

Comparative Comparison of Compressive Strength and Slump of Colored Concrete with Chemical, Mineral, and Composite Pigments to Improve Visual Quality in Urban Landscape Design

Hamidreza Sheibani¹, Farhad Avaznejad^{*2}, Mahmoudreza Golshan³, Khalil Hajipoor¹

1- Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, P.O. Code: 7188637911, Shiraz, Iran.

2- Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technical and Vocational University (TVU), P.O. Code: 1435761137, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technical and Vocational University (TVU), P.O. Code: 1435761137, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09-07-2025

Accepted: 14-12-2025

Available online: 05-01-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167588.1263

Keywords:

Colored Concrete

Chemical Pigment

Mineral Pigment

Concrete Workability

Compressive Strength

Urban Design

ABSTRACT

Colored concrete can be an effective tool for improving visual readability in urban design projects. The present study aims to conduct a comparative study of the effect of chemical, mineral, and composite pigments on the mechanical properties of concrete, including compressive strength and slump, to utilize colored concrete in urban design and landscape. In this regard, experiments were conducted on concrete samples with chemical pigments (in red, yellow, green, and blue), composite pigments (turquoise), and mineral pigments (limonite). The results of the experiments show that adding pigments significantly affects the flowability (slump) and compressive strength of concrete. In particular, the use of chemical pigments reduces the flowability and compressive strength of concrete, with the reduction more evident at higher pigment percentages. The yellow pigment had the least negative effect on flowability and compressive strength among the colors. In contrast, limonite mineral pigment increased the compressive strength of concrete, especially at 5 and 10 % percentages.

*Corresponding author: * FAvaznejad@tvu.ac.ir



مقایسه تطبیقی مقاومت فشاری و روانی بتن رنگی با رنگ‌دانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی در راستای ارتقا کیفیت دیداری در طراحی منظر شهری

حمیدرضا شیبانی^۱، فرهاد عوض نژاد^۲، محمودرضا گلشن^۳، خلیل حاجی‌پور^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرمت و حفاظت میراث شهری، گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۸۸۶۳۷۹۱۱

۲- مربی، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

۳- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

۴- استادیار، گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۸۸۶۳۷۹۱۱

چکیده

بتن رنگی در پروژه‌های طراحی شهری می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای ارتقای خوانایی دیداری مورد استفاده قرار گیرد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تطبیقی اثر رنگ‌دانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری و روانی، به منظور بهره‌گیری از بتن رنگی در طراحی و منظر شهری پرداخته است. در این راستا، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های بتن با رنگ‌دانه‌های شیمیایی (در رنگ‌های قرمز، زرد، سبز و آبی)، رنگ‌دانه‌های ترکیبی (فیروزه‌ای) و رنگ‌دانه‌های معدنی (لیمونیت) انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن رنگ‌دانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر روانی و مقاومت فشاری بتن دارد. به‌ویژه، استفاده از رنگ‌دانه‌های شیمیایی باعث کاهش روانی و مقاومت فشاری بتن می‌شود، به‌طوری که در درصد‌های بالاتر رنگ‌دانه‌ها این کاهش بیشتر مشهود است. رنگ‌دانه زرد نسبت به سایر رنگ‌ها کمترین تأثیر منفی را بر روانی و مقاومت فشاری داشت. در مقابل، رنگ‌دانه معدنی لیمونیت موجب افزایش مقاومت فشاری بتن، به‌ویژه در درصد‌های ۵ و ۱۰ درصد شدند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167588.1263

واژه‌های کلیدی:

بتن رنگی

رنگ‌دانه شیمیایی

رنگ‌دانه معدنی

روانی بتن

مقاومت فشاری

طراحی شهری

۱- مقدمه

بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی، حدود ۷۰ درصد از کل مصالح صنعت راه و ساختمان را تشکیل می‌دهد و علاوه بر نقش سازه‌ای، در نمای بیرونی و سیمای شهری نیز اهمیت دارد. در دهه‌های اخیر، بتن رنگی با بهره‌گیری از پالت رنگی متنوع و سهولت اجرا، به عنوان رویکردی نوین در معماری و شهرسازی مطرح شده و موجب ارتقای کیفیت زیبایی‌شناختی فضاهای شهری گردیده است (شکل ۱) (۱، ۲). با وجود این، در بسیاری از پروژه‌های شهری به مقوله رنگ کمتر توجه شده، در حالی که رنگ یکی از عناصر بنیادین کیفیت فضایی، انسجام دیداری و هویت‌بخشی به شهرها محسوب می‌شود (۳-۷). ورود رنگدانه‌های معدنی تحول بزرگی در تولید بتن ایجاد کرد و امکان دستیابی به طیف وسیعی از رنگ‌ها را فراهم نمود (۸). عوامل متعددی همچون اندازه ذرات رنگدانه، نسبت آب به سیمان، سطح ویژه سیمان، ویژگی سنگدانه‌ها و رنگ اولیه سیمان بر رنگ نهایی بتن اثرگذارند (۹). فرایند ساخت بتن رنگی تفاوت چندانی با بتن معمولی ندارد و تنها با افزودن رنگدانه انجام می‌شود، اما رعایت الزامات آیین‌نامه‌های فنی نظیر ASTM C494، AASHTO M194، ACI 303 و ASTM C979 برای دستیابی به کیفیت مطلوب الزامی است (۲۰-۱۰). افزودن رنگدانه می‌تواند بر خواص مکانیکی و دوام بتن اثر بگذارد. نوع، منشأ و میزان رنگدانه مصرفی در مقاومت فشاری، کششی، سایشی و جذب آب بتن نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ موضوعی که در کاربردهای شهری حساسیت بالایی دارد. هرچند پژوهش‌های متعددی در زمینه رنگدانه‌ها انجام شده، اما هنوز مطالعه‌ای جامع برای مقایسه هم‌زمان رنگدانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی ارائه نشده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه اثر این رنگدانه‌ها بر روانی^۱ و مقاومت فشاری بتن برای ارزیابی نقش آن‌ها در دوام و کیفیت دیداری فضاهای شهری است.

۲- بخش تجربی

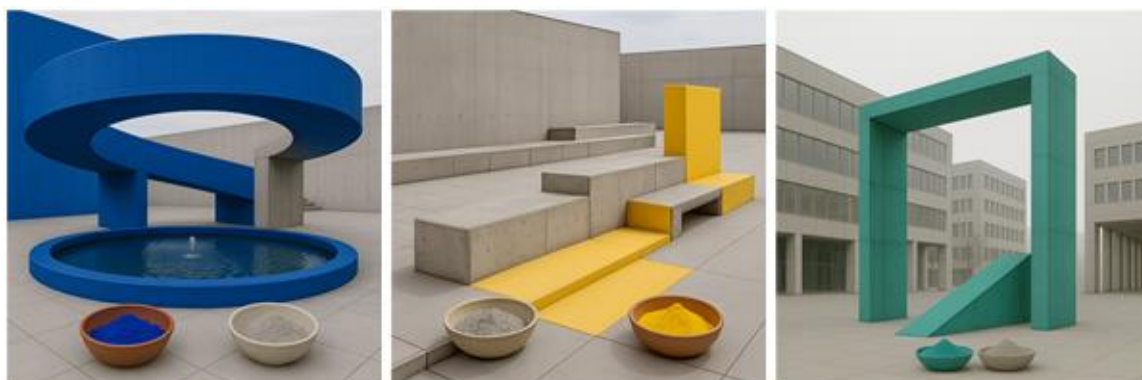
۲-۱- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر با هدف بررسی روانی بتن و مقاومت فشاری بتن‌های رنگی و مقایسه آن با بتن معمولی (نمونه شاهد) تدوین شده است. در این راستا، نمونه‌های مکعبی در ابعاد استاندارد تهیه و تحت شرایط کنترل‌شده ساخته و آزمایش شده‌اند. طرح اختلاط بتن‌ها با استفاده از روش آئین‌نامه ACI-211 و با در نظر گرفتن نوع و مشخصات مصالح، به صورت سعی و خطا بهینه‌سازی شده است (۱۴). در مجموع، تعداد ۸۰ نمونه مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ برای انجام آزمون مقاومت فشاری ساخته شده‌اند. این تعداد شامل نمونه‌هایی از بتن رنگی و نمونه‌های شاهد می‌باشد. برای هر طرح اختلاط، آزمون‌ها در دو سن ۷ روزه و ۲۸ روزه آزمایش شده‌اند، به گونه‌ای که برای هر سن، سه آزمون مشابه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین نتایج به عنوان مقاومت فشاری نهایی در آن سن گزارش شده است. جزئیات ساخت نمونه‌ها به شرح زیر است:

- تعداد ۲۶ نمونه مکعبی بتن رنگی (رنگدانه‌های شیمیایی با طیف‌های قرمز، زرد، سبز و آبی) در رنگ‌های مختلف، برای سنین ۷ و ۲۸ روز (۲)

- تعداد ۲۴ نمونه مکعبی بتن رنگی (ترکیبی از رنگدانه‌های شیمیایی آبی و سبز برای تولید بتن رنگی فیروزه‌ای) برای دو سن مذکور (۷)
- تعداد ۳۰ نمونه مکعبی شامل بتن معمولی و بتن رنگی (رنگدانه معدنی لیمونیت) برای سنین ۷ و ۲۸ روز (۲)

1. Slump



شکل ۱: نمونه‌هایی از استفاده از بتن رنگی در محیط‌های شهری.

Figure 1: Illustrative examples of colored concrete applications in urban environments.

عملکرد بتن‌های رنگی در مقایسه با بتن معمولی فراهم کرده است. مشخصات آزمون‌ها، روش آزمایش و استاندارد مربوطه مطابق جدول ۱ تنظیم شده‌اند.

۲-۲- مصالح مصرفی

۲-۲-۱- سنگ‌دانه

همه سنگ‌دانه‌های مصرفی از جنس گرانیت و بدون هرگونه سنگ‌دانه سوزنی یا پولکی شکل هستند. برای جلوگیری از نفوذ خاک در بتن، همه سنگ‌دانه‌های مصرفی شستشو شده‌اند و عاری از هرگونه گل‌ولای بوده است. همه الزامات استفاده از سنگ‌دانه طبق استاندارد ملی ایران

آزمون مقاومت فشاری طبق روش استاندارد ASTM C39 انجام شده و آزمون‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، در سنین مورد نظر در بارگذاری قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها پس از ساخت، در اتاق رطوبت با دمای کنترل شده عمل‌آوری شدند تا اثر عوامل بیرونی بر نتایج مقاومت فشاری به حداقل برسد. همچنین برای تحلیل داده‌ها، میانگین نتایج سه آزمون برای هر نمونه در هر سن به‌عنوان معیار نهایی مقاومت فشاری لحاظ شده است. بدین ترتیب، این برنامه آزمایشگاهی صرفاً بر روی آزمون روانی بتن و مقاومت فشاری تمرکز داشته و شامل ساخت و آزمون ۸۰ نمونه مکعبی $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ در چهار طرح اختلاط مختلف می‌باشد که بستر مناسبی برای ارزیابی

جدول ۱: طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش.

