

Investigating the effect of rust and iron shavings on the mechanical properties of self-compacting concrete

Seyed Ali Asghari Pari ^{1*}, Amir Hossein Derakhshan Nezhad ², Mahbobeh Mirzaie Aliabadi ³

1,3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2- Master's student in Civil-Structural Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

ABSTRACT

Today, self-compacting concrete is recognized as one of the greatest advances in the concrete industry. Self-compacting concrete is increasingly targeted by engineers in the construction industry. One of the important concerns in the environment is solid waste disposal, which increases the need to reuse solid waste. Waste disposal is a serious environmental challenge worldwide. Recycling of industrial waste for concrete production is currently the best way for waste management, environment and sustainable products. Rust and iron scraps are one of the major parts of solid waste. All kinds of metals turn into iron rust after being oxidized, and iron chips and shavings are created during turning and cutting, which are considered as industrial waste. The main goal of this research is to use the idea of using (iron rust) rejected from sieve No. 20 and (iron shavings) rejected from sieve No. 4 in the design of mixing self-compacting concrete with different percentages (0, 0.5, 1, 1.5, 2% relative to the weight of sand) and (0, 5, 10, 15, 20% relative to the weight of sand) were used as an additive, cheap, waste and available. For fresh and hardened properties of self-compacting concrete tests with and without rust and iron filings, slump flow tests, V funnel, L box, J ring, U box and compressive strength, tensile strength, ultrasonic pulse speed, Schmidt hammer, impact Temperature and permeability were investigated. The results of the experiments showed that by increasing the percentage of (iron rust) and (iron filings) in self-compacting concrete, the compressive strength increased in the range of 1.75-8.14 percent compared to self-compacting concrete (standard) and the tensile strength In 28 days of processing, the resistance increased in the range of 3.73-16.33% compared to self-compacting concrete (standard).

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 February 2024

Revise Date: 28 May 2024

Accept Date: 20 June 2024

Keywords:

Self-consolidating concrete
Iron rust
Iron shavings
pushing resistance
Tensile strength
Permeability
Schmidt hammer
Ultrasonic pulse speed

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.441467.3355](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441467.3355)

*Corresponding author: Seyed Ali Asghari Pari
Email address: asghari@bkatu.ac.ir

بررسی تأثیر زنگ و براده آهن بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم

سید علی اصغری پری^{1*}، امیرحسین درخشان نژاد²، محبوبه میرزائی علی آبادی³

1 و 3- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان،

بهبهان، ایران

چکیده

امروزه بتن خودتراکم به عنوان یکی از بزرگترین پیشرفت‌ها در صنعت بتن شناخته شده است. بتن خودتراکم به طور فزاینده‌ای در صنعت ساختمان مورد هدف مهندسان قرار گرفته است. یکی از نگرانی‌های مهم در محیط زیست، دفع زباله‌های جامد است که نیاز به استفاده مجدد از زباله‌های جامد را افزایش می‌دهند. دفع بی‌رویه زباله یک چالش زیست محیطی شدید در سطح جهانی است. بازیافت ضایعات صنعتی برای تولید بتن در حال حاضر بهترین راه برای مدیریت ضایعات، محیط زیست و محصولات پایدار است. ضایعات زنگ و براده آهن یکی از بخش‌های عمده زباله‌های جامد هستند. انواع فلزات پس از اکسید شدن تبدیل به زنگ آهن می‌شوند، همچنین در هنگام تراش کاری و برش کاری‌ها خرده و براده آهن ایجاد می‌شود که این موارد از ضایعات صنایع محسوب می‌شوند. هدف اصلی این پژوهش، به ایده استفاده از (زنگ آهن) رد شده از الک شماره 20 و (براده آهن) رد شده از الک شماره 4 در طرح اختلاط بتن خودتراکم با درصدهای مختلف (0، 0/5، 1، 1/5، 2 درصد نسبت به وزن شن) و (0، 5، 10، 15، 20 درصد نسبت به وزن ماسه) به عنوان یک ماده افزودنی، ارزان، ضایعات و قابل دسترس استفاده شد. برای خواص تازه و سخت شده آزمون‌های بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L، حلقه J، جعبه U و مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت پالس آلتراسونیک، چکش اشमित، تأثیر دما و نفوذپذیری مورد انجام و بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش درصد (زنگ آهن) و (براده آهن) در بتن خودتراکم مقاومت فشاری در عمل‌آوری 28 روزه در محدوده 1/75 - 8/14 درصد مقاومت نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت و مقاومت کششی در عمل‌آوری 28 روزه در محدوده 3/73 - 16/33 درصد مقاومت نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، زنگ آهن، براده آهن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری، چکش اشमित، سرعت پالس آلتراسونیک

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|---|----------------|--|----------------|------------------------------------|------------|
| doi: | 10.22065/jsce.2024.441467.3355 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441467.3355 | /11/30 1403 | /11/30 1403 | /03/31 1403 | /03/08 1403 | 1402/11/14 |
| | | | سید علی اصغری پری asgharipari@bkatu.ac.ir | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | |



1- مقدمه

بتن خودتراکم به عنوان یک نوآوری مهم در صنعت ساخت و ساز، امکانات و کاربردهای جدیدی را فراهم کرده و باعث بهبود کیفیت و کارایی در پروژه‌های مختلف می‌شود. بتن خودتراکم نوعی بتن با خواص جریان‌پذیری و کارایی بالا است که بدون نیاز به ویبره یا لرزش، در قالب‌ها جریان یافته و تمامی زوایای آن را پر می‌کند. بتن خودتراکم از سنگ‌دانه‌های ریز و درشت، سیمان، مواد افزودنی و آب تشکیل می‌شود [1]. بتن خودتراکم می‌تواند به راحتی از انواع اشکال پیچیده یا اشکالی که دارای میلگردهای تقویت‌کننده زیادی هستند، جریان پیدا کند و هیچ فضای خالی باقی نمی‌گذارد [2]. این نوع بتن دارای تنش تسلیم کم، تغییرشکل‌پذیری بالا، مقاومت در برابر جداسازی و ویسکوزیته متوسط است [3]. بتن خودتراکم از نظر روانی و کارایی نسبت به بتن معمولی کارتر است و به راحتی در داخل و اطراف قالب بدون ارتعاش و ویبره جریان می‌یابد و قابلیت خود تراز شدن در سطح را دارد [4]. معمولاً از نظر زمان‌گیری، عمل‌آوری و دوام از بتن معمولی نیز بهتر است [5]. نسبت آب به سیمان در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی کمتر است و خواص سیال خود را با فوق روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های افزایش‌دهنده به دست می‌آورد [6-8]. در نتیجه، استفاده از بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی، بهتر و کارآمدتر است [9]. علاوه بر این، بتن خودتراکم را می‌توان یک ماده مقرون‌به‌صرفه برای کاهش هزینه‌ها در اجرا از قبیل، زمان و ویبره به دلیل فشرده شدن تحت وزن خود در نظر گرفت [10]. امروزه با هر فعالیت معدنی و صنایع، زباله‌های زیادی ایجاد می‌شود. به دلیل استفاده ناکافی از آن‌ها، معمولاً در دفع و دفن زباله تخلیه می‌شوند و در بیشتر موارد، استفاده زیادی از آن‌ها نمی‌شود [11-13]. حجم زباله‌های جامد تولید شده، از جمله ضایعات حاصل شده از فعالیت‌های فراوری مواد معدنی، صنایع، ذوب آهن، شرکت‌های تولیدی فولادی و غیره هستند. یکی از نگرانی‌های اصلی و مهم در آلودگی محیط زیست و منابع طبیعی، صنعت و معدن هستند؛ بنابراین، راه‌حلی برای استفاده از زباله‌های صنایع ایجاد شده است. استفاده از ضایعات صنایع به عنوان مصالح ساختمانی برای خاکریزهای جاده‌ها، راه‌آهن‌ها، بتن و سدها به جای استفاده از شن و ماسه طبیعی در 20 سال گذشته افزایش یافته است، همچنین استفاده مجدد از ضایعات جامد صنعتی به عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن توسط بسیاری از پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است [14]. شن و ماسه طبیعی به دلیل افزایش مصرف در انواع بتن‌ها در حال کاهش بوده و در نتیجه، جایگزین شن و ماسه طبیعی با استفاده از ضایعات در حال رشد است [15]. یکی از ضایعات صنعتی که از انواع فلزات، برش کاری و تراش کاری ایجاد می‌شوند زنگ و براده هستند. سه نوع از زنگ آهن وجود دارد. این سه نوع از نظر ترکیبات شیمیایی و نسبت ترکیب آهن و اکسیژن موجود در آن‌ها تفاوت دارند. این ماده نسبتاً ارزان قیمت، مقاومت بالای در برابر تغییر رنگ در مقابل نور خورشید دارند [7]. آن‌ها همچنین در شرایط محیطی، پایداری بالایی دارند. البته رنگ‌دانه‌های طبیعی، دوام و قوام کمتری نسبت به رنگ‌دانه‌های مصنوعی دارند. به همین دلیل هم از آن‌ها به عنوان رنگ‌های حمایتی و زیرسازی استفاده می‌شود. دیگر خاصیت رنگ‌دانه‌های زنگ آهن این است که به دلیل اندازه کوچکشان که ده برابر از ذرات سیمان کوچک‌تر هستند، به خوبی در شبکه سیمان جای می‌گیرند. دلیل یکنواختی سطوح بتنی و سیمانی که با این رنگ‌ها پوشش می‌شوند نیز همین است [9]. رنگ‌دانه‌های شیمیایی در برابر مواد قلیایی نیز مقاومت بسیار بالایی دارند. تولید زنگ آهن از فلزات ترکیب شدن نور خورشید و رطوبت بر ذرات ریز فلز طی مدت زمان پدیدار می‌شوند [16]. زنگ آهن به دلیل ترکیبات شیمیایی دارای خواص فیزیکی و مکانیکی تأثیر گذار است. به دلیل بافت نرم زنگ آهن و ترکیب عناصر آن پیوند خوبی با سیمان پرتلند و همچنین پایداری بالا در مخلوط بتن ایجاد می‌کند [8]. زنگ آهن به مقدار زیاد در سراسر جهان ضایعات می‌شود. با افزایش مستمر تولید زنگ آهن، به جای دفع آن در محیط زیست می‌توان به استفاده از آن در بتن و مخلوط سیمان نمود که منجر به، دوام و مقاومت می‌شود، همچنین به عنوان پرکننده منافذ داخلی و بهبود ریزساختار بتن کمک کند. به دلیل واکنش‌پذیری پوزولانی کم، بر خواص مکانیکی سیمان در بتن خودتراکم تأثیر گذار است. با توجه به اینکه سنگدانه با اندازه ذرات بزرگتر (مانند شن و ماسه) بیشتر باعث ناهمگنی مخلوط، منافذ بین ذرات و تخلخل می‌شوند، استفاده از زنگ آهن جهت بهبود همگنی، فشرده‌گی، کاهش تخلخل، توپری بتن و مقاومت به منظور رسیدن به خواص مکانیکی و دوام بتن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده جامع از زنگ آهن باعث کاهش خطرات زیست محیطی و مصالح طبیعی می‌شود [10]. براده آهن یا ریزه آهن در مواقعی که متخصص یا کارگر در حال سوهان کردن، مته کردن، برش کاری و تراش کاری است، پدیدار می‌شود و به عنوان ضایعات و مواد دور ریختنی به طبیعت و محیط زیست دور ریخته می‌شوند [17]. پژوهش‌های مختلفی در رابطه با استفاده از براده و زنگ آهن در بتن صورت گرفته

