

کاربرد باطله‌های فرآوری مس در تهیه بتن به منظور جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست

یوسف درزاده^۱، علی اکبر دایا^۲، مرضیه حسینی نسب^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲ و ۳- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

* نویسنده مسئول: مرضیه حسینی نسب، گروه مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایمیل: hosseininasab@eng.usb.ac.ir

چکیده

باطله‌های مس محصول جانبی کارخانه‌های فرآوری مس هستند که کاربرد مناسبی برایشان تعریف نشده است و به دلیل حجم زیاد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن، مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی بسیاری را به همراه دارند. پژوهش اخیر به بررسی تأثیر استفاده از باطله کارخانه فرآوری مس به عنوان جایگزین سیمان بر خواص مکانیکی و دوام بتن می‌پردازد. برای این منظور، پنج طرح اختلاط با درصد‌های مختلف از باطله مس معدن چهل کوره در ساخت بتن استفاده شد. این باطله حاوی سیلیسیم، آهن، منیزیم و آلومینیوم است. ۱۰۵ نمونه شامل ۷۵ نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و ۳۰ نمونه استوانه‌ای با ابعاد $15 \times 30 \times 30$ سانتی‌متر تهیه شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۵ درصد باطله‌مس باعث بهبود مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می‌شود. اما در صورت افزایش درصد باطله مس به ۱۰ درصد، کاهش در مقاومت فشاری مشاهده شد که با وجود این کاهش، همچنان مقدار مقاومت فشاری، بیشتر از نمونه شاهد بود. با استفاده از باطله مس، کاهش ناچیزی در مقاومت کششی رخ داد. آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و جذب آب در سن ۲۸ روز نشان دادند که استفاده از باطله مس باعث کاهش ناچیز در مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن می‌شود. همچنین، افزودن ۵ تا ۱۰ درصد باطله مس بجای سیمان باعث کاهش هزینه‌های تولید بتن و کاهش مصرف انرژی با مصرف کمتر سیمان، کاهش آسیب به محیط زیست با تولید کمتر سیمان و مصرف پهنه باطله‌های معادن مس خواهد شد. بنابراین، باطله مس به عنوان یک جایگزین مناسب برای جایگزینی جزئی سیمان در بتن قابل استفاده است.

کلمات کلیدی

باطله‌های معدنی، معدن مس چهل کوره، مصالح ساختمانی، محیط زیست، بتن.

۱- مقدمه

ایران دارای پتانسیل بالایی در زمینه معدنکاری است. اما با وجود تولید و بهره‌برداری بالا از معادن مختلف، متأسفانه مقدار زیادی از باطله‌های معدنی بلا استفاده در اطراف معادن دپو می‌شود [۱]. باطله‌های معدنی، فاقد ارزش اقتصادی قابل توجه هستند و نگهداری آنها باعث اشغال فضا و هدرروی منابع می‌شود [۲]. کیفیت هوا و خاک ممکن است تحت تأثیر تولید و انتشار گرد و غبار قرار گیرد و منابع آب زیرزمینی و سطحی نیز از طریق نشت از خاک یا از طریق حفره‌ها آلوده شود [۳]. بنابراین، مدیریت باطله‌های معدنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌های مدیریت باطله‌های معدنی استفاده مجدد از آنها است [۱]. از طرفی تولید سیمان و مصرف روز افزون آن نیز با آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از کارخانجات سیمان و مصرف بالای انرژی همراه است [۴].

برای حفاظت از منابع و مدیریت صحیح معدنی، مطالعات اخیر بر تبدیل باطله به منابع مفید در کاربردهای مختلف تأکید دارند. یکی از بخش‌هایی که می‌تواند بخش قابل توجهی از این باطله‌ها را مورد استفاده قرار دهد بخش ساخت و ساز است. بنابراین برای کاهش مصرف، مطالعاتی برای جایگزین کردن مواد زائد به جای مصالح ساختمانی رایج انجام شده است [۵]. از طرف دیگر، بتن یکی از پرمصرف‌ترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان است که در ساخت و ساز، راه‌سازی، سدها، پل‌ها و سایر سازه‌های عمرانی استفاده می‌شود. بتن یک ماده ساختمانی است که از ترکیب آب، سیمان و سنگدانه‌های ریز و درشت (شن و ماسه) به دست می‌آید [۶ و ۷]. دسترسی آسان به اجزاء تشکیل دهنده، شکل‌پذیری، پایداری و هزینه مناسب، آن را به یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی ساخته شده به دست بشر تبدیل کرده است و هرگونه تغییر و اصلاح در روش‌های تولید آن (استفاده از مواد و ضایعات صنعتی) اثرات عمده زیست‌محیطی و اقتصادی مثبت را به دنبال دارد [۶]. با توجه به مصرف بسیار بالای انرژی در تولید سیمان، استفاده

از باطله معدن به عنوان جایگزین در بتن، می‌تواند راه‌حلی مناسب و مؤثر باشد. این راه‌حل، علاوه بر کاهش مصرف منابع طبیعی و مصالح ساختمانی، می‌تواند خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را نیز بهبود بخشد. همچنین، این روش می‌تواند بازار جدیدی را برای صنعت معدن ایجاد کند و ارزش اقتصادی باطله معدن را افزایش دهد [۸].

بخشی از باطله‌های معدن مس، ضایعاتی هستند که پس از استخراج ماده معدنی حاوی مس از سنگ معدن تولید می‌شوند [۹]. بخشی دیگر از باطله‌های معدن مس، پسماندهایی را شامل می‌شوند که در فرآیند تصفیه مس به وجود می‌آید. این نوع از باطله مس معمولاً شامل سنگ‌ها، خاک و مواد غیرمفید دیگر است که در طول عملیات لیچینگ، فلوتاسیون، ذوب و تصفیه از مس جدا می‌شوند [۱۰]. این نوع از باطله که دارای کانی‌های بی‌ارزش و حلال است، چالش‌های زیست‌محیطی دارد و هزینه زیادی را برای شرکت‌های تولیدکننده مس به همراه می‌آورد.

برخی پژوهشگران، باطله‌های معدن مس را به عنوان یک جایگزین سیمان و سنگدانه در بتن پیشنهاد کرده‌اند که در ادامه به آن پرداخته شده است.

اسکاریا توماس^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی جایگزینی سنگدانه‌های ریز در بتن با باطله معدن مس، تا ۶۰ درصد، بجای بخشی از شن و ماسه طبیعی رودخانه پرداختند. این محققین، باطله معدن مس را با نسبت‌های مختلف آب به سیمان (۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵)، جایگزین بخشی از شن و ماسه کرده و بتن حاصل را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و سایشی با درصدهای مختلف از باطله مس و نسبت آب به سیمان متفاوت، مورد بررسی قرار گرفتند. بیشترین مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز برای نمونه‌ی حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد باطله مس به عنوان جایگزین شن و ماسه طبیعی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ گزارش شد. سایر نمونه‌ها، با افت مقاومت نسبت به نمونه شاهد مواجه شدند. همچنین زمانی که نسبت آب به سیمان ۰/۵ بود با افزایش درصد جایگزینی و سن عمل‌آوری نمونه‌ها، افزایش مقاومت خمشی مشاهده شد. از نتایج بدست آمده مشاهده شد که باطله‌ی مس می‌تواند به عنوان جایگزینی جزئی (تا ۶۰ درصد) با سنگدانه‌های ریز طبیعی، و با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ مورد استفاده قرار گیرد [۱۱].