Table 1: The density of mixing materials.

Row	Mix Code	Pigment Type	Pigment (%)	Cement (kg/m ³)	Pigment (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)	Sample No. (7d)	Sample No. (28d)	Total Samples
1	Control	None	0	450	0.0	225	1280	720	4.5	3	3	6
2	Red-3 %	Chemical Pigment	3	436.5	13.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
3	Red-5 %	Chemical Pigment	5	427.5	22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
4	Red-7 %	Chemical Pigment	7	418.0	31.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
5	Yellow-3 %	Chemical Pigment	3	436.5	13.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
6	Yellow-5 %	Chemical Pigment	5	427.5	22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
7	Yellow-7 %	Chemical Pigment	7	418.0	31.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
8	Green-3 %	Chemical Pigment	3	436.5	13.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
9	Green-5 %	Chemical Pigment	5	427.5	22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
10	Green-7 %	Chemical Pigment	7	418.0	31.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
11	Blue-3 %	Chemical Pigment	3	436.5	13.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
12	Blue-5 %	Chemical Pigment	5	427.5	22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
13	Blue-7 %	Chemical Pigment	7	418.0	31.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
14	LI-5 %	Mineral Pigment (Limonite)	5	427.5	22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
15	LI-10 %	Mineral Pigment (Limonite)	10	405.0	45.0	225	1280	720	4.5	3	3	6
16	LI-15 %	Mineral Pigment (Limonite)	15	382.5	67.5	225	1280	720	4.5	3	3	6
17	LI-20 %	Mineral Pigment (Limonite)	20	360.0	90.0	225	1280	720	4.5	3	3	6
18	Turquoise Mix	Mixed Chemical Pigment (G+B)	~6	~427.5	~22.5	225	1280	720	4.5	3	3	6

برای دانه‌بندی سنگ‌دانه طبق استاندارد عمل شده است (۲۳).

ج- نمودار منحنی دانه‌بندی

برای رسم منحنی دانه‌بندی ابتدا باید جدول دانه‌بندی را تکمیل

کرد. نمودار منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه استفاده‌شده در شکل ۲

مشخص شده است.

د- مدول نرمی ماسه

مدول نرمی مصالح مورد استفاده در پژوهش طبق جدول ۳ انجام

گرفته است.

1. Oven

2. Saturated Surface Dry (SSD)

شماره ۳۰۲ (برگرفته از استاندارد ASTM C 33/C 33M) (۱۶) رعایت

شده است (۲۱). مشخصات دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی در جدول ۲

ارائه شده است.

الف- سنگ‌دانه در حالت اشباع با سطح خشک

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 خشک‌کن^۱ در دمای ۱۱۰

درجه سانتی‌گراد به حالت اشباع با سطح خشک درآمده‌اند (۲۲).

ب- دانه‌بندی سنگ‌دانه

دانه‌بندی سنگ‌دانه یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت بتن است.

جدول ۲: مشخصات دانه‌بندی سنگ‌دانه (۲۳).

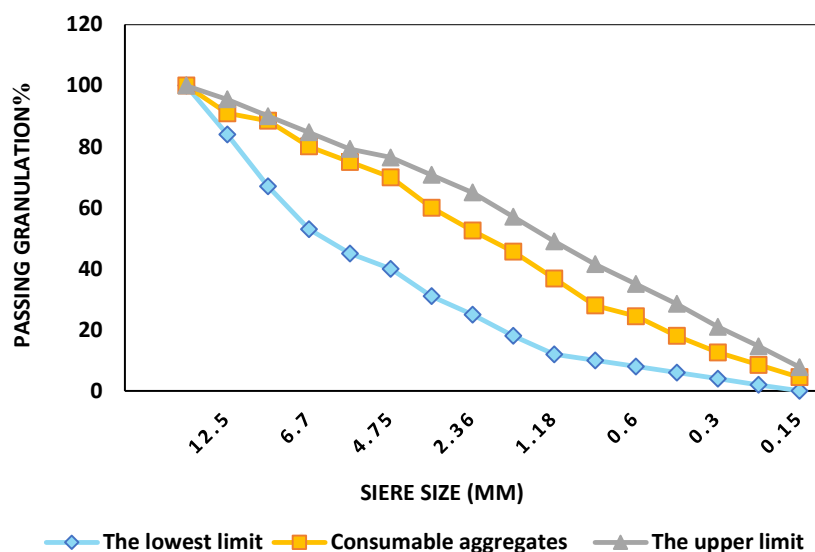
Table 2: The characteristics of aggregate granulation (23).

Sieve No. (inch)	Sieve Size (mm)	The weight of the remaining material on the sieve (g)	Materials remaining on the sieve (%)	Materials passed through the sieve (%)
3.4	19	0	0	100
1.2	12.5	90.5	9.05	95.95
4	4.75	210	21	69.95
8	2.36	174.5	17.45	52.5
16	1.18	156.5	15.65	36.85
30	0.6	124	12.4	24.45
50	0.3	118.5	11.85	12.6
100	0.15	81	8.1	4/5
Pan	-	4.5	4.5	0

جدول ۳: مدول نرمی ماسه (۲).

Table 3: The Softness Modulus of Sand (2).

Sieve Sample	The weight left on the sieve		Remaining Sands (%)
	Single Sieve	Total Sieve	
4	210	210	24.3
8	174.5	384.5	44.5
16	156.5	541	62.6
30	124	665	76.9
50	118.5	783.5	90.6
100	81	-	-
Pan	-	-	-
Sieve weight	864.5	-	298.9
Soft modulus	298.9÷100=2.98		



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی (۷).

Figure 2: The linear curve of granulation (7).

میزان اسیدی یا باز بودن (pH) آب باید بین ۶ تا ۸ باشد (۷، ۲، ۱).
آب مورد استفاده در پژوهش حاضر آب آشامیدنی شهرستان شیراز
بوده که با آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D1067
میزان غلظت یون هیدروژن یا pH آب ۷/۰۸ است (۲۰).

۴-۱-۲- افزودنی

۴-۱-۲-۱- فوق روان کننده

در این پژوهش از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک
اتر (طبق استاندارد ASTM C494 و ASTM C107) که رنگی شفاف
مایل به قهوه‌ای دارد، استفاده شده است (۲۴، ۱۱).

1. PCE

و- وزن مخصوص سنگ‌دانه

وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM C128 /C127
و میزان جذب آب در جدول ۴ ارائه شده است (۱۹، ۱۸).

۲-۱-۲- سیمان سفید

سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط، سیمان سفید پرتلند نی‌ریز با
نرمی 2950 gr/cm^2 است. مشخصات شیمیایی سیمان در جدول ۵
موجود است.

۳-۱-۲- آب

آب نقش بسیار مهم در بتن دارد به همین جهت استفاده از آب
مناسب در بتن همواره مورد توجه قرار گرفته است. آب به کاررفته در
ساخت بتن باید پاک و عاری از هرگونه ناخالصی باشد. همچنین

جدول ۴: مشخصات وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها (۱۹، ۱۸).

Table 4: The Aggregate of specific Gravity (Density) (18, 19).

Bulk Specific Gravity/kg/m ³	Apparent Specific Gravity/ kg/m ³	Materials
1945	1840	Sand
1980	1825	Ballast

جدول ۵: ساختار شیمیایی سیمان سفید نی‌ریز (۲).

Table 5: Chemical characteristics of cement (2).

LOI	IR	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SO ₃	MgO	FE ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	SiO ₂
3 %	0.7 %	0.5 %	0.5 %	66.7 %	2.7 %	0.9 %	6.3 %	4.1 %	22.7 %

۲-۴-۱-۲- رنگدانه

در این تحقیق، رنگدانه‌های مورد استفاده در سه دسته اصلی شامل رنگدانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی طبقه‌بندی شده‌اند که هر کدام با درصد‌های متفاوت به‌صورت جایگزین بخشی از سیمان سفید در طرح اختلاط بتن مصرف شده‌اند.

رنگدانه‌های شیمیایی: در این تحقیق، رنگ بتن به‌صورت پودری و در طیف‌های متنوعی شامل قرمز، زرد، سبز و آبی مورد استفاده قرار گرفته است. برای دستیابی به توزیع یکنواخت رنگ در مخلوط بتن، حداقل زمان اختلاط رنگدانه با سایر اجزا، ۳ دقیقه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که رعایت نکات ایمنی در حین استفاده از رنگدانه‌ها ضروری است، هرچند این ترکیبات فاقد خاصیت سمی می‌باشند. شایان ذکر است که مطابق الزامات استاندارد ASTM C979، حداکثر مجاز مصرف رنگدانه‌های معدنی در بتن به میزان ۱۰ درصد وزنی نسبت به سیمان محدود شده است (۱۴).

رنگدانه‌های ترکیبی: با توجه به عدم دسترسی به رنگدانه فیروزه‌ای، در این پژوهش رویکردی خلاقانه اتخاذ گردید؛ بدین‌صورت که رنگ مورد نظر از ترکیب رنگ‌های آبی و سبز به نسبت وزنی ۷۰

به ۳۰ درصد تهیه شد.

رنگدانه‌های معدنی: در این بخش، از رنگدانه معدنی لیمونیت، استخراج‌شده از منابع طبیعی ایران (جزیره ابوموسی)، استفاده گردید. این رنگدانه به‌صورت جایگزین وزنی سیمان با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد در طرح اختلاط وارد شده است.

در خصوص مشخصات و شناسنامه رنگدانه‌های شیمیایی مصرفی می‌توان اشاره کرد که رنگدانه سبز مورد استفاده، محصول شرکت دلتا است؛ رنگدانه آبی توسط شرکت لاپیس لازولی^۱، رنگدانه قرمز توسط شرکت لنکسس^۲، رنگدانه زرد محصول شرکت فناوری مواد نوین کی‌تک گوانگ‌دونگ^۳ و منبع معدنی رنگدانه لیمونیت نیز از معادن جزیره ابوموسی می‌باشد. مشخصات شیمیایی رنگدانه مصرفی هر سه بخش در جدول ۶ و مشخصات فیزیکی آنها در جدول ۷ ارائه شده است.

1. Delta
2. Lapis Lazuli
3. Lanxess AG
4. Guangdong Kitech New Material Holding Co., Ltd

جدول ۶: خصوصیات شیمیایی رنگدانه‌های مختلف مورد استفاده در بتن (۲، ۷، ۲۵).

Table 6: Chemical Properties of Various Pigments Used in Concrete (2, 7, 25).