است که مواردی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. سینق و همکاران [3] در سال 2016، به تاثیر سرباره آهن به عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌های ریز بررسی شد و بر ویژگی‌های دوام بتن خودتراکم و تحلیل خواص مکانیکی ریز ساختاری بتن خودتراکم با سرباره آهن به عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌های ریز پرداختند. موتوکو و همکاران [4] در سال 2018، اثر پودر آهن (Fe_2O_3) بر مقاومت، کارایی و تخلخل بتن را بررسی کردند. عسکری دولت آباد و همکاران [6] در سال 2019، به بررسی خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن سبک خود متراکم حاوی ضایعات معدن آهن سیرجان پرداختند. روزالس و همکاران [7] در سال 2020، اثر ضایعات سرباره فولاد ضد زنگ در ساخت بتن خود متراکم مورد مطالعه قرار دادند. ادوارد و همکاران [10] در سال 2021، به بررسی اثر نانو اکسید آهن بر بتن در معرض حمله فیزیکی سولفات پرداختند. ژائو و همکاران [11] در سال 2021، تاثیر استفاده از ضایعات آهنی در بتن با کارایی بالا مورد تحقیق قرار دادند. مارک و همکاران [12] در سال 2021، اثر سرباره کوره القایی بر ویژگی‌های مقاومتی بتن خودتراکم را بررسی کردند. پورنازیان و همکاران [13] در سال 2024، به بررسی جامع ویژگی‌های عملکرد، خواص مکانیکی و پارامترهای دوام بتن خودتراکم حاوی سرباره آهن به عنوان سنگدانه درشت پرداختند.

یکی از مهم‌ترین ارکان در تولید علم، لحاظ نمودن رویکرد توسعه پایدار و بهسازی است. توسعه پایدار با مفهوم استفاده از پتانسیل و امکانات موجود در راستای استفاده بهینه از منابع در دسترس، حائز اهمیت است. جنبه نوآوری این پژوهش، در جهت استفاده بهینه از منابع ضایعاتی و به حداقل رساندن ضایعات است. از زنگ آهن جهت افزایش مقاومت فشاری در بتن خودتراکم استفاده شد و از نانو سیلیس جهت افزایش مقاومت ریزساختار، تقویت ناحیه انتقال (فاز سوم) و از VMA جهت کنترل خواص رئولوژیکی در این طرح اختلاط استفاده شد همچنین آزمایش تاثیر دما بر مقاومت فشاری 1 روزه بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن و آزمایش نفوذپذیری انجام شد. برای این منظور، خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم حاوی زنگ و براده آهن به عنوان جایگزین شن و ماسه در این مقاله ارائه و پرداخته شد. هدف از افزودن زنگ و براده آهن در طرح مخلوط بتن خودتراکم جهت بهبود افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری می‌باشد.

2- برنامه آزمایشگاهی

2-1- مصالح مصرفی

2-1-1- سیمان

باتوجه به اینکه در بتن‌های خودتراکم، حجم خمیر سیمان نسبت به بتن‌های معمولی کم‌تر است، انتخاب نوع سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق برای تمامی 5 طرح مخلوط‌ها از سیمان پرتلند تیپ 2 تولید کارخانه سیمان بهبهان استفاده شد که طبق استاندارد ASTM C150 [18] است (مطابق جدول 1 و 2).

جدول 1: مشخصات سیمان پرتلند تیپ 2

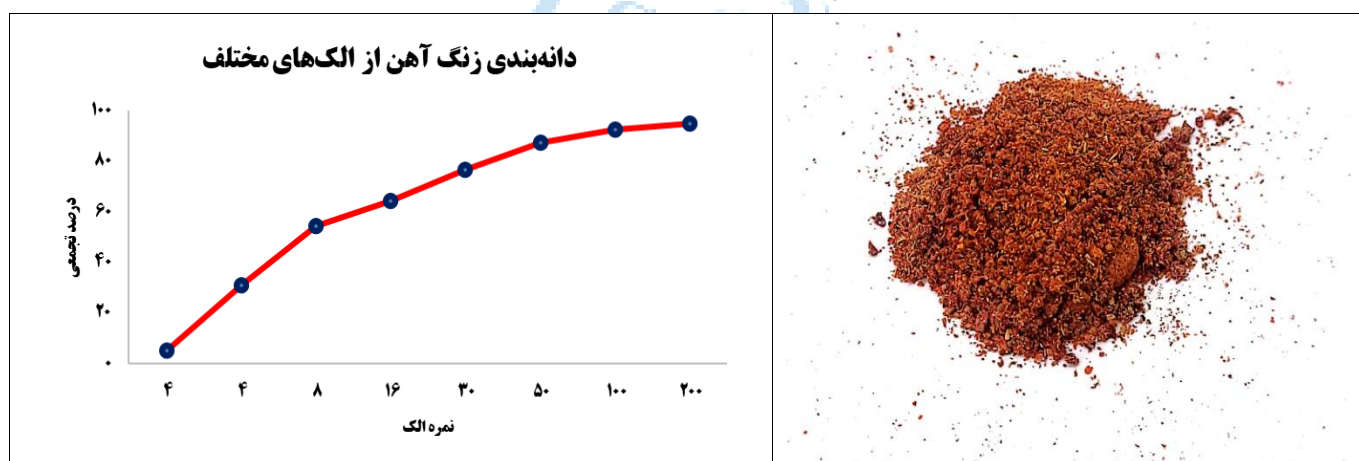
| تحلیل شیمیایی | IR | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | O+Na | K ₂ O | LOI | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | Free Cao |
|---------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|-------------------|----------|
| درصد | 0/24 | 21/68 | 4/82 | 3/88 | 65/40 | 2/08 | 0/68 | 0/25 | 0/88 | 0/20 | 60/63 | 16/46 | 6/21 | 11/80 | 0/70 |

جدول 2: مشخصات مکانیکی سیمان پرتلند تیپ 2

| مشخصات | ظرافت بلین (cm ² /g)(BF) | زمان تنظیم اولیه (دقیقه) (IST) | زمان تنظیم نهایی (دقیقه) (FST) | مقاومت فشاری 3 روزه (kg/cm ²) | مقاومت فشاری 7 روز (kg/cm ²) | مقاومت فشاری 28 روز (kg/cm ²) |
|--------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|--|---|
| میزان | 3220 | 155 | 270 | 240 | 300 | 446 |

2-1-2- زنگ آهن

زنگ آهن ترکیبی شیمیایی است که از آهن و اکسیژن تشکیل می‌شود. حدود ۱۶ نوع زنگ آهن و اکسید هیدروکسید وجود دارد. زنگ آهن در طبیعت گسترده هستند و نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای زمین‌شناسی و بیولوژیکی دارند. زنگ آهن در دو نوع معدنی و سنتزی (مصنوعی) حاصل می‌شود. زنگ‌های آهن طبیعی شامل ترکیبی از یک یا چند اکسید آهن یا آهن به همراه ناخالصی‌هایی نظیر منگنز، خاک رس یا مواد آلی هستند. زنگ آهن مصنوعی را می‌توان به روش‌های مختلفی تولید کرد. روش تولید اکسید آهن به صورت مصنوعی در شرکت فولاد و ذوب‌آهن است. در کارخانه تولید فولاد و شمش بعد از اتمام رطوبت و سرد شدن فولاد توسط سیستم خنک‌کننده به دلیل تغییر دما در ذرات فولاد و میزان تبخیر آب سطحی در فولاد، اکسید آهن بر روی سطح شمش ایجاد می‌شود، همچنین در اثر نور خورشید و رطوبت طی مدت زمان آهن با رطوبت ترکیب و واکنش شیمیایی شده و منجر به زنگ آهن به صورت رنگ مسی حاصل می‌شود. (مطابق شکل 1). استفاده گسترده از زنگ آهن در صنایع مختلف می‌تواند به عواقب زیست محیطی منفی منجر شود. آلودگی هوا و آب به دلیل ذرات معلق و مواد زائد از فرایندهای تولید زنگ آهن، به یکی از نگرانی‌های اصلی در این زمینه تبدیل شده است. به همین دلیل، کنترل و مدیریت مناسب ضایعات و انتشارات آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ویژگی زنگ آهن به‌عنوان ماده‌ای دورریختنی، عبارت‌اند از؛ مقاومت بالا در برابر تغییر رنگ در مقابل نور خورشید و پایدار در شرایط محیطی است. خاصیت مهم زنگ آهن به دلیل اندازه کوچکشان که ده برابر از ذرات سیمان کوچک‌تر هستند، به‌خوبی در شبکه سیمان جای می‌گیرند و با توجه به اندازه ریز آن‌ها با سیمان واکنش نشان داده و بر گیرش نهایی سیمان تأثیرگذار است و سرعت‌گیرش را افزایش می‌دهند همچنین با ترکیب شدن سیمان می‌تواند سطح بتن را یکنواخت‌تر کند. ترکیب سیمان با زنگ آهن می‌تواند مقاومت مواد قلیایی را نیز افزایش دهد. همچنین، درخشندگی بیشتری هم به سطح می‌دهند و مقاومت خمیر سیمان را نیز افزایش دهند. ترکیبات اصلی زنگ آهن عبارت‌اند از؛ دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2)، آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، کلسیم اکسید (CaO)، اکسید منیزیم (MgO) و اکسید آهن III (Fe_2O_3) هستند که 95 درصد ترکیب را تشکیل می‌دهند. برای استفاده از زنگ آهن در بتن خودتراکم، رد شده از الک با شماره 20 مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از زنگ آهن در ساخت بتن راه حل خوبی برای دفع آن است. آزمایش ویکات برای سیمان پرتلند تیپ 2 با و بدون زنگ آهن صورت گرفت که مطابق با استاندارد ASTM C150 [18] است و زمان گیرش برای سیمان تیپ 2 به صورت حداکثر 1 دقیقه در نظر گرفته شد. اندازه سوزن ویکات 10 سانتی‌متر است که گیرش اولیه برای سیمان پرتلند تیپ 2، 1/2 سانتی‌متر در خمیر سیمان اندازه گیری شد و گیرش اولیه برای سیمان پرتلند تیپ 2 با زنگ آهن، 0/5 سانتی‌متر در خمیر سیمان اندازه گیری شد. اندازه سوزن وارد شده در سیمان میزان گیرش در زمان معین را نشان می‌دهد. آزمایش نشان داد استفاده از زنگ آهن تأثیر مستقیم در گیرش سیمان می‌گذارد و باعث زودگیر شدن و افزایش مقاومت سیمان می‌شود (مطابق جدول 3 و 4).



