Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Laboratory Evaluation of the Eeffect of Scrap Iron Filings on the Performance and Durability of Concrete Containing Microsilica

Amin Zare[a], Rezvan Babagoli*[b], Meisam Qorbani Fouladi[c]

[a] MSc. Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.
[b] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.
[c] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:
Received: 2026-05-09
Revised: 2026-07-14
Accepted: 2026-07-18

Keywords:
Silica fume,
Waste iron,
Sustainable concrete,
Mechanical properties,
Concrete durability,
Electrical resistivity,
Permeability.

ABSTRACT

The increasing consumption of cement and growing generation of metallic waste have highlighted the urgent need for developing sustainable concrete incorporating recycled materials. Although numerous studies have independently investigated the effects of microsilica or waste iron shavings on concrete properties, limited research has examined their combined influence on both the mechanical performance and durability characteristics of concrete. Consequently, a significant research gap remains regarding the synergistic behavior of these two materials. Therefore, the present study aimed to experimentally investigate the combined effects of microsilica and waste iron shavings on concrete performance and to identify optimum mixture exhibiting the best overall performance within the investigated range**.** To this end, concrete mixtures containing 4% and 8% microsilica as partial replacements for cement and 3%, 5%, and 7% waste iron shavings as partial replacements for fine aggregate were prepared. Compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, water absorption, density, and electrical resistivity were evaluated at curing ages of 7, 28, and 90 days. The results indicated that replacing cement with 8% microsilica increased the 90-day compressive strength by approximately 29% compared with the control mixture. Furthermore, incorporating 3% waste iron shavings enhanced the compressive strength by approximately 22%, whereas increasing the iron shaving content to 7% resulted in a

*** Corresponding author.**
E-mail address: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

How to cite this article: Zare, A., Babagoli, R. and Qorbani Fouladi, M. (2026). Laboratory evaluation of the effect of scrap iron filings on the performance and durability of concrete containing microsilica. . *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.109-142.*
DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41162.1762

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

reduction in strength and an increase in water absorption. The highest flexural strength was achieved by the mixture containing 8% microsilica and 7% waste iron shavings. However, considering the overall performance in terms of mechanical properties and durability indicators, the mixture incorporating 8% microsilica and 3% waste iron shavings exhibited the most balanced and favorable performance. In addition, the incorporation of microsilica appeared to mitigate part of the adverse effects associated with higher iron shaving contents by densifying the cementitious matrix and refining the interfacial transition zone (ITZ). Overall, the findings demonstrate that controlled incorporation of waste iron shavings in the presence of microsilica can simultaneously enhance the strength and durability of concrete through a synergistic effect, providing an effective approach for producing sustainable concrete with improved engineering performance.

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر براده آهن ضایعاتی بر عملکرد و دوام بتن حاوی میکروسیلیس

امین زارع[۱]، رضوان باباگلی[۲]•، میثم قربانی فولادی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

[۲] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

بازنگری مقاله: ۰۴۰۵/۰۴/۲۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

واژه‌های کلیدی:

میکروسیلیس،

براده آهن ضایعاتی،

بتن پایدار،

خواص مکانیکی،

دوام بتن،

مقاومت الکتریکی، نفوذپذیری.

چکیده

افزایش مصرف سیمان و تولید پسماندهای فلزی، ضرورت توسعه بتن‌های پایدار با استفاده از مواد بازیافتی را بیش از پیش آشکار ساخته است. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی جداگانه اثر میکروسیلیس یا براده‌های آهن بر خواص بتن پرداخته‌اند، اما پژوهش‌های محدودی اثر همزمان این دو ماده را بر خواص مکانیکی و شاخص‌های دوام بتن ارزیابی کرده‌اند و شکاف پژوهشی موجود در زمینه تبیین رفتار ترکیبی آنها همچنان باقی است. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی اثر همزمان میکروسیلیس و براده آهن ضایعاتی بر عملکرد بتن و شناسایی ترکیب دارای بهترین عملکرد کلی در محدوده مورد مطالعه بود. بدین منظور، بتن‌هایی حاوی ٤ و ٨ درصد میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین سیمان و ۳، ۵ و ۷ درصد براده آهن به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه ریز تولید شدند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خمشی، جذب آب، وزن مخصوص و مقاومت الکتریکی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۸ درصد میکروسیلیس موجب افزایش حدود ۲۹ درصدی مقاومت فشاری ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین افزودن ۳ درصد براده آهن، مقاومت فشاری را حدود ۲۲ درصد افزایش داد، در حالی که افزایش مقدار براده تا ۷ درصد باعث کاهش مقاومت و افزایش جذب آب گردید. نتایج مقاومت خمشی نشان داد که ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۷ درصد براده آهن بیشترین

• پست الکترونیک نویسنده مسئول: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

استناد به این مقاله: زارع، امین.، باباگلی، رضوان. و قربانی فولادی، میثم. (۱٤۰۵). ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر براده آهن ضایعاتی بر عملکرد و دوام بتن حاوی میکروسیلیس. *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*، ۱۲ (۲)، ۱۰۹-۱٤۲.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41162.1762

مقاومت خمشی را ارائه کرد، در حالی که از نظر عملکرد کلی شامل مقاومت‌های مکانیکی و شاخص‌های دوام، مخلوط حاوی ۸ درصد میکروسیلیس و ۳ درصد براده آهن متعادل‌ترین و مطلوب‌ترین عملکرد را نشان داد. همچنین میکروسیلیس با متراکم‌سازی ماتریس سیمانی و بهبود ناحیه انتقال (ITZ)، بخشی از اثرات منفی ناشی از افزایش براده آهن را تعدیل کرد. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده از براده آهن در حضور میکروسیلیس می‌تواند از طریق ایجاد اثر هم‌افزایی (Synergistic Effect)، مقاومت و دوام بتن را به‌طور همزمان بهبود داده و رویکردی مؤثر برای تولید بتن‌های پایدار با عملکرد مهندسی مناسب فراهم سازد.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت و توسعه زیرساخت‌های عمرانی، منجر به افزایش چشمگیر تقاضا برای مصالح ساختمانی شده است. در این میان، بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده مهندسی در جهان، نقش اساسی در ساخت‌وساز ایفا می‌کند. با این حال، تولید سیمان به‌عنوان جزء اصلی بتن، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، دارد و به‌عنوان یکی از صنایع آلاینده شناخته می‌شود. از سوی دیگر، استخراج بی‌رویه منابع طبیعی نظیر سنگدانه‌ها، چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی متعددی را به همراه داشته است. در چنین شرایطی، حرکت به سمت استفاده از مواد جایگزین، بازیافتی و پسماندهای صنعتی در تولید بتن، به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در راستای توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

در کنار چالش‌های مرتبط با صنعت سیمان، افزایش حجم پسماندهای صنعتی نیز به مسئله‌ای جدی در حوزه مدیریت محیط‌زیست تبدیل شده است. در این میان، براده‌های آهن حاصل از فرآیندهای ماشین‌کاری و صنایع فلزی، بخش قابل توجهی از ضایعات صنعتی را تشکیل می‌دهند که در بسیاری موارد بدون بازیافت مؤثر دفع می‌شوند. انباشت این پسماندها علاوه بر اشغال اراضی و آلودگی منابع خاک و آب، موجب اتلاف منابع فلزی ارزشمند نیز می‌شود. از این‌رو، استفاده مجدد از براده‌های آهن در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در تولید بتن، می‌تواند رویکردی مؤثر در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی، مدیریت پسماند و حرکت به سوی اقتصاد چرخشی باشد. هرچند براده‌های آهن و ضایعات فولادی از نظر تئوری قابل بازگشت به چرخه تولید فولاد هستند، اما در بسیاری از مناطق (به‌ویژه کشورهای در حال توسعه) به دلیل حجم بالا، آلودگی سطحی و هزینه‌های لجستیکی، بخش قابل توجهی از این ضایعات بدون بازیافت مؤثر در محل‌های دفن زباله انباشته یا دفع می‌شوند. انباشت این پسماندها علاوه بر اشغال اراضی و خطر احتمالی آلودگی خاک و آب زیرزمینی از طریق آبشویی[1] فلزات، منجر به اتلاف منابع فلزی ارزشمند می‌گردد (گارگ، ۲۰۲۲؛ حسین و الخفاجی، ۲۰۲۲). استفاده مجدد از این ضایعات در بتن نه تنها رویکردی در راستای اقتصاد چرخشی است، بلکه بار محیطی ناشی از دفع غیربهینه آن‌ها را کاهش می‌دهد.

به موازات این‌رویکرد، استفاده از مواد پوزولانی فعال نظیر میکروسیلیس به‌طور گسترده‌ای در بتن‌های پیشرفته مورد بررسی قرار گرفته است. میکروسیلیس، به‌عنوان یک محصول جانبی صنعت فروسیلیس، دارای ذرات بسیار ریز با سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری شیمیایی قابل توجه است که با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش داده و منجر به تشکیل فازهای ژلی ثانویه می‌شود. این فرآیند نه‌تنها باعث کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار خمیر سیمان می‌شود، بلکه مقاومت‌های مکانیکی و دوام بتن را نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. به همین دلیل، استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان یکی از مؤثرترین افزودنی‌های معدنی در تولید بتن‌های با عملکرد بالا[2] به‌طور گسترده‌ای مورد تأیید قرار گرفته است.

با این وجود، یکی از چالش‌های اساسی در طراحی بتن‌های نوین، دستیابی به ترکیبی بهینه از خواص مکانیکی و دوام در کنار ملاحظات زیست‌محیطی است. در این میان، استفاده از براده‌های آهن به‌عنوان یک ماده تقویت‌کننده بالقوه، می‌تواند بر رفتار مکانیکی بتن تأثیرگذار باشد. این براده‌ها، به‌دلیل مدول الاستیسیته بالا و ماهیت فلزی، قادرند به‌عنوان عناصر مسلح‌کننده در مقیاس ریز عمل کرده و موجب بهبود مقاومت‌های

1- Leaching

2- High performance concrete

فشاری، کششی و خمشی بتن شوند. همچنین، حضور این ذرات ممکن است بر رفتار ترک‌خوردگی و جذب انرژی بتن نیز اثرگذار باشد. با این حال، اثرات استفاده از براده‌های آهن محدود به بهبود خواص مکانیکی نیست و می‌تواند پیامدهای پیچیده‌ای بر سایر ویژگی‌های بتن داشته باشد. به‌عنوان مثال، افزایش چگالی و تغییر در ساختار حفرات، ممکن است بر نفوذپذیری، جذب آب و در نتیجه دوام بتن تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، احتمال بروز خوردگی در ذرات فلزی و تأثیر آن بر عملکرد بلندمدت بتن، از جمله نگرانی‌های مهم در این زمینه به شمار می‌رود. از این‌رو، بررسی جامع اثرات این پسماندها بر جنبه‌های مختلف عملکردی بتن، امری ضروری به نظر می‌رسد.

ایسوس (۲۰۲٤) تأثیر استفاده از براده‌های آهن به عنوان ماده افزودنی بر مقاومت فشاری بتن را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، سه طرح اختلاط شامل یک نمونه شاهد و دو طرح حاوی مقادیر مختلف براده آهن (۱۲ و ۲٤ اونس) تهیه شد. برای هر طرح، شش نمونه استوانه‌ای ساخته شد و آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۱ روز انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن براده‌های آهن به طور میانگین موجب کاهش حدود ۳ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل شده است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، استفاده از براده آهن نه تنها به بهبود مقاومت فشاری منجر نشد، بلکه تا حدی باعث افت آن گردید. همچنین، مشکلاتی نظیر کاهش کارایی و تراکم‌پذیری بتن در مخلوط‌های حاوی براده آهن گزارش شد که می‌تواند بر کیفیت نهایی بتن اثر منفی بگذارد.

اولاویل و همکاران (۲۰۲۱) امکان استفاده از براده‌های آهن به عنوان جایگزین جزئی ماسه در بتن خودتراکم[۲] (SCC) را مورد بررسی قرار دادند. هدف این تحقیق، ارزیابی همزمان خواص تازه و سخت‌شده بتن در راستای توسعه مصالح پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از استخراج سنگدانه‌های طبیعی بود. در این مطالعه، براده‌های آهن در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزین ماسه رودخانه‌ای شدند و یک طرح بدون براده آهن به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد. نسبت آب به مواد چسباننده برای تمامی طرح‌ها ثابت و برابر ۰/٤۵ بود. آزمایش‌های مربوط به حالت تازه شامل اسلامپ فلو، T500، L-box و V-funnel انجام شد و مقاومت‌های فشاری و کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که تمامی مخلوط‌ها الزامات آیین‌نامه‌ای بتن خودتراکم را در حالت تازه تأمین کردند، هرچند با افزایش درصد براده آهن، روانی بتن کاهش و ویسکوزیته آن افزایش یافت. از نظر مقاومتی، افزایش میزان براده آهن تا ۱۵٪ موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی شد، به‌گونه‌ای که بیشترین افزایش مقاومت کششی (حدود ۸٪) در این سطح مشاهده گردید. با این حال، جایگزینی بیش از ۱۵٪ منجر به افت مقاومت‌ها شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مقدار ۱۵٪ براده آهن به عنوان درصد بهینه جایگزینی ماسه در بتن خودتراکم معرفی گردید. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده از براده‌های آهن می‌تواند ضمن حفظ خواص کارایی، موجب بهبود نسبی مقاومت‌های مکانیکی نیز گردد و از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجه باشد.