Pigment Type	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Cu ₂ O (%)	Appearance Color
Red Pigment	1.8	86.0	7.4	0.6	2.2	-	Red
Yellow Pigment	0.5	94.0	1.3	0.2	2.0	-	Yellow
Green Pigment	28.0	41.7	11.6	15.3	1.4	-	Green
Blue Pigment	6.2	5.0	-	9.6	3.2	74.0	Blue
Limonite (Machine-Processed)	26.91	49.54	6.01	10.93	0.25	-	N/A

جدول ۷: خصوصیات فیزیکی رنگدانه‌های مختلف مورد استفاده در بتن (۲، ۷، ۲۵).

Table 7: Physical Properties of Various Pigments Used in Concrete (2, 7, 25).

Apparent Color	Water Absorption (%)	Hardness (Mohs)	Particle Size (μm)	Chemical Formula	Specific Gravity (g/cm ³)
Red	0.30	4.5 – 5	<25	Fe ₂ O ₃	4.1
Yellow	0.50	5 – 5.5	<30	Fe ₂ OH	4.3
Green	2	2.5 – 3	<20	Fe ₃ O ₄	4
Blue	1/1	3.5 – 4	<12	Cu ₃ [OH(CO ₃) ₂] ²	3.7
Yellow to brownish-yellow	0.5 – 1.0	1.5 – 5.0	< 25	FeO(OH)·nH ₂ O	2.7 – 4.3

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روانی بتن

روانی بتن، معیاری برای بررسی میزان جریان‌پذیری یا روانی بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز است (۷). مطابق دستورالعمل ASTM-C979 محدوده مجاز روانی بتن رنگی باید، 100 ± 13 میلی‌متر می‌باشد. شکل ۳ که میزان روانی هر طرح مخلوط را نمایش می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده مشخص گردید که هر چه میزان استفاده از رنگدانه بیشتر باشد، میزان روانی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رنگدانه‌های مصرفی جاذب آب بوده و میزان روانی بتن را بطور محسوسی کاهش می‌دهند (۲۵، ۲، ۷).

(۱) روانی رنگدانه‌های شیمیایی

طبق شکل ۴ که تغییرات میزان روانی در هر طرح اختلاط را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار رنگدانه رنگی موجب کاهش مقدار روانی بتن می‌شود. این کاهش روانی به دلیل تأثیر رنگدانه‌ها بر گرانروی و روانی مخلوط بتن است. با این حال، در طرح مخلوط بتن زرد، کاهش روانی به مراتب کمتر از سایر رنگدانه‌های رنگی است. این پدیده را می‌توان به اندازه ذرات بزرگ‌تر رنگدانه زرد و

سطح مخصوص ذرات آن (اکسید آهن زرد) نسبت به دیگر رنگدانه‌ها نسبت داد. بنابراین، به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص رنگدانه زرد، مقاومت بتن در برابر کاهش روانی افزایش یافته و بتن با کارایی بالاتری نسبت به سایر رنگ‌ها تولید می‌شود.

(۲) روانی رنگدانه‌های شیمیایی ترکیبی (بتن رنگی فیروزه‌ای)

طبق شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش مقدار رنگدانه مصرفی، روانی بتن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش روانی ناشی از خاصیت جاذب آب رنگدانه‌ها است که باعث کاهش چشم‌گیر روانی بتن می‌شود. به‌طوری که در طرح‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد رنگدانه، روانی بتن به ترتیب ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درصد کمتر از طرح شاهد بوده است.

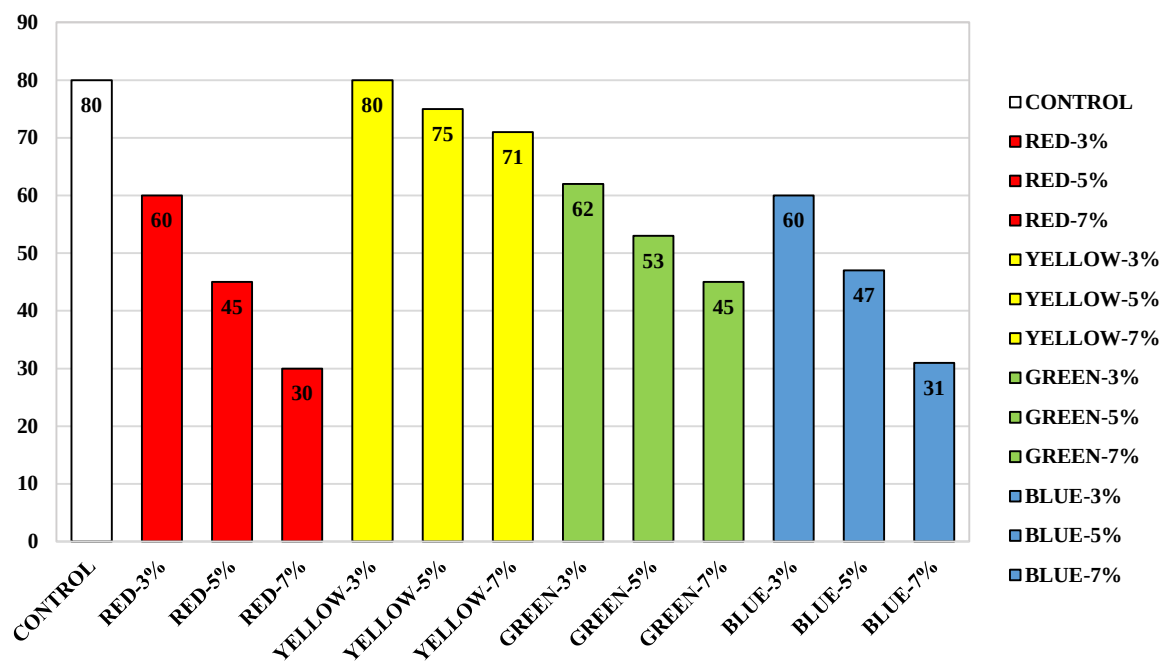
(۳) روانی رنگدانه‌های معدنی لیمونیت

طبق شکل ۶ نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش درصد وزنی رنگدانه لیمونیت در مخلوط، میزان روانی بتن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به‌طور خاص، استفاده از رنگدانه لیمونیت به مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد موجب کاهش روانی بتن به ترتیب ۱۰، ۲۳، ۴۰ و ۵۶ درصد نسبت به طرح شاهد شده است.



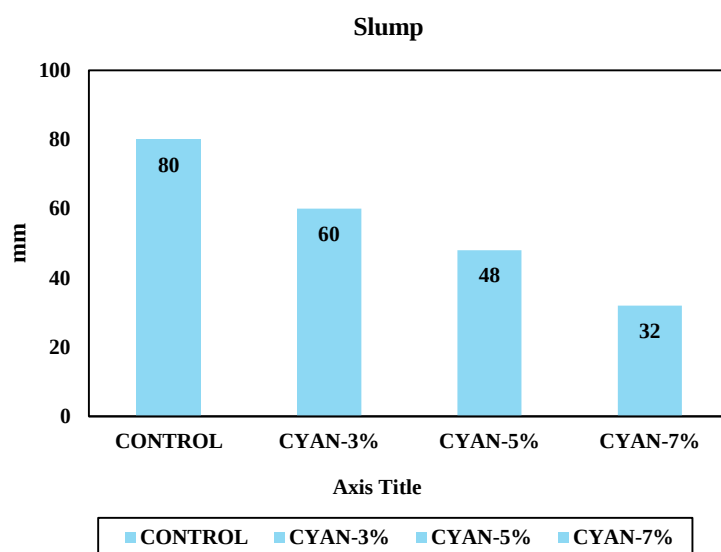
شکل ۳: روانی طرح مخلوط‌های آزمایش‌شده.

Figure 3: Slump design of the tested mixtures.



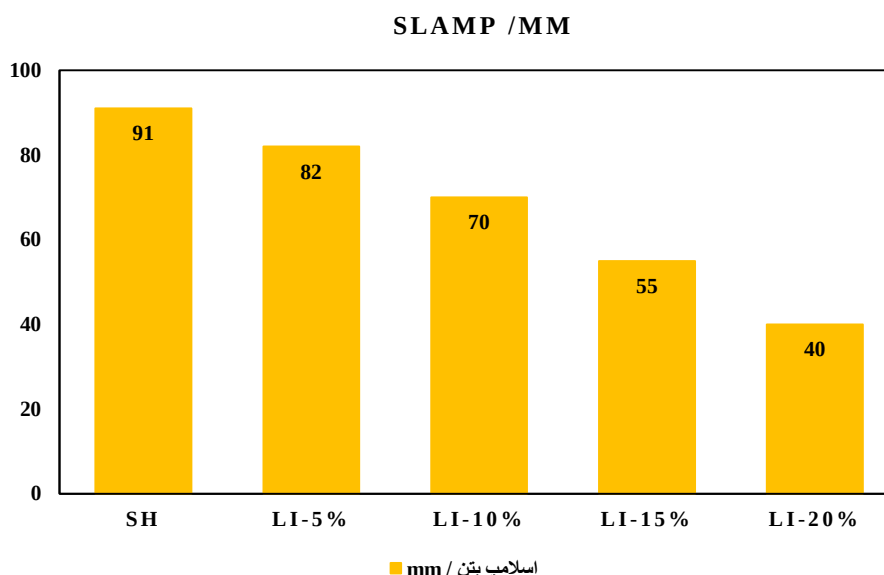
شکل ۴: مقادیر اسلامپ در طرح‌های مختلف مخلوط بتن

Figure 4: Slump Measurements for Different Concrete Mixes



شکل ۵: مقادیر اسلامپ در طرح‌های مختلف مخلوط بتن.

Figure 5: Slump Measurements for Different Concrete Mixes.



شکل ۶: مقایسه روانی طرح مخلوط‌های مورد مقایسه.

Figure 6: Psychological comparison of mixed design compared.

که در طرح‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد رنگدانه، روانی بتن به ترتیب ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درصد کمتر از طرح شاهد بود.