شکل 1: زنگ آهن و دانه‌بندی آن از الک‌های مختلف

جدول 3: نتایج آزمایش ویکات سیمان با و بدون زنگ آهن

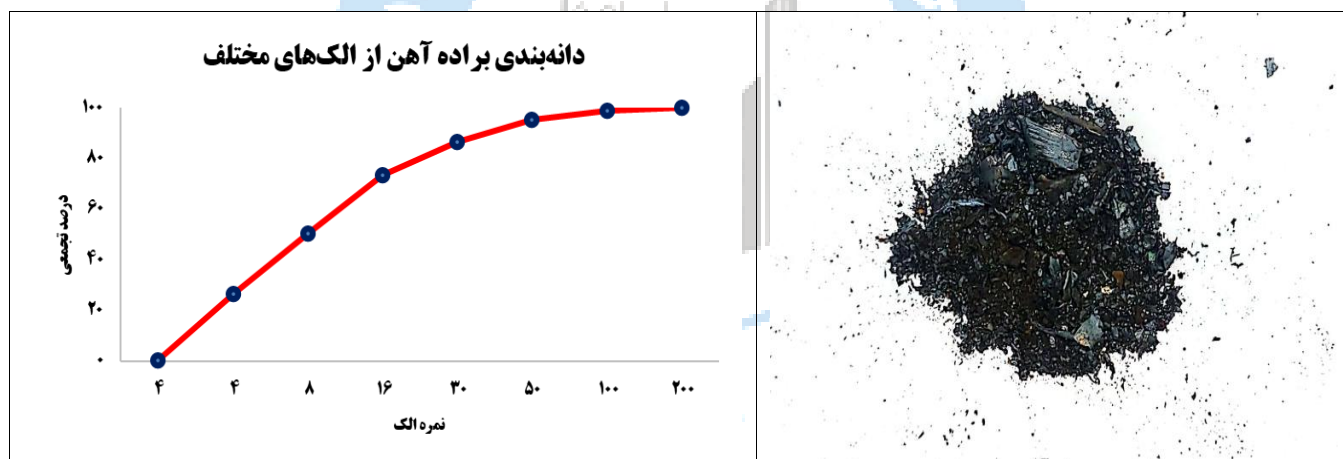
| مشخصات | زمان گیرش (دقیقه) | اندازه سوزن - گیرش نهایی (سانتی - متر) | اندازه سوزن - گیرش اولیه (سانتی متر) |
|------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
| سیمان پرتلند تیپ 2 | 1 | 3 | 1/2 |
| سیمان پرتلند تیپ 2 + زنگ آهن | 1 | 1/8 | 0/5 |

جدول 4: مشخصات اکسید آهن [3 و 4]

| ویژگی‌ها | مدول الاستیسیته (GPa) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | جذب آب (24 ساعته) | مقاومت کششی (GPa) | دمای ذوب (°C) |
|----------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| مقدار | 195 | 5/26 | ٪162 | 863 | 3470 |

2-1-3- براده آهن

براده یا براده آهن به ریزه آهن و مانند آن می‌گویند که در وقت سوهان کردن یا مته کردن بیفتد. قطعات براده اگر بسیار ریز باشد و حالت پودری به خود بگیرد به آن خاکه می‌گویند. قطعات براده‌ها اگر بزرگ باشد در زمره قراضه آهن قرار می‌گیرد. در کارگاه‌های ماشین‌کاری، صنایع و غیره در هنگام تراش کاری و برش کاری براده آهن ایجاد می‌شود که به‌عنوان ضایعات شناخته می‌شوند. به‌این ترتیب الک رد شده با شماره 4 در طرح مخلوط بتن خودتراکم با درصدهای مختلف (0، 5، 10، 15، 20 درصد نسبت به وزن ماسه) استفاده شد. براده آهن به دلیل مقاومت و دوام منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن و به دلیل ریز بود باعث پر شدن خلل و فرج درون منافذ بتن شده و بتن نیز توپرتر می‌شود (مطابق شکل 2 و جدول 5).



شکل 2: براده آهن و دانه‌بندی آن از الک‌های مختلف

جدول 5: مشخصات براده آهن

| ویژگی‌ها | مدول الاستیسیته (GPa) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | جذب آب (24 ساعته) | مقاومت کششی (GPa) | دمای ذوب (°C) |
|----------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| مقدار | 243 | 6/25 | ٪139 | 955 | 3310 |

2-1-4- سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه درشت (شن) با حداکثر اندازه 19 میلی‌متر و ماسه با حداکثر 4/75 میلی‌متر در این طرح مخلوط استفاده شدند. شن و ماسه مورد استفاده در این طرح اختلاط از رامهرمز خوزستان تهیه شدند. با استفاده از الک‌های مناسب به دانه‌بندی ماسه و شن (نخودی، بادامی) پرداخته شد. برای شن نخودی رد شده از الک با شماره 3/8، شن بادامی رد شده از الک شماره 1/2، ماسه رد شده از الک شماره 8 استفاده شد که مطابق با استاندارد ASTM C33 [19] می‌باشد (مطابق جدول 6 و شکل 3).

جدول 6: مشخصات سنگدانه‌ها

| ویژگی‌ها مقدار (%) | درصد جذب آب ماسه 2/2 | درصد جذب آب شن نخودی 0/80 | درصد جذب آب شن بادامی 0/90 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | | |

شکل 3: دانه بندی ماسه و شن (نخودی، بادامی)

2-1-5- فوق روان کننده و ژل نانو سیلیس

در این پژوهش، برای رسیدن به خواص مکانیکی بتن خودتراکم، از فوق روان کننده و نانو سیلیس که بر پایه پلی کربوکسیلات اتر و دوده سیلیسی به عنوان یک نوع آب کاهندگی، افزاینده بسیار قوی بتن، رسیدن به خواص رئولوژیک در حالت خمیری و بهبوددهنده کیفیت بتن خودتراکم استفاده شد. افزودن نانو سیلیس به مخلوط بتن باعث می‌گردد SiO_2 فعال آن با محلول هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن به چهارنوع می‌گردد. (1) افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن (2) افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش (3) کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن (4) جلوگیری از نفوذ یون کلرید و سولفات‌ها و سایر مواد شیمیایی مخرب به داخل بتن به دلیل خصوصیات بالا از آن جهت بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن استفاده شد. نانو سیلیس با حالت غیر کریستالی به شکل ذرات بی نهایت ریز با قطر نانونی برای استفاده به عنوان یک ماده سیمانی در بتن بسیار مناسب است و امکان سهولت بتن ریزی با افزایش اسلامپ بتن و کارایی بالا میسر می‌گردد همچنین ژل نانو سیلیس می‌تواند ناحیه انتقال را تقویت و بر مقاومت نهایی بتن تاثیر گذار باشد. سیلیس با کلسیم هیدروکسید، CSH بیشتری را در مرحله پایانی تشکیل می‌دهد. چون نانو سیلیس 100000 مرتبه کوچکتر از ذرات تشکیل دهنده سیمان است در نتیجه نانو سیلیس می‌تواند حفره‌های باقی مانده موجود در بتن را پراکنده و در نتیجه (چگالی) بتن را افزایش دهد. افزایش نانو سیلیس به سیمان و بتن موجب اثرات مختلفی می‌شود. یکی از این ذرات اثر شتاب دهنده است که مکانیسم اصلی این تاثیر مربوط به سطح ویژه بالای نانو سیلیس است چون این ذرات بعنوان محل هسته زایی برای تشکیل CSH عمل می‌کنند. همچنین اثر شتاب دهنده که در نتیجه افزایش نانو سیلیس به وجود می‌آید به طور غیر مستقیم به وسیله اندازه گیری تغییر ویسکوزیته دوغاب سیمان تعیین می‌شود. استفاده از ژل نانو سیلیس می‌تواند میکرو ساختار بتن را بهبود بخشد و نفوذپذیری آب در بتن سخت را کاهش دهد. بیشترین اثر ژل نانو سیلیس، بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم است. ژل نانو سیلیس موجب افزایش چگالی، کاهش تخلخل و بهبود استحکام پیوند بین سیمان و مصالح می‌شود که مطابق با استاندارد ASTM C 494 [20] است (مطابق جدول 7).

جدول 7: مشخصات فنی فوق روان کننده و نانو سیلیس [13]

| ویژگی‌ها | حالت فیزیکی | جرم مخصوص (کیلوگرم بر لیتر) | PH | رنگ |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------------|-----|---------|
| فوق روان کننده SUPER PLAST PC5000 | | | | |
| مشخصات | مایع | 1/1 | 6/2 | زرد |
| نانو سیلیس | | | | |
| مشخصات | مایع غلیظ | 1/35 | 9 | خاکستری |

2-1-6- آب

آب شرب در طرح مخلوط بتن خودتراکم، جهت تولید و عمل‌آوری آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفت که منطبق بر الزامات ASTM C 94 [21] است (مطابق جدول 8).

جدول 8: ویژگی آب شرب [6]

| ویژگی‌ها | دما (سانتی‌گراد) | PH | غلظت یون کلرید |
|----------|------------------|----|----------------|
| مقدار | 20 | 6 | 50 |

2-1-7- پودر سنگ آهک

یکی از مواد لازم جهت تأمین ویسکوزیته مناسب در بتن خودتراکم پودر سنگ است. پرکننده‌هایی چون پودر سنگ به دلیل دارابودن ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی، حفره‌های موجود بین ذرات سیمان و سنگ‌دانه‌ها شده و باعث کاهش تخلخل و افزایش درجه توپری بتن می‌گردند. این دسته از عناصر پرکننده به دلیل دارابودن سطح ویژه بسیار زیاد، اصطکاک بین دانه‌ها را افزایش داده و باعث افزایش لزجت بتن می‌گردند. نتایج تجزیه شیمیایی و مشخصات فیزیکی پودر سنگ آهک در جدول 9 نشان داده شده است. در این طرح، از پودر سنگ آهک قم استفاده شد.

جدول 9: پودر سنگ آهک قم [13]

| تجزیه و تحلیل شیمیایی | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Cao | SO ₃ | LOI |
|-----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------|-----------------|------|
| درصد | 2/8 | 0/35 | 0/5 | 1/8 | 51/22 | 1/24 | 43/2 |

2-1-8- افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته

افزودنی پودری VMA برای تولید بتن خودتراکم با ویسکوزیته افزایش یافته و خواص رئولوژیکی کنترل شده را توسعه می‌دهد. VMA در کنترل آب اضافی بتن نقش بسزایی دارد. در این تحقیق از افزودنی Master Matrix VMA 358 بر پایه رشته‌های مولکولی پلیمری سنگین و با پایداری فوق‌العاده استفاده شد. مقدار این ماده در طرح مخلوط بتن نسبت به وزن سیمان محاسبه می‌شود که منطبق بر استاندارد ASTM C 494/C 494M [22] است.



