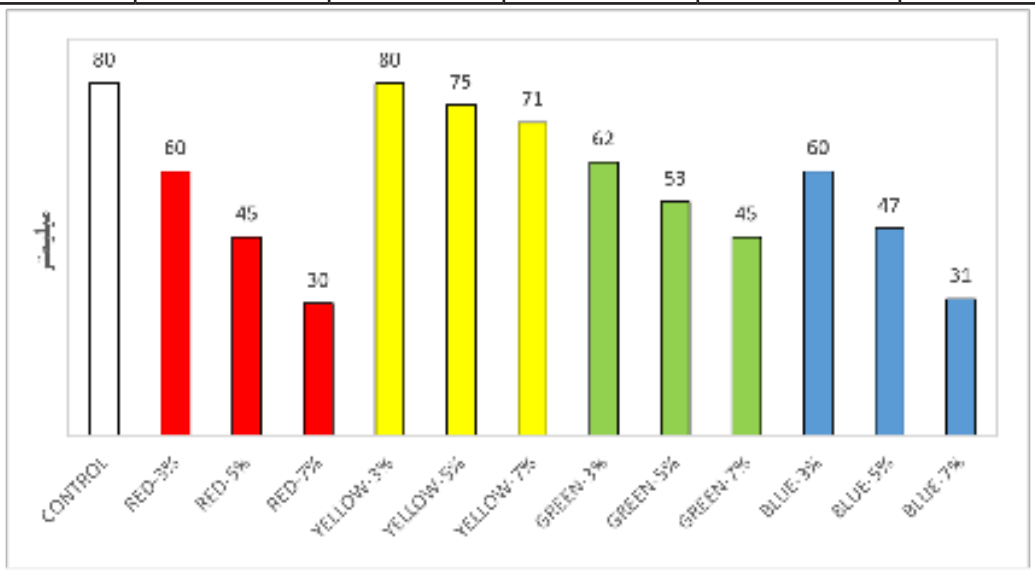
اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی میزان جریان‌پذیری یا روانی بتن تازه، پیش از استفاده در محل موردنیاز است[۳۴]. میزان اسلامپ در طرح مخلوط بتن‌های رنگی به‌دلیل جذب آب بالای رنگدانه‌ها و اندازهٔ بسیار ریز، عمدتاً کاهش می‌یابد. مطابق نمودار شماره(۲) که میزان اسلامپ هر طرح مخلوط را نمایش می‌دهد مشخص است که هر چه میزان استفاده از رنگدانه رنگی بیشتر باشد میزان اسلامپ کاهش می‌یابد؛ ولی میزان کاهش اسلامپ در طرح مخلوط بتن زرد به‌دلیل

جدول ۸: خصوصیات شیمیایی رنگ‌دانه‌های مختلف[۲۸-۳۳].

رنگ ظاهری	Cu_2O	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2
قرمز	-	٪ ۲/۲	٪ ۰/۶	٪ ۷/۴	٪ ۸۶	٪ ۱/۸
زرد	-	٪ ۲	٪ ۰/۲	٪ ۱/۳	٪ ۹۴	٪ ۰/۵
سبز	-	٪ ۱/۴	٪ ۱۵/۳	٪ ۱۱/۶	٪ ۴۱/۷	٪ ۲۸
آبی	٪ ۷۴	٪ ۳/۲	٪ ۹/۶	-	٪ ۵	٪ ۶/۲

جدول ۹ : خصوصیات فیزیکی رنگ‌دانه‌های مختلف[۲۸-۳۳].

وزن مخصوص	نماد شیمیایی	اندازهٔ دانه	سختی	میزان جذب آب	رنگ ظاهری
gr / cm^2		µm		٪	
۴/۱	Fe_2O_3	< ۲۵	۵ - ۴/۵	۰/۳۰	قرمز
۴/۳	Fe_3OH	< ۳۰	۵ - ۵/۵	۰/۵۰	زرد
۴	Fe_3O_4	< ۲۰	۳ - ۲/۵	۲	سبز
۳/۷	$Cu_3[OH\|CO_3]_2$	< ۱۲	۴ - ۳/۵	۱/۱	آبی



نمودار ۲: مقایسهٔ روانی طرح مخلوط‌های مقایسه‌شده

شکل ۲: اسلامپ طرح مخلوط‌های آزمایش‌شده

اندازهٔ ذرات بزرگ‌تر رنگدانه و سطح مخصوص ذرات آن (اکسید آهن زرد) در مقایسه با دیگر رنگدانه‌های رنگی از شدت کاهش اسلامپ بتن کاسته خواهد شد.