یوسف (۲۰۱۹) اثر هم‌افزایی براده آهن و میکروسیلیس بر خواص خمیر سیمان پرتلند معمولی را بررسی کرد. در این مطالعه، درصد براده آهن بین ۰ تا ۱۵ درصد متغیر و مقدار میکروسیلیس ثابت و برابر با ۱۰ درصد وزنی ماده چسباننده بود. نسبت آب به چسباننده نیز برابر ۰.۲۵ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد افزودن همزمان براده آهن و میکروسیلیس موجب کاهش کارایی خمیر در نسبت آب پایین می‌شود که به افزایش اصطکاک داخلی و توسعه ناحیه انتقالی بین‌سطحی نسبت داده شد. از نظر دوام، ترکیب مذکور باعث کاهش قابل توجه

جمع‌شدگی خشک‌شدگی گردید، به‌گونه‌ای که بیشترین کاهش در سطح ۱۵٪ براده آهن همراه با ۱۰٪ میکروسیلیس مشاهده شد. تحلیل ریزساختاری نیز تشکیل فازهای CSH ، CASH و CAFSH را نشان داد که بیانگر افزایش تراکم و بهبود ساختار داخلی ماتریس سیمانی است. با وجود افزایش جذب آب در برخی سطوح جایگزینی، نتایج کلی این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده همزمان از براده آهن و میکروسیلیس می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش جمع‌شدگی و بهبود دوام بتن، به‌ویژه در شرایط اقلیمی گرم باشد.

شمس الدین و همکاران (۲۰۱۹) امکان جایگزینی کامل ماسه با براده‌های آهن در تولید بتن با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از استخراج ماسه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، براده‌های آهن به عنوان پسماند صنعتی فلزی به طور کامل جایگزین سنگدانه ریز شده و خواص مکانیکی بتن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که جایگزینی کامل ماسه با براده آهن موجب افزایش حدود ۲۵ درصدی مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی نسبت به بتن شاهد شد. همچنین، مقاومت سایشی بتن حدود ۲۰ درصد بهبود یافت که این امر کاربرد بالقوه این بتن را در روسازی‌ها و کف‌های صنعتی نشان می‌دهد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از SEM[1] نیز افزایش تراکم و بهبود ساختار داخلی بتن را تأیید کرد.

به نظر گارگ (۲۰۲۲)، یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی و صنعتی، ضایعات فولادی تولید شده در کارگاه‌ها و کارخانه‌هاست که معمولاً در محل‌های دفن زباله یا منابع آب ریخته می‌شوند و آلودگی ایجاد می‌کنند. به منظور کاهش ورود این ضایعات به محیط، پژوهش‌ها به دنبال استفاده مجدد از پرکننده‌های فولادی در ساخت بتن و مصالح ساختمانی هستند.

طبق نظر داوود و همکاران (۲۰۲۳) تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از پرکننده‌های آهن به‌عنوان جایگزین جزئی ماسه در بتن، می‌تواند بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و فیزیکی بتن ایجاد کند. مطالعات آزمایشی نشان داده‌اند که درصدهای جایگزینی بین ۵٪ تا ۳۰٪ برای بهبود مقاومت فشاری، کششی و خمشی بهینه هستند. به‌طور خاص، نمونه‌هایی با ۲۰٪ پرکننده آهن بیشترین مقاومت فشاری و کششی و نمونه‌هایی با ۳۰٪ پرکننده آهن بیشترین مقاومت خمشی را نشان داده‌اند.

زهرا و الجمیلی (۲۰۲۳) معتقدند که یکی از رویکردهای نوین در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، استفاده از ضایعات آهن به‌عنوان جایگزین جزئی مصالح ریزدانه است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن پرکننده آهن می‌تواند مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در پژوهشی که جایگزینی جزئی ماسه با پرکننده آهن در مقادیر ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بررسی شد، نتایج نشان دادند که جایگزینی ۱۰٪ بهترین عملکرد در مقاومت فشاری، کششی و خمشی را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش درصد پرکننده آهن، ضریب انبساط حرارتی بتن کاهش یافته و این امر موجب افزایش فاصله بین درزهای انبساطی می‌شود. بیشترین فاصله بین درزهای انبساطی در جایگزینی ۱۵٪ مشاهده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از پرکننده آهن نه تنها خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند مشکلات ناشی از انبساط و انقباض حرارتی بتن را نیز کاهش دهد و موجب بهبود عملکرد طولانی‌مدت سازه‌ها گردد. بنابراین، جایگزینی جزئی ماسه با پرکننده آهن یک راهکار مؤثر در طراحی بتن‌های مقاوم و با دوام محسوب می‌شود و می‌تواند به عنوان یک استراتژی پایدار و زیست‌محیطی برای استفاده از ضایعات آهن در مهندسی عمران مطرح گردد.

بریسم و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از پرکننده‌های

1- Scanning Electron Microscopy

آهن به‌عنوان جایگزین جزئی مصالح ریزدانه در بتن را نه تنها یک راهکار پایدار برای کاهش ضایعات صنعتی می‌دانند، بلکه می‌تواند بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن تأثیر بگذارد. تحقیقات نشان داده‌اند که با افزایش درصد جایگزینی پرکننده آهن، روانی و ضریب تراکم بتن کاهش می‌یابد، به ویژه در درصدهای بالاتر (۲۰٪ تا ٤۰٪). این کاهش روانی معمولاً به دلیل زبری سطح پرکننده‌های آهن و افزایش سطح تماس است که نیاز به آب را بالا برده و یکپارچگی مخلوط را کاهش می‌دهد. با وجود کاهش روانی، مقاومت فشاری و خمشی مخلوط‌ها در محدوده معقولی قرار داشت، اما به طور کلی افزودن پرکننده آهن بیش از حد می‌تواند باعث کاهش مقاومت شود (تا ۳۸٪ در مقاومت فشاری و ٤٤٪ در مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز). استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها می‌تواند اثر کاهش روانی را جبران کرده و تراکم و کارایی بتن را بهبود دهد.

الاجیل و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی تجربی، تأثیر استفاده از براده‌های آهن به‌عنوان ماده افزودنی بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را مورد تحقیق قرار دادند. در این مطالعه، از سنگدانه درشت و ماسه منطقه المنقوش مصراته و سیمان تولیدی شرکت اتحاد عرب استفاده شد. نمونه‌های آزمایشی شامل مکعب‌های ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر و استوانه‌های ۱۵×۳۰ سانتی‌متر بوده و در سه رده مقاومتی C25، C30 و C35 طراحی شدند. برای هر رده مقاومتی، نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد براده آهن (بر حسب وزن سیمان) تهیه و در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش درصد براده آهن موجب کاهش مقاومت فشاری، چگالی و کارایی بتن می‌شود که این امر به افزایش ذرات ریز در مخلوط نسبت داده شده است. در مقابل، افزودن ۳ درصد براده آهن منجر به بهبود مقاومت کششی دو نیم‌شدگی گردید.

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی فیلازی و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر استفاده از براده‌های آهن بازیافتی بر خواص مکانیکی و الکتریکی ملات سیمانی بررسی شد. در این تحقیق، ملات‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و درصدهای مختلف براده آهن (صفر تا ١٦ درصد وزنی نسبت به سیمان) و در محدوده اندازه ۰/۵ تا ٤ میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در آب در سنین ۷ و ۲۸ روز، تحت آزمون‌های جریان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و هدایت الکتریکی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ۱ درصد براده آهن با اندازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر موجب افزایش مقاومت فشاری (حدود ٥/٤ درصد) نسبت به نمونه شاهد شد؛ با این حال، افزایش بیشتر درصد جایگزینی باعث کاهش مقاومت مکانیکی به دلیل کاهش تراکم ساختاری گردید. همچنین، با افزایش مقدار و اندازه براده‌های آهن، مقاومت ویژه الکتریکی کاهش و هدایت الکتریکی ملات افزایش یافت که این امر به ایجاد مسیرهای رسانا در ساختار ملات نسبت داده شد.

راجشواری (۲۰۲۱) در پژوهشی آزمایشگاهی، امکان استفاده از براده‌های آهن به‌عنوان جایگزین جزئی ماسه در بتن معمولی را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، مقادیر ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد جایگزینی سنگدانه ریز با براده آهن در بتن با رده مقاومتی M20 (نسبت اختلاط ۳، ۱/۵، ۱) ارزیابی شد. به‌منظور بررسی اثر این جایگزینی، آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد براده‌های آهن، کارایی بتن افزایش یافته و خواص مقاومتی نیز بهبود می‌یابد. بیشترین افزایش مقاومت مربوط به سطح ۳۵ درصد جایگزینی بود که عملکردی بهتر از بتن شاهد نشان داد. بر این اساس، استفاده از براده‌های آهن می‌تواند علاوه بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن، در راستای بهره‌برداری از ضایعات صنعتی و کاهش مصرف منابع طبیعی نیز مؤثر باشد.

رشیدیان و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی نشان

داده‌اند که استفاده از میکروسیلیس تا ۱۰–۱۵ درصد وزنی سیمان می‌تواند مقاومت فشاری نهایی بتن را در عمل‌آوری با آب و عمل‌آوری تسریع یافته با بخار افزایش دهد. با این حال، نرخ کسب مقاومت در بتن‌های حاوی میکروسیلیس تحت عمل‌آوری با بخار معمولاً کمتر از بتن‌های بدون میکروسیلیس است. کاهش نسبت آب به سیمان می‌تواند سرعت کسب مقاومت در عمل‌آوری بخار را افزایش دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای تولید بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده، استفاده از ۱۵٪ وزنی میکروسیلیس و عمل‌آوری با بخار به مدت ۲٤ ساعت می‌تواند حدود ۷۰٪ مقاومت ۲۸ روزه مورد نظر را تأمین کند. این یافته‌ها اهمیت طراحی مخلوط و شرایط عمل‌آوری مناسب در استفاده از افزودنی‌های پوزولانی برای تولید بتن با عملکرد مکانیکی بالا و قابل اعتماد در فرآیندهای صنعتی را نشان می‌دهد و به عنوان راهنمایی برای استفاده بهینه از میکروسیلیس در بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده مطرح می‌گردد.

رشیدیان و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه آزمایشگاهی، نمونه‌های بتنی با مقادیر مختلف میکروسیلیس (۰٪، ۱۰٪ و ۱۳٪ وزن سیمان) و الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۰۵٪، ۰/۰۷۵٪ و ۰/۱٪ وزن بتن) تهیه کردند. نمونه‌ها برای مدت یک ساعت در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و خواص مکانیکی آن‌ها قبل و بعد از حرارت‌دهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه کنترل دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال بود و به عنوان معیار مقایسه استفاده شد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از ذرات و الیاف فلزی در بتن می‌تواند بر رفتار مکانیکی، الگوی ترک‌خوردگی و ظرفیت جذب انرژی آن تأثیرگذار باشد. براده‌های آهن نیز به دلیل مدول الاستیسیته بالا و ماهیت فلزی خود، این پتانسیل را دارند که به‌عنوان عناصر تقویت‌کننده در مقیاس ریز عمل کرده و موجب بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن شوند. با این حال، استفاده از این پسماندها همواره با چالش‌هایی نظیر کاهش کارایی، افزایش ناهمگنی ریزساختار، تغییر در شبکه منافذ و احتمال خوردگی ذرات فلزی همراه است که می‌تواند عملکرد بلندمدت و ویژگی‌های دوام بتن را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، ارزیابی همزمان خواص مکانیکی و شاخص‌های دوام در بتن‌های حاوی براده آهن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این راستا، استفاده از مواد پوزولانی فعال نظیر میکروسیلیس می‌تواند راهکاری مؤثر برای اصلاح برخی پیامدهای منفی ناشی از حضور ذرات فلزی در بتن باشد. میکروسیلیس، به‌عنوان محصول جانبی صنعت فروسیلیس، دارای ذرات فوق‌ریز و واکنش‌پذیری پوزولانی بالا است که از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم، موجب تشکیل فازهای ژلی ثانویه، کاهش تخلخل و بهبود ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌شود. در نتیجه، استفاده از میکروسیلیس می‌تواند علاوه بر افزایش مقاومت مکانیکی، نفوذپذیری و انتقال یون‌ها در بتن را نیز کاهش داده و دوام آن را بهبود بخشد. از این منظر، ترکیب همزمان میکروسیلیس و براده آهن می‌تواند رویکردی امیدوارکننده برای تولید بتن‌های پایدار با عملکرد مهندسی مناسب باشد.

با توجه به پتانسیل هم‌افزایی مواد پوزولانی فعال مانند میکروسیلیس و ضایعات فلزی (براده آهن)، این پژوهش با هدف بررسی همزمان اثر این دو افزودنی بر خواص مکانیکی و دوام بتن طراحی شده است. انتظار می‌رود که ترکیب مناسب این مواد بتواند تعادل مطلوبی بین بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی از یک سو و کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام از سوی دیگر ایجاد نماید. چنین مخلوط‌هایی می‌توانند برای کاربرد در کف‌های صنعتی و روسازی‌ها (که نیاز به مقاومت سایشی بالا دارند)، سازه‌های دریایی و ساحلی (به دلیل نیاز به مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید) و عناصر پیش‌ساخته با عملکرد بالا مناسب باشند. نتایج این مطالعه می‌تواند

راهنمایی برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های پایدار در پروژه‌های عمرانی ارائه دهد.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از تحقیقات به بررسی جداگانه اثر مواد پوزولانی یا ضایعات فلزی اختصاص یافته است و مطالعات محدودی به بررسی همزمان این دو نوع ماده پرداخته‌اند. در مواردی که از الیاف یا ذرات فلزی در بتن استفاده شده، تمرکز عمدتاً روی خواص مکانیکی بوده و ارزیابی‌های جامع دوام، به‌ویژه در حضور مواد پوزولانی فعال، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، نتایج برخی مطالعات حاکی از بهبود خواص مکانیکی در اثر استفاده از ضایعات فلزی است، در حالی که در برخی موارد، کاهش کارایی و افزایش تخلخل گزارش شده است که این تناقضات، ضرورت انجام مطالعات دقیق‌تر را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، یکی از خلأهای مهم در ادبیات موجود، عدم بررسی کافی مکانیزم‌های ریزساختاری حاکم بر رفتار ترکیبی این مواد است. به‌عبارت دیگر، ارتباط بین تغییرات در ساختار ماتریس سیمانی (ناشی از حضور میکروسیلیس) و توزیع و اندرکنش ذرات فلزی (براده آهن) به‌طور کامل تبیین نشده است. این موضوع می‌تواند نقش کلیدی در پیش‌بینی رفتار مکانیکی و دوام بتن ایفا کند و بهینه‌سازی طرح اختلاط را تسهیل نماید.