شکل 4: مصالح مورد مصرف در طرح اختلاط بتن خودتراکم

2-2- طرح مخلوط

5 طرح اختلاط بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. میزان درصد زنگ و براده آهن به ترتیب با نسبت‌های مختلف (0، 0/5، 1، 1/5، 2 درصد نسبت به وزن شن) و (0، 5، 10، 15، 20 درصد نسبت به وزن ماسه) می‌باشند. در تمامی 5 طرح مخلوط، مقدار مصالح ثابت بوده و میزان زنگ و براده آهن متغیر است، به دلیل اینکه نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی و فشاری دقیق‌تر و شفاف‌تر بیان شوند (مطابق جدول 10).

جدول 10: طرح اختلاط بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن

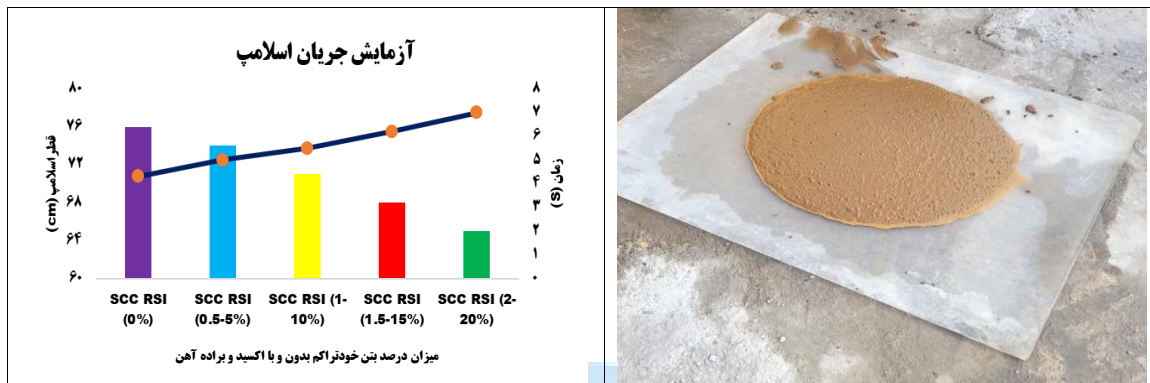
| طرح اختلاط بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (0%) | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| SCC (0%) | | | | | | | | | |
| زنگ آهن (kg/m ³) | براده (kg/m ³) | VMA (kg/m ³) | پودر سنگ (kg/m ³) | فوق روان کننده - سوپرزل نانو سیلیس (kg/m ³) | آب (kg/m ³) | ماسه (kg/m ³) | شن بادامی (kg/m ³) | شن نخودی (kg/m ³) | سیمان (kg/m ³) |
| - | - | 0/167 | 207 | 12 - 7 | 154 | 1067 | 140 | 350 | 500 |
| طرح اختلاط بتن خودتراکم با زنگ (0.5%) و براده آهن (5%) | | | | | | | | | |
| SCC RSI (5%- 0/5) | | | | | | | | | |
| 2/45 | 53/35 | 0/167 | 207 | 12 - 7 | 154 | 1067 | 140 | 350 | 500 |
| طرح اختلاط بتن خودتراکم با زنگ (1%) و براده آهن (10%) | | | | | | | | | |
| SCC RSI (1-10%) | | | | | | | | | |
| 4/9 | 106/7 | 0/167 | 207 | 12 - 7 | 154 | 1067 | 140 | 350 | 500 |
| طرح اختلاط بتن خودتراکم با زنگ (1.5%) و براده آهن (15%) | | | | | | | | | |
| SCC RSI (15%- 1/5) | | | | | | | | | |
| 7/35 | 160/05 | 0/167 | 207 | 12 - 7 | 154 | 1067 | 140 | 350 | 500 |
| طرح اختلاط بتن خودتراکم با زنگ (2%) و براده آهن (20%) | | | | | | | | | |
| SCC RSI (2-20%) | | | | | | | | | |
| 9/8 | 213/4 | 0/167 | 207 | 12 - 7 | 154 | 1067 | 140 | 350 | 500 |

2-3- انجام آزمایش

مصالح ذکر شده را جهت انجام آزمایش در مدت 15 دقیقه در میکسر مخلوط شدند. پس از ترکیب شدن مصالح در میکسر لازم است برای خواص تازه بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش قیف V-Funnel، آزمایش L-Box، آزمایش J-Ring و آزمایش U-Box انجام گردد.

2-3-1- آزمایش جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ به دلیل سادگی اجرا، برای تعیین کارایی بتن خودتراکم بسیار متداول است. نتایج آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف زنگ و براده آهن در شکل 5 بر اساس میانگین به دست آمده است.

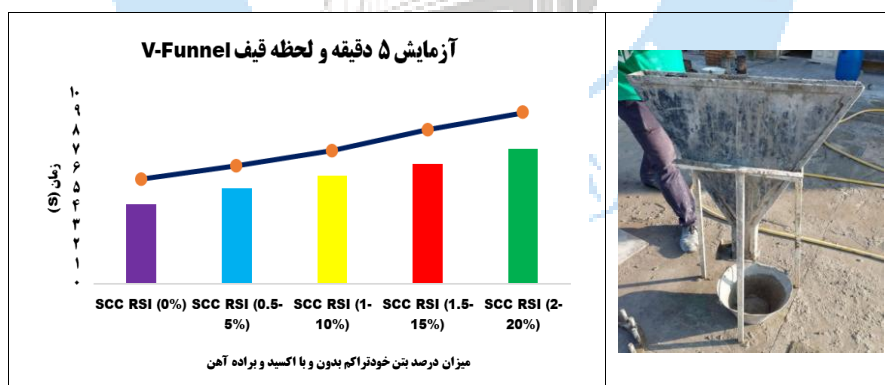


شکل 5: آزمایش جریان اسلامپ

نتایج آزمایش جریان اسلامپ نشان داد که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، قطر اسلامپ (جریان پذیری) به ترتیب 2/63، 6/57، 10/52، 14/47 درصد نسبت به بتن خودتراکم (معیار) کاهش یافت و زمان جریان اسلامپ نیز به ترتیب 0/7، 1/9، 1/7، 2/7 ثانیه نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت که آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C1611 [23] می باشد.

2-3-2- آزمایش قیف V-Funnel

آزمایش قیف V-Funnel را جهت سنجش توانایی بتن خودتراکم برای تغییر جهت جریان و عبور از میان مقاطع مسلح و مقید، بدون جداسدگی دانه‌ها و وقوع انسداد در جریان انجام می‌گیرد. نتایج آزمایش قیف V-Funnel بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف زنگ و براده آهن در شکل 6 بر اساس میانگین به دست آمده است.

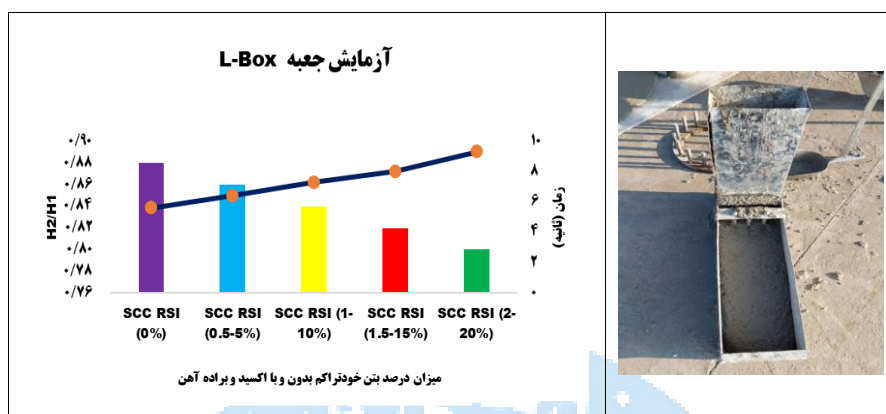


شکل 6: آزمایش قیف V-Funnel

نتایج آزمایش قیف V-Funnel و آزمایش 5 دقیقه قیف V-Funnel نشان دادند که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، زمان نیز به ترتیب 0/8، 1/5، 2/1، 2/9، 3/5 ثانیه و 0/7، 1/5، 2/6، 3/5 ثانیه نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافتند که آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ISISIR 3203-9 [24] می باشد.

2-3-3- آزمایش L-Box

هدف از آزمایش L-Box برای بررسی قابلیت روانی، قدرت عبور بتن از بین میلگردها، پایداری در مقابل جدایش دانه‌ها و قابلیت پرنندگی است. نتایج آزمایش L-Box بتن خودتراکم با اثر درصد‌های زنگ و براده آهن در شکل 7 بر اساس میانگین به دست آمده است.

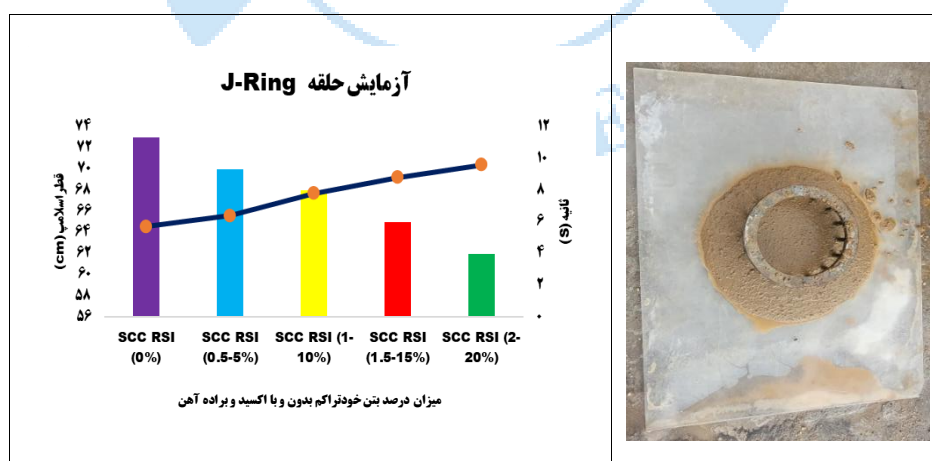


شکل 7: آزمایش L-Box

نتایج آزمایش L-Box نشان داد که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، زمان نیز به ترتیب 0/8، 1/7، 2/4، 3/7 ثانیه آزمایش افزایش یافت و ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی (H2) و انتهای بخش عمودی (H1) تعیین و از رابطه $H2/H1$ که به نسبت اسناد معروف است به دست آمد که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، نسبت اسناد 2/27، 4/54، 6/81، 9/09 درصد کاهش یافت که آزمایش مطابق با استاندارد INSO 3203-10 [25] می‌باشد.