۳-۲- مقاومت فشاری بتن

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از بتن‌شکن ۲۰۰تنی دیجیتال با سرعت بارگذاری ۰/۸مگاپاسکال بر ثانیه استفاده شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵سانتی‌متر بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچهٔ آب مورد آزمایش فشاری قرار گرفت. میزان مقاومت فشاری به‌دست‌آمده در هر طرح مخلوط در جدول شماره (۱۰) ارایه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از رنگدانه برای طیف‌های رنگی قرمز، سبز و آبی در درصدهای بالا، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد، ولی این کاهش مقاومت در بتن با رنگدانه قرمزدر مقایسه با سایر نمونه ها چشمگیر نمی باشد. در طرح اختلاط ۳درصد زرد علاوه بر رنگ دهی مناسب، میزان افزایش مقاومت بتن ۷ و ۲۸ روزه، بیشتر از ۱۰ درصد مقاومت نمونه شاهد خواهد بود. همچنین به دلیل وجود درصد زیادی از عنصر اکسید آهن و دانه بندی مناسب تر در این رنگدانه، شاهد خواهیم بود که با افزایش هر چه بیشتر این رنگدانه در بتن، مقاومت فشاری افزایش می یابد. این افزایش مقاومت در سنین اولیه محسوس‌تر خواهد بود، به‌طوری که در طرح بتن با رنگدانه زرد ۷ درصد مقاومت فشاری ۷ روزه بیش از ۴۰درصد و مقاومت ۲۸ روزه بیش از ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. در طرح مخلوط بتن با رنگدانه سبز به دلیل استفاده از اکسید آهن و اندازهٔ بسیار ریز این رنگدانه، اُفت بسیار شدید مقاومت فشاری در بتن رخ می‌دهد به‌طوری که در طرح مخلوط سبز ۷ درصد مقاومت فشاری ۷ روزه بیش از ۶۰درصد و مقاومت ۲۸ روزه ۴۲درصد کاهش می‌یابد. در طرح مخلوط بتن آبی به‌دلیل اندازهٔ بسیار ریز این رنگدانه شاهد اُفت بسیار شدید مقاومت فشاری در بتن خواهیم بود. با افزایش هر چه بیشتر این رنگ‌دانه در بتن، مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت به‌طوری که در طرح مخلوط آبی ۷ درصد مقاومت فشاری ۷ روزه بیش از ۳۶درصد و مقاومت ۲۸ روزه ۲۴درصد کاهش می‌یابد.

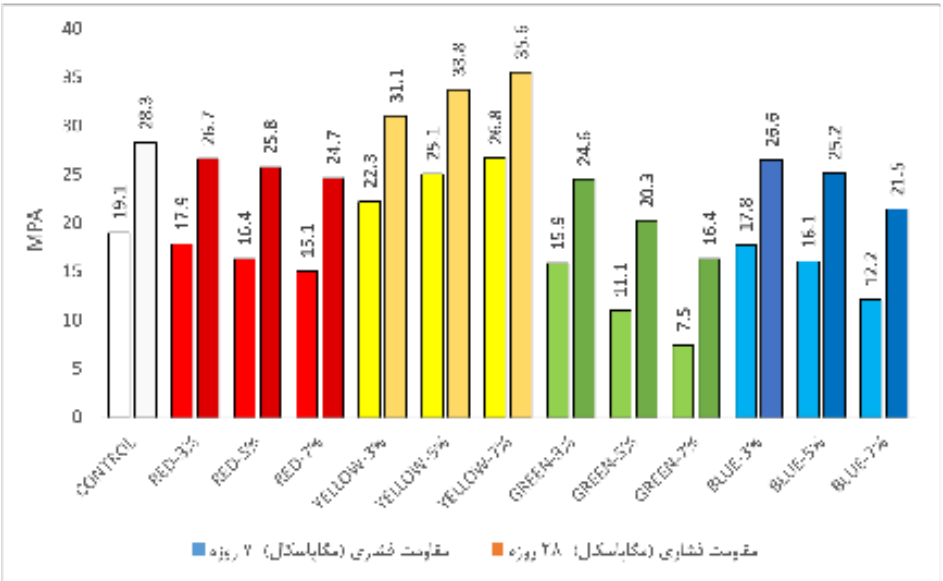
۳-۳-مقاومت کششی

آزمون کشش بتن به روش دونیم‌کردن نمونهٔ استوانه‌ای که به‌اختصار به روش برزیلی شناخته می‌شود، روشی برای تعیین مقاومت کششی بتن است. آزمایش مقاومت کششی بتن مطابق استاندارد ASTM-C496 انجام گرفته است. میزان مقاومت کششی به‌دست‌آمده در هر طرح مخلوط در جدول شماره (۱۱) ارائه شده است. در طیف رنگی قرمز و زرد علی‌رغم کاهش حجم سیمان به دلیل افزایش تراکم بین عناصر تشکیل‌دهندهٔ بتن و انسجام کافی بین ذرات تغییر محسوسی در میزان مقاومت کششی نخواهیم داشت. در طیف رنگی سبز و آبی میزان افت مقاومت کششی با افزایش مقادیر رنگدانه در بتن محسوس خواهد بود. علاوه بر آن جایگزینی رنگدانهٔ آبی و سبز به‌جای سیمان موجود در بتن به‌دلیل سختی و مقاومت کم عناصر شیمیایی آن می‌تواند باعث کاهش مقاومت کششی بین ذرات بتن شود.