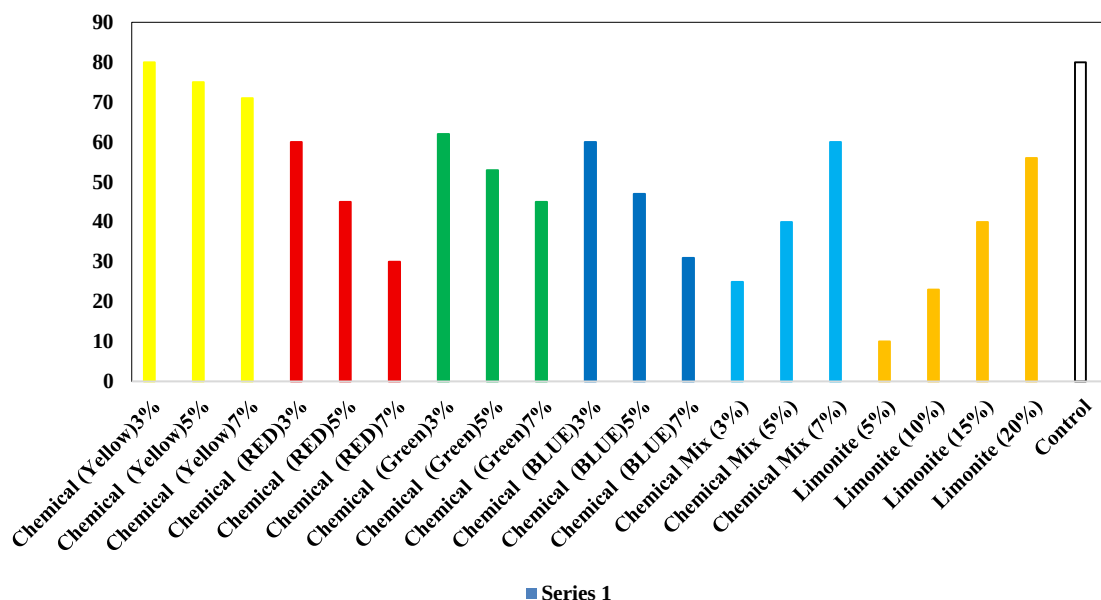
۳. رنگدانه‌های معدنی لیمونیت: استفاده از رنگدانه معدنی لیمونیت در مخلوط بتن نیز باعث کاهش روانی می‌شود، اما شدت این کاهش با توجه به درصد وزنی رنگدانه متفاوت است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از رنگدانه لیمونیت به مقادیر ۱۵، ۱۰، ۵ و ۲۰ درصد موجب کاهش روانی بتن به ترتیب ۴۰، ۲۳، ۱۰ و ۵۶ درصد نسبت به طرح شاهد می‌شود. این کاهش روانی به دلیل خاصیت جاذب آب لیمونیت و ویژگی‌های فیزیکی این نوع رنگدانه است.

به‌طور کلی، افزایش میزان رنگدانه در بتن موجب کاهش روانی می‌شود که این امر عمدتاً به خاصیت جذب آب رنگ دانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر رفتار رئولوژیکی مخلوط بازمی‌گردد. در این میان، رنگدانه‌های شیمیایی، به‌ویژه رنگدانه زرد، کمترین افت روانی را ایجاد می‌کنند، در حالی که رنگ دانه‌های ترکیبی و معدنی مانند لیمونیت بیشترین تأثیر منفی را دارند. این تفاوت‌ها مستقیماً با اندازه ذرات، سطح ویژه و ویژگی‌های شیمیایی رنگ دانه‌ها مرتبط است؛ به‌گونه‌ای که رنگ دانه‌های ریزدانه با سطح ویژه بالا، جذب آب بیشتری داشته و افت روانی شدیدتری ایجاد می‌کنند.

۳-۱-۱-۳- مقایسه میزان روانی در طرح‌های مختلف مخلوط بتن

طبق جدول ۸ و شکل ۷ مقایسه میزان روانی در طرح‌های مختلف مخلوط بتن با استفاده از سه نوع رنگدانه (رنگدانه‌های شیمیایی، رنگدانه‌های شیمیایی ترکیبی و رنگدانه‌های معدنی لیمونیت) نشان می‌دهد که هر یک از این رنگدانه‌ها تأثیر متفاوتی بر روانی بتن دارند. ۱. رنگدانه‌های شیمیایی: استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی در مخلوط بتن باعث کاهش روانی بتن می‌شود. این کاهش به دلیل اثر جاذب آب رنگدانه‌هاست که موجب افزایش گرانیروی و کاهش جریان‌پذیری مخلوط می‌شود. در میان رنگدانه‌های شیمیایی مختلف، رنگدانه زرد نسبت به سایر رنگ‌ها کمتر باعث کاهش روانی می‌شود. این پدیده به دلیل اندازه ذرات بزرگ‌تر رنگدانه زرد و سطح مخصوص کمتر آن نسبت به سایر رنگدانه‌ها است که باعث می‌شود این رنگدانه اثر کمتری بر کاهش روانی بتن بگذارد.

۲. رنگدانه‌های شیمیایی ترکیبی (فیروزه‌ای): در طرح‌های حاوی رنگدانه ترکیبی (ترکیب رنگدانه‌های شیمیایی آبی و سبز برای تولید بتن رنگی فیروزه‌ای)، با افزایش درصد رنگدانه مصرفی، میزان روانی به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این کاهش روانی نشان‌دهنده جاذب آب بودن این رنگدانه‌ها است که با افزایش درصد رنگدانه، روانی مخلوط بتن به شدت کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری



شکل ۷: مقایسه کاهش روانی بتن با استفاده از رنگ‌دانه‌های شیمیایی، ترکیبی و معدنی

Figure 7: Comparison of Slump Reduction in Concrete with Chemical, Combined Chemical, and Mineral Limonite Pigments.

جدول ۸: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگ‌دانه‌های شیمیایی در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Table 8: Comparison of Compressive Strength of Concrete with Chemical Pigments at 7-Day and 28-Day Curing Periods.

Design Name	Compressive Strength (MPa) 7 days	Compressive Strength (MPa) 28 days	Description
C-SH	19.1 MPa	28.3 MPa	Control Sample
CY-3 %	16.6 MPa	24.7 MPa	Cyan – 3 %
CY-5 %	13.3 MPa	22.1 MPa	Cyan – 5 %
CY-7 %	10.5 MPa	19.4 MPa	Cyan – 7 %
BL-3 %	17.8 MPa	26.6 MPa	Blue – 3 %
BL-5 %	16.1 MPa	25.2 MPa	Blue – 5 %
BL-7 %	12.2 MPa	21.5 MPa	Blue – 7 %
GR-3 %	15.9 MPa	24.6 MPa	Green – 3 %
GR-5 %	11.1 MPa	20.3 MPa	Green – 5 %
GR-7 %	7.5 MPa	16.4 MPa	Green – 7 %
RD-3 %	17.9 MPa	26.7 MPa	Red – 3 %
RD-5 %	16.4 MPa	25.8 MPa	Red – 5 %
RD-7 %	15.1 MPa	24.7 MPa	Red – 7 %
YE-3 %	22.3 MPa	31.1 MPa	Yellow – 3 %
YE-5 %	25.1 MPa	33.8 MPa	Yellow – 5 %
YE-7 %	26.8 MPa	35.6 MPa	Yellow – 7 %

۲-۳- مقاومت فشاری رنگدانه‌های مختلف

الف) رنگدانه‌های شیمیایی

همان‌طور که در شکل ۸ توضیح داده شده است، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها در قالب‌های مکعبی با ابعاد $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ و عمل‌آوری آن‌ها در آب به مدت ۷ روز برای نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روز برای نمونه‌های ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط دستگاه جک بتن‌شکن دیجیتال با ظرفیت ۲۰۰ تن اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج آزمایشات، مقادیر اختلاط اجزای بتن (طرح اختلاط) طبق

دستورالعمل‌های استاندارد ACI-211 محاسبه گردید (۳۴). شایان ذکر است که برای هر طرح اختلاط، ۶ نمونه مکعبی تحت آزمایش فشاری استاندارد قرار گرفتند که ۳ نمونه در ۷ روزگی و ۳ نمونه دیگر در ۲۸ روزگی مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج به‌دست‌آمده به‌دست‌آمده به‌صورت میانگین محاسبه و ارائه شد که در جدول ۹ و شکل ۹ به آن اشاره شده است. همچنین، برای ارزیابی مقاومت کششی، از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 30×15 سانتی‌متر استفاده شده و آزمایش‌ها براساس استاندارد ASTM-C496 صورت گرفت (۲).



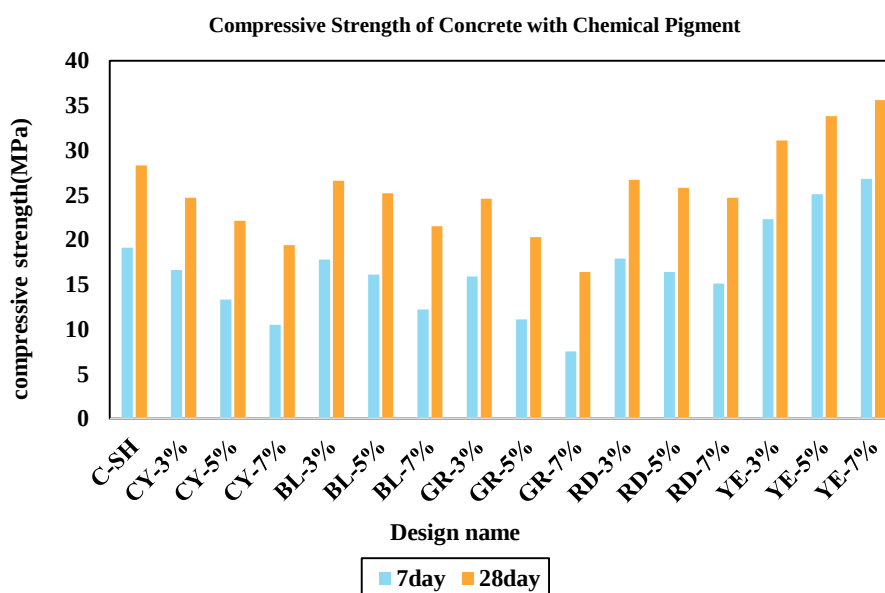
شکل ۸: آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مکعبی ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های رنگی (۲، ۲۲، ۲۳).

Figure 8: Compressive strength test of cubic concrete samples at 7 and 28 days of colored concretes (2, 22, 23).

جدول ۹: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگدانه ترکیبی (فیروزه‌ای) در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Table 9: Comparison of Compressive Strength of Concrete with Combined Chemical Pigment (Turquoise) at 7-day and 28-day Curing Periods.

Design Name	Age (days)	Compressive Strength (MPa)	Increase in Compressive Strength (%)
Control	7	19.1 MPa	-
	28	28.3 MPa	-
CY-3 %	7	17.6 MPa	-7.9
	28	26.4 MPa	-6.7
CY-5 %	7	15.6 MPa	-18.3
	28	24.7 MPa	-12.7
CY-7 %	7	11.7 MPa	-38.7
	28	21.0 MPa	-25.8



شکل ۹: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Figure 9: Comparison of Compressive Strength of Concrete with Chemical Pigments at 7-Day and 28-Day Curing Periods.