2-3-4- آزمایش J-Ring

آزمایش J-Ring در واقع شبیه‌سازی عبور بتن از میان میلگردها است و به منظور بررسی قابلیت عبور به کار گرفته می‌شود. نتایج آزمایش J-Ring بتن خودتراکم با اثر درصد‌های مختلف زنگ و براده آهن در شکل 8 بر اساس میانگین به دست آمده است.

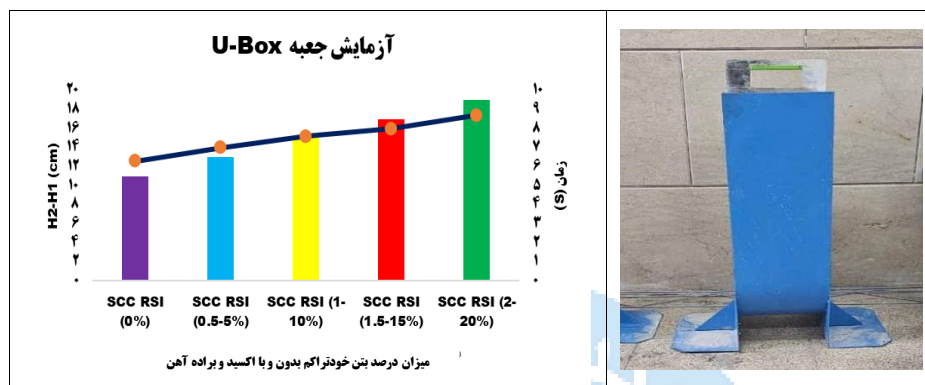


شکل 8: آزمایش J-Ring

نتایج آزمایش J-Ring نشان داد که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، قطر اسلامپ (جریان‌پذیری) به ترتیب 4/10، 6/84، 10/95، 15/06 درصد نسبت به بتن خودتراکم (معیار) کاهش یافت و زمان جریان اسلامپ نیز به ترتیب 0/7، 2/1، 3/1، 3/9 ثانیه نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت که آزمایش مطابق با استاندارد INSO 11271 [26] می‌باشد.

2-3-5- آزمایش U-Box

برای اندازه گیری قابلیت پر کردن و قابلیت عبور بتن خودتراکم استفاده می شود. قالب این آزمایش ظرفی به شکل U است. این دستگاه شامل مجرایی است که توسط یک تیغه جداکننده و یک دریچه متحرک در وسط به دو قسمت تقسیم شده است. این آزمایش برای سنجش توانایی عبور بتن خود تراکم از خروجی های تنگ وب باریک تحت ارتفاع مشخص طراحی شده است. نتایج آزمایش U-Box بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف زنگ و براده آهن در شکل 9 بر اساس میانگین به دست آمده است.



شکل 9: آزمایش U-Box

نتایج آزمایش U-Box نشان داد که با افزایش درصد زنگ و براده آهن، زمان نیز به ترتیب $0/7$ ، $1/3$ ، $1/7$ ، $2/4$ ثانیه نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت و میزان اختلاف ارتفاع بتن در دو مجرا (H2-H1) نیز به ترتیب 2 ، 4 ، 6 ، 8 سانتی متر نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت. میزان اختلاف ارتفاع بتن در دو مجرا (H2-H1) کمتر از 30 میلی متر بود و مورد قبول واقع شد. آزمایش مطابق با استاندارد UNI 11044 [27] می باشد.

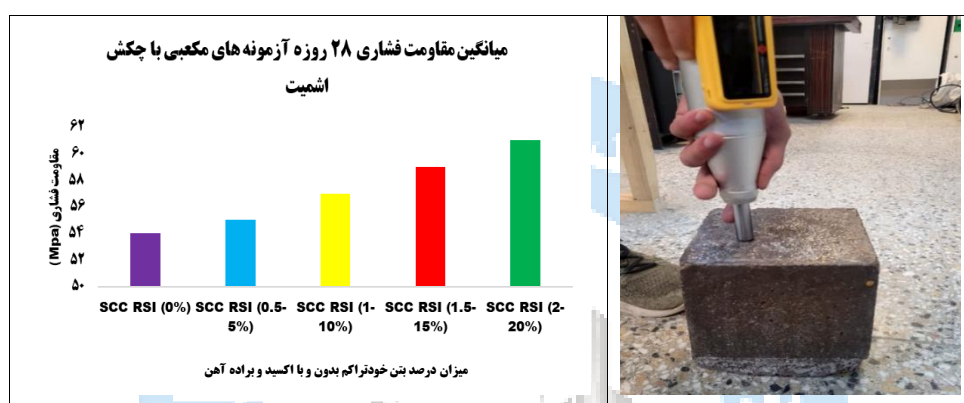
2-4- قالب گیری نمونه های بتن

بتن تازه در درون قالب های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی متر و قالب های استوانه ای با ابعاد 300×150 میلی متر قالب گیری شدند. نمونه ها به مدت 24 ساعت جهت سخت شدن در دمای 23 درجه سانتی گراد نگهداری شدند و پس از گذشت 24 ساعت آزمونه ها از قالب ها خارج و در حوضچه آب جهت عمل آوری در مدت 7 و 28 روزه نگهداری شدند. در مجموع 300 نمونه بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن ساخته که از این تعداد 150 آزمونه در قالب مکعبی و 150 آزمونه در قالب استوانه ای ساخته شدند. پس از رسیدن 5 طرح مخلوط به سنین 28 روز، آزمایش چکش اشमित براساس استاندارد ASTM C805 [28] آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک براساس استاندارد ASTM C-597 [29]، آزمایش نفوذپذیری براساس استاندارد استاندارد DIN 1048 [30]، انتقال حرارت و تاثیر دما بر بتن و مقاومت فشاری آزمونه های مکعبی طی عمل آوری 7 و 28 روزه براساس استاندارد ISIRI 3206 [31] و مقاومت کششی آزمونه های استوانه ای براساس استاندارد ASTM C496 [32] انجام گردیده شد. جهت شکستن آزمونه های بتن از دستگاه جک بتن شکن استفاده شد. در نهایت پس از نتایج آزمایش های چکش اشमित، آزمایش آلتراسونیک و شکست نمونه های بتن، نتایج آن ها با بتن خودتراکم (شاهد) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

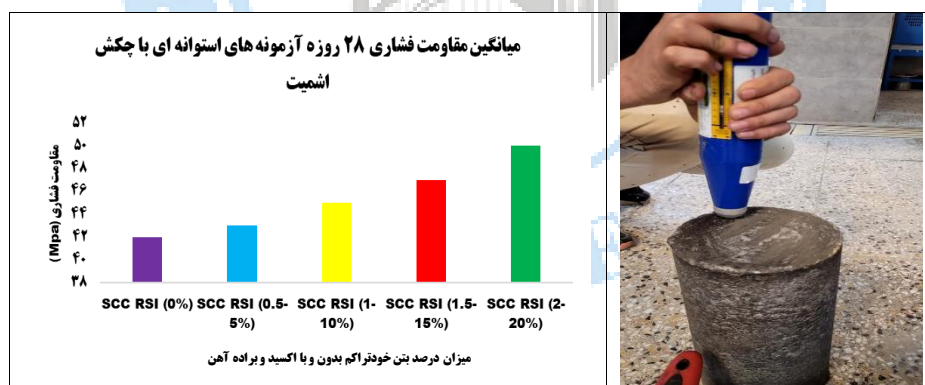
2-5- آزمایش چکش اشमित

آزمایش چکش اشमित یک تست غیر مخرب بتن برای تعیین سختی و یکنواختی سطح بتن و یکی از انواع آزمایش های بتن است که به عنوان متداول ترین و پرمصرف ترین ابزارضربه زنی شناخته می شود. جهت آزمایش مقاومت فشاری آزمونه های مکعبی و استوانه ای از آزمایش چکش اشमित استفاده شد. چکش اشमित برای سنجش ویژگی های مواد کشسان و به ویژه سنجش مقاومت فشاری بتن به کار گرفته می شود. چکش اشमित به عنوان یک ابزاری مؤثر برای مقاومت سطح اجسام باتوجه به سختی آن ها مورد استفاده

قرار می‌گیرد [33]. هدف از انجام آزمایش چکش اشमित اندازه گیری مقاومت فشاری بتن (f_c) به یک روش ساده، سریع و اقتصادی است و جهت کنترل سختی و یکنواختی سطح بتن از آن در این پژوهش استفاده گردید. دلیل استفاده از چکش اشमित بر نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای این است که میزان مقاومت فشاری بتن به صورت دقیق‌تر بررسی شود و نتایج به دست آمده از این آزمایش و شکست بتن با جک بتن شکن، مقاومت فشاری نمونه‌ها شفاف‌تر بیان شود. آزمایش چکش اشमित بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISO 1920-7 [34] می‌باشد (مطابق شکل‌های 10 و 11). نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای نشان داد که با اضافه شدن زنگ و براده آهن به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری با آزمایش چکش اشमित افزایش یافت. دلیل افزایش در آزمایش چکش اشमित جهت سنجش مقاومت فشاری بتن خودتراکم برای نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای ناشی از تاثیر مثبت فضای خالی پر شده با زنگ و براده آهن در بتن خودتراکم به سبب مقدار، شکل و پراکندگی در بتن می‌باشد. همچنین، افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش درصد زنگ و براده آهن ناشی از کاهش تخلخل بدلیل افزودن زنگ و براده آهن و به تبع آن افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال و انسجام کافی بتن می‌باشد.