بر این اساس، تحقیق حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌های علمی، به بررسی آزمایشگاهی اثر براده‌های آهن ضایعاتی بر خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی میکروسیلیس می‌پردازد. در این پژوهش، پارامترهای مهمی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و خمشی، کارایی، جذب آب، تخلخل و سایر شاخص‌های دوام مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، تلاش شده است تا با تحلیل نتایج، ارتباط بین رفتار ریزساختاری و عملکرد کلان بتن تبیین گردد و نقش هم‌افزایی یا تداخل اثرات این دو ماده مورد بررسی قرار گیرد.

نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک رویکرد جامع برای استفاده همزمان از یک پسماند صنعتی فلزی و یک ماده پوزولانی فعال در بتن است، به‌گونه‌ای که علاوه بر بهبود عملکرد مهندسی، ملاحظات زیست‌محیطی نیز مدنظر قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه دانش فنی در زمینه بتن‌های پایدار کمک کرده و زمینه را برای کاربرد عملی این نوع مواد در پروژه‌های عمرانی فراهم سازد. علاوه بر این، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات آتی در زمینه بهینه‌سازی ترکیبات بتن و بررسی رفتار بلندمدت آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مواد و مصالح

۲-۱-۱. سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ II به‌عنوان ماده چسباننده اصلی استفاده شد. این سیمان مطابق استاندارد ملی ایران (ISIRI 389) و مشابه الزامات استاندارد ASTM C150 تولید شده و به دلیل مقاومت متوسط در برابر حملات سولفاتی و کاربرد گسترده در بتن‌های ساختمانی انتخاب گردید. جداول ۱، ۲ و ۳ به ترتیب خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، و ترکیب فازی سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع	روش آزمون
نوع سیمان	–	–	سیمان پرتلند تیپ II	–	ASTM C۱۵۰ / ISIRI ۳۸۹
وزن مخصوص	Gs	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۳.۱۵	۳.۱۰–۳.۲۰	ASTM C۱۸۸

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع	روش آزمون
سطح مخصوص	SSA	سانتی‌متر مربع بر گرم	۳۰۰۰–۳۵۰۰	≥ ۲۸۰۰	ASTM C۲۰٤
زمان گیرش اولیه	IST	دقیقه	۶۰–۹۰	≥ ٤۵	ASTM C۱۹۱
زمان گیرش نهایی	FST	دقیقه	< ۳۷۵	≤ ۳۷۵	ASTM C۱۹۱
مقاومت فشاری ۳ روزه	f'c–۳d	مگاپاسکال	≥ ۱۶	≥ ۱۲	ASTM C۱۰۹
مقاومت فشاری ۷ روزه	f'c–۷d	مگاپاسکال	≥ ۲۲	–	ASTM C۱۰۹
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	f'c–۲۸d	مگاپاسکال	≥ ۳۰	≥ ۱۹	ASTM C۱۰۹

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	حد استاندارد	روش آزمون
اکسید کلسیم	CaO	درصد	۶۰–۶۵	–	ASTM C۱۱٤
دی‌اکسید سیلیسیم	SiO_2	درصد	۲۰–۲۲	–	ASTM C۱۱٤
اکسید آلومینیوم	Al_2O_3	درصد	٤–۶	–	ASTM C۱۱٤
اکسید آهن	Fe_2O_3	درصد	۳–۵	–	ASTM C۱۱٤
اکسید منیزیم	MgO	درصد	< ۶	≤ ۶	ASTM C۱۵۰
تری‌اکسید گوگرد	SO_3	درصد	< ۳	≤ ۳	ASTM C۱۵۰
افت حرارتی	LOI	درصد	< ۳ (مقدار متعارف)	≤ ۳	ASTM C۱۱٤

جدول ۳. ترکیب فازی سیمان مورد استفاده

فاز معدنی	نماد	واحد	مقدار تخمینی
تری‌کلسیم سیلیکات	C_3S	٪	٤۵–۶۰
دی‌کلسیم سیلیکات	C_2S	٪	۱۵–۳۰
تری‌کلسیم آلومینات	C_3A	٪	< ۸
تتراکلسیم آلومینوفریت	C_4AF	٪	۸–۱۲

۲-۱-۲. میکروسیلیس

در این پژوهش، از میکروسیلیس به‌عنوان یک ماده پوزولانی فعال و اصلاح‌کننده ریزساختار بتن استفاده شد. میکروسیلیس مصرفی به صورت پودر بسیار ریز خاکستری رنگ تهیه گردید و دارای درصد بالایی از دی‌اکسید سیلیس (SiO_2) بوده است. این ماده عمدتاً محصول جانبی فرآیند تولید فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی است و به دلیل ساختار آمورف و سطح ویژه بسیار بالا، از واکنش‌پذیری قابل توجهی برخوردار می‌باشد.

جدول ٤. مشخصات میکروسیلیس

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع
وزن مخصوص	Gs	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۲.۲–۲.۳	۲.۱–۲.۳
سطح مخصوص	SSA	متر مربع بر کیلوگرم	۱۵۰۰۰–۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰–۳۰۰۰۰
اندازه متوسط ذرات	d_{50}	میکرون	< ۱	۰.۱–۱
شکل ذرات	–	–	کروی بسیار ریز	–

میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش داده و ترکیبات سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) ثانویه تولید می‌کند که این امر منجر به کاهش تخلخل، افزایش چگالی خمیر سیمان، بهبود پیوستگی خمیر و سنگدانه و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. در نتیجه، استفاده از این ماده موجب افزایش مقاومت فشاری و بهبود شاخص‌های دوام بتن به‌ویژه در محیط‌های خورنده می‌گردد.

در این پژوهش، میکروسیلیس در دو سطح ٤ و ٨ درصد وزن سیمان به مخلوط بتن افزوده شد تا اثر آن بر خواص مکانیکی و دوام بتن به‌صورت کمی و مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. انتخاب این درصدها بر اساس مطالعات پیشین و محدوده بهینه مصرف میکروسیلیس در بتن‌های ساختمانی انجام شده است که نشان می‌دهد دوز بهینه میکروسیلیس برای افزایش عملکرد مکانیکی و دوام بتن معمولی عموماً بین ٥٪ تا ١٠٪ است که با محدوده بهینه گزارش شده در تحقیقات قبلی سازگار است (رشیدیان، ٢٠٢٣؛ مهتا و مونتیرو، ٢٠١٤). سطوح جایگزینی کمتر ممکن است اثرات پوزولانی و پرکننده کافی را فراهم نکنند؛ در حالی که دوزهای بالاتر ممکن است بر کارایی تأثیر منفی گذاشته و نیاز به آب را افزایش دهند. بنابراین، دو سطح جایگزینی نمونه برای بررسی اثربخشی مقادیر متوسط و نسبتاً زیاد میکروسیلیس در بتن حاوی براده‌های آهن ضایعاتی انتخاب شدند. این ماده به صورت پودر بسیار ریز با درصد بالای دی‌اکسید سیلیس (SiO_2) تهیه گردید و نقش مهمی در افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن دارد. استفاده از میکروسیلیس سبب کاهش فضای خالی در ماتریکس سیمان، افزایش چگالی و بهبود پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌شود.

جدول ٥. ترکیب شیمیایی میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	حد مرجع (ASTMC1240)
دی‌اکسید سیلیسیم	SiO_2	درصد	> ٩٠	≥ ٨٥
اکسید آلومینیوم	Al_2O_3	درصد	٠.٥–٢	–
اکسید آهن	Fe_2O_3	درصد	٠.٥–٢	–
اکسید کلسیم	CaO	درصد	٠.٥–٢	–
اکسید منیزیم	MgO	درصد	< ٢	–
افت حرارتی	LOI	درصد	(متعارف) < ٦	≤ ٦



شکل ١. ژل میکروسیلیس

۲-۱-۳. براده آهن ضایعاتی

در این پژوهش، براده آهن به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه ریز مورد استفاده قرار گرفت. براده آهن مصرفی از کارگاه‌های ماشین‌کاری و تراشکاری قطعات فلزی تهیه گردید. پیش از استفاده، عملیات جداسازی ناخالصی‌ها شامل حذف ذرات غیرآهنی، روغن‌های صنعتی و آلودگی‌های سطحی انجام شد. سپس براده‌ها شست‌وشو داده شده و در دمای محیط خشک گردیدند. به‌منظور دستیابی به یکنواختی نسبی در توزیع اندازه ذرات، نمونه‌ها از الک‌های استاندارد عبور داده شدند تا در محدوده دانه‌بندی مشخص مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۲ براده آهن ضایعاتی مورد استفاده را نشان می‌دهد. جداول ٦ و ۷ مشخصات فیزیکی و شیمیایی براده آهن ضایعاتی مورد استفاده را نشان می‌دهند.

جدول ٦. مشخصات براده آهن ضایعاتی

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع
وزن مخصوص	Gs	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۷.۲–۷.۸	۷.۰–۷.۸
شکل ذرات	–	–	نامنظم، گوشه‌دار	–
زبری سطح	–	–	نسبتاً زبر	–
اندازه ذرات	d	میلی‌متر	در محدوده ماسه ریز (≈۰.۱۵–۱.۱۸)	مطابق ASTM C۳۳
چگالی ظاهری	ρ	کیلوگرم بر متر مکعب	(توده‌ای) ٤۰۰۰–۳۰۰۰	–

جدول ۷. ترکیب شیمیایی براده آهن

ترکیب	نماد	واحد	مقدار تقریبی
آهن	Fe	درصد	> ۹۵
کربن	C	درصد	۰.۱–۱
منگنز	Mn	درصد	۰.۳–۱
سیلیسیم	Si	درصد	۰.۱–۰.۵
ناخالصی‌ها	–	درصد	ناچیز



شکل ۲. براده آهن

۲-۱-٤. سنگدانه‌ها

سنگدانه‌ها بخش عمده‌ای از حجم بتن (حدود ٦٠ تا ٧٥ درصد) را تشکیل می‌دهند و نقش اساسی در انتقال بار، کنترل جمع‌شدگی و تأمین مقاومت و دوام بتن ایفا می‌کنند. در این پژوهش، از سنگدانه‌های ریز (ماسه) و درشت (شن شکسته) مطابق الزامات استاندارد ASTM C33 استفاده شد. پیش از مصرف، مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت تا یکنواختی و انطباق با حدود مجاز استاندارد اطمینان حاصل شود. سنگدانه ریز مورد استفاده از نوع ماسه طبیعی با بافت نسبتاً زبر و دانه‌های عمدتاً گردگوشه بوده است که مشخصات آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸. مشخصات فیزیکی سنگدانه ریز

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع	روش آزمون
وزن مخصوص ظاهری	Gs	گرم بر سانتی‌متر مکعب	٢.٦	٢.٥–٢.٧	ASTM C١٢٨
جذب آب	WA	درصد	< ٣	٠.٥–٣	ASTM C١٢٨
مدول نرمی	FM	–	٢.٥–٣.٠	٢.٣–٣.١	ASTM C١٣٦
درصد رطوبت	MC	درصد	اندازه‌گیری و اعمال در طرح اختلاط	–	ASTM C٥٦٦

سنگدانه درشت از نوع شن شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر انتخاب شد. ذرات دارای شکل گوشه‌دار و سطح زبر بوده‌اند که این ویژگی موجب افزایش قفل و بست مکانیکی در بتن می‌شود. مشخصات مصالح سنگی درشت دانه در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹. مشخصات فیزیکی مصالح درشت دانه

ویژگی	نماد	واحد	مقدار گزارش‌شده	محدوده مرجع	روش آزمون
وزن مخصوص ظاهری	Gs	گرم بر سانتی‌متر مکعب	٢.٦–٢.٧	٢.٥–٢.٨	ASTM C١٢٧
جذب آب	WA	درصد	< ٢	٠.٥–٢	ASTM C١٢٧

از نظر ترکیب شیمیایی، سنگدانه‌ها عمدتاً سیلیسی بوده و فاقد مقادیر مضر سولفات‌ها، کلریدها و مواد آلی تشخیص داده شدند. کنترل میزان مواد ریزدانه عبوری از الک ۷۵ میکرون نیز انجام شد تا از عدم وجود گرد و غبار بیش از حد و تأثیر منفی بر چسبندگی خمیر سیمان اطمینان حاصل گردد.

به‌منظور دستیابی به بتن با کارایی مناسب و مقاومت مطلوب، منحنی دانه‌بندی ترکیبی سنگدانه‌های ریز و درشت به‌گونه‌ای تنظیم شد که توزیع پیوسته‌ای از اندازه ذرات فراهم گردد. این امر موجب کاهش فضای خالی، کاهش نیاز به خمیر سیمان و بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شد.

۲-۱-۵. آب

آب مورد استفاده در اختلاط بتن، آب آشامیدنی فاقد املاح مضر و آلاینده بود. کیفیت آب اهمیت زیادی دارد زیرا املاح موجود در آب می‌توانند بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان و

خواص مکانیکی بتن اثر منفی بگذارند. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها به‌صورت کنترل‌شده و ثابت در نظر گرفته شد تا اثر افزودنی‌ها بر خواص بتن به‌صورت دقیق بررسی گردد.