شکل ۳: آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مکعبی ۷ و ۲۸ روزهٔ بتن‌های رنگی

جدول ۱۰: مقایسهٔ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

ردیف	نام طرح	اسلامپ	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		مقاومت فشاری (درصد)	
		میلی‌متر	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
1	CONTROL	80	19.1	28.3	-	-
2	RED-3%	60	17.9	26.7	-6.3	-5.7
3	RED-5%	47	16.4	25.8	-14.1	-8.8
4	RED-7%	31	15.1	24.7	-20.9	-12.7
5	YELLOW-3%	80	22.3	31.1	16.8	9.9
6	YELLOW-5%	75	25.1	33.8	31.4	19.4
7	YELLOW-7%	71	26.8	35.6	40.3	25.8
8	GREEN-3%	62	15.9	24.6	-16.8	-13.1
9	GREEN-5%	53	11.1	20.3	-41.9	-28.3
10	GREEN-7%	45	7.5	16.4	-60.7	-42.0
11	BLUE-3%	60	17.8	25.6	-6.8	-6.0
12	BLUE-5%	45	16.1	25.2	-15.7	-11.0
13	BLUE-7%	30	12.2	21.5	-36.1	-24.0



نمودار ۳: سنجش و مقایسهٔ میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مکعبی ۷ و ۲۸ روزه

شکل ٤: سنجش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای دارای رنگدانه‌های رنگی

جدول ۱۱: مقایسهٔ نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

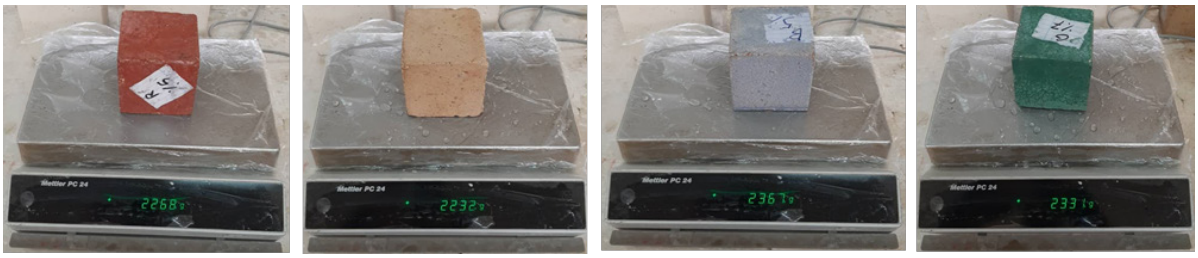
ردیف	نام طرح	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (درصد)
		۲۸ روزه	□
1	CONTROL	5.2	-
2	RED-3%	5	-3.8
3	RED-5%	4.8	-7.7
4	RED-7%	4.7	-9.6
5	YELLOW-3%	5.1	-1.9
6	YELLOW-5%	5	-3.8
7	YELLOW-7%	4.9	-5.8
8	GREEN-3%	4.5	-13.5
9	GREEN-5%	3.8	-26.9
10	GREEN-7%	2.9	-44.2
11	BLUE-3%	4.6	-11.5
12	BLUE-5%	4	-23.1
13	BLUE-7%	3.6	-30.8