شکل 10: نتایج آزمایش چکش اشमित برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری 28 روزه



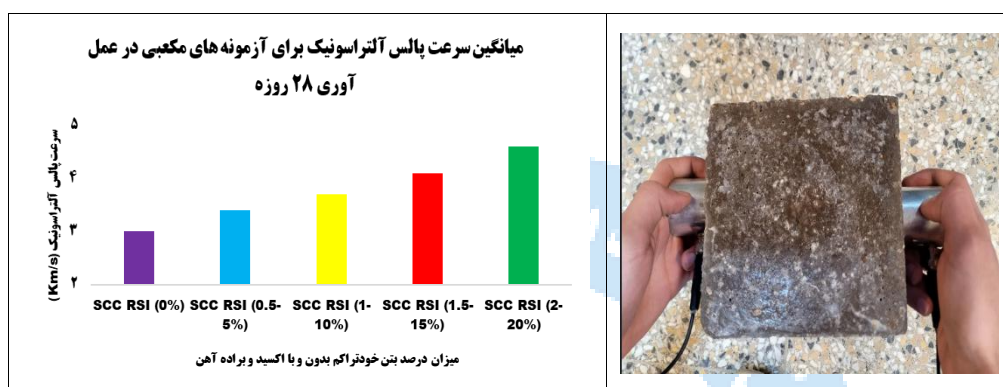
شکل 11: نتایج آزمایش چکش اشमित برای نمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری 28 روزه

2-6- آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک

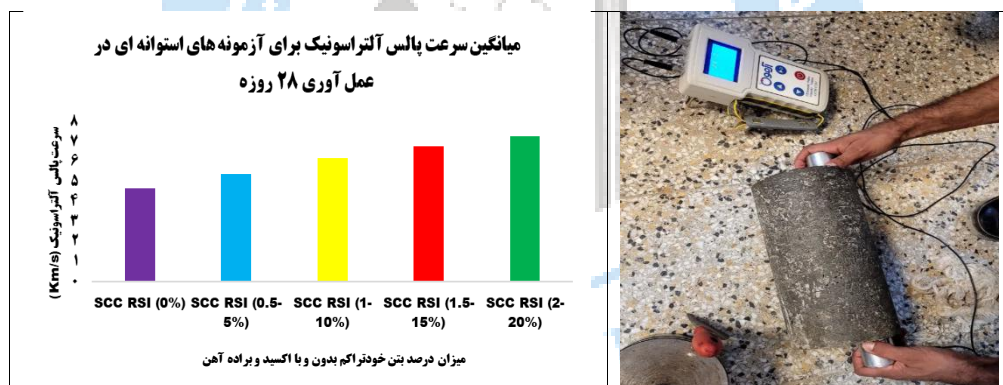
آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک (UPV) یکی از روش‌های تست غیرمخرب است که امکان تجزیه و تحلیل عمیق همگنی مواد، یکنواختی، کیفیت، فرسودگی، یافتن عیوب، وجود حفره‌های داخلی و خلل و فرج در بتن سخت شده را تعیین می‌کند. سرعت امواج آلتراسونیک، در این پژوهش در محدوده فرکانسی 20 تا 170 کیلوهرتز است. همچنین از روش مستقیم برای انجام آزمایش استفاده شد و فاصله بین دو مبدل آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی 150 میلی‌متر و برای نمونه‌های استوانه‌ای 300 میلی‌متر است که مطابق با استاندارد ISO 1920-7 [34] است. مطابق رابطه (1) فاصله (CM) بر عدد قرائت (MS) که روی نمایشگر دستگاه نمایش داده شده را تقسیم کرده و در 10 ضرب گردیده می‌شود تا سرعت پالس برحسب (km/s) تعیین گردد. معیار تعیین کیفیت بتن بر اساس این آزمایش با کنترل سرعت موج در بازه‌های استاندارد تعیین شده (km/s) به دست می‌آید که هر چه مقدار آن کمتر از 3 باشد نتیجه مطلوب نیست و اگر از 3

بالتر باشد نتیجه مطلوب و قابل قبول است [32] به این صورت عدد قرائت آلتراسونیک و فاصله بین دو مبدل‌ها بر روی نمونه‌ها انجام و نتایج آن ثبت شد (مطابق شکل‌های 12 و 13). نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای نشان داد که با اضافه شدن زنگ و براده آهن به بتن خودتراکم، سرعت پالس آلتراسونیک افزایش یافت. دلیل افزایش در نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک بر بتن خودتراکم ناشی از پر شدن فضای خالی و کاهش نفوذپذیری بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن است. همچنین با افزایش درصد زنگ و براده آهن باعث کاهش تخلخل و به تبع آن افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگ‌دانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال بتن و انسجام کافی در بتن باعث افزایش سرعت پالس در بتن شد.

$$km/s = \frac{CM}{MS} \times 10 \quad (1)$$



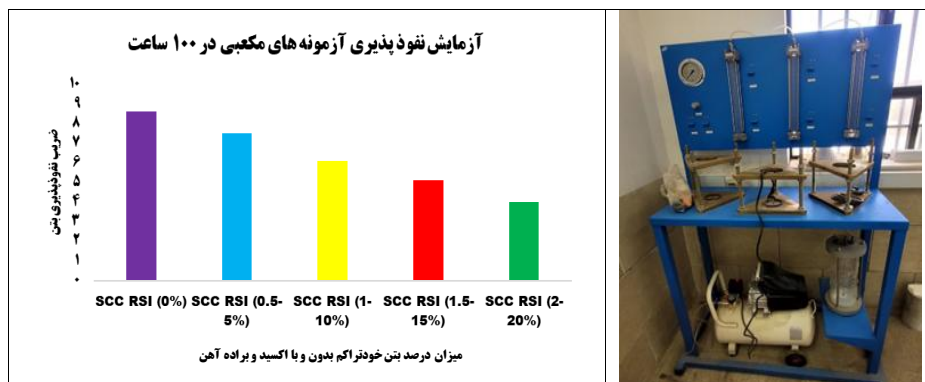
شکل 12: نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری 28 روزه



شکل 13: نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری 28 روزه

2-7- آزمایش نفوذ پذیری نمونه‌ها مکعبی

آزمایش نفوذپذیری بتن خودتراکم برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متری جهت حفظ نمونه‌ها در برابر آب و دوام بتن در نظر گرفته شد که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نفوذپذیری نیز ارتباط تنگاتنگی با دوام بتن، به‌ویژه مقاومت آن، در برابر زوال تدریجی تحت قرارگرفتن در معرض آب‌وهوای شدید و نشست ناشی از نفوذ آب دارد، به‌ویژه زمانی که حاوی گازها یا مواد معدنی تهاجمی در محلول باشد. نفوذپذیری بتن در برابر آب، خوردگی ناشی از کربناته شدن و ... از جمله عوامل بسیار تأثیرگذار در دوام بتن است. منظور از دوام بتن، توانایی آن برای مقابله با عوامل جوی، حملات شیمیایی، سایش، فرسایش و هرگونه فرایندی که منجر به زوال و خرابی و کاهش طول عمر مفید و بهره‌دهی آن می‌شود، است؛ بنابراین، تعیین ویژگی‌های نفوذپذیری بتن خودتراکم اهمیت قابل توجهی دارد. این آزمایش برای نمونه‌ها مکعبی در معرض فشار هیدرواستاتیک 5 بار که مطابق با استاندارد DIN 1048 [30]، اندازه‌گیری مقدار شد. آب در طول یک بازه زمانی معین از طریق منافذ بتن نفوذ می‌کند و ضریب نفوذپذیری را محاسبه می‌شود. آزمایش نفوذپذیری بتن در دوره 100 ساعته در دمای 27 درجه سانتی‌گراد انجام شد.



شکل 14: دستگاه نفوذپذیری بتن و نتایج آزمایش نفوذپذیری

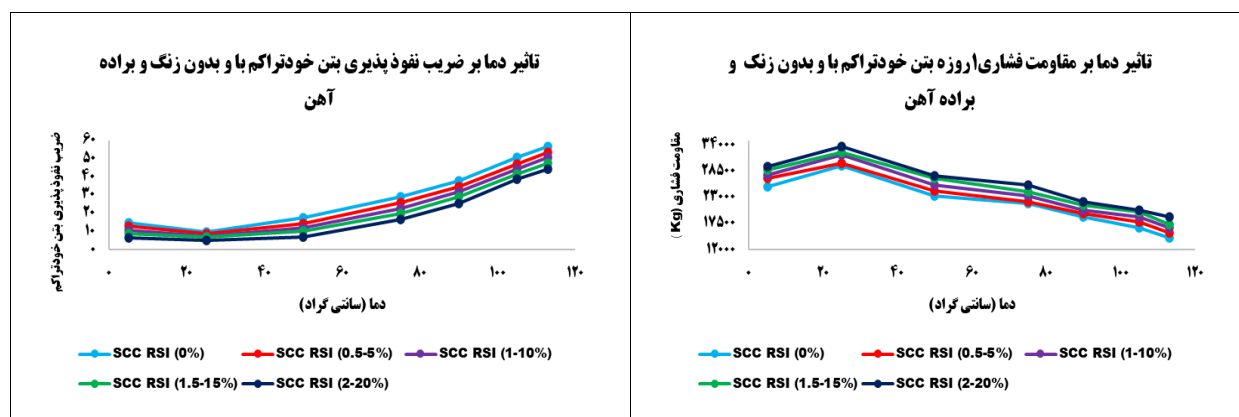
استفاده از زنگ و براده آهن در بتن می‌تواند در کاهش نفوذپذیری مؤثر باشد. زنگ و براده آهن دارای خواص مکانیکی مناسبی هستند و می‌توانند به تقویت و چسبندگی بین مصالح بتن کمک کنند. زنگ و براده آهن می‌توانند به‌عنوان یک عامل تقویتی به افزایش مقاومت و دوام بتن کمک کنند. با افزودن این دو به بتن، خواص مکانیکی و فیزیکی بتن بهبود می‌یابد و می‌تواند سبب کاهش نفوذپذیری و مواد آب‌بندی شده در بتن شوند. زنگ و براده آهن می‌توانند به ساختار داخلی بتن، مانند مقاومت، انعطاف‌پذیری و ایجاد مانع برای نفوذ آب کمک کنند. طبق درصد‌های مختلف الیاف و اکسید در بتن خودتراکم، 7/32، 15/96، 24/72، 33/37 درصد کاهش نفوذپذیری نسبت به بتن خودتراکم ایجاد شد.

2-8- آزمایش تاثیر دما بر مقاومت آزمون‌های مکعبی

این آزمایش نشان‌دهنده تأثیر دماهای مختلف بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن است. ابتدا آزمون‌های بتن تازه خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن در قالب مکعبی قالب‌گیری شدند، سپس قالب‌ها را در فور خشک‌کننده^۱ مطابق شکل 15 و 16 با دماهای مختلف قرار داده شدند. پس از 24 ساعت که آزمون‌ها سخت شدند، قالب‌ها را از فور خشک‌کننده خارج کرده و تست مقاومت فشاری 1 روزه را انجام و نتایج ثبت گردید. به دلیل اینکه بتن خودتراکم در آن به مدت 24 ساعت قرار گرفته و عملیاتی در بتن از قبیل تغییرات دما، گرمای هیدراتاسیون در سیمان، خواص حرارتی بتن خودتراکم، انتقال حرارت از قالب به بتن خودتراکم و غیره که به طور قابل توجهی بر پایداری و دوام بتن اثرگذار هستند؛ بنابراین مقاومت فشاری 1 روزه بتن خودتراکم انجام گردید [36 و 37].