۲-۲. طرح اختلاط

با توجه به جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس، نسبت ثابت مورد استفاده در این پژوهش نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) بوده است. در تمامی طرح‌های اختلاط، نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۳ در نظر گرفته شد تا اثر متغیرهای مورد مطالعه بر نتایج به‌طور مستقل ارزیابی شود.

در این پژوهش، میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان در دو سطح ٤ و ٨ درصد وزنی سیمان مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب این محدوده بر اساس مطالعات پیشین و عملکرد بهینه میکروسیلیس در بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی انجام شد. همچنین، براده آهن به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه ریز در مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد مورد استفاده قرار گرفت تا اثر آن بر رفتار فیزیکی، مکانیکی و شاخص‌های انتقالی بتن مورد ارزیابی قرار گیرد. جایگزینی براده آهن بر مبنای وزن سنگدانه ریز انجام شد.

محتویات انتخاب ضایعات آهن (۳٪، ۵٪ و ۷٪ وزن دانه‌های ریز) بر اساس محدوده دوز گزارش شده قبلی برای مواد ضایعات فلزی در کامپوزیت‌های سیمانی انتخاب شدند. سطوح جایگزینی بسیار پایین معمولاً تأثیر محدودی بر ریزساختار بتن و پاسخ مکانیکی دارد، در حالی که سطوح جایگزینی بالاتر ممکن است بر همگنی ماتریس و پیوند سطحی تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، محدوده انتخاب شده برای ارزیابی اثربخشی عملی تراشه‌های آهن ضایعات و برهمکنش آن با میکروسیلیس مناسب در نظر گرفته شد.

به منظور حفظ دانه‌بندی مناسب و دستیابی به تراکم مطلوب، نسبت سنگدانه‌های ریز و درشت در تمامی طرح‌ها ثابت نگه داشته شد. همچنین، با در نظر گرفتن شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها، اصلاحات لازم در مقدار آب اختلاط اعمال گردید. از آنجا که استفاده از میکروسیلیس و ذرات فلزی می‌تواند موجب کاهش کارایی بتن تازه شود، کارایی مخلوط‌ها از طریق آزمون اسلامپ کنترل شد و در صورت نیاز، تنظیمات لازم در فرآیند اختلاط اعمال گردید.

در مجموع، ۱۲ طرح اختلاط، شامل ترکیب‌های مختلف میکروسیلیس و براده آهن، به‌همراه یک نمونه شاهد، تهیه شد. جزئیات کامل طرح‌های اختلاط در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. طرح‌های اختلاط

نمونه ها	سنگدانه درشت(kg/m^3)	سنگدانه ریز(kg/m^3)	سیمان(kg/m^3)	آب(kg/m^3)	تراشه فولادی(kg/m^3)	میکروسیلیس
No name	1189	830	350	150	0	0
M4	1189	830	336	150	0	4%
M8	1189	830	322	150	0	8%
F3	1189	805.1	350	150	3%	0
F5	1189	788.5	350	150	5%	0
F7	1189	771.9	350	150	7%	0
M4-F3	1189	805.1	336	150	3%	4%

نمونه ها	سنگدانه درشت(kg/m^3)	سنگدانه ریز(kg/m^3)	سیمان(kg/m^3)	آب(kg/m^3)	تراشه فولادی(kg/m^3)	میکروسیلیس
M4-F5	1189	788.5	336	150	5%	4%
M4-F7	1189	771.9	336	150	7%	4%
M8-F3	1189	805.1	322	150	3%	8%
M8-F5	1189	788.5	322	150	5%	8%
M8-F7	1189	771.9	322	150	7%	8%

فرآیند ساخت نمونه‌ها مطابق با روش‌های متداول آزمایشگاهی و در چند مرحله انجام شد. ابتدا مصالح خشک شامل سیمان، میکروسیلیس، براده آهن و سنگدانه‌ها به‌مدت مشخص به‌صورت خشک مخلوط شدند تا توزیع یکنواخت اجزا حاصل شود. سپس ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر و استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتی‌متر آب اختلاط به‌تدریج افزوده شده و عملیات اختلاط تا دستیابی به مخلوطی همگن ادامه یافت. بتن تازه در قالب‌های استاندارد مکعبی ریخته شد و تراکم نمونه‌ها با استفاده از میله تراکم استاندارد انجام گرفت تا حباب‌های هوا به حداقل برسند و یکنواختی بتن حفظ شود.

پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش‌ها در حوضچه آب آهک اشباع در دمای ۲۳ ± ۲ درجه سلسیوس مطابق الزامات استاندارد ASTM C192 عمل‌آوری شدند.

تمامی نمونه‌ها تا سن آزمایش در شرایط یکسان نگهداری شدند تا اثر شرایط محیطی بر نتایج به حداقل برسد. آزمون‌های مکانیکی و دوام در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد تا اثر زمان عمل‌آوری بر عملکرد بتن‌های حاوی میکروسیلیس و براده آهن مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۳ نمایی از نمونه‌های ساخته‌شده و شرایط عمل‌آوری آن‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر مقایسه تجربی رفتار مهندسی مخلوط‌های مختلف و بررسی روند تغییرات خواص بتن در اثر استفاده از میکروسیلیس و براده آهن بود. از این‌رو، نتایج به صورت مقایسه‌ای تحلیل شده و از به‌کارگیری روش‌های آماری استنباطی نظیر تحلیل واریانس (ANOVA) که نیازمند تعداد بیشتری تکرار آزمایش برای هر متغیر هستند، اجتناب شد.



شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده و در حال عمل‌آوری

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مکانیکی بتن، روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد (۱۵×۱۵×۱۵) سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، مطابق با الزامات استاندارد مربوطه تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. بارگذاری با نرخ یکنواخت و پیوسته تا زمان وقوع شکست کامل ادامه یافت و حداکثر بار ثبت‌شده به‌عنوان بار گسیختگی نمونه در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری هر نمونه از نسبت حداکثر نیروی اعمالی به سطح مقطع بارگذاری محاسبه گردید. شکل ٤، نمایی از نمونه‌ها در حین انجام آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ٤. دستگاه تست مقاومت فشاری

مقاومت فشاری از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A} \qquad (۱)$$

که در آن F نیروی گسیختگی (N)، A سطح مقطع نمونه (mm^2) و σ_c مقاومت فشاری بتن (MPa) است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C39 انجام شد.

۳-۲. آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) به‌منظور ارزیابی رفتار کششی بتن، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها پس از طی دوره عمل‌آوری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، مطابق با الزامات استاندارد مربوطه تحت بارگذاری فشاری قطری قرار گرفتند. در این آزمایش، بار به‌صورت یکنواخت در امتداد قطر قائم نمونه اعمال شد تا گسیختگی کششی در راستای قطر افقی ایجاد گردد. بارگذاری با نرخ ثابت تا زمان شکست کامل نمونه ادامه یافت و حداکثر نیروی ثبت‌شده به‌عنوان بار گسیختگی در نظر گرفته شد. مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس روابط استاندارد و با استفاده از حداکثر بار اعمالی، قطر و ارتفاع نمونه محاسبه گردید. شکل ۵ نمونه‌ای از نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۵. دستگاه تست مقاومت کششی

$$f_t = \frac{2F_{max}}{\pi LD} \qquad (۲)$$

که در آن:

P : نیروی گسیختگی **(N)**

L : طول نمونه **(mm)**

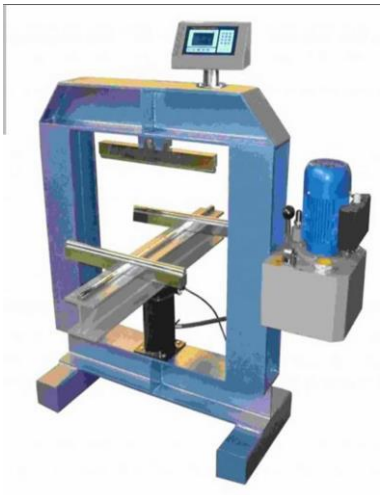
D : قطر نمونه **(mm)**

ft : مقاومت کششی بتن **(MPa)**

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C٤٩٦ انجام شد.

۳-۳. آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی به‌منظور ارزیابی ظرفیت تحمل تنش‌های خمشی و رفتار ترک‌خوردگی بتن روی تیرک‌های بتنی با ابعاد (۱۰×۱۰×٤۰) سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها پس از طی دوره عمل‌آوری در سنین مورد نظر، تحت بارگذاری خمشی دونقطه‌ای قرار گرفتند تا توزیع یکنواخت‌تری از لنگر خمشی در ناحیه میانی تیر ایجاد شود و شکست خمشی در این محدوده رخ دهد. بارگذاری با نرخ یکنواخت و پیوسته تا زمان گسیختگی کامل ادامه یافت و حداکثر بار ثبت‌شده به‌عنوان بار شکست خمشی در نظر گرفته شد. مقاومت خمشی نمونه‌ها بر اساس روابط استاندارد و با استفاده از حداکثر بار اعمالی، فاصله تکیه‌گاه‌ها و ابعاد مقطع تیر محاسبه گردید. همچنین، نحوه ایجاد و توسعه ترک‌ها در ناحیه کششی تیر در حین بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ٦، نمایی از نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.



شکل ٦. دستگاه تست مقاومت خمشی

شکل ٦، دستگاه تست مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

مقاومت خمشی از رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$f_r = \frac{3F_{max}L}{2bd^2} \qquad (۳)$$

که در آن:

P : نیروی شکست(N)

L : فاصله دهانه(mm)

b : عرض مقطع(mm)

h : ارتفاع مقطع(mm)

fr : مقاومت خمشی(MPa)

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C293 انجام شد.

۳-٤. آزمایش جذب آب

جذب آب یکی از مشخصات بتن و بیانگر خصوصیات ریزساختار آن از لحاظ خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها باهم است. جذب آب بلند مدت مطابق با استاندارد ASTM C642 انجام گرفته است. نتایج این آزمایش ارتباط مستقیمی با منافذ موجود در بتن دارد بنحوی که هر چه منافذ موجود بیشتر باشند در نتیجه جذب آب بیشتر خواهد بود. جهت انجام این آزمایش، نمونه‌های مکعبی پس از عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه با خروج از حوضچه، آماده انجام آزمایش شده‌اند. ابتدا نمونه‌ها به‌مدت ٢٤ ساعت در دمای ۵ ± ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شده و پس از درآوردن از آون و خنک شدن، نمونه‌ها وزن گردیده و سپس در آب تمیز قرار داده شده‌اند. نمونه‌ها پس از گذشت ٢٤ ساعت از آب خارج شده و در حالت اشباع با سطح خشک وزن شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش و تفاضل‌های وزن خشک و مرطوب، درصد جذب آب و همچنین درصد رطوبت نسبی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ٤ محاسبه شده است.

$$W_A = \left(\frac{W_S - W_d}{W_d}\right). \qquad (۴)$$

که در آن :

W_A : درصد جذب آب بتن (٪)

W_s : وزن نمونه در حالت اشباع (kg)

W_d : وزن خشک نمونه پس از قرارگیری در آون (kg)

۳-۵. آزمایش وزن مخصوص

به‌منظور تعیین چگالی بتن سخت‌شده و بررسی تأثیر براده آهن بر جرم حجمی بتن، آزمایش وزن مخصوص انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌های از آب بیرون آورده شده ابتدا وزن شده و سپس نمونه در آب هم وزن شده در ادامه برای بدست آوردن چگالی از رابطه زیر استفاده شده است.



شکل ۷. وزن نمونه در آب

$$\rho = \left(\frac{W_{ssd}}{W_{ssd}-W_w}\right) \times 100 \qquad (۵)$$

که در آن:

W_{ssd} : وزن نمونه مرطوب (kg)

W_w : وزن نمونه غوطه ور در آب (kg)

ρچگالی بتن(kg/m^3)

افزایش چگالی می‌تولند نشان‌دهنده کاهش تخلخل و بهبود تراکم داخلی بتن باشد.

این آزمایش بر اساس استانداردASTM C٦٤٢ انجام شد.

٦-٣. آزمایش مقاومت الکتریکی

این آزمایش بر اساس روش استاندارد ASTMC1760 روی آزمونه‌های استوانه‌ای شکل با ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی-متر انجام می‌گیرد. روش آزمایش بدین صورت است که آزمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک درون سلول آزمایش قرار گرفته و ولتاژ ٦٠ ولت DC توسط محلول سدیم کلرید با غلظت ۳٪ به دو سر آزمونه اعمال می‌شود. پس از گذشت ٦٠ ثانیه، جریان عبوری از آزمونه قرائت می‌شود و با استفاده از رابطه ٦ هدایت الکتریکی آزمونه بتنی محاسبه می‌گردد.



شکل ۸. دستگاه تست مقاومت الکتریکی

$$\sigma = \frac{KLI_1}{Vd^2} \qquad (۶)$$

که در آن :

6 : هدایت الکتریکی بتن (ms/m)

K : ۱۲۷۳.۲ (ضریب ثابت)

I۱ : جریان عبوری در ٦٠ ثانیه (mA)

V : ولتاژ اعمالی V

L : طول آزمونه (mm)

D : قطر آزمونه (mm)

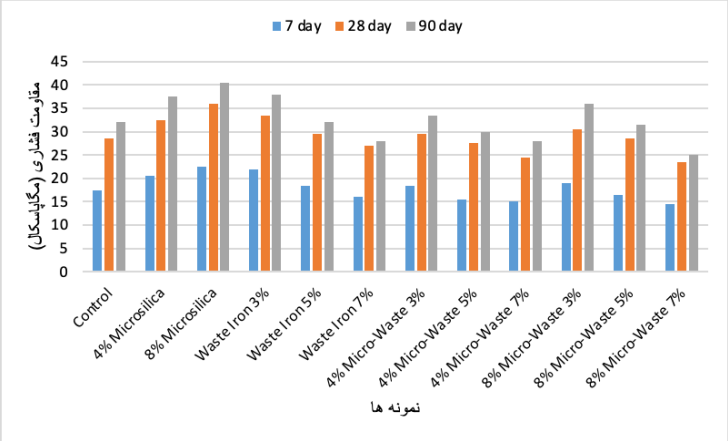
٤. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این بخش برای هر آزمایش به صورت نمودار و یا جدول قرار می‌گیرد و در دو دسته قرار دارد: آزمایش بتن تازه و بتن سخت شده.