دربهنری و همکاران (۱۴۰۰)، با بررسی استفاده از باطله‌های معدن مس میدوک با درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن مشاهده کردند که مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد باطله مس به عنوان جایگزین سیمان، بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داد و در سایر درصدهای جایگزینی، افت مقاومت نسبت به نمونه شاهد گزارش شد. همچنین مقاومت کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد باطله مس، نسبت به نمونه‌ی شاهد، مقاومت کششی بیشتر یا برابر با آن داشته است [۱۲]. عبدالله پور و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از باطله معدن مس به عنوان جایگزین سیمان در ملات پایه بتن با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ در آزمایش مقاومت فشاری که با آزمون‌های با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روزه انجام شد، دریافتند که مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد باطله مس به ترتیب ۸ و ۱۲/۴۷ درصد افزایش یافت. همچنین، جهت انجام آزمایش مقاومت خمشی از نمونه‌های با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر استفاده شد که نشان داد مقاومت خمشی در طرح‌های اختلاط حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد باطله مس به عنوان جایگزین سیمان نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب ۰/۶۶، ۱۷/۸۳، ۱۱/۱۳ و ۱۶/۲۲ درصد افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقاومت خمشی در طرح حاوی ۱۰ درصد باطله مس مشاهده شد و طرح حاوی ۲۵ درصد باطله مس، کاهش مقاومت به میزان ۱۴/۴۳ درصد را نشان داد [۱۳].

اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۰)، تأثیر افزودن باطله معدن مس با درصدهای ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ را به بتن بر رفتار تنش-کرنش بتن محصور نشده در ابعاد استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار دادند. مصالح مصرفی در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع یک کارخانه صوفیان و مواد باطله معدن مس سونگون با حداکثر قطر دانه‌بندی ۱۲/۵ میلی‌متر بود. با اضافه کردن باطله مس تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد، افزایش پیدا کرد به گونه‌ای که حداکثر مقاومت فشاری، مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد باطله مس به عنوان جایگزین سیمان بوده است [۱۴].

¹ Skariah Thomas

قاضی و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی به مطالعه آزمایشگاهی تعیین مقاومت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ کلرید در نمونه‌های با جایگزینی باطله معدن مس به عنوان سیمان مصرفی در بتن پرداختند. در این پژوهش، سه طرح اختلاط تهیه شد که در آن ۰ تا ۳۰ درصد باطله مس جایگزین سیمان شد. آزمون‌های مقاومت فشاری و خمشی برای سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شدند. با افزایش درصد جایگزینی باطله مس، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری بتن کاهش یافت. همچنین نشان داده شد که باطله مس می‌تواند به عنوان یک جاذب برای حذف فلزات سنگین از آب‌های زیرزمینی عمل کند [۱۵].

زی^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی به ارزیابی تأثیر استفاده از باطله مس به عنوان سیمان بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. بدین منظور از ۱۰ درصد باطله مس، ۵ درصد سیلیس، و ۸۵ درصد سیمان پرتلند برای تهیه بتن استفاده شد. نسبت آب به سیمان ۰/۱۸ بود و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، آزمایش مقاومت فشاری و خمشی انجام شد. در این مطالعه، همچنین آزمایش ترسیب فلزات سنگین نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی بتن در صورت استفاده از باطله مس، بهبود یافته و فلزات سنگین، رسوب پیدا خواهند کرد. در این پژوهش، فقط ۱۰ درصد باطله مس به جای سیمان استفاده شد. این درصد به عنوان یک درصد بهینه محسوب می‌شد و درصدهای بالاتر باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی می‌شد [۱۶].

در این تحقیق، باطله حاصل از کارخانه فرآوری مس چهل کوره مورد استفاده قرار گرفته است. این باطله بطور عمده شامل عناصر سیلیسیم (بطور تقریبی ۴۵ درصد)، منیزیم (بطور تقریبی ۱۸ درصد)، آهن (بطور تقریبی ۱۰ درصد)، آلومینیوم (بطور تقریبی ۸ درصد)، کلسیم (بطور تقریبی ۵ درصد) و گوگرد (بطور تقریبی ۲ درصد) است. باطله حاصل از کارخانه فرآوری مس چهل کوره، باطله نهایی کارخانه فرآوری است. سنگ معدن حاوی مس، پس از انجام خردایش و فرآیند فلوتاسیون، فیلتر شده و بخش جامد تحت عنوان باطله، بصورت بلااستفاده در پشت سدهای باطله انبار می‌شود. در حال حاضر، کنسانتره (محصول) نهایی این کارخانه برای تولید مس خالص و فرآوری عناصر ارزشمندی مانند روی و سرب به کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه ارسال می‌شود.

معدن مس چهل کوره در ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب شهر زاهدان در ۱۵ کیلومتری شمال روستای دهانه باغی قرار دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌های این ناحیه را آمیزه‌های رنگین تشکیل می‌دهند و پس از آن رسوبات ضخیم فلیش مانند قرار دارد که تنوپی از ماسه سنگ، شیل و مارن است و روی مخلوط‌های رنگین فوق قرار گرفته است [۱۷]. این معدن جزء مهم‌ترین معادن فعال استان سیستان و بلوچستان قلمداد می‌شود که تا کنون هیچ کار علمی بر روی باطله‌های حاصل از این معدن صورت نگرفته است. در صورت انجام یک کار تحقیقاتی برای استفاده از این باطله‌ها به عنوان مواد اولیه مصالح ساختمانی، که صنعت پرکاربردی است، می‌توان علاوه بر در نظر گرفتن جنبه‌های زیست محیطی، به میزان قابل توجهی در انرژی و سایر هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. با توجه به توضیحاتی که بیان شد، در پژوهش اخیر سعی شده است به بررسی این باطله‌ها و اثر آن بر مشخصات مکانیکی بتن بعنوان افزودنی پرداخته شود.

۲- روش تحقیق (طرح اختلاط و برنامه‌های آزمایشگاهی)

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان است که به دلیل خواص مکانیکی بالا و همچنین قابلیت ساخت در اشکال مختلف، در انواع پروژه‌های ساختمانی استفاده می‌شود. با این حال، تولید بتن با استفاده از سیمان که یکی از مواد اصلی در ساخت بتن است، منجر به آسیب رساندن به محیط زیست می‌شود [۱۸]. پژوهش‌های زیادی برای کاهش اثرات منفی تولید سیمان بر روی محیط زیست صورت گرفته است [۱۹-۲۱]. یکی از راه‌های کاهش این اثرات منفی، تولید بتن با استفاده از مواد بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از مواد اولیه در ساخت بتن است [۲۲]. در این بخش، به نحوه رسیدن به طرح اختلاط شاهد، آزمایش حالت تازه (اسلامپ)، و آزمایش حالت سخت شده (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن) پرداخته شده است.

۱-۲- مواد و مصالح مورد استفاده در تحقیق

در این بخش به بررسی مواد مورد استفاده شامل مصالح سنگی، سیمان، باطله معدن مس، میکروسیلیس، مواد افزودنی و آب پرداخته شده و براساس تخمین و بررسی نگارنده، مقایسه قیمت بتن معمولی و بتن حاوی باطله مس در جدول ۱ صورت گرفته است.