۳-٤-میزان جذب آب

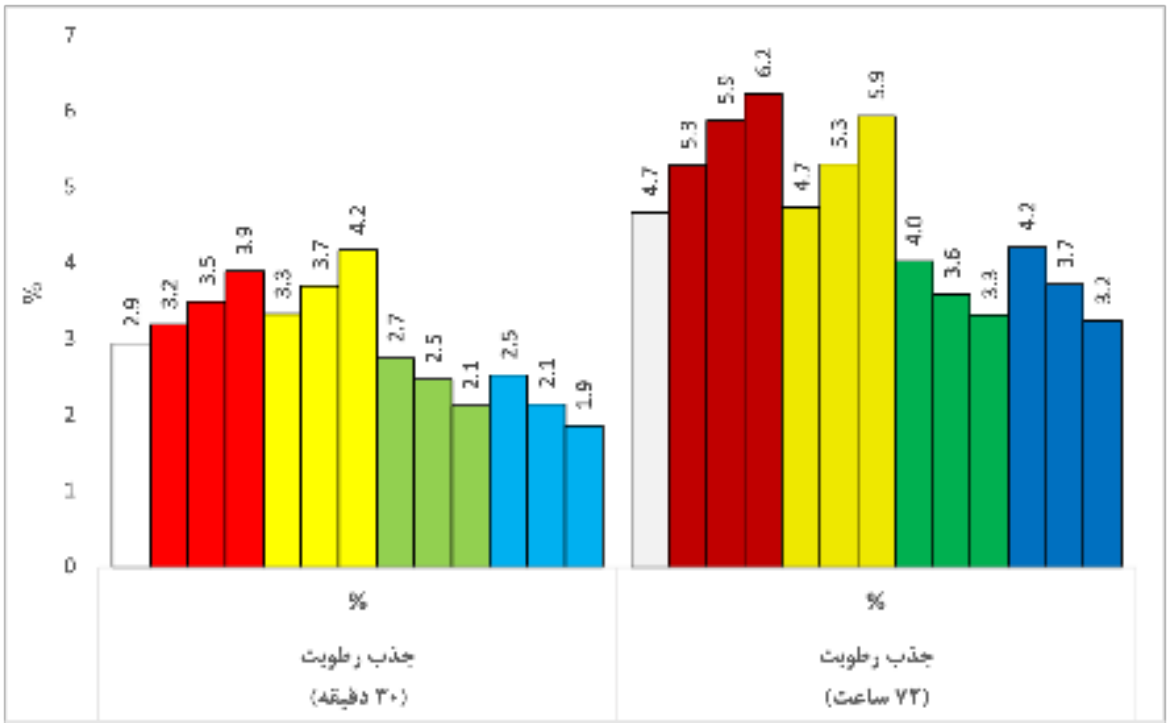
آزمایش جذب آب مطابق استاندارد ASTM-C642 انجام شده است. نمونه‌ها پس از خشک‌شدن در گرمای ۱۱۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت طی ۳۰ دقیقه (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعت (جذب آب ثانویه) در حوضچهٔ آب قرار گرفتند و وزن هرکدام از آن‌ها نیز یادداشت شد. بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که رنگدانه زرد و قرمز در جذب آب اولیه و ثانویه، جذب آب بیشتری را در مقایسه با نمونهٔ شاهد خواهند داشت؛ ولی افزودن رنگدانه آبی و سبز عمدتاً آب کمتری را نسبت به سیمان به خود جذب خواهند کرد به‌طوری که با افزایش درصد مصرفی رنگدانه در بتن، میزان جذب آب اولیه و ثانویه به‌دلیل افزایش تراکم ناشی از ریزدانه‌بودن رنگ‌دانه در مقایسه با ذرات سیمان کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش جذب آب در بتن‌های رنگی نشان می‌دهد نمونه‌های دارای طیف رنگی زرد و قرمز دارای جذب آب ثانویه بالای ۵درصد است؛ بنابراین در صورت استفاده از این طرح مخلوط در مجاورت تغییرات آب‌وهوایی گسترده به‌خصوص چرخه یخ‌زدگی باید از مکمل‌هایی نظیر حباب‌ساز یا ضدیخ استفاده کرد.

۳-۵- مقاومت سایشی بتن

مبنای تست سایش در این تحقیق، استاندارد ASTM-C779 است [۱۵]. سایش سطح رویهٔ نمونهٔ بتنی با ابعاد مذکور به‌وسیلهٔ استوانهٔ دوار فلزی زبر در شرایط استاندارد انجام شده است. چرخ دوار دستگاه با سرعت ثابت بر روی ۵۰۰ دور تنظیم و سپس نمونه، سایش شد. در پایان با اندازه‌گیری وزن نمونهٔ بتنی قبل و بعد از سایش و تفریق این دو از یکدیگر درصد ساییدگی را محاسبه کرده و نتایج موردبحث و مقایسه قرار گرفت. نمودار (۶) نحوهٔ آزمایش سایش بر روی نمونه‌های



شکل ۵: وزن گیری نمونه‌های بتن رنگی جهت تعیین میزان جذب آب در بتن سخت شده



نمودار ۵: سنجش مقاومت جذب آب نمونه‌های بتن دارای رنگدانه‌های رنگی

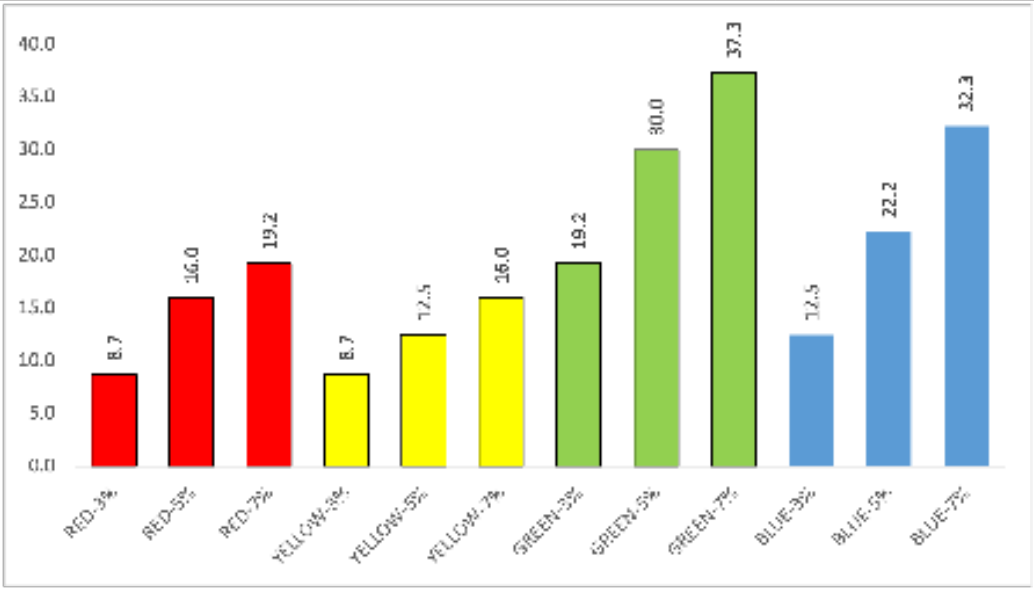
جدول ۱۲: میزان جذب آب نمونه‌های بتن رنگی در زمان‌های مختلف و مقایسه نتایج آن