٤-١. آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش فشاری استاندارد طبق استاندارد ASTMC39 اندازه‌گیری شد. داده‌های مقاومت فشاری برای سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) ثبت و با بتن مرجع مقایسه

گردید تا اثر درصد براده آهن و حضور میکروسیلیس بر سختی و توان تحمل بار فشاری مشخص شود.



شکل ۹. نمودار مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس و براده آهن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روند کلی افزایش مقاومت با افزایش سن در تمامی طرح‌های اختلاط مشهود بوده است که ناشی از تداوم فرآیند هیدراتاسیون سیمان و تکمیل تدریجی ساختار خمیر سیمان در طول زمان می‌باشد.

در میان نمونه‌های تک‌افزودنی، میکروسیلیس اثر قابل‌توجهی در بهبود مقاومت فشاری در هر سه سن آزمایش نشان داده است. به‌طوری که نمونه حاوی ۸٪ میکروسیلیس بالاترین مقاومت فشاری را در بین تمامی طرح‌ها ثبت کرده است. این افزایش مقاومت را می‌توان به عملکرد پوزولانی قوی میکروسیلیس، کاهش $Ca(OH)_2$ آزاد، و بهبود ریزساختار بتن نسبت داد. علاوه بر این، اثر پرکنندگی ذرات بسیار ریز میکروسیلیس موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم خمیر سیمان شده که در نهایت منجر به بهبود مقاومت فشاری گردیده است. این مکانیزم‌ها به‌طور گسترده در مطالعات قبلی از طریق آنالیز میکروسکوپی SEM و XRD تأیید شده‌اند (مهتا و مونتیرو، ۲۰۱۴)

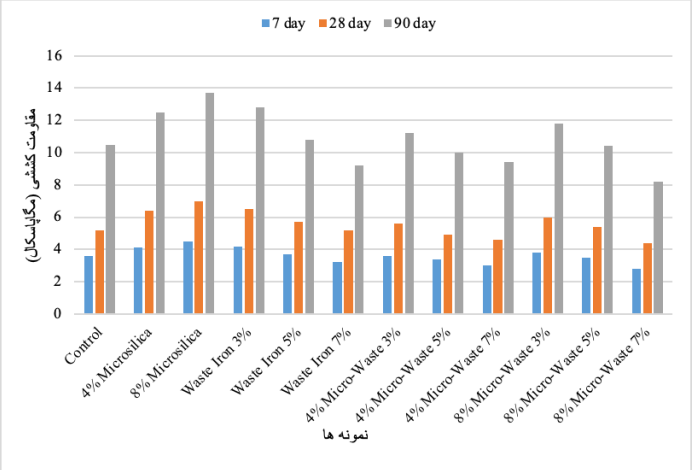
در مقابل، نتایج مربوط به براده آهن نشان می‌دهد که رفتار این افزودنی وابسته به درصد مصرف آن است. در درصد پایین (۳٪)، افزایش نسبی مقاومت نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اثر تقویت‌کننده فیزیکی و بهبود نسبی قفل‌وبست مکانیکی بین ذرات باشد. با این حال، با افزایش درصد براده آهن به ۵٪ و ۷٪، کاهش تدریجی مقاومت فشاری رخ داده است. این پدیده عمدتاً به دلیل ضعف چسبندگی در فصل مشترک خمیر سیمان–براده آهن، افزایش نواحی تمرکز تنش و ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی در ماتریس بتن قابل توجیه است. در نمونه‌های ترکیبی (میکروسیلیس–براده آهن)، حضور میکروسیلیس تا حدی اثر منفی ناشی از براده آهن را تعدیل کرده است. به‌عبارت دیگر، بهبود ریزساختار ناشی از میکروسیلیس موجب افزایش تراکم ماتریس و بهبود ناحیه انتقال (ITZ) شده و بخشی از ضعف ناشی از حضور براده آهن را جبران کرده است. با این وجود، عملکرد این گروه همچنان پایین‌تر از نمونه‌های حاوی میکروسیلیس خالص گزارش شده که نشان‌دهنده غالب بودن اثر منفی براده آهن در درصدهای بالاتر می‌باشد. این مکانیزم‌ها به‌طور گسترده در مطالعات قبلی از طریق آنالیز میکروسکوپی SEM و XRD تأیید شده‌اند (مهتا و همکاران، ۲۰۱۴).

به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که میکروسیلیس نقش کلیدی در بهبود مقاومت فشاری و اصلاح ریزساختار بتن ایفا می‌کند، در حالی که براده آهن تنها در درصدهای محدود می‌تواند اثر تقویتی داشته باشد و در مقادیر بالاتر موجب افت عملکرد مکانیکی می‌شود. این موضوع اهمیت بهینه‌سازی همزمان نوع و درصد افزودنی‌ها را در طراحی مخلوط‌های بتن اصلاح‌شده نشان می‌دهد.

افزایش مقاومت فشاری در مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس را می‌توان به دو مکانیزم اصلی نسبت داد. نخست، واکنش پوزولانی میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان که منجر به تشکیل مقادیر بیشتری ژل C-S-H و افزایش استحکام ماتریس سیمانی می‌شود. دوم، اثر پرکنندگی ذرات بسیار ریز میکروسیلیس که با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان و سنگدانه‌ها موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار می‌گردد. در مورد براده آهن، مقادیر محدود این ماده می‌تواند از طریق افزایش تراکم موضعی و بهبود توزیع تنش در ماتریس بتن به افزایش مقاومت فشاری کمک کند. با این حال، در درصدهای بالاتر، احتمال تجمع ذرات فلزی و افزایش ناهمگنی ساختار بتن افزایش یافته و می‌تواند منجر به ایجاد نواحی تمرکز تنش و کاهش کارایی انتقال بار شود که این موضوع کاهش مقاومت مشاهده‌شده در برخی مخلوط‌ها را توجیه می‌کند.

٤-٢. آزمایش مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌ها از طریق آزمایش کشش غیر مستقیم تعیین شد. این آزمایش نشان‌دهنده توانایی بتن در مقاومت در برابر نیروهای کششی و ترک‌خوردگی است. داده‌ها به صورت نمودار مقاومت کششی در مقابل درصد براده آهن و میزان میکروسیلیس ارائه می‌شوند.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۱۰ نشان‌دهنده روند افزایشی واضح مقاومت در تمامی طرح‌های اختلاط با افزایش سن است. این‌روند افزایشی به‌طور مستقیم ناشی از توسعه تدریجی ساختار خمیر سیمان، تداوم فرآیند هیدراتاسیون و افزایش پیوستگی در ناحیه انتقال (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد که منجر به بهبود ظرفیت تحمل تنش‌های کششی در بتن شده است.

در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، افزایش درصد این افزودنی از ٤٪ به ٨٪ موجب بهبود قابل توجه مقاومت کششی در هر سه سن آزمایش شده است. به‌طوری که در سن ۹۰ روز، مقاومت کششی از ۱۲/٦ مگاپاسکال در

نمونه ٤٪ میکروسیلیس به ۱۳/۷ مگاپاسکال در نمونه ۸٪ افزایش یافته است. این رفتار را می‌توان به اثر پوزولانی قوی میکروسیلیس، کاهش $Ca(OH)_2$ آزاد و بهبود ریزساختار خمیر سیمان نسبت داد. همچنین، نقش پرکنندگی ذرات بسیار ریز میکروسیلیس موجب کاهش تخلخل، افزایش چگالی ماتریس و ارتقای مقاومت در برابر گسترش ترک‌های کششی شده است. در نمونه‌های حاوی براده فولاد، مشاهده می‌شود که درصد پایین (۳٪) منجر به بهبود مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است (۱۲/۸ مگاپاسکال در ۹۰ روز)، که می‌تواند ناشی از اثر پل‌زنی[1] و افزایش مقاومت در برابر بازشدگی ترک‌ها باشد. با این حال، با افزایش درصد براده به ۵٪ و ۷٪، کاهش تدریجی مقاومت کششی مشاهده شده است؛ به‌گونه‌ای که در ۷٪ براده، مقاومت به ۹/۵ مگاپاسکال در ۹۰ روز کاهش یافته است. این افت عملکرد عمدتاً به ضعف چسبندگی در فصل مشترک خمیر سیمان–براده فولاد، افزایش تمرکز تنش در اطراف ذرات فلزی و ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی در ماتریس بتن نسبت داده می‌شود. در نمونه‌های ترکیبی (میکروسیلیس–براده فولاد)، حضور میکروسیلیس تا حدی اثر منفی ناشی از افزایش براده را تعدیل کرده است. بهبود ریزساختار ناشی از میکروسیلیس باعث تقویت ناحیه انتقال و کاهش تخلخل شده و در نتیجه عملکرد مکانیکی ترکیبات را نسبت به نمونه‌های دارای براده تنها بهبود بخشیده است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که در درصدهای بالای براده، حتی در حضور میکروسیلیس، افت مقاومت اجتناب‌ناپذیر است. بهترین عملکرد مربوط به ترکیب ۸٪ میکروسیلیس و ۳٪ براده فولاد بوده که مقاومت کششی ۱۲/۱ مگاپاسکال در ۹۰ روز را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که میکروسیلیس نقش کلیدی در ارتقای مقاومت کششی از طریق اصلاح ریزساختار و افزایش چگالی ماتریس دارد، در حالی که براده فولاد در درصدهای پایین می‌تواند با مکانیزم پل‌زنی موجب بهبود مقاومت شود، اما افزایش بیش از حد آن منجر به تشدید ناپیوستگی‌های ساختاری و کاهش عملکرد کششی می‌گردد. بنابراین، دستیابی به عملکرد بهینه مستلزم تعیین تعادل مناسب بین مواد پوزولانی و تقویت‌کننده‌های فلزی در طرح اختلاط بتن است.

بهبود مقاومت کششی و خمشی در مخلوط‌های حاوی درصدهای پایین براده آهن را می‌توان به چند سازوکار مکمل نسبت داد. نخست، حضور ذرات فلزی ریز در فضای خالی بین اجزای ماتریس سیمانی موجب اثر پرکنندگی[2] و افزایش تراکم موضعی بتن می‌شود. دوم، اختلاف مدول الاستیسیته ذرات فلزی و خمیر سیمان می‌تواند موجب بازتوزیع تنش در مقیاس ریزساختاری شده و از تمرکز تنش در برخی نواحی بحرانی جلوگیری کند. علاوه بر این، وجود ذرات فلزی ممکن است مسیر گسترش ریزترک‌ها را پیچیده‌تر کرده و انرژی بیشتری برای رشد ترک مورد نیاز باشد که در نهایت به بهبود مقاومت کششی و خمشی منجر می‌شود.

با این حال، افزایش بیش از حد مقدار براده آهن همواره به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود. در مقادیر بالاتر، احتمال تجمع ذرات فلزی، افزایش ناهمگنی ماتریس و ایجاد نواحی ضعیف در ساختار بتن افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند موجب تمرکز موضعی تنش و کاهش کارایی انتقال بار در ماتریس شده و بخشی از مزایای ناشی از اثر پرکنندگی را خنثی کند.

٤-۳. آزمایش مدول الاستیسیته

برای ارزیابی مقاومت خمشی، نمونه‌های بتنی تحت بار سه‌نقطه‌ای خمشی طبق استاندارد ASTM C78 قرار گرفتند.

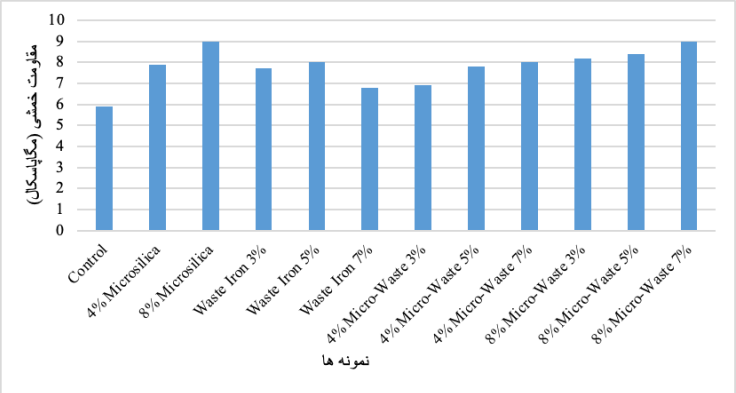
داده‌ها به صورت نمودار مقاومت کششی در مقابل درصد براده آهن و میزان میکروسیلیس ارائه می‌شوند.

1- Bridging effect

2- Filler effect

در این پژوهش، مقاومت خمشی نمونه‌ها تنها در سن ۲۸ روزه مورد آزمون قرار گرفتند زیرا این سن به عنوان استاندارد مرجع برای تعیین مقاومت مکانیکی بتن در بسیاری از استانداردهای ملی و بین‌المللی شناخته می‌شود. مقاومت ۲۸ روزه نشان‌دهنده حداکثر رشد اولیه مقاومت بتن تحت شرایط عادی هیدراتاسیون است و برای مقایسه اثر افزودنی‌ها و اصلاحات ترکیبی در بتن، معیار مناسبی فراهم می‌کند.

نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روز مطابق شکل ۱۱ نشان می‌دهد که استفاده از میکروسیلیس و براده فولاد به‌صورت مستقل و ترکیبی، تأثیر قابل توجهی بر رفتار خمشی بتن دارد.



شکل ۱۱. نمودار مقاومت خمشی برای نمونه ۲۸ روزه

به‌طور کلی، تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به نمونه شاهد (۵٫۸۸ MPa) بهبود عملکرد خمشی را نشان داده‌اند که بیانگر نقش مؤثر این افزودنی‌ها در اصلاح ریزساختار و افزایش ظرفیت تحمل تنش‌های کششی در ناحیه کششی مقطع خمشی است. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، افزایش درصد از ٤٪ به ۸٪ منجر به افزایش پیوسته مقاومت خمشی شده است (از ۷٫۷۱ به ۸٫۷۱ MPa). این بهبود را می‌توان به اثر پوزولانی فعال میکروسیلیس نسبت داد که از طریق مصرف $Ca(OH)_2$ آزاد، تولید ژل C–S–H ثانویه و کاهش تخلخل موئینه، موجب تراکم بیشتر ماتریس سیمانی می‌شود. علاوه بر این، کاهش اندازه و بهبود توزیع حفرات، مقاومت بتن در برابر شروع و گسترش ترک‌های خمشی را افزایش داده و در نتیجه ظرفیت خمشی بهبود یافته است. در واقع، میکروسیلیس نه‌تنها مقاومت فشاری، بلکه به‌طور مستقیم مقاومت کششی مؤثر در ناحیه کششی تیر را نیز ارتقا داده و همین موضوع نقش کلیدی آن در بهبود مقاومت خمشی را توجیه می‌کند. در نمونه‌های حاوی براده فولاد، رفتار غیرخطی و وابسته به درصد مشاهده می‌شود. افزایش براده از ۳٪ به ۵٪ باعث افزایش مقاومت خمشی (۷٫۵۹ به ۸٫۰۰ MPa) شده که می‌توان آن را به مکانیزم پل‌زنی[1] و مهار رشد ترک‌ها توسط ذرات فلزی نسبت داد. در این حالت، براده‌ها با ایجاد مقاومت پس‌از ترک‌خوردگی اولیه، انرژی شکست را افزایش داده و ظرفیت باربری خمشی را بهبود می‌بخشند. با این حال، افزایش بیشتر براده تا ۷٪ منجر به کاهش مقاومت خمشی (٦٫۸۲ MPa) شده است. این افت عملکرد عمدتاً ناشی از افزایش ناپیوستگی در ماتریس، کاهش یکنواختی توزیع ذرات، ضعف در ناحیه انتقال (ITZ) و تمرکز تنش در اطراف ذرات فلزی است که موجب تسریع در

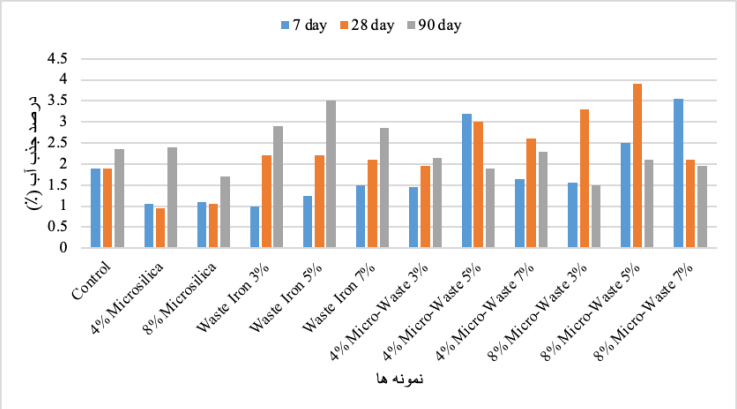
1- Crack bridging

گسترش ترک‌ها می‌شود. بنابراین، اثر براده فولاد را می‌توان به‌صورت یک رفتار بهینه‌دار[1] تفسیر کرد. در نمونه‌های ترکیبی، هم‌افزایی بین میکروسیلیس و براده فولاد قابل مشاهده است. به‌طور خاص، نمونه‌های دارای ۸٪ میکروسیلیس عملکرد غالباً بهتری نسبت به سایر ترکیبات نشان داده‌اند و اثر منفی ناشی از افزایش براده را تا حدی خنثی کرده‌اند. نمونه م۸ب۷ با مقاومت ۹/۲٤ MPa بالاترین عملکرد خمشی را در بین تمامی طرح‌ها ارائه داده است. این نتیجه نشان می‌دهد که بهبود ریزساختار ناشی از میکروسیلیس (کاهش تخلخل و تقویت ITZ) شرایط مناسبی برای عملکرد مکانیزم پل‌زنی براده فولاد فراهم کرده و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی و مقاومت خمشی افزایش یافته است. این مکانیزم‌ها به‌طور گسترده در مطالعات قبلی از طریق آنالیز میکروسکوپی SEM و XRD تأیید شده‌اند (مهتا و همکاران،۲۰۱٤)

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مقاومت خمشی بتن حاصل برهم‌کنش دو مکانیسم اصلی است: ۱) تقویت ماتریس و کاهش نقص‌های ریزساختاری ناشی از میکروسیلیس، و ۲) کنترل و انتقال تنش در ناحیه ترک ناشی از براده فولاد. با این حال، عملکرد بهینه زمانی حاصل می‌شود که بین این دو عامل تعادل برقرار باشد؛ به‌گونه‌ای که میکروسیلیس نقش بهبوددهنده ماتریس و براده فولاد نقش کنترل‌کننده رشد ترک را ایفا کند. نتایج این مطالعه با یافته‌های گزارش‌شده در ادبیات پژوهشی نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهد ترکیب بهینه مواد پوزولانی با الیاف یا ذرات فلزی می‌تواند به‌طور هم‌زمان مقاومت اولیه و رفتار پس از ترک‌خوردگی بتن را بهبود دهد.

٤-٤. جذب آب و نفوذپذیری

نمونه‌ها تحت آزمایش جذب آب قرار گرفتند تا میزان تخلخل و قابلیت دوام بتن در برابر نفوذ آب و عوامل شیمیایی ارزیابی شود.



شکل ۱۲. نمودار جذب آب نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

نتایج درصد جذب آب نمونه‌های بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نوع و درصد افزودنی‌ها تأثیر قابل توجهی بر ساختار تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری بتن دارد. به‌طور کلی، تغییرات جذب آب در طول زمان تابعی از تکامل ریزساختار خمیر سیمان، میزان انسداد منافذ موئینه و همچنین کیفیت ناحیه انتقال (ITZ) است. در نمونه شاهد، روند تغییر جذب آب نسبتاً محدود بوده و در بازه ۱/۸۷ تا ۲/۳٤ درصد قرار دارد که بیانگر ساختار متعارف و بدون اصلاح بتن معمولی است. با این حال، نوسانات مشاهده‌شده در سنین

1- Optimum-dependent behavior

مختلف نشان می‌دهد که فرآیند بلوغ ریزساختار هنوز در حال تکامل بوده و توزیع منافذ به‌طور کامل پایدار نشده است. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، به‌ویژه در سن ۲۸ روز، کاهش قابل توجه جذب آب مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده نقش مؤثر این ماده در کاهش نفوذپذیری است. این رفتار ناشی از اثر پوزولانی میکروسیلیس و تشکیل ژل ثانویه C–S–H است که موجب پر شدن منافذ موئینه و کاهش پیوستگی شبکه منافذ می‌شود. همچنین، اثر فیلر[1] ناشی از ذرات بسیار ریز میکروسیلیس باعث بهبود تراکم خمیر سیمان و کاهش مسیرهای پیوسته نفوذ آب شده است. با این وجود، در برخی سنین (به‌ویژه ۹۰ روز)، افزایش جزئی جذب آب در برخی نمونه‌های میکروسیلیسی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از ناهمگنی ریزساختاری یا بازتوزیع منافذ در اثر ادامه هیدراتاسیون باشد. در نمونه‌های حاوی براده فولاد، به‌ویژه در درصدهای بالاتر (۵٪ و ۷٪)، افزایش محسوس جذب آب مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، براده ۵٪ در سن ۹۰ روز مقدار ۳٪/۵۹ جذب آب نشان می‌دهد که به‌طور قابل توجهی بیشتر از نمونه شاهد است. این افزایش نفوذپذیری را می‌توان به ایجاد ناپیوستگی در ماتریس سیمانی، ضعف چسبندگی در ناحیه ITZ اطراف ذرات فلزی و تشکیل ریزفضاهای خالی در اطراف براده‌ها نسبت داد. در واقع، حضور ذرات فلزی با هندسه نامنظم و رفتار غیرهمگن، موجب افزایش مسیرهای نفوذ و تشدید انتقال آب در بتن شده است. این مکانیزم‌ها به‌طور گسترده در مطالعات قبلی از طریق آنالیز میکروسکوپی SEM و XRD تأیید شده‌اند (مهتا و همکاران،۲۰۲۰؛ روسیگنولو و همکاران، ۲۰۰۷؛ اوزباس و همکاران، ۲۰۲۰).

در نمونه‌های ترکیبی میکروسیلیس–براده فولاد، رفتار جذب آب تابعی از رقابت بین دو مکانیزم متضاد است: از یک سو، میکروسیلیس با کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار موجب کاهش نفوذپذیری می‌شود و از سوی دیگر، براده فولاد در درصدهای بالا تمایل به افزایش تخلخل مؤثر و ایجاد ناپیوستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که در ترکیباتی با میکروسیلیس بالا و براده پایین یا متوسط، عملکرد بهتری در کاهش جذب آب حاصل شده است، در حالی که افزایش همزمان درصد براده موجب تضعیف اثر مثبت میکروسیلیس شده است. این موضوع به‌ویژه در نمونه‌هایی با براده ۵٪ و ۷٪ به‌وضوح قابل مشاهده است که در آن‌ها جذب آب افزایش یافته است.

به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که میکروسیلیس نقش کلیدی در بهبود دوام بتن از طریق کاهش جذب آب و کاهش پیوستگی منافذ موئینه دارد، در حالی که براده فولاد در درصدهای بالا می‌تواند به‌عنوان عامل افزایش‌دهنده نفوذپذیری عمل کند. بنابراین، دستیابی به عملکرد بهینه دوام مستلزم کنترل دقیق درصد براده و استفاده همزمان از مقادیر مناسب میکروسیلیس است تا تعادل بین بهبود ریزساختار و اثرات مخرب ناشی از ناپیوستگی‌های داخلی برقرار گردد.

کاهش جذب آب در مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس را می‌توان ناشی از ریزتر شدن ساختار منافذ و کاهش پیوستگی شبکه حفرات موئینه دانست. ذرات میکروسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا علاوه بر مشارکت در واکنش‌های پوزولانی، نقش مؤثری در پر کردن فضاهای خالی ایفا کرده و مسیرهای انتقال آب و عوامل مهاجم را محدود می‌کنند. از سوی دیگر، استفاده از براده آهن در مقادیر پایین تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر جذب آب نداشته است؛ اما با افزایش درصد جایگزینی، احتمال ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی در ماتریس و افزایش فضاهای خالی اطراف ذرات فلزی افزایش می‌یابد که می‌تواند موجب افزایش نفوذپذیری و جذب آب شود. به همین دلیل، عملکرد مطلوب مشاهده‌شده در مخلوط‌های حاوی ۸ درصد

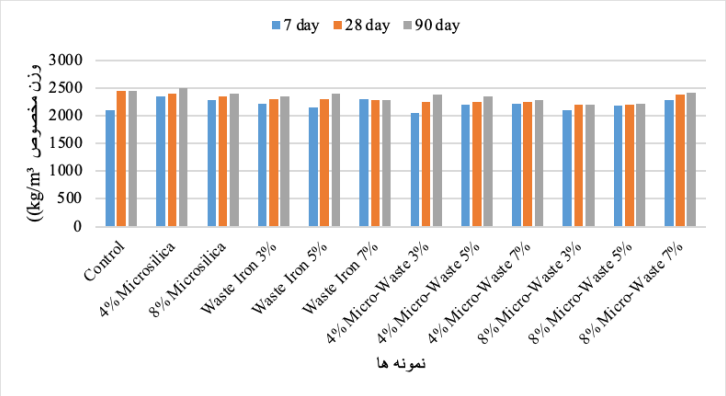
1- Filler effect

میکروسیلیس و ۳ درصد براده آهن را می‌توان ناشی از ایجاد تعادل بین اثر متراکم‌کننده میکروسیلیس و اثرات فیزیکی ناشی از حضور ذرات فلزی دانست.

تغییرات حجمی و تراکم بتن با افزودن براده آهن و میکروسیلیس مشخص گردد. این پارامتر برای تحلیل اثر براده آهن بر چگالی و خواص فیزیکی بتن اهمیت دارد.