جدول ۱- برآورد قیمت بتن معمولی و بتن حاوی باطله مس

Table 1. Estimation of the price of normal concrete and concrete containing copper waste

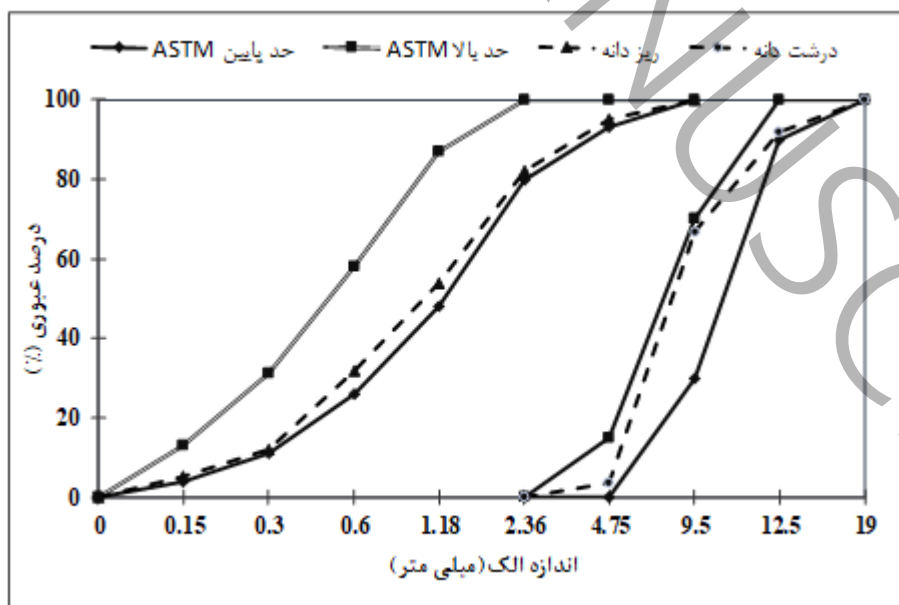
¹ Xie

مصالح	بتن معمولی		بتن حاوی باطله مس	
	میزان مصرف (کیلوگرم بر متر مکعب)	قیمت (تومان)	میزان مصرف (کیلوگرم بر متر مکعب)	قیمت (تومان)
ریزدانه (ماسه)	۷۵۰	۱۷۵۰۰۰	۹۶۰	۱۷۵۰۰۰
درشت‌دانه (شن)	۸۵۰	۱۷۰۰۰۰	۶۴۰	۱۷۰۰۰۰
سیمان	۴۰۰	۶۴۰۰۰۰	۴۰۰	۶۰۸۰۰۰
باطله مس	-	-	۲۰	-
آب	-	-	-	-
فوق روان کننده	۱/۶	۱۲۰۰۰۰	۴	۱۲۰۰۰۰
مجموع	---	۱۱۰۵۰۰۰	---	۱۰۷۳۰۰۰

ارزیابی قیمت نشان داد، که هزینه ساخت ۱ متر مکعب بتن با استفاده از باطله مس، وقتی مقدار جایگزینی سیمان با باطله ۵ درصد باشد، در مقایسه با بتن معمولی، حدود ۳ درصد کاهش و با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با باطله مس، حدود ۶ درصد کاهش قیمت وجود داشت. دلیل این امر، کاهش مصرف سیمان در بتن حاوی باطله مس در مقایسه با بتن معمولی است که در نهایت منجر به کاهش هزینه ساخت بتن می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه سیمان و تولید آن، بالاترین مصرف انرژی را در بین مصالح در جهان دارد، با مصرف کمتر سیمان، مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد. با تولید کمتر سیمان و مصرف بهینه باطله‌های معادن مس، آسیب کمتری به محیط زیست می‌رسد و همچنین، با مصرف بهینه باطله‌های مس، هزینه‌های نگهداری و دفع باطله‌ها نیز کاهش می‌یابد.

۱-۲-۱- مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

برای تهیه مصالح سنگی درشت دانه، چهار نوع شن، و برای مصالح ریز دانه نیز دو نمونه ماسه، از معادن اطراف زاهدان، مورد بررسی قرار گرفتند. این مصالح سنگی، در مسیر رودخانه شسته شده و با درصد‌های شکستگی مطابق استاندارد [۲۳] ASTM C۳۳ مورد استفاده قرار گرفت. بزرگ‌ترین اندازه ذرات درشت دانه، ۱۶ میلی‌متر و کوچکترین اندازه‌ی آن‌ها، ۲/۳۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. جرم مخصوص و جذب آب سنگدانه‌های ریز، به ترتیب ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۲ درصد می‌باشد. شکل ۱، نمودار دانه‌بندی مصالح ریز و درشت دانه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق

Figure 1. Granulation chart of coarse and fine materials used in this research

جدول ۲، مشخصات مصالح ریزدانه و جدول ۳، مشخصات مصالح درشت دانه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات مصالح ریزدانه

Table 2. Characteristics of fine-grained materials

مقدار	مشخصات
۲۵۷۰	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۵۶۵	وزن مخصوص اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۵۷۳	وزن مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۲	درصد جذب آب

جدول ۳- مشخصات مصالح درشت دانه

Table 3. Characteristics of coarse-grain materials

مقدار	مشخصات
۲۷۶۲	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۷۷۵	وزن مخصوص اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۸۰۱	وزن مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۷	درصد جذب آب

۲-۲-۱- باطله‌ی مس مورد استفاده در تحقیق

باطله‌های صنعت فرآوری بخصوص باطله‌های حاصل از فرآیند فلوتاسیون بدلیل استفاده از مواد شیمیایی مشکلات زیست‌محیطی زیادی را به همراه دارند. بنابراین نیاز است که روش‌های مناسب برای دفع یا بازیافت آن‌ها اتخاذ شود. یک روش پایدار برای استفاده از باطله‌های مس، به‌کارگیری آن‌ها در صنعت ساخت و ساز به عنوان جایگزین یا تکمیل‌کننده سنگدانه، پوزولان یا سیمان در بتن است. این روش علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید بتن، منجر به بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن نظیر مقاومت فشاری، کششی، خوردگی و ... می‌شود. باطله مورد استفاده در این تحقیق، همچنان که قبلاً اشاره شد، از باطله‌های فرآوری معدن مس چهل کوره تهیه شده است که آنالیز ICP و میزان ترکیبات اکسیدی موجود در آن، به ترتیب در جداول ۴ و ۵، ارائه شده است. مطابق این جداول، بخش عمده‌ای از باطله مورد استفاده در این تحقیق، حاوی سیلیسیم، آهن، منیزیم و آلومینیوم است.

جدول ۴- مشخصات باطله حاصل از کارخانه فرآوری معدن مس چهل کوره (بر حسب درصد)

Table 4. Characteristics of the mineral processing tailings of the Chehelkoreh copper mine (%)

اکسید منیزیم	اکسید گوگرد	اکسید سدیم	اکسید پتاسیم	میزان مواد فرار بر اثر حرارت	اکسید آلومینیوم	اکسید آهن سه ظرفیتی	اکسید آهن سه سیلیسیم	اکسید کلسیم
۱۲/۵۶	۳/۱۲	۰/۲۳	-	۱۰/۶۴	۱۱/۵۹	۱۳/۳۱	۴۱/۹۹	۲/۷۶

جدول ۵- نتایج آنالیز ICP (بر حسب پی‌پی‌ام)

Table 5. ICP analysis results (ppm)

آهن	مس	کروم	کبالت	سلنیم	کادمیوم	کلسیم	آرسنیک	آلومینیوم	نقره
۱۰۰	۱	۱	۱	۱	۰/۱	۱۰۰	۰/۵	۱۰۰	۰/۱
گوگرد	سرب	فسفر	نیکل	مولیبدن	منگنز	منیزیم	لیتیم	لاتانیوم	
۵۰	۱	۵	۱	۰/۵	۵	۱۰۰	۱	۱	

برای اندازه‌گیری وزن مخصوص باطله مس، بر اساس استاندارد [۲۴] ASTM C ۱۸۸، از بالن لوشاتلیه و نفت سفید استفاده شد.

۳-۲-۱- میکروسیلیس

در این تحقیق از میکروسیلیس تولید شده توسط شرکت فرو آلیاژ ایران استفاده شده است که وزن مخصوص آن ۲/۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب است. خصوصیات شیمیایی میکروسیلیس نیز در جدول ۶، ارائه شده است.