ردیف	نام طرح	وزن نمونهٔ خشک	وزن نمونهٔ اشباع (۳۰ دقیقه)	وزن نمونهٔ اشباع (۷۲ ساعت)	جذب رطوبت (۳۰ دقیقه)	جذب رطوبت (۷۲ ساعت)
		گرم	گرم	گرم	٪	٪
1	CONTROL	2035	2095	2130	2.9	4.7
2	RED-3%	2098	2165	2209	3.2	5.3
3	RED-5%	2142	2217	2268	3.5	5.9
4	RED-7%	2180	2265	2316	3.9	6.2
5	YELLOW-3%	2131	2202	2232	3.3	4.7
6	YELLOW-5%	2185	2266	2301	3.7	5.3
7	YELLOW-7%	2204	2296	2335	4.2	5.9
8	GREEN-3%	2110	2168	2195	2.7	4.0
9	GREEN-5%	2143	2196	2220	2.5	3.6
10	GREEN-7%	2256	2304	2331	2.1	3.3
11	BLUE-3%	2254	2311	2349	2.5	4.2
12	BLUE-5%	2282	2331	2367	2.1	3.7
13	BLUE-7%	2310	2353	2385	1.9	3.2

بتنی ساخته‌شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایش‌شده مشخص شد که افزودن رنگدانه رنگی در بتن به دلیل کاهش حجم سیمان، اُفت دوام سایشی را به دنبال دارد. این کاهش در نمونه‌های دارای طیف رنگی قرمز و زرد به‌دلیل وجود اکسید آهن، کمتر ولی در طیف رنگی سبز و آبی درصد ساییدگی بیشتر خواهد بود. توصیه می‌شود برای استفاده از بتن رنگی ساخته‌شده با رنگدانه رنگی از دیگر پوشش‌های تقویتی نظیر لایهٔ اپوکسی استفاده شود تا ضمن حفظ کیفیت و دوام سایشی بتن به دلیل خاصیت جلادهندگی اپوکسی، رنگ بتن چشم‌نوازتر و درخشندگی آن بیشتر شود.

جدول ۱۳ : مقایسهٔ تست سایش نمونه‌های دارای رنگدانه رنگی

ردیف	نام طرح	وزن ساییده‌شده نمونه اول	وزن ساییده‌شده نمونه دوم	میانگین وزن ساییده‌شده	درصد ساییدگی
		گرم	گرم	گرم	%
1	CONTROL	2	2.2	1.2	0.0
2	RED-3%	2.2	2.4	3.2	8.7-
3	RED-5%	2.6	2.4	5.2	16.0-
4	RED-7%	2.6	2.6	6.2	19.2-
5	YELLOW-3%	2.3	2.3	3.2	8.7-
6	YELLOW-5%	2.4	2.4	4.2	12.5-
7	YELLOW-7%	2.6	2.4	5.2	16.0-
8	GREEN-3%	2.5	2.7	6.2	19.2-
9	GREEN-5%	3.1	2.9	0.3	30.0-
10	GREEN-7%	3.4	3.3	4.3	37.3-
11	BLUE-3%	2.4	2.4	4.2	12.5-
12	BLUE-5%	2.7	2.7	7.2	22.2-
13	BLUE-7%	3.0	3.2	1.3	32.3-