٤-٥. وزن مخصوص

وزن مخصوص نمونه‌ها (دانسیته) اندازه‌گیری شد تا



شکل ۱۳. نمودار وزن مخصوص نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

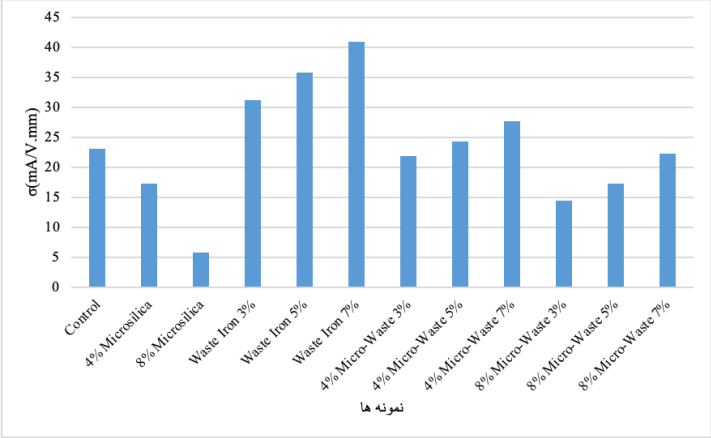
نتایج وزن مخصوص نمونه‌های بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۱۳ نشان می‌دهد که نوع و درصد افزودنی‌ها تأثیر قابل توجهی بر چگالی و تراکم نهایی بتن دارند. به‌طور کلی، روند افزایشی وزن مخصوص در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان مشاهده می‌شود که این امر ناشی از تداوم فرآیند هیدراتاسیون، کاهش تدریجی تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار خمیر سیمان است. در نمونه شاهد، افزایش وزن مخصوص از ۲۱۱۱ کیلوگرم بر متر مکعب در ۷ روز به ۲٤۸۲ کیلوگرم بر متر مکعب در ۹۰ روز بیانگر تکامل طبیعی ساختار بتن در اثر تشکیل محصولات هیدراتاسیون و کاهش فضای خالی داخلی است. این‌روند به‌عنوان رفتار پایه برای مقایسه اثر افزودنی‌ها در نظر گرفته می‌شود. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، افزایش وزن مخصوص نسبت به نمونه شاهد در اغلب سنین مشاهده شده است. این افزایش به‌ویژه در ٤٪ میکروسیلیس محسوس‌تر بوده و نشان‌دهنده نقش مؤثر این ماده در بهبود تراکم بتن است. از منظر ریزساختاری، میکروسیلیس از طریق اثر پوزولانی و همچنین عملکرد فیلری، موجب پر شدن منافذ موئینه و کاهش فضای خالی بین ذرات سیمان و سنگدانه شده و در نتیجه چگالی کلی ماتریس افزایش یافته است. با این حال، در برخی حالات (مانند ۸ درصد)، به دلیل افزایش بیش از حد ذرات بسیار ریز و احتمال ایجاد تجمع موضعی، روند افزایش چگالی یکنواخت نبوده و افت نسبی در برخی سنین مشاهده می‌شود. در نمونه‌های حاوی براده فولاد، تغییرات وزن مخصوص تابعی از درصد مصرف این افزودنی است. در درصدهای پایین تا متوسط، افزایش وزن مخصوص نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از چگالی بالای ذرات فلزی و جایگزینی بخشی از حجم خمیر سیمان با ماده‌ای سنگین‌تر باشد. با این حال، در درصدهای بالاتر، به دلیل افزایش ناپیوستگی ساختاری و احتمال ایجاد حفرات اطراف ذرات براده، اثر افزایشی بر چگالی محدود شده و حتی در برخی موارد کاهش نسبی تراکم مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که اثر براده فولاد صرفاً تابع جرم حجمی آن نیست، بلکه به کیفیت توزیع و پیوستگی

آن در ماتریس نیز وابسته است. در نمونه‌های ترکیبی میکروسیلیس–براده فولاد، اثر هم‌زمان دو مکانیزم متضاد مشاهده می‌شود: از یک سو، میکروسیلیس با بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل موجب افزایش چگالی می‌شود و از سوی دیگر، براده فولاد با چگالی بالا به‌صورت بالقوه می‌تواند وزن مخصوص را افزایش دهد، اما در صورت توزیع نامناسب، اثر آن تضعیف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با ترکیب بهینه (به‌ویژه میکروسیلیس بالا همراه با براده متوسط) عملکرد مطلوب‌تری در افزایش وزن مخصوص داشته‌اند، در حالی که ترکیبات با درصد بالای براده یا عدم تعادل بین اجزا، از یکنواختی ساختاری کمتری برخوردار بوده‌اند.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییر وزن مخصوص در بتن اصلاح‌شده تحت تأثیر دو عامل اصلی است: ۱) تکامل هیدراتاسیون و کاهش تخلخل در طول زمان، و ۲) اثر فیزیکی–میکروساختاری افزودنی‌ها بر تراکم نهایی ماتریس. در این میان، میکروسیلیس نقش غالب در بهبود یکنواختی و کاهش فضای خالی دارد، در حالی که براده فولاد بیشتر از طریق اثر جرم حجمی و در صورت توزیع مناسب، موجب افزایش چگالی می‌شود. بنابراین، دستیابی به بتن متراکم و پایدار مستلزم بهینه‌سازی همزمان درصد این دو افزودنی و کنترل کیفیت اختلاط است.

٤-٦. مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن به‌منظور بررسی تأثیر میکروسیلیس و براده آهن بر هدایت الکتریکی و دوام در محیط‌های مرطوب یا خورنده اندازه‌گیری شد. این پارامتر می‌تواند رابطه بین میزان ضایعات فلزی و احتمال خوردگی فولاد در بتن را مشخص کند.



شکل ١٤. نمودار میله‌ای مقاومت الکتریکی نمونه ۲۸ روزه

نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن میکروسیلیس و براده فولاد تأثیر قابل توجهی بر هدایت الکتریکی بتن دارد. نمونه شاهد با مقاومت ۲۳/۱ mA/V·mm به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، با افزایش درصد آن از ٤٪ به ٨٪، مقاومت الکتریکی به طور قابل توجهی کاهش یافته است؛ به طوری که نمونه میکروسیلیس ٤٪ مقاومت ۱۷/۳ mA/V·mm و نمونه میکروسیلیس ٨٪ مقاومت ۵/۸ mA/V·mm را نشان می‌دهد. کاهش مقاومت الکتریکی بتن در حضور میکروسیلیس را می‌توان ناشی از افزایش هدایت نسبی ماتریس و کاهش تخلخل مؤثر دانست، زیرا میکروسیلیس با واکنش پوزولانی و تولید محصولات هیدراتاسیون ثانویه موجب پر شدن منافذ ریزساختار بتن

می‌شود. از آنجا که مقاومت الکتریکی بتن رابطه معکوس با میزان تخلخل و نفوذپذیری دارد، کاهش مقاومت الکتریکی بیانگر کاهش حجم حفرات پیوسته و بهبود تراکم ساختار داخلی بتن است. در مقابل، نمونه‌های حاوی براده فولاد با افزایش درصد براده از ۳٪ تا ۷٪، افزایش مقاومت الکتریکی را نشان دادند؛ به طوری که مقدار مقاومت الکتریکی از ۳۱/۲ تا ٤١ mA/V·mm تغییر کرد. حضور ذرات فلزی غیرپیوسته در ماتریس سیمانی می‌تواند مسیر انتقال جریان الکتریکی را محدود کرده و باعث افزایش مقاومت الکتریکی شود. این رفتار همچنین می‌تواند با افزایش نسبی تخلخل مؤثر یا کاهش یکنواختی ساختار داخلی بتن مرتبط باشد. ترکیب میکروسیلیس و براده فولاد اثر همزمان دو افزودنی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، نمونه م۸–ب۳ با مقدار ١٤/٤ mA/V·mm کمترین مقاومت الکتریکی و نمونه م٤–ب۷ با مقاومت ۲۷/۷ mA/V·mm رفتار میانی را نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که اثر میکروسیلیس در افزایش هدایت بتن و کاهش مقاومت الکتریکی غالب بوده، در حالی که براده فولاد در برخی درصدها باعث افزایش نسبی مقاومت الکتریکی شده است. در مجموع، رفتار الکتریکی بتن در این پژوهش با تغییرات ساختار تخلخل، نفوذپذیری و توزیع ذرات در ماتریس سیمانی مرتبط بوده و انتخاب ترکیب مناسب افزودنی‌ها می‌تواند در کنترل خواص الکتریکی بتن مؤثر باشد.

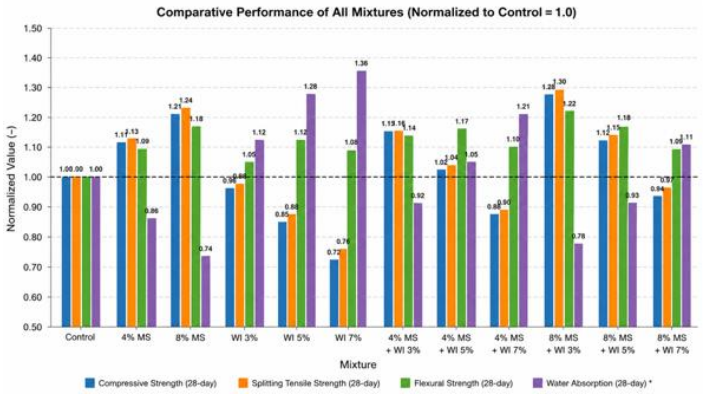
افزایش مقاومت الکتریکی در مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس نشان‌دهنده کاهش پیوستگی شبکه منافذ و محدود شدن حرکت یون‌ها در ماتریس بتن است. از آنجا که مقاومت الکتریکی یکی از شاخص‌های غیرمستقیم اما معتبر دوام بتن محسوب می‌شود، افزایش این پارامتر را می‌توان نشانه‌ای از کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت احتمالی در برابر انتقال عوامل مخرب دانست. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب میکروسیلیس و براده آهن در مقادیر بهینه موجب افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد شده است که مؤید بهبود کیفیت ماتریس سیمانی و کاهش قابلیت انتقال رطوبت و یون‌ها در بتن می‌باشد.

شکل ۱۵ مقایسه نرمال‌شده عملکرد تمامی طرح‌های اختلاط را نسبت به نمونه شاهد ارائه می‌دهد. نرمال‌سازی نتایج امکان مقایسه همزمان شاخص‌های مختلف مکانیکی و دوام را، علی‌رغم تفاوت در واحدها و دامنه مقادیر آنها، فراهم می‌سازد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، استفاده از میکروسیلیس موجب بهبود همزمان مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی شده و در عین حال جذب آب را کاهش داده است. این رفتار را می‌توان به واکنش پوزولانی میکروسیلیس، تولید بیشتر ژل C-S-H، پرشدن حفرات موئینه و متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن نسبت داد. در نتیجه، ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها (ITZ) اصلاح شده و مسیرهای نفوذپذیری در ماتریس سیمانی کاهش یافته است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از میکروسیلیس و براده آهن منجر به ایجاد یک اثر هم‌افزایی[1] شده است؛ به‌طوری که عملکرد مخلوط‌های حاوی هر دو ماده نسبت به مخلوط‌های حاوی هر یک از این افزودنی‌ها به‌تنهایی بهبود بیشتری را نشان می‌دهد. در این حالت، میکروسیلیس با متراکم‌سازی ماتریس و بهبود پیوستگی ریزساختاری، شرایط مناسبی را برای توزیع مؤثرتر تنش در اطراف ذرات براده آهن فراهم می‌کند و براده‌های آهن نیز از طریق اثر پرکنندگی، افزایش چگالی و بهبود مکانیزم انتقال تنش در ماتریس بتن در افزایش مقاومت‌ها نقش ایفا می‌کنند. بر اساس نتایج شکل ۱۵، مخلوط حاوی ۸ درصد میکروسیلیس و ۳ درصد براده آهن مطلوب‌ترین عملکرد کلی را در میان طرح‌های اختلاط مورد بررسی نشان داده است. این

1- Synergistic effect

موضوع بیانگر آن است که در این سطح از جایگزینی، تعادل مناسبی میان بهبود خواص مقاومتی و شاخص‌های دوام برقرار شده و بیشترین بهره‌وری از اثرات توأم میکروسیلیس و براده آهن حاصل گردیده است.



شکل ۱۵. شاخص عملکرد نرمال شده همه مخلوط‌ها

ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که انتخاب طرح اختلاط بهینه صرفاً بر مبنای مقاومت فشاری نمی‌تواند بیانگر عملکرد واقعی بتن باشد، زیرا هر یک از مخلوط‌ها ممکن است در برخی شاخص‌ها عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر شاخص‌ها داشته باشند. از این‌رو، در پژوهش حاضر تمامی خواص مکانیکی و دوام به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفتند. مقایسه نرمال‌شده نتایج نشان داد که اگرچه برخی مخلوط‌ها در یک ویژگی خاص نظیر مقاومت خمشی یا مقاومت فشاری بیشترین مقدار را ارائه کرده‌اند، اما مخلوط حاوی ۸ درصد میکروسیلیس و ۳ درصد براده آهن بهترین تعادل عملکردی را میان مقاومت‌های مکانیکی، جذب آب و مقاومت الکتریکی ایجاد کرده است. بنابراین این مخلوط به عنوان طرح دارای بهترین عملکرد کلی در محدوده مورد بررسی معرفی می‌شود.

٤-٧. ملاحظات زیست‌محیطی

علاوه بر مزایای فنی مشاهده شده، استفاده از میکروسیلیس و براده آهن ضایعاتی می‌تواند از منظر پایداری نیز دارای اهمیت باشد. میکروسیلیس به عنوان یک محصول جانبی صنعتی، جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند را امکان‌پذیر می‌سازد و از این طریق می‌تواند به کاهش مصرف کلینکر و در نتیجه کاهش انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با تولید سیمان کمک کند. همچنین، استفاده از براده آهن ضایعاتی به عنوان بخشی از مصالح مورد استفاده در بتن، رویکردی در راستای بازیافت پسماندهای صنعتی و کاهش نیاز به دفع این مواد در محیط‌زیست محسوب می‌شود. با وجود این، ارزیابی کمی میزان کاهش ردپای کربن، مصرف انرژی و صرفه اقتصادی ناشی از این جایگزینی‌ها نیازمند انجام مطالعات اختصاصی ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل اقتصادی است که خارج از محدوده پژوهش حاضر بوده است.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر استفاده همزمان از میکروسیلیس و براده فولاد بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها در سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد که هر یک از این افزودنی‌ها رفتار متفاوتی در ساختار بتن ایجاد می‌کنند و ترکیب آن‌ها نیز وابسته به درصد مصرف، عملکرد متغیری از خود نشان می‌دهد.