جدول ۶- مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق (بر حسب درصد)

Table 6. Chemical characteristics of microsilica used in this research (%)

اکسید منیزیم	اکسید گوگرد	اکسید سدیم	اکسید پتاسیم	میزان مواد فرار بر اثر حرارت	اکسید آلومینیوم	اکسید آهن سه ظرفیتی	اکسید سیلیسیم	اکسید کلسیم
۰/۶	-	۰/۷	۰/۸۹	۳/۵	۰/۶	۱/۲	۹۰	۰/۵

۴-۲-۱- سیمان

سیمانی که برای ساخت نمونه‌ها در این تحقیق استفاده شد، سیمان تیپ دو شرکت سیمان قائن بود که دارای مقاومت مناسب در برابر حرارت و رطوبت است. وزن مخصوص این سیمان، ۳/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن توسط شرکت سازنده ارائه شده که در جدول ۷، به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۷- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۲ شرکت سیمان قائن

Table 7. Physical and chemical characteristics of type 2 cement of Qain Cement Company

اکسید منیزیم (درصد)	اکسید گوگرد (درصد)	اکسید سدیم (درصد)	اکسید پتاسیم (درصد)	میزان مواد فرار بر اثر حرارت (درصد)	اکسید آلومینیوم (درصد)	اکسید آهن سه ظرفیتی (درصد)	اکسید سیلیسیم (درصد)	اکسید کلسیم (درصد)
۱/۴	۲/۵	-	-	۲/۹	۴/۶۱	۴/۰۲	۲۱/۴	۶۳/۱
بلین	گیرش (دقیقه)	درصد انبساط اتوکلاو			مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			
ابتدایی	انتهایی							
۳۳۰	۱۹۰	۲۸۰	۰/۰۷	۲۸	۷	۳	۲۸	۴۵

برای اندازه‌گیری وزن مخصوص سیمان نیز بر اساس استاندارد [۲۴] ASTM C ۱۸۸ از بالن لوشاتلیه و نفت سفید استفاده شد.

۵-۲-۱- آب

آب استفاده شده در این تحقیق، آب آشامیدنی و شرب شهر زاهدان می‌باشد.

۶-۲-۱- فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ای که در این تحقیق برای تهیه بتن مورد استفاده قرار گرفته است، دارای پایه کربوکسیلیکات بوده و از شرکت سفید بام کرمان تامین شده است. فوق روان کننده‌ها، باعث کاهش نسبت آب به سیمان در مخلوط بتن می‌شوند و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن خواهند شد. مشخصات فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- مشخصات فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق

Table 8. Specifications of the super-lubricant used in this research

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	زرد
ورن مخصوص (کیلوگرم بر لیتر)	۱/۰۳۰ ± ۰/۰۲
میزان کلر	≤ ۰/۱ درصد جرمی
میزان نیترات	ندارد
نقطه انجماد	صفر درجه سانتی‌گراد

۷-۲-۱- الیاف فولادی

در این پژوهش برای افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر، به آنها الیاف فولادی اضافه شد که مشخصات فیزیکی این الیاف در جدول ۹، ارائه شده است.

جدول ۹- مشخصات فیزیکی الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق
Table 9. Physical characteristics of steel fibers used in this research

مشخصات فیزیکی	
طول الیاف	۳۵ میلی‌متر
قطر معادل	۱ میلی‌متر
مقاومت کششی	۱۰۵۰ مگاپاسکال
نوع الیاف	الیاف فولادی
شکل ظاهری	قلاب‌دار

۲-۲- طرح اختلاط و ساخت بتن

انتخاب طرح اختلاط مناسب یکی از مراحل مهم برای ساخت بتن است که در آن نسبت‌های مناسب مواد تشکیل‌دهنده بتن مانند سیمان، آب، سنگدانه و افزودنی‌ها تعیین می‌شود. در این تحقیق، پنج طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۳ در نظر گرفته شد [۱۱ و ۲۵]. میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری، خمشی و الکتریکی بتن می‌شود. مقدار و روش مصرف ژل میکروسیلیس در بتن به صورت درصدی از جرم سیمان و به شکل پودر یا دوغاب می‌باشد [۲۶].

۲-۲-۱- طراحی، نحوه اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

۱-۲-۲-۱- انتخاب طرح اختلاط شاهد

هدف اصلی از این تحقیق، رسیدن به طرح اختلاط مناسب برای ساخت بتن بود. برای این منظور، ابتدا با مرور مقالات مختلف در زمینه طراحی بتن، مقدار اسلامپ مورد نیاز بر اساس نوع کاربرد و خواص مطلوب بتن مشخص شد. سپس، با استفاده از آزمون اسلامپ که یکی از آزمایش‌های ساده و معمول برای تعیین خواص رئولوژی بتن است، نسبت آب به سیمان و مقدار فوق‌روان‌کننده برای هر نمونه تغییر داده شد. در چند طرح اول، به دلیل عدم تطابق نسبت آب به سیمان و فوق‌روان‌کننده با خصوصیات مصالح، دستیابی به اسلامپ مورد نظر ممکن نبود. با بررسی‌های بیشتر، نسبت آب به سیمان و فوق‌روان‌کننده تغییر داده شد. در نهایت، با تغییر وزن‌های سیمان، فوق‌روان‌کننده و آب، طرح اختلاط شاهد مناسب بدست آمد. جدول ۱۰، میزان هر یک از مواد مورد استفاده در ۵ طرح اختلاط را نشان می‌دهد. در این جدول، T^1 نشان‌دهنده باطله مسی و M^2 نشان‌دهنده میکروسیلیس می‌باشد.

جدول ۱۰- طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق (کیلوگرم بر مترمکعب)

Table 10. Mixing designs examined in this research (Kg/m^3)

کد طرح	شناسه	ریزدانه	درشت دانه	سیمان	باطله مس	میکروسیلیس	آب	فوق‌روان‌کننده
۱	T.M.0	۷۵۰	۸۵۰	۴۰۰	۰	۰	۱۷۲	۱/۶
۲	T5M.0	۷۵۰	۸۵۰	۳۸۰	۲۰	۰	۱۷۲	۱/۶
۳	T10M.0	۷۵۰	۸۵۰	۳۶۰	۴۰	۰	۱۷۲	۱/۶
۴	T.0M5	۷۵۰	۸۵۰	۳۸۰	۰	۲۰	۱۷۲	۱/۶
۵	T.0M10	۷۵۰	۸۵۰	۳۶۰	۰	۴۰	۱۷۲	۱/۶

در این پژوهش، طرح اختلاط شاهد، بدون استفاده از باطله مس و میکروسیلیس و با ۴۰۰ کیلوگرم سیمان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۲-۱- روش تهیه بتن برای ۵ طرح اختلاط

¹ Copper Tailing

² Microsilica

روش ساخت مخلوط بتن به این صورت بود که ابتدا سنگدانه‌های ریز و درشت به مدت یک دقیقه در میکسر قرار داده شده و مخلوط می‌شود. سپس سیمان را اضافه کرده و دوباره به مدت یک دقیقه مخلوط می‌شود. پس از آن، نصف آب را به مخلوط افزوده و ۳۰ ثانیه صبر می‌کنیم. در مرحله آخر، نصف دیگر آب که با فوق روان‌کننده مخلوط شده است، را به میکسر اضافه کرده و تا رسیدن به حالت مناسب هم می‌زنیم. در نهایت، آزمایش اسلامپ انجام می‌شود.

باطله مس و میکروسیلیس بصورت دوغاب به مواد بتن افزوده می‌شود. دلیل استفاده از باطله مس و میکروسیلیس به صورت دوغاب این است که باطله مس و میکروسیلیس به صورت پودر خشک، دارای ذرات بسیار ریزی هستند که ممکن است باعث تولید گرد و غبار و مشکلات تنفسی شوند.

برای جلوگیری از تبخیر و از دست دادن رطوبت، سطح قالب با پلاستیک پوشیده می‌شود. پس از ۲۴ ساعت، مواد از قالب خارج شده و به حوضچه انتقال داده می‌شود.

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر درصد‌های مختلف باطله فرآوری معدن مس چهل کوره به عنوان جایگزین سیمان در بتن می‌باشد. برای این منظور، پس از عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی برای سنین ۷ و ۲۸ روزه و همچنین مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن در سن ۲۸ روز بر روی حالت سخت شده بتن انجام گردید که در ادامه، نحوه انجام آزمایش‌های حالت سخت شده بتن ارائه شده است.