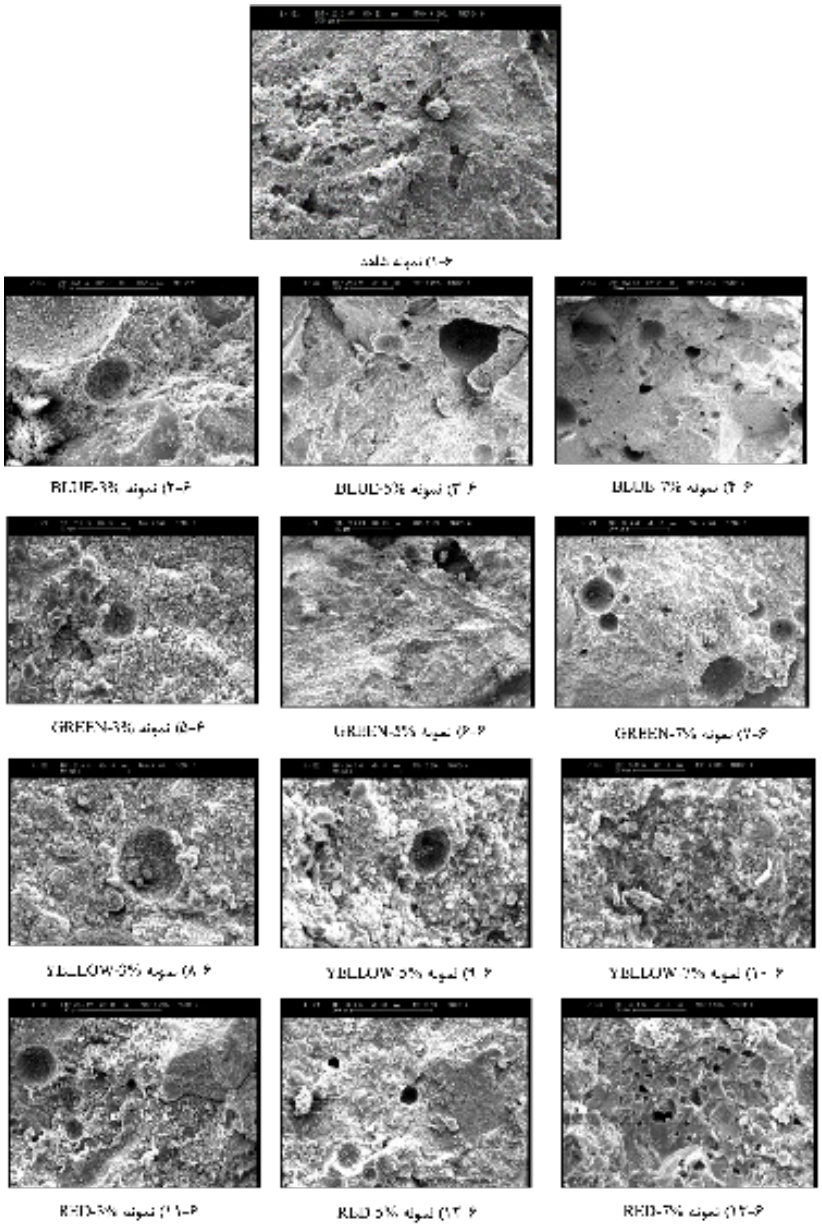


نمودار ٦: مقایسهٔ درصد ساییدگی نمونه‌های رنگی در مقایسه با نمونهٔ شاهد

٦-٣- عکس برداری الکترونی روبشی (SEM)

جهت بررسی ریز ساختارشکست نمونهها، قطعات بتنی شکسته شده در ابعاد حدود۲ تا ۳ سانتی متر جمع آوری و تحت عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) قرار گرفتند. شکلهای شماره ۶ وضعیت منافذ، تراکم و ساختار موجود در بتن با نسبتهای مختلف رنگدانه را نمایش میدهند که در مقیاس ۱۰۰۰X برابر بزرگنمایی، نمایش داده شده است.

مطابق با شکل های شماره ۶ مشخص گردید که نوع رنگدانه و خصوصیات شیمیایی آن در ترکیب بتن از اهمیت زیادی برخوردار است. بطوریکه عدم پخش نامناسب باعث تشکیل کلوخه و بروز ترک یا حفرات در سطح بتن میگردد. همچنین استفاده از میزان بهینه رنگدانه در ساختار بتن و پخش مناسب علاوه بر توجیه اقتصادی باعث اختلال در عمل هیدراتاسیون سیمان نخواهد شد. این مهم سبب افزایش تراکم، ایجاد فضایی همگن و کاهش تخلخل بتن میشود که باعث بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خواهد شد. افزودن مقادیر بیش از حد رنگدانه می‌تواند باعث تداخل در پخش مناسب، تاثیر منفی در واکنش پذیری و هیدراتاسیون سیمان، کاهش کارایی بتن و جلوگیری از رشد کافی کریستال‌های هیدروکسید کلسیم شود که در نهایت باعث ضعف مقاومت بتن یا شکست زودرس خواهد شد. مطابق با تصاویر شماره ۶-۲ تا ۶-۷ که مربوط به طرح بتن آبی و سبز رنگ میباشد مشخص شد که آزوریت و اکسید سنتز آهن (اکسید مصنوعی) مانع رشد و تشکیل اترینگ سیمانی و هیدروکسید کلسیم



شکل ٦: تصاویر SEM

در بتن می باشد. همچنین در صورت استفاده از درصد بالای رنگدانه، این عارضه شدیدتر خواهد شد. همچنین عدم پخش نامناسب رنگدانه در بتن باعث تشکیل حفره در سطح موئینه بتن خواهد شد که این حفرات منجر به شکست زودرس می شوند.