از سنتز و اکسید آهن، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن مشاهده می‌شود. یکی از دلایل اصلی این کاهش، سختی پایین رنگدانه‌های استفاده شده است. از آنجا که در آزمایش سختی، فشار به سطح ماده وارد می‌شود، سختی به عنوان میزان مقاومت ماده در برابر نیروی فشاری نیز تعریف می‌شود. بنابراین، با توجه به سختی پایین رنگدانه‌ها، کاهش مقاومت فشاری بتن با افزایش میزان رنگدانه‌ها چندان دور از انتظار نبود. مقاومت فشاری طرح حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد رنگدانه در مقایسه با طرح شاهد در سن ۷ روزه به ترتیب ۸، ۱۸ و ۳۹ درصد کاهش و در ۲۸ روزه به ترتیب ۷، ۱۳ و ۲۶ درصد کاهش نشان داد. طبق دستورالعمل ASTM-C979، مقاومت فشاری بتن‌های رنگی باید حداقل ۹۰ درصد مقاومت فشاری نمونه شاهد باشد (۷). بنابراین،

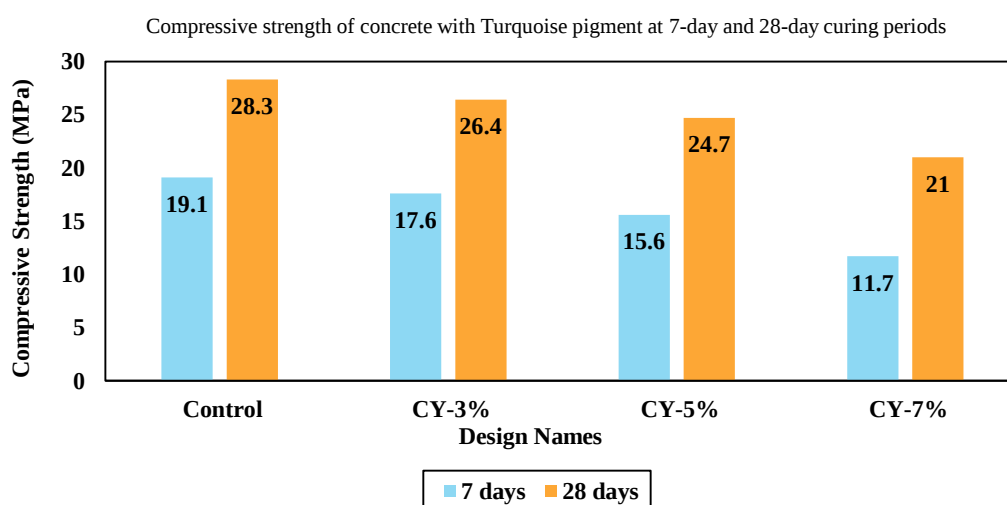
(ب) مقاومت فشاری رنگدانه ترکیبی (فیروزه‌ای)
مقاومت فشاری به عنوان یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین ویژگی‌های مشخصه بتن شناخته می‌شود. بسیاری از ویژگی‌های بتن با مقاومت فشاری ارتباط دارند و نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌تواند مبنای کنترل کیفیت بتن، تعیین نسبت‌های اختلاط، روش‌های مخلوط‌سازی و ریختن بتن، انطباق با مقاومت مشخصه مورد نظر و همچنین ارزیابی تاثیر مواد افزودنی و سایر ترکیبات مشابه بر بتن قرار گیرد (۲۵). آزمایش مقاومت فشاری بتن بر اساس استاندارد BS-EN-12390 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در سن ۷ و ۲۸ روز انجام شد و نتایج آن در جدول ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طرح مخلوط بتن با رنگدانه فیروزه‌ای، به دلیل استفاده

(FeO(OH)) نسبت داد. پایداری ساختاری این فازهای اکسیدی سبب می‌شود ذرات رنگ دانه در نقش پرکننده عمل کرده و بخشی از خلل و فرج‌های میکروسکوپی خمیر سیمان را مسدود کنند؛ امری که به افزایش تراکم و یکپارچگی ریزساختار بتن می‌انجامد. از سوی دیگر، سختی نسبتاً بالاتر و اندازه ذرات درشت‌تر رنگ دانه زرد، سطح تماس آن با آب را کاهش داده و در مقایسه با سایر رنگ دانه‌ها جذب آب کمتری ایجاد می‌کند. در نتیجه، آب مؤثر بیشتری برای واکنش‌های هیدراسیون سیمان در دسترس باقی مانده و این فرآیند به‌صورت کامل‌تری انجام می‌شود که نهایتاً به بهبود مقاومت فشاری بتن منجر می‌گردد.

همه نمونه‌های مکعبی پس از خروج از قالب به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شده و سپس در حوضچه آب اشباع با دمای ثابت $23 \pm 2^\circ\text{C}$ غوطه‌ور شدند. عمل‌آوری مطابق ASTM C192 برای دوره‌های ۷ و ۲۸ روز انجام شد. لازم به ذکر است که حضور رنگ دانه‌ها می‌تواند با جذب بخشی از آب اختلاط یا تغییر سطح تماس ذرات، آب‌پوشی سیمان را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین تمامی نمونه‌ها به‌صورت مجزا و در شرایط یکسان نگهداری شدند تا اثرات متفاوت رنگ دانه‌ها در دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه با کمترین تغییر محیطی مقایسه‌پذیر باشد.

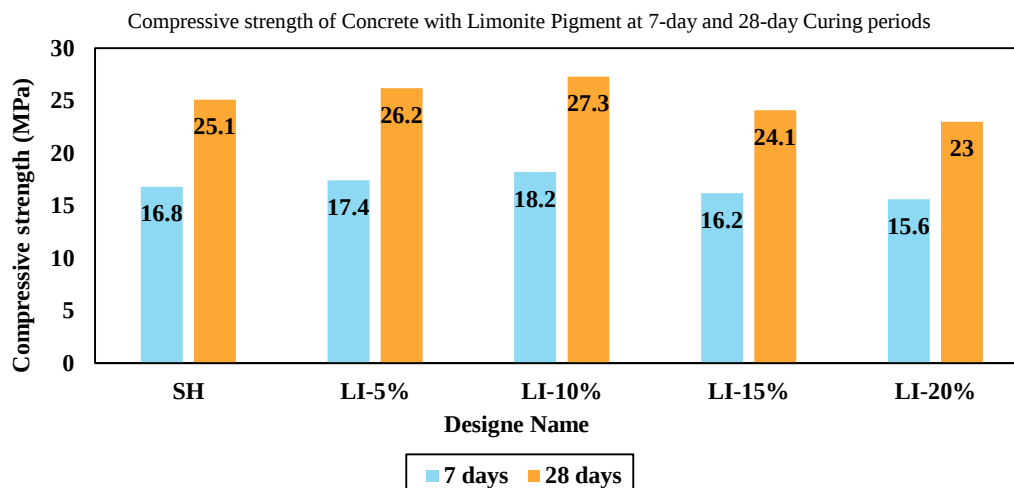
طبق این استاندارد، مقاومت فشاری طرح با ۳ درصد رنگ دانه قابل پذیرش است (۲۵).

ج) مقاومت فشاری رنگ دانه معدنی (لیمونیت)
برای آزمایش مقاومت فشاری، از جک هیدرولیکی دیجیتال با سرعت بارگذاری ۰/۸ ثانیه بر ثانیه استفاده شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ پس از عمل‌آوری در حوضچه آب به مدت ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. مقادیر مقاومت فشاری به‌دست‌آمده برای هر طرح مخلوط طبق جدول ۱۰ و شکل ۱۱ آمده است. نتایج نشان داد که افزودن ۵ و ۱۰ درصد پیگمنت گل ماش به بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه می‌شود. یکی از دلایل اصلی این افزایش مقاومت، حضور اکسید آهن در ساختار رنگ دانه لیمونیت است که مقاومت قابل توجهی دارد. همچنین، ریز بودن ذرات رنگ دانه موجب افزایش تراکم بتن و کاهش تخلخل آن گردیده که در نهایت باعث تقویت مقاومت فشاری می‌شود. در طرح‌های مخلوط با ۱۵ و ۲۰ درصد پیگمنت گل ماش، کاهش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز مشاهده شد. این کاهش مقاومت را می‌توان به کاهش وزن سیمان و کاهش چسبندگی بین اجزای تشکیل‌دهنده بتن نسبت داد (۲۵). افزایش مقاومت فشاری مشاهده‌شده در بتن‌های حاوی رنگ دانه زرد را می‌توان به ماهیت معدنی این رنگ دانه و حضور ترکیبات اکسید آهن آبدار



شکل ۱۰: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگ دانه ترکیبی (فیروزه‌ای) در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Figure 10: Comparison of Compressive Strength of Concrete with Combined Chemical Pigment (Turquoise) at 7-day and 28-day Curing Periods



شکل ۱۱: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگدانه معدنی (لیمونیت) در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Figure 11: Comparison of Compressive Strength of Concrete with Mineral Pigment (Limonite) at 7-day and 28-day Curing Periods.

جدول ۱۰: مقایسه مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگدانه معدنی در دوره‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه.

Table 10: Comparison of compressive strength of concrete with mineral pigment at 7-day and 28-day curing periods.

Design Name	Age (days)	Compressive Strength (MPa)	Increase in Compressive Strength (%)
SH	7	16.8	-
	28	25.1	-
LI-5%	7	17.4	+6.3
	28	26.2	+4.4
LI-10%	7	18.2	+8.3
	28	27.3	+8.8
LI-15%	7	16.2	-3.6
	28	24.1	-4
LI-20 %	7	15.6	-7.1
	28	23.0	-8.4

می‌شود. به‌ویژه در درصدهای بالاتر رنگدانه‌ها، این کاهش بیشتر محسوس است.

- رنگدانه قرمز: با استفاده از این رنگدانه، مقاومت فشاری بتن به میزان ۶، ۹ و ۱۳ درصد کاهش پیدا کرد.
- رنگدانه زرد: این رنگدانه بر خلاف سایر رنگدانه‌ها تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری داشت. استفاده از رنگدانه زرد موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب ۱۰، ۱۹ و ۲۶ درصد در درصدهای ۳، ۵ و ۷ شد.
- رنگدانه سبز و آبی: رنگدانه‌های سبز و آبی باعث کاهش

۳-۲- بررسی و تحلیل مقاومت فشاری بتن با استفاده از

رنگدانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی

در این مطالعه، تأثیرات رنگدانه‌های مختلف بر مقاومت فشاری بتن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. این رنگدانه‌ها به سه دسته شیمیایی، معدنی و ترکیبی تقسیم شده‌اند.

۱- رنگدانه‌های شیمیایی

در بررسی تأثیر رنگدانه‌های شیمیایی بر مقاومت فشاری بتن، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی مختلف (قرمز، زرد، سبز و آبی) عموماً موجب کاهش مقاومت فشاری بتن

موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شد. در این مطالعه، افزایش مقاومت فشاری در حدود ۴/۴ مگاپاسکال در ۲۸ روز مشاهده شد. این افزایش به دلیل وجود اکسید آهن در رنگدانه لیمونیت و تأثیر آن بر تراکم بتن و کاهش تخلخل آن است.