برای ساخت نمونه‌ها، براساس استاندارد [۲۷] BSI عمل شد. برای تعیین مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، و جذب آب، به نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر نیاز بود. برای تعیین مقاومت کششی نیز از استاندارد [۲۸] ASTM C۴۹۶ استفاده شد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۲-۲-۲- آزمایش‌های مربوط به بتن تازه (خواص رئولوژی بتن)

۲-۲-۲-۱- آزمایش اسلامپ

سنجش اسلامپ بتن آزمایشی است که در آن میزان کارایی و روانی (شل یا سفت بودن) بتن تازه، پیش از گیرش بتن تعیین می‌شود. این آزمایش برای بررسی کارایی بتن تازه و در نتیجه جریان یافتن روان و سهولت ریخته‌شدن بتن و جا گرفتن آن در قالب انجام می‌شود. روش انجام آزمایش به این ترتیب است که در ابتدا محل زیر صفحه فلزی به ابعاد 1×1 متر، تمیز شده و سپس صفحه فلزی بگونه‌ای قرار داده شود که از تراز بودن آن اطمینان حاصل شود. سطح صفحه فلزی و مخروط آزمایش را مرطوب کرده و سپس یک سوم مخروط را از نمونه پر کرده و مخروط به کمک پا ثابت نگه داشته می‌شود. سپس، مواد را متراکم می‌کنیم. این کار در سه مرحله تا پر شدن تمام مخروط، انجام شده و پس از تراکم، مخروط به آرامی به صورت عمودی و پیوسته به بالا کشیده می‌شود و در نهایت سطح مخروط فلزی با سطح نمونه بتنی که از مخروط بیرون آمده، مقایسه می‌شود. اختلاف این دو سطح، مشخص کننده عدد اسلامپ می‌باشد. جدول ۱۱ بر گرفته از مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان است [۲۹].

جدول ۱۱- تعیین کاربرد قطعه بتنی با مشخص بودن عدد اسلامپ

Table 11. Determining the use of concrete pieces with the determination of the slump number

عدد اسلامپ به میلی‌متر		نوع عضو یا قطعه بتنی	ردیف
حداکثر	حداقل		
۷۵	۲۵	شالوده‌ها و پی دیوارهای بتن‌آرمه	۱
۷۵	۲۵	شالوده‌های بتن ساده، صندوقه‌های زیر سازه‌ها	۲
۱۰۰	۲۵	تیرها و دیوارهای بتن‌آرمه	۳
۱۰۰	۲۵	ستون‌ها	۴
۷۵	۲۵	دالها و پیاده‌روهای بتنی	۵
۵۰	۲۵	بتن حجیم	۶

۲-۲-۳- آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن سخت شده

۲-۲-۳-۱- مقاومت فشاری

در این پژوهش، از استاندارد [۳۰] BS ۱۸۸۱، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن استفاده شد. این استاندارد، شکل، ابعاد و سایر الزامات آزمون‌ها و قالب‌ها را برای تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده تعیین می‌کند. نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر با استفاده از قالب فلزی، تهیه و در شرایط استاندارد، نگهداری و عمل‌آوری شدند. سپس، نمونه‌ها در دستگاه جک بتن شکن قرار گرفتند و بار فشاری به صورت گام به گام افزایش داده شد تا نمونه شکسته شود. مقاومت فشاری هر نمونه، با تقسیم بار شکست به مساحت سطح آن نمونه به دست آمد. مقاومت فشاری بتن به عوامل مختلفی از جمله نسبت آب به سیمان، نوع و مقدار سنگدانه‌ها، مواد افزودنی، روش‌های مخلوط کردن، شرایط نگهداری و عمل‌آوری، شکل و ابعاد نمونه و دستگاه آزمایش بستگی دارد. شکل ۲، نحوه قرارگیری نمونه و دستگاه جک بتن شکن را نشان می‌دهد.



شکل ۲- دستگاه جک بتن شکن که نمونه مکعبی درون آن قرار داده شده است.

Figure 2. The concrete breaker jack device, which has a cubic sample inside it.

۳-۲-۲-۲- مقاومت کششی

در این پژوهش، از روش دو نیم کردن یا تست برزلی، برای تعیین مقاومت کششی بتن استفاده شد. این آزمایش، در [۲۸] ASTM C۴۹۶ و [۳۱] BS ۱۸۸۱ شرح داده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با استفاده از یک قالب فلزی تهیه شد و در شرایط استاندارد، نگهداری و عمل‌آوری شدند. سپس نمونه‌ها در دستگاه جک بتن شکن قرار گرفت و بار فشاری به صورت گام به گام افزایش یافت تا نمونه به دو نیم شکسته شود. مقاومت کششی هر نمونه با استفاده از فرمول ۱، به دست آمد. در این فرمول، P مقاومت فشاری، L و D به ترتیب طول و قطر استوانه می‌باشند.

$$\text{مقاومت کششی} = \frac{2P}{\pi \times L \times D} \quad (1)$$

۳-۲-۲-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن، شاخصی از نفوذپذیری و دوام بتن در برابر عوامل تهاجمی مانند کلریدها و خوردگی آرماتورها است. مقاومت الکتریکی بتن را می‌توان با اعمال جریان و یا استفاده از دو یا چهار الکترود متصل به انتهای یک نمونه با مقطع یکنواخت اندازه‌گیری کرد. این آزمایش یک روش غیر مخرب است که به دلیل سادگی، سرعت و اقتصادی بودن، برای ارزیابی خصوصیات بتن تازه و سخت شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی بتن به عوامل مختلفی از جمله رطوبت و درجه اشباع بتن، نوع جریان و فرکانس مصرفی، شکل و اندازه نمونه، افزودنی‌های شیمیایی بتن و مقاومت الکتریکی سنگدانه‌های موجود در بتن بستگی دارد. نحوه انجام این آزمایش به این صورت است که نمونه مکعبی را روی محل قرارگیری نمونه قرار داده و از قسمت بالای دستگاه، اهرم‌ها بسته می‌شود تا نمونه در محل خود ثابت شود و قسمت بالای نمونه نیز بر روی اسفنج بالایی قرار گیرد (شکل ۳). با وصل کردن جریان، مقدار مقاومت الکتریکی را از صفحه‌ی دیجیتال که روی دستگاه قرار دارد، می‌توان قرائت کرد.



شکل ۳- ثابت شدن نمونه درون دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی

Figure 3. Fixing the sample inside the electrical resistance measuring device

۳-۲-۲-۴- آزمایش تعیین جذب آب بتن

جذب آب بتن یکی از عوامل مؤثر بر دوام و کیفیت بتن است. آب می‌تواند باعث ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ساختار بتن شود و آسیب‌های مختلفی را به آن وارد کند. برای این منظور، لازم است که مقدار جذب آب بتن را با استانداردهای موجود مقایسه و کنترل کرد. برای انجام این آزمایش، نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر از بتن سخت شده تهیه شد. سپس نمونه‌ها در اون با دمای 105 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا خشک شوند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، وزن خشک با دقت 0.1 گرم اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در حوضچه قرار گرفتند تا از آب اشباع شوند. در نهایت، نمونه‌ها از آب خارج شده و سطح آن‌ها با یک پارچه خشک شد. وزن تر نمونه‌ها نیز با دقت 0.1 گرم اندازه‌گیری شد. جذب آب بتن با استفاده از فرمول ۲، محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد جذب آب} = 100 \times \frac{W_s - W_k}{W_s} \quad (2)$$

در این فرمول، وزن تر نمونه و W_k معرف وزن خشک نمونه است.