- در بخش مقاومت فشاری، تمامی طرح‌های اختلاط با افزایش سن، روند افزایشی قابل توجهی را نشان دادند که بیانگر تداوم فرآیند هیدراتاسیون و توسعه ساختار خمیر سیمان است. افزودن میکروسیلیس موجب بهبود معنادار مقاومت فشاری در تمامی سنین شد، به‌گونه‌ای که نمونه‌های حاوی درصد بالاتر میکروسیلیس بیشترین مقاومت نهایی را در ۹۰ روز نشان دادند. این رفتار ناشی از اثر همزمان پوزولانی و فیلری میکروسیلیس است که منجر به کاهش تخلخل، بهبود ناحیه انتقال (ITZ) و افزایش تراکم ریزساختار بتن می‌شود. در مقابل، براده فولاد تنها در درصدهای پایین اثر تقویتی از خود نشان داد، در حالی که افزایش درصد آن موجب افت مقاومت فشاری شد؛ پدیده‌ای که عمدتاً به ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی، تمرکز تنش و کاهش پیوستگی ماتریس نسبت داده می‌شود.
- در خصوص مقاومت کششی نیز الگوی رفتاری مشابهی مشاهده شد. میکروسیلیس با افزایش درصد مصرف، موجب ارتقای مقاومت کششی گردید که نشان‌دهنده نقش آن در بهبود انسجام ماتریس و افزایش مقاومت در برابر گسترش ترک‌ها است. براده فولاد در درصد پایین اثر مثبت محدودی بر مقاومت کششی داشت، اما در درصدهای بالاتر موجب کاهش عملکرد شد. در نمونه‌های ترکیبی، عملکرد بهینه زمانی حاصل شد که درصد میکروسیلیس بالا و درصد براده فولاد پایین باشد، که این امر بیانگر اهمیت تعادل بین تقویت ریزساختار و حضور فاز فلزی در کنترل رفتار کششی بتن است.
- در آزمون مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه، تمامی نمونه‌های حاوی افزودنی عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. میکروسیلیس با افزایش چگالی ماتریس و بهبود پیوستگی داخلی، نقش مؤثری در افزایش مقاومت خمشی ایفا کرد. همچنین براده فولاد از طریق مکانیزم پل‌زنی ترک‌ها و افزایش انرژی شکست، در بهبود رفتار خمشی مشارکت داشته است. با این حال، نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت خمشی در ترکیباتی حاصل شده است که در آن‌ها هر دو افزودنی به‌صورت همزمان و در درصدهای مناسب حضور داشته‌اند، که بیانگر اثر هم‌افزایی این دو ماده است.
- بررسی مقاومت الکتریکی نشان داد که افزودن میکروسیلیس باعث کاهش مقدار هدایت الکتریکی و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی بتن شده است که بیانگر کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار داخلی است. در مقابل، افزایش درصد براده فولاد موجب افزایش هدایت الکتریکی گردید که ناشی از ماهیت فلزی و رسانای براده‌ها می‌باشد. در نمونه‌های ترکیبی، اثر این دو عامل به صورت همزمان مشاهده شد و رفتار نهایی تابع درصد هر یک از اجزا بود.
- در بررسی جذب آب، نتایج نشان داد که میکروسیلیس به‌طور کلی موجب کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن شده است که این امر ناشی از کاهش تخلخل و انسداد شبکه منافذ موئینه می‌باشد. در مقابل، براده فولاد به‌ویژه در درصدهای بالا موجب افزایش جذب آب گردید که به ضعف ناحیه انتقال و ایجاد ناپیوستگی‌های داخلی نسبت داده می‌شود. در نمونه‌های ترکیبی، رفتار جذب آب تابعی از رقابت بین اثر کاهنده میکروسیلیس و اثر افزایشی براده فولاد بوده و نتایج نشان داد که ترکیبات با درصد بالاتر میکروسیلیس عملکرد بهتری از نظر دوام دارند.
- در بخش وزن مخصوص، نتایج بیانگر آن بود که روند تغییرات چگالی بتن وابسته به نوع و درصد

افزودنی‌ها است. میکروسیلیس با بهبود تراکم ریزساختار در برخی سنین موجب افزایش وزن مخصوص شد، در حالی که براده فولاد به دلیل چگالی ذاتی بالا می‌تواند موجب افزایش جرم حجمی بتن گردد، اما این اثر در عمل به توزیع یکنواخت و کیفیت پیوستگی آن در ماتریس وابسته است و در برخی موارد رفتار غیر یکنواختی مشاهده شد.

- به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که میکروسیلیس نقش مؤثری در بهبود خواص مکانیکی و کاهش نفوذپذیری بتن دارد، در حالی که براده فولاد در درصد پایین می‌تواند به عنوان عامل تقویت‌کننده عمل کند اما افزایش بیش از حد آن باعث افت عملکرد مکانیکی و افزایش هدایت الکتریکی می‌شود. ترکیب بهینه در این پژوهش مربوط به درصد بالاتر میکروسیلیس همراه با درصد پایین براده فولاد بوده است.
- اگرچه نتایج این پژوهش بهبود برخی شاخص‌های مقاومتی و دوام را در حضور براده آهن نشان داد، ارزیابی رفتار بلندمدت این ذرات در محیط‌های خورنده در محدوده مطالعه حاضر قرار نداشت. از نظر تئوری، در صورت نفوذ عوامل مهاجم و فراهم شدن شرایط الکتروشیمیایی مناسب، امکان خوردگی ذرات فلزی و تشکیل محصولات خوردگی با حجم بیشتر وجود دارد که می‌تواند بر دوام بلندمدت بتن تأثیرگذار باشد. با این حال، حضور میکروسیلیس و کاهش نفوذپذیری ماتریس ممکن است دسترسی رطوبت و یون‌های مهاجم به ذرات فلزی را محدود کرده و خطر خوردگی را تا حدی کاهش دهد. بررسی کمی این پدیده نیازمند مطالعات دوام بلندمدت و آزمون‌های اختصاصی خوردگی است.
- ترکیب بهینه شناسایی‌شده (۸٪ میکروسیلیس + ۳٪ براده آهن) با توجه به تعادل مطلوب بین خواص مکانیکی و دوام، برای استفاده در کف‌های صنعتی، روسازی‌ها و سازه‌های دریایی توصیه می‌شود. تحقیقات آتی می‌تواند بر ارزیابی رفتار بلندمدت (مانند مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد–ذوب یا حمله سولفاتی) و مقیاس‌پذیری در پروژه‌های واقعی تمرکز کند

٦. محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

نتایج این پژوهش باید در چارچوب برنامه آزمایشگاهی انجام‌شده تفسیر شوند. نخست، در این مطالعه تنها دو سطح جایگزینی میکروسیلیس (٤ و ٨ درصد) و سه درصد براده آهن ضایعاتی (۳، ۵ و ۷ درصد) مورد بررسی قرار گرفتند، زیرا این مقادیر بر اساس دامنه‌های کاربردی و متداول گزارش‌شده در مطالعات پیشین انتخاب شدند. دوم، ارزیابی عملکرد بتن به خواص مکانیکی متداول و برخی شاخص‌های دوام شامل جذب آب و مقاومت الکتریکی محدود شد. سایر جنبه‌های مهم دوام نظیر مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید، حمله سولفاتی، چرخه‌های یخبندان–ذوب و مقاومت در برابر کربناسیون در محدوده این پژوهش قرار نداشتند. همچنین، تفسیر مکانیزم‌های اثر متقابل میکروسیلیس و براده آهن عمدتاً بر اساس رفتار ماکروسکوپی نمونه‌ها انجام شد و از روش‌های مستقیم ریزساختاری برای بررسی این مکانیزم‌ها استفاده نشد.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده دامنه گسترده‌تری از درصدهای میکروسیلیس و براده آهن مورد بررسی قرار گیرد و عملکرد بلندمدت بتن در شرایط محیطی مخرب ارزیابی شود. همچنین استفاده از روش‌های ریزساختاری نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)، طیف‌سنجی پراش انرژی (EDS)،

پراش پرتو ایکس (XRD) و تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه (MIP) می‌تواند به درک دقیق‌تر سازوکارهای حاکم بر اثرات هم‌افزای میکروسیلیس و براده آهن کمک کند. علاوه بر این، انجام مطالعات مرتبط با ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل اقتصادی می‌تواند دیدگاه جامع‌تری در خصوص امکان‌سنجی اجرایی، مزایای زیست‌محیطی و پایداری استفاده از براده آهن ضایعاتی در تولید بتن ارائه دهد.

در پژوهش حاضر، تمرکز اصلی بر ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن سخت‌شده بوده است؛ بنابراین خواص بتن تازه از جمله اسلامپ، زمان گیرش و پارامترهای رئولوژیکی مورد بررسی قرار نگرفتند. با وجود آنکه تمامی مخلوط‌ها با موفقیت ساخته، متراکم و عمل‌آوری شدند، بررسی دقیق رفتار بتن تازه و تأثیر میکروسیلیس و براده آهن بر کارایی مخلوط می‌تواند موضوع مطالعات تکمیلی آینده باشد.

اگرچه در این پژوهش از مواد جایگزین و بازیافتی با قابلیت بالقوه بهبود پایداری استفاده شد، ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی این جایگزینی‌ها انجام نشد. از آنجا که تحلیل چرخه عمر و ارزیابی اقتصادی نیازمند اطلاعات مربوط به فرآیندهای تولید، حمل‌ونقل، مصرف انرژی و شرایط اجرایی در مقیاس صنعتی است، بررسی این جنبه‌ها خارج از محدوده مطالعه حاضر بود. انجام مطالعات LCA و تحلیل هزینه–فایده در تحقیقات آتی می‌تواند دیدگاه جامع‌تری در خصوص مزایای پایداری این نوع بتن ارائه نماید.

یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر عدم استفاده از تحلیل‌های آماری استنباطی نظیر تحلیل واریانس (ANOVA)و آزمون‌های چندگانه مقایسه میانگین بود. با توجه به ماهیت برنامه آزمایشگاهی و تمرکز مطالعه بر مقایسه عملکرد مهندسی طرح‌های اختلاط مختلف، نتایج بر اساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده و روندهای مشاهده‌شده مورد تحلیل قرار گرفتند. بنابراین، یافته‌های این پژوهش باید در چارچوب شرایط آزمایشگاهی انجام‌شده تفسیر شوند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده با افزایش تعداد تکرارهای آزمایش، امکان ارزیابی آماری معنی‌داری اختلافات بین طرح‌های اختلاط نیز فراهم گردد.

۷. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و فدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش یاری رسان بوده‌اند، ابراز می‌دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخوردهای سازنده‌ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده‌اند، تشکر می‌گردد.

۸. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می‌کنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل آنها بوده و قبلاً در هیچ مجله یا کنفرانس دیگری منتشر نشده و همچنین برای بررسی همزمان به مجله دیگری ارسال نشده است.

۹. مشارکت‌های نویسندگان

امین زارع: اعتبارسنجی، تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها.

رضوان باباگلی: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی، نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله.

میثم قربانی: ایده‌پردازی.

۱۰. منابع مالی

این پژوهش هیچ بودجه مشخصی از سازمان‌های تأمین‌کننده داخلی یا خارجی دریافت نکرده است.

۱۱. تعارض منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که هیچگونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

۱۲. مراجع

Aceves, D. (2024). “Iron filings impact on the compressive strength of concrete”. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California.

Alajail, A., Ahmed, M., Abdullah, A., & Ali, A. (2025). “Improving the properties of concrete using iron industry waste”. African J. Adv. Pure Appl. Sci., 223-234.

Breesem, K. M., Mohammed, T. J., Hassen, D. R., & Heil, S. M. (2023). “Properties of concrete using waste iron”. Mater. Today: Proceed., 80: 769-773.

Dawood, A., Al-Khazraji, H., & Mahmood, D. A. (2023). “Shear behaviour of reinforced-concrete beams incorporating iron filings as sand replacement”. Adv. Civ. Archit. Eng., 14(27): 80-96.

Garg, H. (2022). “Durability of concrete made with steel filings as a replacement of fine aggregate”. Mater. Today: Proceed., 49: 3217-3221.

Hussain, A. J., & Al-Khafaji, Z. S. (2022). “Experimental investigation on applying waste iron filings in the engineering fields for protection the environment from contamination”. Mater. Today: Proceed., 61: 794-798.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). “Concreto: Estrutura; Propriedades e Materiais”. Ibracon: Sao Paulo, Brazil.

Olawale, S. O., Kareem, M. A., et al. (2021). “Utilization of iron filings as partial replacements for sand in self-compacting concrete”. Tanzania J. Sci., 47(3).

Rajeswari, V. (2021). “Strength behaviour of iron fillings in concrete by partial replacement of sand”. Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT), 10(05): 839-841.

Rashidian, S., Ziaei, M., & Esmaeilabadi, R. (2023). “Experimental study of the effect of elevated temperature on compressive and tensile strength of concrete made with microsilica and polypropylene”. J. Struct. Constr. Eng., 10(8): 161-178.

Shamsad, A., Khaled Own Mohaisen, Saheed Kolawole Adekunle, Salah U. Al-Dulaijan, & Mohammed Maslehuddin. (2019). “Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures”. Constr. Build. Mater., 198: 437-444.

Yusuf, M. O. (2019). “Synergistic-effect of iron-filing and silica-fume on the absorption and shrinkage of cement paste”. Magaz. Civ. Eng., 91(7): 16-26.

Zahraa, N. J., & Al-Jumaili, M. A. H. (2023). “Mechanical evaluation of sustainable concrete used in a concrete pavement that production from iron filling waste”. In: E3S Web of Conferences, vol. 427, p. 03013. EDP Sciences.