۲- رنگدانه‌های ترکیبی

تأثیر رنگدانه‌های ترکیبی (ترکیب رنگ‌های آبی و سبز) بر بتن، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این رنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری بتن تأثیر منفی دارد. به‌ویژه در درصد‌های بالاتر رنگدانه‌ها، مقاومت فشاری بتن کاهش بیشتری داشت. استفاده از رنگدانه ترکیبی فیروزه‌ای در درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد موجب کاهش مقاومت فشاری بتن به ترتیب ۷/۶، ۷/۱۲ و ۸/۲۵ درصد در ۲۸ روز شد. این کاهش بیشتر در مقایسه با سایر رنگدانه‌ها محسوس بود. همچنین، درصد بالاتر رنگدانه‌های ترکیبی (۷ درصد) منجر به کاهش مقاومت فشاری تا ۸/۲۵ درصد نسبت به نمونه شاهد شد.

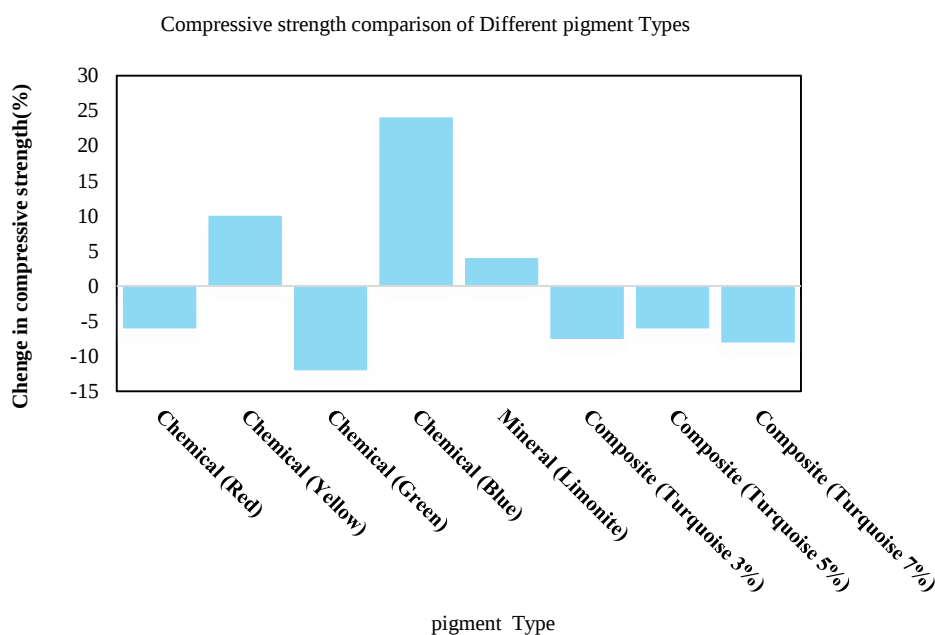
شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات در مقاومت فشاری بتن با استفاده از انواع مختلف رنگدانه‌ها است. هر ستون نمایانگر تغییر در مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (بدون رنگدانه) است، که در برخی از نمونه‌ها افزایش و در برخی دیگر کاهش مشاهده می‌شود.

مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۳، ۲۸ و ۴۲ درصد در رنگدانه سبز و ۶، ۱۱ و ۲۴ درصد در رنگدانه آبی شدند.

کاهش چشمگیر مقاومت در نمونه‌های حاوی رنگدانه آبی احتمالاً ناشی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص این رنگدانه است. ذرات آبی دارای اندازه بسیار ریز و سطح ویژه بالا هستند که موجب جذب بخشی از آب اختلاط و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان مؤثر و آب‌پوشی ناقص می‌گردد. همچنین ترکیبات شیمیایی مبتنی بر مس در این نوع رنگدانه‌ها فاقد واکنش‌های مفید پوزولانی بوده و پیوند ضعیف‌تری با خمیر سیمان ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، احتمال تداخل رنگدانه با عملکرد فوق‌روان‌کننده و ایجاد توزیع غیریکنواخت آب در بستر سیمان نیز می‌تواند از دلایل دیگر کاهش مقاومت باشد.

۱- رنگدانه‌های معدنی

در استفاده از رنگدانه‌های معدنی به ویژه لیمونیت (رنگ زرد)، نتایج نشان می‌دهد که رنگدانه معدنی لیمونیت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن دارد. این رنگدانه به دلیل ترکیبات اکسید آهن موجود در آن، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. استفاده از رنگدانه لیمونیت در درصد‌های مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد)



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات مقاومت فشاری بتن با استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی.

Figure 12: Comparison of Compressive Strength Changes in Concrete with Chemical, Mineral, and Composite Pigments.

۴-۳- تحلیل سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر تفاوت مقاومت فشاری بتن‌های رنگی

تفاوت‌های مشاهده‌شده در مقاومت فشاری نمونه‌ها را می‌توان به دو عامل اصلی ماهیت فیزیکی (ریزدانگی، سختی و ریخت ذرات رنگدانه) و ماهیت شیمیایی ترکیبات رنگدانه‌ها نسبت داد. از نظر فیزیکی، اندازه کوچک‌تر ذرات و سطح ویژه بالاتر رنگدانه‌های شیمیایی (به‌ویژه آبی و سبز) موجب افزایش سطح تماس با خمیر سیمان و جذب بخشی از آب اختلاط می‌شود. این امر نسبت آب به سیمان مؤثر را کاهش داده و تراکم خمیر سیمان را کاهش می‌دهد که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری است. همچنین، شکل نامنظم یا زاویه‌دار ذرات باعث تمرکز تنش در فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان شده و در نتیجه شکست زودهنگام بتن را تسریع می‌کند. از نظر شیمیایی، ترکیبات حاوی اکسید آهن Fe_2O_3 و $\text{FeO}(\text{OH})$ در رنگدانه‌های زرد و معدنی (لیمونیت) رفتار شبه‌پوزولانی از خود نشان می‌دهند. این ترکیبات با فازهای هیدروکسیدی سیمان واکنش داده و سبب افزایش تراکم میکروساختار و کاهش تخلخل می‌شوند که در نهایت مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. در مقابل، رنگدانه‌های دارای ترکیبات مسی (مانند $\text{Cu}_2[\text{OH}][\text{CO}_3]$ در رنگ آبی) فاقد چنین اثرات شیمیایی بوده و گاهی به دلیل واکنش‌پذیری پایین، پیوند مناسبی با خمیر سیمان ایجاد نمی‌کنند.

بنابراین، ماهیت شیمیایی رنگدانه‌ها در کنار ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها به‌صورت هم‌افزا یا متقابل بر خواص مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، رنگدانه زرد به دلیل ترکیب اکسید آهن پایدار و اندازه ذرات مناسب، منجر به بیشترین افزایش مقاومت فشاری در میان رنگدانه‌های بررسی‌شده شد، در حالی که رنگدانه‌های ترکیبی فیروزه‌ای با سختی پایین و ذرات بسیار ریز، بیشترین افت مقاومت را نشان دادند.

۵-۳- مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین

نتایج این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین، روند مشابهی را در تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های رنگی نشان می‌دهد. به‌طور خاص، یافته‌ها با نتایج مطالعه لی و همکارانش (۱۵) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند افزودن رنگدانه‌های اکسید آهن به بتن باعث کاهش جزئی در مقاومت فشاری و تغییر در رنگ سطحی می‌شود. همچنین در پژوهش‌های منصوری و همکارانش (۲۶) و بازایی و همکارانش (۲۷) مشخص شد که استفاده از رنگدانه‌های خاکی و معدنی نظیر گل‌ماش (لیمونیت) در درصدهای محدود، موجب افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۸ درصد نسبت به بتن معمولی می‌گردد؛ روندی که با نتایج این تحقیق تطابق کامل دارد. از سوی دیگر، کاهش محسوس مقاومت در نمونه‌های حاوی رنگدانه‌های شیمیایی با درصدهای بالا

با یافته‌های نادری و همکارانش (۹) نیز سازگار است؛ آنان نیز گزارش کردند که افزایش مقدار رنگدانه‌های آلی و شیمیایی سبب افزایش تخلخل و در نتیجه افت استحکام می‌شود. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج حاضر از نظر جهت‌گیری و دامنه تغییرات، در محدوده منطقی و هم‌راستا با پژوهش‌های معتبر پیشین قرار دارد، هرچند نوع رنگدانه، شرایط آزمایش و ترکیب سیمان می‌تواند موجب تفاوت در مقادیر دقیق مقاومت فشاری گردد.

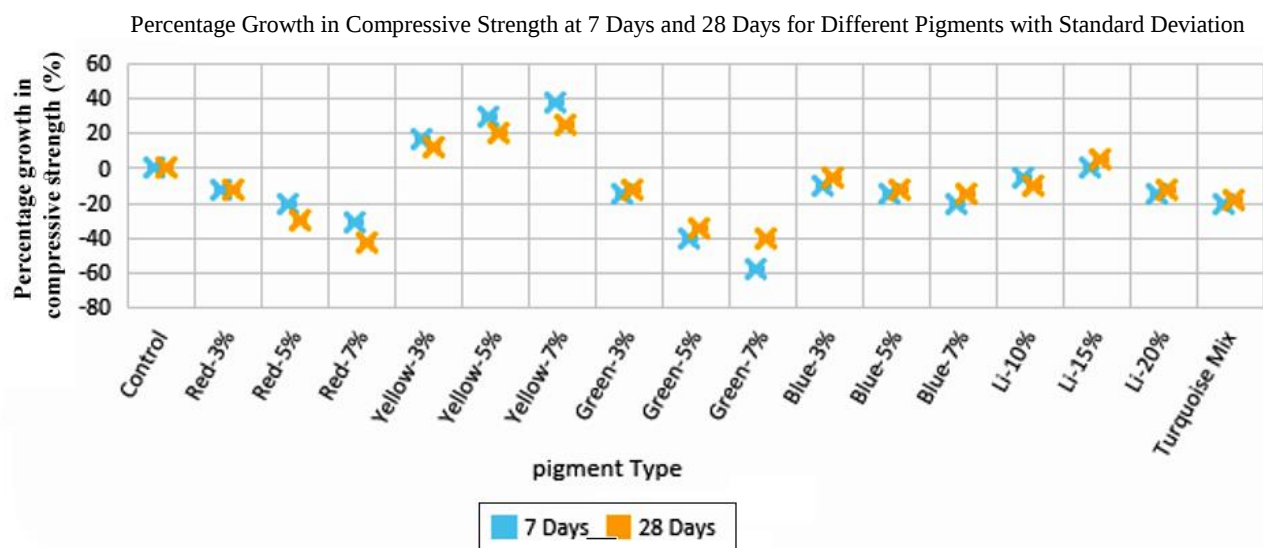
۶-۳- بررسی تأثیر رنگدانه‌های مختلف بر رشد مقاومت فشاری بتن در دو دوره زمانی ۷ روزه و ۲۸ روزه همراه با انحراف استاندارد

به منظور کنترل نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن رنگی در اثر افزودن رنگدانه در بتن از روش ارزیابی انحراف از معیار داده‌ها استفاده شد. در این راستا ارتباط میان نتایج بین مقاومت فشاری طرح‌های متفاوت در سنین مختلف و میزان تغییرات بین نتایج نمونه‌ها بررسی گردیده و میزان انحراف آن در جدول ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید که 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.