۳- ارائه نتایج و بحث

در این بخش، داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن‌های حاوی باطله مس و میکروسیلیس، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. خواص مکانیکی بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین خواهد شد. نتایج به دست آمده با یکدیگر و با نتایج پژوهش‌های قبلی، مقایسه خواهد شد و تأثیر باطله مس و مقایسه آن با میکروسیلیس نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- خواص حالت تازه بتن

۳-۱-۱- آزمایش اسلامپ

خواص حالت تازه برای 5 بتن حاصل از 5 طرح اختلاط، در جدول ۱۲، ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از 5 درصد باطله مس، عدد اسلامپ 73 میلی‌متر ثبت شد که در مقایسه با نمونه شاهد، $5/33$ درصد کاهش داشت. با افزایش این مقدار به 10 درصد، کاهش بیشتر در عدد اسلامپ مشاهده شد، بدین معنی که در صورت استفاده از 10 درصد باطله مس، عدد اسلامپ، 68 میلی‌متر بدست آمد که نسبت به نمونه شاهد، $13/2$ کاهش در عدد اسلامپ اتفاق افتاد. این کاهش می‌تواند به جذب بیشتر آب در باطله مس مربوط باشد. هر چه عدد اسلامپ کمتر باشد، بتن دارای روانی کمتر (سفت‌تر) است و در نتیجه، نیاز به آب بندی کمتری دارد. این نکته حائز اهمیت است که بتن با اسلامپ پایین‌تر گرچه کارایی کمتری دارد (گرچه این مقدار اسلامپ کاملاً معمول است)، اما در مقابل سایش سطح مقاوم‌تر و در مقابل ورود مواد خارجی از جمله آب و مواد شیمیایی به داخل آن مقاوم‌تر است. در نتیجه کاهش اسلامپ بتن تأثیر مستقیم بر دوام آن (بعنوان مثال کاهش نفوذ یون کلر و کاهش حمله سولفات‌ها) دارد.

جدول ۱۲- نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ برای 5 طرح اختلاط بتن

Table 12. Slump test results for 5 concrete mixing designs

نام طرح	عدد اسلامپ
T.M.0	77
T5M.0	73
T10M.0	68
T.M.5	71

۳-۲- خواص مکانیکی بتن

عملکرد بتن از نظر مهندسی، بر اساس خواص مکانیکی آن تعیین می‌شود. خواص مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، شکل‌پذیری، سختی، استحکام خستگی و ضربه‌ای، سایش‌پذیری و دوام هستند. از بین این خواص، مقاومت فشاری بتن مهم‌ترین پارامتر برای تعیین عملکرد بتن است. زیرا بسیاری از سازه‌های بتنی در حالت فشار کار می‌کنند و مقاومت فشاری بتن تأثیر مستقیم بر ظرفیت باربری و امنیت سازه دارد. همچنین، مقاومت فشاری بتن با دیگر خواص مکانیکی بتن در بسیاری از موارد ارتباط مستقیم دارد. به این معنا که با افزایش مقاومت فشاری بتن، خواص دیگر مکانیکی نظیر مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، شکل‌پذیری، سختی، استحکام خستگی و ضربه‌ای، سایش‌پذیری و دوام نیز بهبود یافته و عملکرد بتن بهتر می‌شود.

۳-۲-۱- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

برای بررسی پارامترهای مکانیکی، پنج طرح اختلاط شامل یک ترکیب شاهد و چهار ترکیب با درصد‌های متفاوت ۵ و ۱۰ درصد باطله مس و میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان در نظر گرفته شد.

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر باطله مس به عنوان یک ریزدانه جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری بتن بود. باطله مس، ماده‌ای است که پس از فرآوری مس به دست می‌آید و دارای خواص پوزولانی می‌باشد. برای این منظور، پنج طرح اختلاط مختلف با درصد‌های متفاوت ۵ و ۱۰ درصد باطله مس در نظر گرفته شد و از میکروسیلیس که آن‌هم یک ماده پوزولانی است، با همان درصد‌ها (۵ و ۱۰ درصد)، برای مقایسه با نتایج حاصل از باطله مس استفاده شد. اولین طرح از این ۵ طرح اختلاط، به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد که فقط شامل سیمان، شن، ماسه و فوق‌روان‌کننده بود. در طرح دوم، پنج درصد از وزن سیمان با باطله مس جایگزین شد و در طرح سوم، ده درصد از وزن سیمان جایگزین باطله مس گردید. برای مقایسه، در طرح چهارم و پنجم، به جای باطله مس، از میکروسیلیس استفاده شد. میکروسیلیس، یک ریزدانه است که دارای خواص پوزولانی بالایی است و اثر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن دارد [۲۶]. در طرح چهارم، پنج درصد از وزن سیمان، و در طرح پنجم، ده درصد از وزن سیمان، جایگزین میکروسیلیس شدند. ابعاد هر نمونه، $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر بود. نمونه‌ها پس از ساخت، در آب قرار گرفتند تا به رسیدگی برسند و از آب اشباع شوند. بعد از ۷ و ۲۸ روز، نمونه‌ها از آب خارج شده و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام شد (شکل‌های ۴ و ۵). نتایج حاصل از آزمایش‌ها، ثبت و تحلیل گردید و تأثیر باطله مس و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن مورد بحث قرار گرفت.



شکل ۵- نمونه شکسته شده در دستگاه جک بتن شکن

Figure 5. The broken sample in the concrete breaker jack



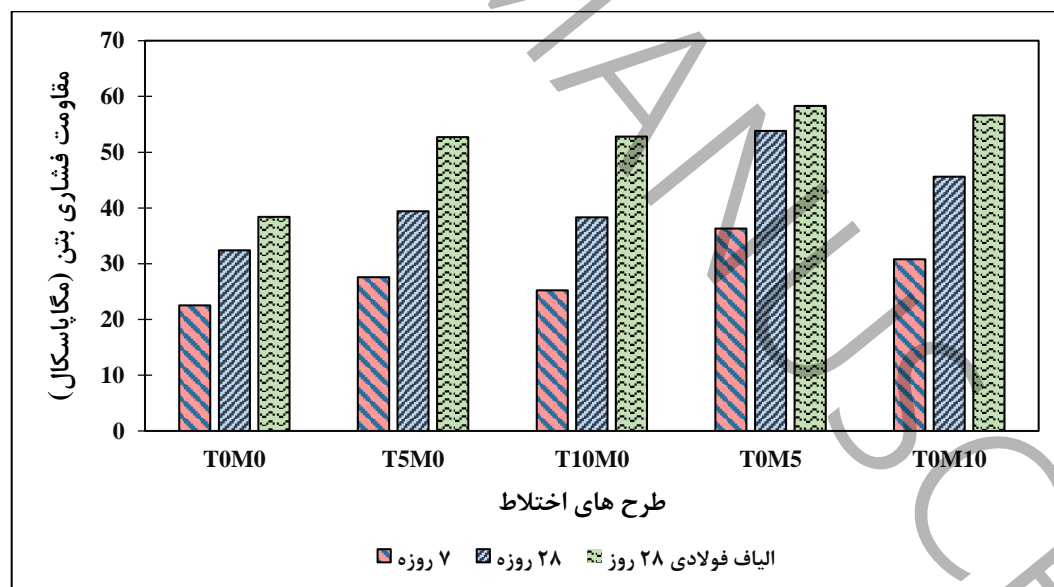
شکل ۴- نمونه مکعبی قرار گرفته شده در دستگاه جک بتن شکن

Figure 4. Cubic sample placed in the concrete breaker jack

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای سنین ۷ و ۲۸ روز در شکل ۶، مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری با ۵ درصد جایگزینی باطله مس با سیمان، در سن ۷ روز، $27/6$ مگاپاسکال و با ۱۰ درصد جایگزینی، $25/2$ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. این اعداد در سن ۲۸ روز، به ترتیب $39/4$ و $38/3$ مگاپاسکال تعیین شدند. بنابراین، در سنین ۷ و ۲۸ روز، جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد باطله مس به جای سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد (مقاومت فشاری نمونه شاهد، در سنین ۷ و ۲۸ روز، به ترتیب $22/5$ و

۳۲/۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده بود). افزایش مقاومت فشاری در صورت استفاده از باطله مس در سیمان، می‌تواند به حالت پوزولانی و ریز دانه بودن باطله مس مربوط باشد. با اضافه کردن ۱۰ درصد باطله مس به جای سیمان، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه شاهد گزارش شد، اما در مقایسه با ۵ درصد جایگزینی، حدود ۲/۸ درصد کاهش مقاومت مشاهده شد. انتظار می‌رود جایگزینی درصدهای بالاتری از باطله مس با سیمان، کاهش بیشتری از مقاومت فشاری را نتیجه دهد. دلیل کاهش مقاومت فشاری در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس به تنهایی نسبت به ۵ درصد، تولید ترک‌های ریز در بین ذرات سیمان است. ضمناً این اعداد بیانگر این مطلب است که تفاوت معناداری در مقاومت فشاری بتن بین نمونه حاوی ۵ درصد و ۱۰ درصد باطله مس وجود ندارد و در این صورت مقدار قابل توجهی از وزن بتن (۱۰ درصد) می‌تواند با باطله مس جایگزین شود.