تصاویر شماره۶-۸ تا ۶-۱۰ مربوط به بتن زرد رنگ می باشد. باتوجه به نتایج مقاومت فشاری نمونهها در سنین مختلف و تصاویر ضمیمه شده این طرح، مشخص گردید که استفاده از اکسید آهن زرد بدلیل سختی و مدول نرمی بالا (ریزدانه بودن) باعث افزایش تراکم یا کاهش تخلخل بتن گردیده است. همچنین مشخص گردید که استفاده از این رنگدانه تاثیر منفی بر روی هیدراتاسیون سیمان ندارد بطوریکه با استفاده از حداکثر درصد مصرفی رنگدانه نیز شاهد اختلالی در تشکیل هیدروکسید کلسیم سیمان نخواهیم بود.

تصاویر شماره ۶-۱۱ تا ۶-۱۳ مربوط به بتن قرمز می باشد. با توجه به اینکه اکسید آهن قرمز آب دوست و جاذب رطوبت میباشد، این مهم باعث گردیده تا ذرات رنگدانه در بتن رطوبت را به خود جذب نموده و تشکیل کلوخه دهند. در صورتی که پخش یک دست و مناسب این ماده در بتن میتوانست احتمال افزایش تراکم و یا حتی افزایش مقاومت فشاری را در پی داشته باشد.

۳-۷- ارزیابی خصوصیات رنگی

در جدول شماره (۱۴) کمیت های رنگی بتن های چهار رنگ با رنگدانه های ۳ ، ۵ و ۷ درصد ارایه گردیده است.

٤- نتیجه‌گیری

استفاده از رنگدانه سبز بیشترین اُفت مقاومت فشاری را بدنبال دارد. بطوریکه افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد از این رنگدانه در بتن مقاومت فشاری ۲۸ روزه را به ترتیب ۱۳، ۲۸ و ۴۲ درصد کاهش میدهد. همچنین استفاده از رنگدانه آبی باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن به میزان به ترتیب ۶، ۱۱ و ۲۴ درصد خواهد شد. استفاده از رنگدانه قرمز باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان به ترتیب ۶، ۹ و ۱۳ درصد خواهد شد و استفاده از رنگ زرد باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان به ترتیب ۱۰، ۱۹ و ۲۶ در صد خواهد شد. بنابراین می توان از بتن با رنگدانه زرد در کف سازی و معابر شهری استفاده نمود ولی از رنگدانه دیگر فقط در جداره شهری که مقاومت فشاری بالایی نیاز ندارند می توان استفاده نمود. استفاده از رنگدانه های قرمز و زرد در بتن تغییر محسوسی در میزان مقاومت کششی ایجاد نخواهند کرد ولی استفاده از رنگدانه های سبز و آبی میزان کاهش مقاومت کششی محسوس خواهد بود. استفاده از رنگدانه باعث کاهش مقاومت سایشی بتن خواهد شد. این کاهش مقاومت در رنگدانه قرمز با درصد های ۳، ۵ و ۷ به ترتیب برابر ۹، ۱۶ و ۱۹،در رنگدانه زرد برابر ۹، ۱۳ و ۱۶، در رنگدانه سبز ۱۹، ۳۰ و ۳۷ و در رنگدانه آبی برابر ۱۳، ۲۲ و ۳۲ درصد خواهد شد.همان طور که ملاحظه می شود بیشترین کاهش مقاومت سایشی مربوط به رنگدانه سبزو کمترین کاهش مقاومت سایشی مربوط به رنگدانه زرد خواهد بود بنابراین می توان از بتن با رنگدانه زرد در کف سازی و جداره های شهری استفاده نمود. بتن با رنگدانه های زرد و قرمز جذب آب اولیه و ثانویه بیشتری نسبت به بتن با رنگدانه های سبز و آبی دارند، بنابراین در سازه های آبی که جنبه زیباسازی شهری دارند مانند آبنماهای شهری بتن با رنگدانه های سبز و آبی توصیه می گردد.