در شکل ۱۳، درصد رشد مقاومت فشاری بتن در دو زمان مختلف، یعنی ۷ روزه و ۲۸ روزه، برای نمونه‌های مختلف بتن رنگی با انواع رنگدانه‌ها نمایش داده شده است. این نمودار به وضوح تأثیر رنگدانه‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی بتن را با در نظر گرفتن انحراف استاندارد هر گروه رنگدانه نشان می‌دهد. در ابتدا، مشاهده می‌شود که درصد رشد مقاومت فشاری بتن در ۲۸ روز برای اکثر رنگدانه‌ها، به‌ویژه رنگدانه‌های شیمیایی و معدنی، نسبت به نمونه کنترل (بدون رنگدانه) مثبت است، اما در برخی از ترکیبات خاص رنگدانه‌ها (مانند رنگدانه‌های ترکیبی فیروزه‌ای) کاهش مقاومت فشاری به‌ویژه در درصدهای بالاتر رنگدانه‌ها مشاهده می‌شود. این کاهش در مقاومت فشاری در مدت زمان کوتاه‌تر (۷ روزه) نسبت به ۲۸ روزه نیز مشهود است. انحراف استاندارد که به‌صورت نوار خطای قرمز رنگ در نمودار نشان داده شده است، نشان‌دهنده پراکندگی داده‌ها و عدم قطعیت در نتایج آزمایش‌ها است. این نوار خطاها به وضوح نشان می‌دهند که برخی ترکیبات رنگدانه‌ها تأثیرات غیرقابل پیش‌بینی‌تری دارند و می‌توانند به‌طور معناداری مقاومت فشاری بتن را کاهش دهند، به‌ویژه زمانی که میزان رنگدانه‌ها به سطح بالاتری می‌رسد. برای مثال، نمونه‌های حاوی رنگدانه‌های شیمیایی آبی و سبز در هر دو دوره زمانی کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری داشتند که این موضوع با انحراف استاندارد بالا تایید می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که

طراحی شهری و سازه‌هایی با نیاز به مقاومت بالا می‌باشد. به طور کلی، شکل ۱۳ می‌تواند به طراحان و مهندسان کمک کند تا انتخاب‌های دقیقی برای نوع و مقدار رنگدانه‌ها در بتن‌های رنگی انجام دهند تا هم به زیبایی‌شناسی پروژه‌های عمرانی و شهری توجه داشته باشند و هم خواص مکانیکی مطلوب بتن را حفظ کنند.

هرچه درصد رنگدانه افزایش می‌یابد، احتمال کاهش مقاومت فشاری بتن بیشتر می‌شود، که این امر به‌ویژه در استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی و ترکیبی مشهود است. از طرفی، رنگدانه‌های معدنی، به‌ویژه لیمونیت، در برخی درصدها موجب افزایش مقاومت فشاری بتن در هر دو دوره ۷ روزه و ۲۸ روزه شدند، که این نتیجه مثبتی برای کاربردهای



شکل ۱۳: درصد رشد مقاومت فشاری بتن در ۷ روز و ۲۸ روز برای رنگدانه‌های مختلف همراه با انحراف استاندارد.

Figure 13: Percentage Growth in Compressive Strength of Concrete at 7 Days and 28 Days for Different Pigments with Standard Deviation.

جدول ۱۱: مقایسه نتایج انحراف استاندارد و ضریب تغییر در مقاومت فشاری نمونه‌ها

Table 11: Comparison of the results of the standard deviation and the coefficient of change in the compressive strength of the samples

Sample specifications		(MPa)			The Average compressive strength of the samples	Variance	standard deviation	CV %
		A	B	C				
Mineral Pigment	Control (7days)	17.1	16.7	16.5	16.8	0.093	0.306	1.822
	L5%(7 days)	17.4	17.2	17.5	17.4	0.023	0.153	0.880
	L10%(7 days)	18.4	18.1	18.0	18.2	0.043	0.208	1.146
	L15%(7 days)	16.1	16.6	16.0	16.2	0.103	0.321	1.980
	L20%(7 days)	15.5	15.8	15.4	15.6	0.043	0.208	1.337
	Control (28 days)	24.9	25.4	25.0	25.1	0.070	0.265	1.054
	L5%(28 days)	26.3	26.3	26.1	26.2	0.013	0.115	0.440
	L10%(28 days)	27.4	27.3	27.2	27.3	0.010	0.100	0.366
	L15%(28 days)	24.2	23.9	24.1	24.1	0.023	0.153	0.635
	L20%(28 days)	23.2	22.9	23.0	23.0	0.023	0.153	0.663

جدول ۱۱: ادامه

Table 11: Continue.

Sample specifications		(MPa)			The Average compressive strength of the samples	Variance	standard deviation	CV %
Composite Pigment	Control (7 days)	18.9	19	19.4	19.1	0.07	0.265	1.385
	Turquoise 3 % (7 days)	17.6	17.4	17.7	17.6	0.0233	0.153	0.870
	Turquoise 5 % (7 days)	15.8	15.5	15.4	15.6	0.0433	0.208	1.337
	Turquoise 7% (7 days)	11.7	11.7	11.6	11.7	0.0033	0.058	0.495
	Control (28 days)	28.3	28.3	28.2	28.3	0.0033	0.058	0.204
	Turquoise 3% (28 days)	26.4	26.5	26.2	26.4	0.0233	0.153	0.579
	Turquoise 5 % (28 days)	24.8	24.5	24.7	24.7	0.0233	0.153	0.619
	Turquoise 7 % (28 days)	21.2	20.9	20.8	21	0.0433	0.208	0.993
Chemical Pigment	Control (7 days)	18.9	19.4	19.0	19.1	0.07	0.265	1.385
	Red % 3	17.9	18.0	17.7	17.9	0.023	0.153	0.855
	Red % 5	16.7	16.33	16.4	16.4	0.093	0.306	1.867
	Red % 7	14.9	15.0	15.3	15.1	0.043	0.208	1.382
	Yellow % 3	21.9	22.2	22.8	22.3	0.210	0.458	2.055
	Yellow % 5	25.3	25.1	24.9	25.1	0.04	0.2	0.797
	Yellow % 7	26.4	27.1	26.9	26.8	0.13	0.361	1.345
	Green % 3	15.7	16.1	15.8	15.9	0.043	0.208	1.312
	Green % 5	11.0	11.2	11.2	11.1	0.013	0.115	1.037
	Green % 7	7.5	7.7	7.2	7.5	0.063	0.252	3.370
	Blue % 3	17.4	17.8	18.1	17.8	0.123	0.351	1.977
	Blue % 5	16.0	16.5	15.9	16.1	0.103	0.321	1.992
	Blue % 7	12.3	11.9	12.5	12.2	0.093	0.306	2.497
	Control (28 days)	28.3	28.1	28.4	28.3	0.023	0.153	0.54
	Red % 3	26.4	26.5	27.0	26.7	0.103	0.321	1.207
	Red % 5	25.8	25.5	26.0	25.8	0.063	0.252	0.977
	Red % 7	24.8	24.7	24.5	24.7	0.023	0.153	0.619
	Yellow % 3	30.9	31.2	31.3	31.1	0.043	0.268	0.669
	Yellow % 5	33.9	33.2	34.2	33.8	0.263	0.513	1.519
	Yellow % 7	35.8	35.0	36.0	35.6	0.280	0.529	1.486
	Green % 3	24.5	24.3	24.9	24.6	0.093	0.306	1.244
	Green % 5	20.2	20.1	20.6	20.3	0.070	0.265	1.303
	Green % 7	16.4	16.5	16.2	16.4	0.023	0.153	0.933
	Blue % 3	26.4	26.6	26.9	26.6	0.063	0.252	0.945
	Blue % 5	25.0	25.6	25.1	25.2	0.103	0.321	1.274
	Blue % 7	21.3	21.4	21.7	21.5	0.043	0.208	0.97

چشم‌گیر مقاومت فشاری بتن شدند. این کاهش به‌ویژه در رنگدانه‌های سبز و آبی مشاهده شد. بنابراین، برای پروژه‌های ساخت‌وساز با نیاز به مقاومت فشاری بالا، استفاده از رنگدانه‌های شیمیایی باید با احتیاط و در درصدهای کنترل شده انجام شود. به‌طور خاص، رنگدانه زرد توانست بر خلاف سایر رنگدانه‌های شیمیایی تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن بگذارد و باعث افزایش مقاومت آن شد. این ویژگی می‌تواند در طراحی پروژه‌های عمرانی و شهری که در آن‌ها مقاومت بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مفید واقع شود. رنگدانه‌های معدنی، به‌ویژه لیمونیت، تأثیر بسیار مثبتی بر مقاومت فشاری بتن داشتند. این رنگدانه‌ها به دلیل داشتن ترکیبات اکسید آهن، باعث افزایش تراکم بتن و کاهش تخلخل آن می‌شوند که نتیجه آن تقویت مقاومت فشاری است. بنابراین، رنگدانه‌های معدنی به‌ویژه لیمونیت می‌توانند گزینه مناسبی برای استفاده در پروژه‌های شهری با نیاز به مقاومت بالا و طول عمر زیاد باشند. رنگدانه‌های ترکیبی (فیروزه‌ای) به دلیل سختی پایین و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها، موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شدند. این کاهش می‌تواند در پروژه‌هایی که نیاز به ویژگی‌های مکانیکی بالا دارند، مشکل ساز باشد. لذا استفاده از رنگدانه‌های ترکیبی باید با دقت و در شرایط خاص انجام گیرد. برای بهره‌برداری بهینه از بتن رنگی در پروژه‌های عمرانی و شهری، انتخاب مناسب نوع و درصد رنگدانه‌ها با توجه به نیازهای عملکردی، زیبایی‌شناختی و سایر مولفه‌های آن‌ها ضروری است.

الف) انتخاب رنگدانه‌های مناسب: انتخاب نوع رنگدانه باید با توجه به نیازهای پروژه صورت گیرد. برای پروژه‌هایی که نیاز به زیبایی‌شناسی خاص دارند، رنگدانه‌های شیمیایی می‌توانند گزینه مناسبی باشند، در حالی که برای پروژه‌هایی که مقاومت فشاری بالاتری لازم است، بهتر است از رنگدانه‌های معدنی، به‌ویژه لیمونیت، استفاده شود.

ب) کنترل درصد رنگدانه‌ها: در استفاده از رنگدانه‌ها باید دقت شود که درصد مصرفی آن‌ها نباید از حد معینی تجاوز کند. به‌ویژه در طرح‌های حاوی رنگدانه‌های شیمیایی و ترکیبی، باید از درصدهای کمتر استفاده شود تا تأثیر منفی آن‌ها بر مقاومت فشاری و روانی کاهش یابد.