همان طور که در شکل ۶، مشاهده می‌شود، باطله مس نسبت به سیمان، حالت پوزولانی بهتری دارد، اما با مقایسه باطله مس با میکروسیلیس، که یک ماده پوزولانی دیگر است، مقدار مقاومت فشاری کمتری برای باطله مس اندازه‌گیری شد. در این شرایط، برای افزایش دادن مقاومت فشاری بتن تا حد مقاومت فشاری آن با استفاده از میکروسیلیس، از الیاف فولادی استفاده شد. با استفاده از ۵ درصد باطله مس به همراه ۰/۰۶ درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن به ۵۲/۷ مگاپاسکال رسید که نسبت به حالت بدون الیاف (۳۹/۴ مگاپاسکال)، ۳۳/۷۶ درصد افزایش مقاومت مشاهده شد. همچنین، با استفاده از ۱۰ درصد باطله مس به جای سیمان به همراه ۰/۰۶ درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن به ۵۲/۸ مگاپاسکال رسید که نسبت به حالت بدون الیاف (۳۸/۳ مگاپاسکال)، ۳۷/۸۶ درصد بیشتر شده است. دلیل افزایش مقاومت فشاری در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس به همراه الیاف فولادی نسبت به ۵ درصد باطله مس همراه با الیاف فولادی، جذب و کنترل ترک‌ها توسط الیاف فولادی است. عبارت دیگر، نقش الیاف فولادی در این شرایط با افزایش درصد باطله مس، تقویت و پایدارسازی ساختار بتن است. الیاف فولادی، باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه می‌شوند. در مجموع همانطور که از نمودار مشاهده می‌شود، در مورد مقاومت فشاری، اثر استفاده از الیاف فولادی همراه با این باطله‌ها، تقریباً مشابه اثر استفاده از میکروسیلیس در بتن است (۵۲/۷ برای استفاده همزمان از الیاف فولادی و باطله در مقابل ۵۳/۸ برای استفاده از میکروسیلیس). بنابراین، امکان جایگزینی میکروسیلیس با باطله مس به همراه الیاف فولادی با اثر مشابه وجود دارد.



شکل ۶- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روز

Figure 6. The results of compressive strength test of concrete at the age of 7 and 28 days

نتیجه تحقیق درب‌هنری^۱ و موسوی^۲ [۱۲]، مشابه با تحقیق حاضر بود. بدین معنی که افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد، در ۱۰ درصد جایگزینی مشاهده شد و پس از آن، با افزایش درصد جایگزینی، شاهد کاهش مقاومت بودند. دلیل افزایش مقاومت در تحقیق درب‌هنری و موسوی، نقش مؤثر باطله مس بعنوان یک پوزولان عنوان شد.

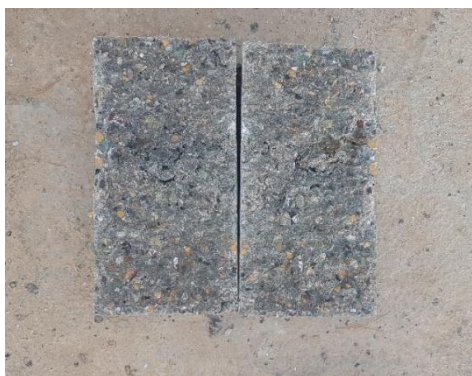
۲-۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی

با هدف بررسی تأثیر جایگزینی سیمان با باطله مس بر مقاومت کششی بتن انجام شده است. برای این منظور، از پنج طرح مختلف اختلاط با درصدهای متفاوت از باطله مس برای انجام آزمایش مقاومت کششی استفاده شد که در جدول ۱۰ بطور کامل ذکر شده است. در این آزمایش‌ها، از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها پس از ساخت، در آب قرار گرفتند تا به سن عمل‌آوری برسند. بعد از ۷ و ۲۸ روز، نمونه‌ها از آب خارج شده و آزمایش مقاومت کششی بر روی آن‌ها صورت گرفت (شکل‌های ۷ تا ۹). نتایج حاصل از آزمایش‌ها ثبت و تحلیل شد (شکل ۱۰) و تأثیر باطله مس بر مقاومت کششی بتن مورد بحث قرار گرفت.



شکل ۷- قرارگیری افقی نمونه استوانه‌ای درون دستگاه برای تعیین مقاومت کششی

Figure 7. Horizontal positioning of the cylindrical sample inside the machine to determine the tensile strength



شکل ۹- نمونه شکسته شده حاصل از آزمایش تعیین مقاومت کششی

Figure 9. The broken sample resulting from the test to determine the tensile strength

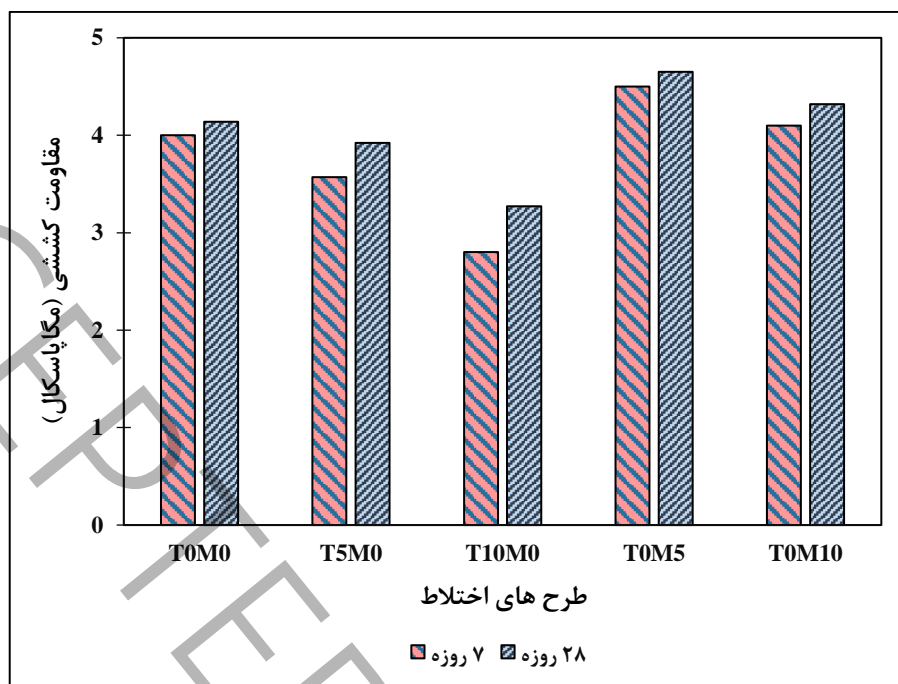


شکل ۸- نحوه شکست نمونه در زیر دستگاه برای تعیین مقاومت کششی

Figure 8. How to break the sample under the machine to determine the tensile strength

¹ Darbehonari

² Mousavi



شکل ۱۰- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز
Figure 10. The results of the tensile strength test at the ages of 7 and 28 days