شکل 15: آزمون مکعبی در فور خشک‌کننده و شکست با دستگاه مقاومت فشاری



شکل 16: آزمایش تاثیر دما بر مقاومت و نفوذپذیری آزمونهای مکعبی

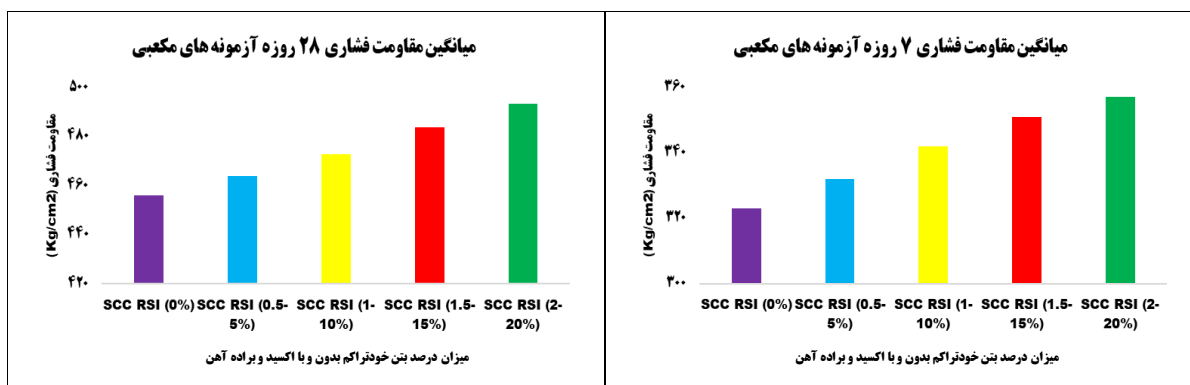
نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش دما بر 5 طرح مخلوط بتن، مقاومت فشاری 1 روزه کاسته و نفوذپذیری افزایش می‌یابد، اما در دمای 25 درجه سانتی‌گراد با افزایش درصد مختلف زنگ و براده آهن در بتن خودتراکم، مقاومت فشاری 1 روزه آزمونهای مکعبی در بالاترین حد افزایش یافت و نفوذپذیری آزمونها در این دما در کمتر حالت نسبت به بتن بدون زنگ و براده آهن ایجاد شد.

2-9- آزمایش مقاومت فشاری آزمونهای مکعبی

مقاومت فشاری 5 طرح مخلوط بر اساس سنین 7 و 28 روزه با ابعاد مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها بر روی آزمونهای مکعبی براساس استاندارد ISIRI 3206 [32] نشان داد که با اضافه شدن زنگ و براده آهن به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد (مطابق شکل‌های 17 و 18). دلیل افزایش در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ناشی از تاثیر مثبت پر شدن فضای خالی ایجاد شده توسط زنگ و براده آهن و ایجاد چسبندگی بیشتر سنگدانه با سیمان در بتن می‌باشد. همچنین با افزایش درصد زنگ و براده آهن باعث کاهش تخلخل و به تبع آن افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال (فاز سوم) بتن و انسجام کافی بتن می‌باشد، دلیل اصلی افزایش مقاومت بتن، افزایش زنگ و براده آهن، واکنش میان سیمان و زنگ و براده آهن می‌باشد که به چسبندگی ذرات درشت سیمان با سنگدانه درشت کمک می‌کند و باعث دوام ساختار و خواص مکانیکی بتن می‌شوند. مطابق تحقیقات موتوکو [4] و ژائو [11] با افزایش درصد زنگ آهن به بتن، مقاومت فشاری افزایش یافت. موتوکو با افزایش 2 درصد زنگ آهن در بتن به بیشترین مقاومت فشاری دست و ژائو با افزایش 2/5 درصد زنگ آهن در بتن خودتراکم به بیشترین مقاومت فشاری دست یافت همچنین در این طرح، با افزایش 2 درصد زنگ آهن و 20 درصد براده آهن در بتن خودتراکم بیشترین مقاومت فشاری نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کسب شد. نتایج سینق و همکاران [3] نشان داد که با 40 درصد وزنی ماسه زنگ آهن در بتن مقاومت فشاری تا حدود 30 درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد.



شکل 17: آزمایش شکست آزمون مکعبی با دستگاه جک بتن شکن و آزمون شکسته شده بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن



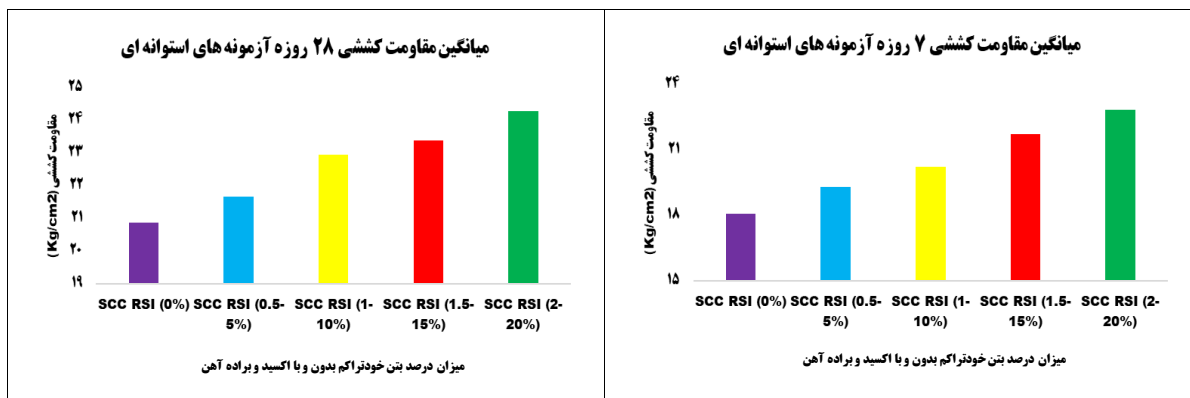
شکل 18: نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری 7 و 28 روزه

2-10- آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

مقاومت کششی 5 طرح مخلوط بر اساس سنین 7 و 28 روزه با ابعاد استوانه‌ای 150×300 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها بر روی آزمون‌های استوانه‌ای براساس استاندارد ASTM C496 [32] نشان داد که با اضافه شدن زنگ و براده آهن به بتن خودتراکم، مقاومت کششی افزایش می‌یابد (مطابق شکل‌های 19 و 20). دلیل افزایش در آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای ناشی از تاثیر مثبت پر شدن فضای خالی ایجاد شده توسط زنگ و براده آهن و ایجاد چسبندگی بیشتر سنگدانه با سیمان در بتن می‌باشد. همچنین با افزایش درصد زنگ و براده آهن باعث کاهش تخلخل و به تبع آن افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال (فاز سوم) بتن و انسجام کافی بتن می‌باشد، دلیل اصلی افزایش مقاومت بتن، افزایش زنگ و براده آهن، واکنش میان سیمان و زنگ و براده آهن می‌باشد که به چسبندگی ذرات درشت سیمان با سنگدانه درشت کمک می‌کند و باعث دوام ساختار و خواص مکانیکی بتن می‌شوند. مطابق تحقیقات موتوکو [4] و ژائو [11] با افزایش درصد زنگ آهن به بتن، مقاومت کششی افزایش یافت. موتوکو با افزایش 2 درصد زنگ آهن در بتن به بیشترین مقاومت کششی دست و ژائو با افزایش 2/5 درصد زنگ آهن در بتن خودتراکم به بیشترین مقاومت کششی دست یافت همچنین در این طرح، با افزایش 2 درصد زنگ آهن و 20 درصد براده آهن در بتن خودتراکم بیشترین مقاومت کششی نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کسب شد.



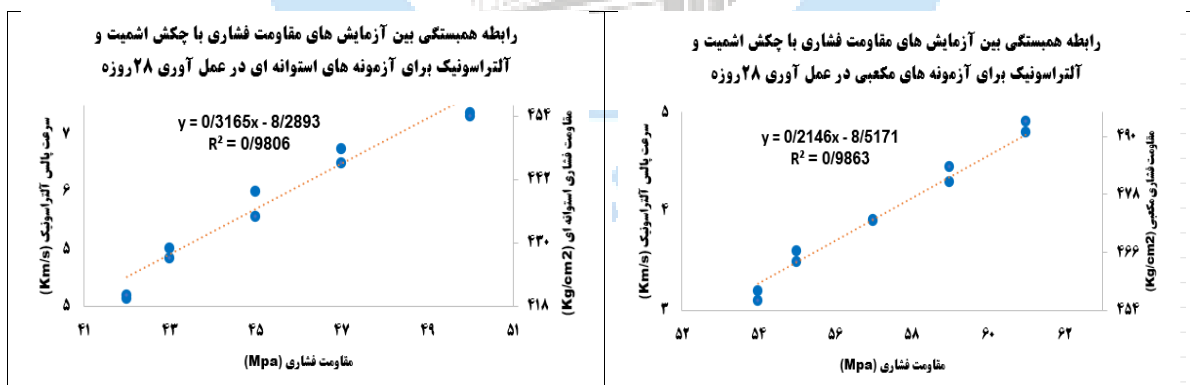
شکل 19: آزمایش شکست آزمون‌های استوانه‌ای با دستگاه جک بتن شکن و آزمون شکسته شده بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن



شکل 20: نتایج آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری 7 و 28 روزه

3- جمع بندی نتایج

بدین ترتیب مطابق نتایج مذکور رابطه همبستگی بین آزمایش چکش اشمیت، آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک، مقاومت فشاری و کششی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای انجام گرفت. ضریب همبستگی نوعی داده آماری برای تعیین درجه و رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورداستفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین 1 تا -1 است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. ضریب همبستگی روشی پارامتری است و برای داده‌هایی با توزیع نرمال یا تعداد داده‌های زیاد استفاده می‌شود که بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر است، رابطه مستقیم یا مثبت به این معناست که اگر یکی از متغیرها افزایش یا کاهش یابد، دیگری نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. زمانی که ضریب همبستگی برابر صفر است این نشان می‌دهد که بین دو متغیر رابطه خطی وجود ندارد. ضریب همبستگی (R^2) آزمایش‌ها از 0/95 به بالا می‌باشند که نتایج همبستگی‌ها مورد قبول هستند. این ضریب نشان دهنده رابطه خطی بین نتایج آزمایش‌های صورت گرفته شده است (مطابق شکل‌های 21).



شکل 21: رابطه همبستگی بین آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی، چکش اشمیت و سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای در عمل آوری 28 روزه

باتوجه به نتایج آزمایش‌های خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم با و بدون زنگ و براده آهن که انجام گردید به این تفاسیر دست یافت که زنگ و براده آهن می‌توانند اثرات منفی بر روانی و کارایی بتن خودتراکم داشته باشند. وجود زنگ و براده آهن ممکن است با ترکیبات سیمان واکنش داده و باعث ایجاد لخته‌ها و کلوخه‌های ریز شوند که روانی و کارایی بتن را کاهش دهند. زیرا زنگ و براده آهن می‌تواند جذب آب را افزایش دهند و در نتیجه آب آزاد موجود برای روان‌سازی بتن کاهش یابد. زنگ آهن و براده آهن به دلیل داشتن سطح ناهموار و زبر، می‌تواند تأثیر منفی بر رئولوژی یا رفتار جریان بتن خودتراکم داشته باشد و منجر به کاهش کارایی بتن و کاهش قابلیت

جریان پذیری آن شود. زنگ و براده آهن مقاومت فشاری بتن را افزایش می دهند. اکسیدهای آهن می توانند به عنوان نقاط قوت در بتن عمل کرده و باعث افزایش یکپارچگی ساختاری بتن شوند، همچنین، واکنش پذیری زنگ آهن با سیمان باعث افزایش چسبندگی می شود که خود این عامل منجر به افزایش مقاومت می گردد. افزایش مقاومت کششی به دلیل تأثیر مثبت زنگ آهن بر چسبندگی بین اجزای مختلف بتن و سیمان است. زنگ و براده آهن به دلیل سطح فعال شیمیایی، می توانند به خوبی به خمیر سیمان بچسبند. همچنین، وجود زنگ و براده آهن می توانند بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان تأثیر مثبت بگذارند. این تأثیر می تواند باعث تشکیل ساختارهای قوی تر در خمیر سیمان شود و باعث افزایش انسجام و پیوستگی بین اجزاء بتن شده و مقاومت فشاری را افزایش می دهند. با توجه به آزمایش نفوذپذیری بر نمونه های بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن که نشان داد وجود زنگ و براده آهن در بتن می تواند باعث کاهش ورود مواد مخرب، کاهش مواد شیمیایی و افزایش دوام طولانی نمونه بتنی شود. همچنین، اضافه کردن زنگ و براده آهن می تواند موجب بهبود خواص مکانیکی بتن مانند مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی شوند.