جدول ١٤: کمیت های رنگی L*a*b*C*h

رنگ	درصد	L	a	b	C	h
قرمز	۷	۶۵	۳۳	۲۷	۴۲	۴۰
	۵	۶۹	۳۳	۲۶	۴۲	۳۹
	۳	۶۷	۲۸	۲۲	۳۶	۳۸
سبز	۷	۷۲	-۲۴	۱۶	۲۹	۱۴۷
	۵	۸۰	-۲۱	۱۷	۲۷	۱۴۱
	۳	۸۲	-۱۸	۱۹	۲۶	۱۳۴
آبی	۷	۳۷	۵	-۳۵	۷۲	۲۱۵
	۵	۵۱	۲	-۲۴	۶۲	۲۱۶
	۳	۷۰	۰	-۱۹	۳۹	۲۱۸
زرد	۷	۸۰	۱۰	۵۷	۵۸	۸۰
	۵	۸۹	۳	۴۴	۴۴	۸۷
	۳	۸۹	۳	۳۴	۳۴	۸۵

۵- مراجع

1. G.Lemaire,G. Escadeillas,E. Ringot, Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. Constr. Build. Mater. 19(2005), 604-611
2. D. F. Lin,H.L. Luo, Fading and color changes in colored asphalt quantified by the image analysis method. Constr.Build. Mater. 18(2004),255-261.
3. C. W. Planje, Colored ceramic aggregate for decorative concrete. J. Am. Ceram. Soc. 20, (1937) 90-96.
4. Naderi, M., Qodousian, O., Mollayi Dehshali, H. (2011). Effects of Type and Dosage of Pigment on the Concrete Compressive Strength and Its Prediction by the Fuzzy Logic. Journal of Color Science and Technology, 5(4), 315-324.
5. Sharifi, M., sheibani, H. (2022). The Effect of Mineral Pigments on the Compressive Strength of Colored Concrete by Focusing on the Role of Improved Color Palette in Current Cities of Iran. Journal of Color Science and Technology, 16(1), 81-92.
6. Avaznejad, F., Sheibani, H. (2022). Studying and Reviewing the Color in Urban Placemaking. Journal of Studies in Color World, 12(1), 71-86.
7. Avaznejad, F., Sheibani, H. (2019). Color in Arsen Zandieh Shiraz. Journal of Studies in Color World, 9(2), 43-52.
8. Lenclos J. P. & Lenclos D. Colors of the world. Norton and & Company: New York; 2004.
9. T. Porter, B. Mikellides, Color for Architecture. London: Studio Vista, 1976.
10. O'Connor, Z. Digital Colour Mapping. In T. Porter & B. Mikellides (Eds.), Colour for Architecture Today. New York: Taylor & Francis; 2009.
11. H.Janpoor, A. Alah Verdi. A review on performance of different organic coatings in protecting concrete structures against aggresive agents. Journal of Studies in Color World, 1(4), (2012) 9-14.
12. American Standards for Testing and Materials, ASTM C979 / C979M-10 Standard specification for pigments for integrally colored concrete.
13. American Standards for Testing and Materials, ASTM C494-10a/C494M-10a Standard specification for chemical admixtures for concrete.
14. American Concrete Institute, ACI303.1-97, Standard specification for cast-in-place architectural concrete.
15. American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO M194-chemical admixtures for concrete.
16. Hyun-Soo Lee, Myoung-Youl Yu and Jae-Yong Lee, “Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks”, Cement & Concrete Research, Ed. Elsevier,)2003). 1889–1896.
17. H. Sheibani, F. Avaznejad, "The color palette of the city", Norouzi publications, 2017.
18. American Standards for Testing and Materials, ACI 211.9R-18, Standard Concrete Technologh And Mix Design
19. American Standards for Testing and Materials, ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates.
20. Iran national standards, INSO. 302, 3rd. Revision, 2015.
21. American Standards for Testing and Materials, ASTM C566 Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.
22. American Standards for Testing and Materials, ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregatcs.
23. American Standards for Testing and Materials, ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
24. American Standards for Testing and Materials, ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
25. D.Mostoufinejad.Concrete mixed design and technology. Isfahan Industrial University.Vol.38.2014.
26. American Standards for Testing and

Materials, ASTM D1067, Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water.
27. American Standards for Testing and Materials, ASTM C107, Method of Panel Spalling Testing High-Duty Fireclay Brick (Withdrawn 1994).
28. K.A. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, Increasing Concrete Durability with High-Reactivity Metakaolin, Cem. Concr. Compos. (2011) 479–484.
29. D.D. Vu, P. Stroeven, V.B. Bui, Strength and Durability Aspects of Calcined Kaolin-Blended Portland Cement Mortar and Concrete, Cem. Concr. Compos. (2010) 471–478.
30. L.H. Kallai, Thermally Modified Clays, In: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), Handbook of Clay Science, Vol. 5a, Elsevier Ltd., Oxford, Uk, (2017) 411-433.
31. P.B. Malla, S. Devisetti, Novel Kaolin Pigment for High Solids Ink Jet Coating, Pap. Technol. 46 (8) (2005) 17–27.
32. A.C. Larson, R.B. Von Dreele, General Structure Analysis System (Gsas), Los Alamos National Laboratory Report Laur, (2017), 86–748.
33. A.C. Scheinost, D.G. Schulze, U. Schwertmann, Diffuse Reflectance Spectra of Al Substituted Goethite: A Ligand Field Approach, Clays Clays Miner. (2016) 156–164.
34. Anahí López, T. Ramlochan, A. Boddy, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, Investigating color stability in mortar and concrete. Compos. (2019) 479–484.