ج) توجه به روانی بتن: در پروژه‌هایی که نیاز به کارایی بالای بتن دارند، باید انتخاب رنگدانه‌ها به گونه‌ای باشد که کمترین تأثیر منفی را بر روانی بتن داشته باشد. به‌ویژه در مواردی که بتن باید به راحتی در قالب‌ها ریخته شود یا در سطوح پیچیده اجرا شود، انتخاب رنگدانه‌های با جاذب آب کمتر می‌تواند کارایی عملیاتی اجرایی را بهبود بخشد.

مطالعه نشان داد که استفاده از رنگدانه‌ها در بتن می‌تواند در پروژه‌های عمرانی و شهری علاوه بر اثرات زیبایی‌شناختی، تأثیرات

برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج، کلیه آزمون‌های مقاومت فشاری با سه نمونه تکراری در هر طرح اختلاط و در هر سن (۷ و ۲۸ روزه) انجام شد. میانگین داده‌ها به‌عنوان مقدار اصلی مقاومت فشاری و انحراف معیار (SD) به‌منظور سنجش پراکندگی داده‌ها محاسبه گردید. در شکل ۱۳، نوارهای خطای نارنجی رنگ نشان‌دهنده دامنه انحراف معیار هر گروه رنگدانه هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان پراکندگی نتایج در رنگدانه‌های شیمیایی آبی و سبز بیشتر از سایر گروه‌هاست که بیانگر حساسیت بالاتر این رنگدانه‌ها به تغییرات ریزساختاری بتن است. در مقابل، نمونه‌های حاوی رنگدانه معدنی لیمونیت دارای انحراف معیار کمتری بوده و نتایج پایدارتری را نشان می‌دهند. بدین ترتیب، داده‌های استحکامی ارائه‌شده در این پژوهش نه تنها به‌صورت میانگین، بلکه همراه با شاخص آماری پراکندگی نیز گزارش شده‌اند تا قابلیت اطمینان نتایج برای مقایسه و تحلیل‌های آماری بعدی افزایش یابد.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر رنگدانه‌های شیمیایی، معدنی و ترکیبی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن، به‌ویژه مقاومت فشاری و روانی آن پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند که افزودن رنگدانه‌ها به مخلوط بتن تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن دارد. این تأثیرات نه تنها به جنبه‌های کارکردی بتن بلکه به جنبه‌های زیبایی‌شناسی و عملکردی آن نیز مربوط می‌شود.

الف) تأثیر رنگدانه‌ها بر روانی بتن: یکی از نتایج بارز این مطالعه کاهش روانی بتن با افزودن رنگدانه‌ها به مخلوط است. رنگدانه‌ها به دلیل خاصیت جاذب آب خود، موجب افزایش گرانروی بتن و در نتیجه کاهش جریان‌پذیری آن می‌شوند. این امر ممکن است مشکلاتی در عملیات اجرایی بتن، به‌ویژه در پروژه‌های با نیاز به بتن‌ریزی با ویژگی‌های خاص، ایجاد کند. در میان انواع مختلف رنگدانه‌ها، رنگدانه‌های شیمیایی به‌ویژه رنگدانه زرد کمترین تأثیر منفی را بر روانی بتن داشتند. این ویژگی به‌ویژه در پروژه‌هایی که به روانی بالای بتن نیاز دارند، مانند استفاده در قالب‌ریزی یا سطوح با جزئیات دقیق، از اهمیت بالایی برخوردار است. در مقابل، رنگدانه‌های ترکیبی و معدنی (به‌ویژه لیمونیت) تأثیر قابل توجهی بر کاهش روانی داشتند. بنابراین، در پروژه‌هایی که نیاز به روانی بیشتر بتن دارند، باید از ترکیب رنگدانه‌هایی استفاده شود که حداقل اثر منفی را بر روانی داشته باشند.

ب) تأثیر رنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری بتن: یکی دیگر از نتایج مهم این تحقیق، تأثیر رنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری بتن است. رنگدانه‌های شیمیایی به‌ویژه در درصدهای بالاتر، موجب کاهش

کبالت یا فتالوسیانین نیست. از این رو، می‌توان گفت الگوی کلی اثر رنگدانه‌ها بر روانی و مقاومت بتن در این تحقیق معتبر است، اما مقادیر کمی نتایج وابسته به نوع و منبع تولید رنگدانه‌هاست. برای دستیابی به تعمیم‌پذیری بالاتر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از رنگدانه‌های با ترکیب‌های مختلف و از تولیدکنندگان گوناگون استفاده و مقایسه شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از آزمایشگاه بتن دانشگاه ملی مهارت استان فارس به سبب فراهم آوردن تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی لازم برای انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

فنی و مکانیکی مهمی داشته باشد. بنابراین، در انتخاب و استفاده از رنگدانه‌ها باید تعادلی میان خواص مکانیکی و زیبایی‌شناختی برقرار شود. این تحقیق می‌تواند راهنمایی مؤثر برای طراحان و مهندسان در انتخاب مناسب‌ترین ترکیب رنگ و نوع رنگدانه در بتن باشد تا هم زیبایی‌شناسی و هم عملکرد بتن بهینه شود.

نتایج این پژوهش بر اساس رنگدانه‌های خاص مورد استفاده در آزمایش‌ها به دست آمده است و از نظر علمی نمی‌توان آن را به تمامی رنگدانه‌های هم‌نام (مثلاً هر نوع رنگدانه زرد یا آبی) تعمیم داد؛ زیرا رفتار مکانیکی بتن به ترکیب شیمیایی دقیق، اندازه ذرات، شکل و درصد خلوص هر رنگدانه بستگی دارد. برای مثال، رنگدانه زرد مورد استفاده در این پژوهش از نوع اکسید آهن آبدار ($\text{FeO}(\text{OH})$) با اندازه ذرات نسبتاً درشت بوده که موجب افزایش مقاومت فشاری بتن گردیده است، در حالی که سایر رنگدانه‌های زرد با ترکیب‌های متفاوت ممکن است نتایج دیگری ایجاد کنند. به همین ترتیب، رنگدانه آبی مبتنی بر ترکیب مس ($\text{Cu}_3[\text{OH}(\text{CO}_3)_2]$) رفتار فیزیکی و شیمیایی خاصی دارد که قابل تعمیم به دیگر رنگ‌های آبی با پایه

۵- مراجع

- Sharifi M, Sheibani H. Thee effect of mineral pigments on the compressive strength of colored concrete by focusing on the role of the improved color palette in current cities of Iran. J Color Sci Tech. (2022);16:81-92. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1401.16.1.7.9>. [In Persian].
- Golshan M, Avaznejad F, Sheibani H. Laboratory investigation of compressive, tensile and wear resistance of concrete with limonite mineral pigment with emphasis on urban beautification. J Color Sci Tech. 2023;17(1):51-63. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.17.1.4.3> [In Persian].
- Avaznejad F, Sheibani H. Studying and reviewing the color in urban placemaking. J Stud Color World. 2022;12:71-86. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1401.12.1.5.0> [In Persian].
- Sharifi M, Sheibani H, Bayat Beheshti Fard S. Studying and Reviewing the Comprehensive Plan of the Color Palette of the City. J. Stud Color World. 2023;13(1):33-49. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.1.3.5> [In Persian].
- Sheibani H, Avaznejad F. The color palette of the city. Norouzi publications, 2017. [In Persian].
- Avaznejad F, Sheibani H. color in arsen zandieh shiraz. j. stud. Color world. 2019;9:43-52. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1401.12.1.5.0> [In Persian].
- Avaznejad F, Golshan M, Sheibani H. 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. Advanced Materials and New Coatings, 2022;10(40):3032- 3047. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.17.1.4.3>. [In Persian].
- Janpoor H, Alah Verdi A. A review on performance of different organic coatings in protecting concrete structures against aggressive agents. J Stud Color World. 2012;1(4):9-14. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1390.1.4.3.7>. [In Persian].
- Naderi M, Qodousian O, Mollayi Dehshali H. Effects of Type and Dosage of Pigment on the Concrete Compressive Strength and Its Prediction by the Fuzzy Logic. J Color Sci Tech. 2011;5(4):315-324. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1390.5.4.7.8>. [In Persian].
- ASTM c979/c979m, (2019). Standard specification for pigments for integrally colored concrete, USA.
- American standards for testing and materials, astm c494-10a/c494m-10a standard specification for chemical admixtures for concrete.
- American concrete institute, aci303.1-97, standard specification for cast-in-place architectural concrete.
- American Association of State Highway and transportation officials aashto m194-chemical admixtures for concrete.
- American standards for testing and materials, ACI 211.9r-18, standard concrete technology and mix design.
- Lee H, Yu M, Lee J. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. Cement & Concrete Research, Ed. Elsevier. 1889-1896. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00209-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00209-6)
- American standards for testing and materials, ASTM C33, standard specification for concrete aggregates.
- Scheinost A, Schulze D, Schwertmann U. Diffuse Reflectance Spectra of Al Substituted Goethite: A Ligand Field Approach, Clays Clays Miner. 2016;156-164. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1999.0470205>
- American Standards for Testing and Materials, ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- American standards for testing and materials, ASTM C128-15 standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.

20. American Standards for Testing and Materials, ASTM D1067, Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water.
21. Iran national standards, inso. 302, 3rd. Revision, (2015).
22. American standards for testing and materials, astm c566 standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying.
23. [23] American standards for testing and materials, astm c136 standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
24. American Standards for Testing and Materials, ASTM C107, Method of Panel Spalling Testing High-Duty Fireclay Brick (Withdrawn 1994).
25. Avaznejad F, Golshan MR, Sheibani H. The Effect of Turquoise Pigment Amounts on the Physical Properties of Concrete Used in Architecture and Iranian Urban Design. J Color Sci Tech. 2023;17(3):203-220. [In Persian].
26. Mansoori B, Aghamajidi R, Bazae A, Ghodomizadeh G. The use of okhra soil and nano aluminum oxide in the colorability of concrete and the investigation of some mechanical properties and wear durability of concrete. J Struct Constr Eng. 2023;10(8):179-201. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.375610.2986>.
27. Bazae A, Mansoori B, Aghamajidi R, Golshan M. Investigating the mechanical properties and freezing durability of yellow colored concrete with different weight ratios of mush clay pigment (limonite). J Struct Constr Eng. 2023; <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368634.2967>.

How to cite this article:

Sheibani HR, Avaznejad F, Golshan MR, Hajipoor Kh. Comparative Comparison of Compressive Strength and Slump of Colored Concrete with Chemical, Mineral, and Composite Pigments to Improve Visual Quality in Urban Landscape Design. J Color Sci Tech. 2025;19(3):249-270. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167588.1263> [In Persian]