زنگ آهن و براده آهن حاوی اکسیدهای آهن مانند هماتیت (Fe_2O_3) و مگنتیت (Fe_3O_4) هستند که می توانند باعث کاهش خوردگی بتن و کاهش تولید ترک های ریز در بتن شوند. زنگ آهن و براده آهن با هیدروکسید کلسیم تولید شده در طی هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ترکیبات مؤثر تولید کنند و منجر به کاهش تنش داخلی و کاهش ترک های ریز در بتن خواهند شد. براده آهن و زنگ آهن دارای چگالی بالایی هستند که افزودن آن به بتن باعث افزایش وزن مخصوص بتن می شود. این ویژگی در کاربردهایی مانند بتن های سنگین برای ساخت سازه های ضد تشعشع و حفاظتی مفید است. براده آهن و زنگ آهن به دلیل رسانایی حرارتی بالای خود، می توانند به بهبود خواص حرارتی بتن کمک کنند. این ویژگی می تواند در سازه هایی که نیاز به مدیریت حرارتی دارند، مانند سازه های صنعتی و کوره ها، مفید باشد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، به استفاده از زنگ و براده آهن در بتن خودتراکم پرداخته شد. این پژوهش می تواند سهم مهمی در توسعه پایدار داشته باشد و در نتیجه کاهش هزینه های سازه و مصالح، کاهش اثرات مخرب و آلودگی به محیط زیست، کاهش شکنندگی و افزایش مقاومت در بتن، حفاظت منابع طبیعی، کاهش نفوذپذیری و با افزایش دما دوام و مقاومت بتن حفظ شود. با توجه به دستاورد اصلی این مقاله می توان به نتایج زیر دست یافت:

1) میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن طی عمل آوری 7 و 28 روزه با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 2/78، 5/88، 8/66، 10/52، 1/75 و 3/68، 6/05، 8/14 درصد مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم زنگ و براده آهن (صفر درصد) افزایش یافت.

2) میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه های استوانه ای بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن طی عمل آوری 7 و 28 روزه با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 6/85، 11/78، 20/24، 26/38 و 3/73، 9/91، 11/92، 16/33 درصد مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) افزایش یافت.

3) میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی و استوانه ای با چکش برگشتی بر بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن طی عمل آوری 28 روزه با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 1/85، 5/55، 9/25، 12/96 و 2/38، 7/14، 11/90، 19/04 درصد مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) افزایش یافت.

4) میانگین نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک نمونه های مکعبی و استوانه ای بر بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن طی عمل آوری 28 روزه با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 13/33، 23/33، 36/66، 53/33 و 14/89، 31/91، 44/68، 55/31 درصد سرعت پالس نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) افزایش یافت.

5) میانگین نتایج آزمایش تأثیر دما بر مقاومت فشاری 1 روزه بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن برای نمونه‌های مکعبی با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 4/22، 7/15، 12/22، 17/64 درصد مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) افزایش یافت.

6) میانگین نتایج آزمایش نفوذپذیری بر بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن برای نمونه‌های مکعبی طی عمل‌آوری 28 روزه با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 12/79، 29/06، 40/69، 53/48 درصد نفوذپذیری نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) کاهش یافت.

7) میانگین نتایج آزمایش تأثیر دما بر نفوذپذیری 1 روزه بر بتن خودتراکم با زنگ و براده آهن برای نمونه‌های مکعبی با افزایش زنگ و براده آهن به ترتیب 7/33، 13/25، 22/83، 30/82 درصد نفوذپذیری نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون زنگ و براده آهن (صفر درصد) کاهش یافت.

منابع

- [1] Shetty, K.K. Nayak, G. Vijayan, V. (2014). effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting concrete. *European Scientific Journal*. edition vol.10, No.21, pp 168 – 176.
- [2] Singh, G. Siddique, R. (2016). Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. Volume 128, Pages 88-95.
- [3] Singh, G. Siddique, R. (2016). Strength properties and micro-structural analysis of self-compacting concrete made with iron slag as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*. Volume 127, Pages 144-152.
- [4] Largeau, M.A. Mutuku, R. Thuo, J. (2018). Effect of Iron Powder (Fe_2O_3) on Strength, Workability, and Porosity of the Binary Blended Concrete. *Open Journal of Civil Engineering*. Vol.8 No.4, pp 411 – 425.
- [5] Mastali, M. Dalvand, A. Sattarifar, A. (2016). The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B: Engineering*. Volume 112, Pages 74-92.
- [6] Askari Dolatabad, Y. Jahanshahi, M.R. (2019). Rheological and Mechanical Properties of Light Weight Self-Compacting Concrete Containing Sirjan Iron Mine Waste. *Environmental Energy and Economic Research*. 3(2): 75-83.
- [7] Rosales, J. Agrela, F. Entrenas, J.E. Cabrera, M. (2020). Potential of Stainless Steel Slag Waste in Manufacturing Self-Compacting Concrete. *Journals Materials*, Volume 13, Issue 9, pp 1 – 17.
- [8] Ismail Al-Hadithi. A, Tareq Noaman. A, Khairi Mosleh. W.(2019). Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC). *Composite Structures*. Volume 224, pp 111 – 121.
- [9] Faraj, R.H. Hama Ali, H.F. Sherwani, A.H. Hassan, B.R. (2020). Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*. 30(11):101-283.
- [10] Edward, E.O. Fredrick, J.O. Anowai, S.N. Solomon, I. (2021). Effect of Nano Iron Oxide (Fe_2O_3) on Concrete Subjected to Physical Sulphate Attack (PSA). *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 10 Issue 08, pp 384 – 394.
- [11] Zhao, Y. Xiaowei, G. Jingping, Q. Zhang, W. Xiaohui, L. (2021). Study on the Utilization of Iron Tailings in Ultra-High-Performance Concrete: Fresh Properties and Compressive Behaviors. *Journal List Materials*. Sep; 14(17), pp 1 – 15.
- [12] mark, O. ede, A. arum, C. oyebisi, S. (2021). effects of induction-furnace slag on strength properties of self-compacting concrete. *Civil and Environmental Engineering*. Vol. 17, Issue 2, 513-527.
- [13] Poornamazan, A. Izadinia, M. (2024). A Comprehensive Investigation of Performance Characteristics, Mechanical Properties and Durability Parameters of Self-compacting Concrete Containing Iron Slag as Coarse Aggregate. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- [14] Jaskowska-Lemańska.J, Kucharska.M, Matuszak.J, Nowak.P, Łukaszczyk.W.(2022). Selected Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled PET Aggregate. *Materials (Basel)*. 15(7), pp 1 – 20.
- [15] Basser, H., Shaghghi, T. M., Afshin, H., Ahari, R. S., & Mirrezaei, S. S. (2022). An experimental investigation and response surface methodology-based modeling for predicting and optimizing the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing steel fiber and PET. *Construction and Building Materials*, 315 (15), pp 125 - 136.
- [16] Rashwan, M.A. Al Basiony, T.M, Mashaly, A.O. Khalil, M.M.(2022). Self-compacting concrete between workability performance and engineering properties using natural stone wastes. *Construction and Building Materials*. Volume 319, 126-132.
- [17] Yeong, N.S. Duc, H.L. Te, H.S. (2015). Greener self-compacting concrete using stainless steel reducing slag. *Construction and Building Materials*. Volume 82, Pages 341-350.
- [18] ASTM C150/C150M. (2012). Standard Specification for Portland Cement.

- [19] ASTM C 33. (2003). Standard specification for concrete aggregates. American Society of Testing and Materials Standards.
- [20] ASTM C 494. (2002). Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards.
- [21] ASTM C 94. (2009). Standard specification for Ready – Mixed Concrete, American Society of Testing and Materials Standards.
- [22] ASTM C 494/C 494M. (2002). Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards.
- [23] ASTM C1611 . (2009). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.
- [24] INSO 3203-9. (2013). Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete V-funnel test.
- [25] INSO 3203-10. (2013). Testing fresh concrete – Part 9: Self- compactin g concrete -L box test.
- [26] INSO 11271. (2014). Concrete -Measurement of passing ability of self-consolidating concrete by J-ring- Test Method.
- [27] UNI 11044. (2012). Standard UTC-0547 U Shape Box Apparatus. Rilem Report No.23
- [28] ASTM C805. (2009). Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- [29] ASTM C-597. (2003). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [30] DIN 1048.(2012). Standard test Concrete Impermeability Test ApparatusIm.
- [31] ISIRI 3206. (2003). Standard Test Determining the compressive strength of concrete samples.
- [32] ASTM C496. (2002). ASTM C496 Tensile Concrete Test Equipment.
- [33] Mirzaie Aliabadi, M. derakhshan Nezhad, A.H.(2023). Quality control of concrete structure by Schmidt hammer method. The fifth international conference and the sixth national conference on civil engineering, architecture, art and urban design. Tabriz, Iran, July 6.
- [34] ISO1920-7. (2004). Testing of concrete — Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete.
- [35] Mirzaie Aliabadi, M. derakhshan Nezhad, A.H.(2023). Health monitoring of concrete structure using ultrasonic. The 7th International Conference on Research in Science and Engineering and the 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning in Asia. Bangkok, Thailand, February 27.
- [36] Mirzai Ali Abadi, M. derakhshan Nezhad, AH. Mousavi Abdullah Nejad, SA Hitavi, AS. (1), Investigating the effect of heat transfer from the mold on the mechanical properties of self -compact concrete. Structural and Construction Engineering. accepted. Online release. Tehran, Iran, 06 Azar.
- [37] Derakhshan Nezhad, AH. Mirzaie Aliabadi, M. Shahidzadeh, M.S. (2024). Laboratory investigation of the effect of plastic packaging belt fibers and iron oxide on the mechanical properties of self-compacting concrete. Amirkabir Civil Engineering Journal. Articles ready for publication, accepted for online publication. Tehran, Iran, May 28