شکل ۱۰، نشان می‌دهد که مقاومت کششی در سن ۷ روز، برای ۵ درصد جایگزینی باطله مس با سیمان، ۳/۵۷ مگاپاسکال و برای ۱۰ درصد جایگزینی، ۳/۲۷ مگاپاسکال بود. این اعداد برای سن ۲۸ روز، به ترتیب ۳/۹۲ و ۳/۲۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. بنابراین، جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد از باطله مس در ترکیب سیمان، باعث کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شد (مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه برای نمونه شاهد، به ترتیب ۳/۵۷ و ۴/۵ مگاپاسکال بود). دلیل این امر، می‌تواند به کمبود مواد سیمانی که نقش چسب را در ترکیب دارند و افزایش منافذ در طول استوانه مرتبط باشد، بطوریکه، منافذ بیشتر باعث کاهش چسبندگی می‌گردد. با جایگزین کردن ۱۰ درصد باطله مس در ترکیب سیمان، کاهش بیشتری در مقاومت کششی نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده شد، بطوریکه، مقاومت کششی، نسبت به ۵ درصد جایگزینی با سیمان، ۱۶/۵۸ درصد کاهش پیدا کرد. می‌توان انتظار داشت که با جایگزینی درصدهای بالاتری از باطله مس در ترکیب سیمان، کاهش بیشتری در مقاومت کششی مشاهده شود. همچنین، در مقایسه با میکروسلیس، استفاده از باطله مس در ترکیب سیمان، کاهش بیشتر مقاومت کششی را نتیجه داد (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که حتی در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس در ترکیب بتن و کاهش مقدار مقاومت کششی بتن در مقایسه با نمونه شاهد، باز هم مقدار مقاومت کششی بتن حاصل، عدد قابل قبولی است.

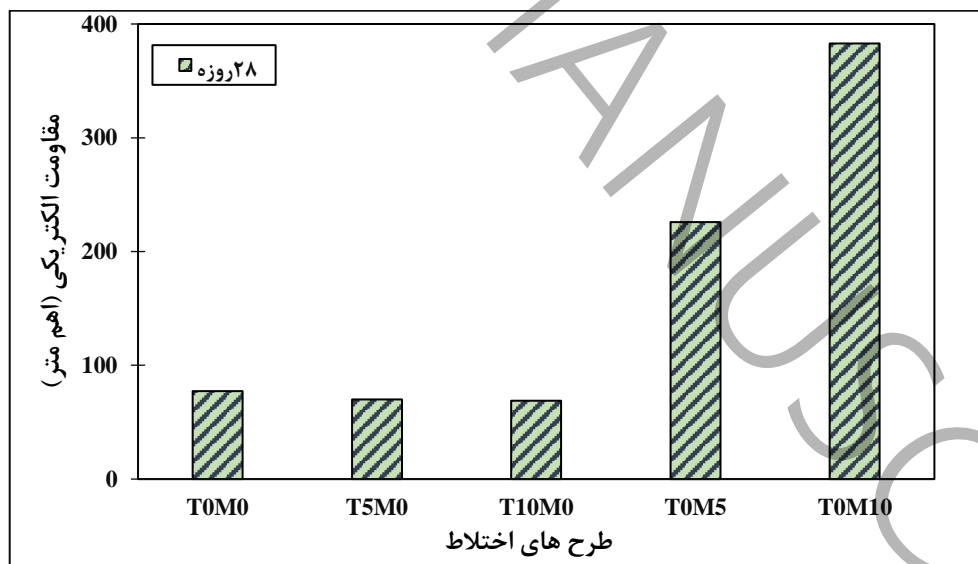
اگر از باطله مس به همراه الیاف فولادی استفاده می‌شد، بنظر می‌رسید که مقاومت کششی افزایش یابد. اما به دلیل اینکه در هنگام بتن‌ریزی از میل‌گرد استفاده می‌شود و این کار، مقاومت کششی را افزایش می‌دهد، بنابراین، نیازی به بررسی این مطلب نبود. آگبولا^۱ و آدامو ایدی^۲ [۳۲]، که در تحقیق خود، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و جایگزینی تا ۲۰ درصد پودر شیشه به جای سیمان در تهیه بتن را مورد بررسی قرار دادند، افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد را در ۱۰ درصد جایگزینی مشاهده کردند. با افزایش درصد جایگزینی به بیش از ۱۰ درصد، کاهش بیشتری در مقاومت کششی ثبت شد. در این تحقیق، دلیل کاهش مقاومت کششی با افزایش دادن درصد جایگزینی باطله مس به بیش از ۱۰ درصد در ترکیب سیمان، قابلیت کمتر تراکم‌پذیری و قالب‌گیری پودر شیشه، و در نتیجه، حضور حباب‌های هوا و خلل و فرج داخلی نمونه بتن بیان شد.

۳-۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی

¹ Agboola

² Adamu Idi

مقاومت الکتریکی یکی از مشخصه‌های بتن است که نشان دهنده برخی از خواص مهم آن از جمله نفوذ پذیری و جذب آب بتن است. مقاومت الکتریکی بتن به توانایی و مقاومت بتن برای انتقال یون‌های باردار گفته می‌شود [۳۳]. دوام و مقاومت الکتریکی بتن، به مقاومت آن نسبت به قرار گرفتن در محیط‌های سخت و در برابر پدیده‌های جوی، مواد شیمیایی، سایش یا هرگونه فرسایش دیگری به منظور حفظ فرم اصلی، کیفیت و قابلیت استفاده بتن، اشاره دارد [۳۴]. تعیین مقاومت الکتریکی بتن برای اهداف مختلفی کاربرد دارد که یکی از آن‌ها، شناسایی مشخصات اولیه بتن تازه می‌باشد. هنگامی که بتن تازه، تنظیم و سخت می‌شود، ناپیوستگی منافذ مویرگی منجر به افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود. از آنجا که جریان الکتریکی توسط یون‌های باردار به صورت محلول وارد منافذ بتن شده و منتقل می‌شوند، این شاخص، معیار خوبی برای سنجش ساختارهای منافذ بتن است. تشکیل ساختار منافذ در سنین اولیه بتن می‌تواند ماندگاری طولانی مدت بتن را ایجاد کند [۳۵]. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن، از نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متری استفاده شده است که نتایج مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل، کمترین مقدار مقاومت الکتریکی، مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد باطله مس، و بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس بود که به ترتیب نسبت به نمونه شاهد، ۱۰ درصد کاهش و ۳۹۶ درصد افزایش در مقاومت الکتریکی را به همراه داشتند. اضافه کردن باطله مس به نمونه‌ها، باعث کاهش مقاومت الکتریکی گردید، که این امر ممکن است به دلیل افزایش تخلخل بوده باشد. البته لازم به ذکر است که حتی در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس در ترکیب بتن، باز هم مقدار مقاومت الکتریکی بتن عدد قابل قبولی است. در طرح اختلاط چهارم، با جایگزینی ۵ درصد میکروسیلیس به ترکیب سیمان (نسبت به نمونه شاهد)، مقاومت الکتریکی ۱۹۳ درصد افزایش یافت و در طرح اختلاط پنجم، با افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس به ترکیب سیمان (نسبت به نمونه شاهد)، ۳۹۶ درصد، افزایش مقاومت الکتریکی مشاهده شد، که این امر ممکن است به دلیل جذب آب کمتر میکروسیلیس و بهبود در ریزساختار بتن با اضافه کردن میکروسیلیس باشد. به عبارت دیگر، مخلوط بتن ساخته شده در این شرایط، دارای تخلخل کمتری نسبت به باطله مس خواهد بود. به هر حال نکته مثبت این است که استفاده از باطله مس ضمن کاهش مصرف سیمان، تاثیر معناداری بر مقاومت الکتریکی بتن و خواص مکانیکی مرتبط با آن ندارد.



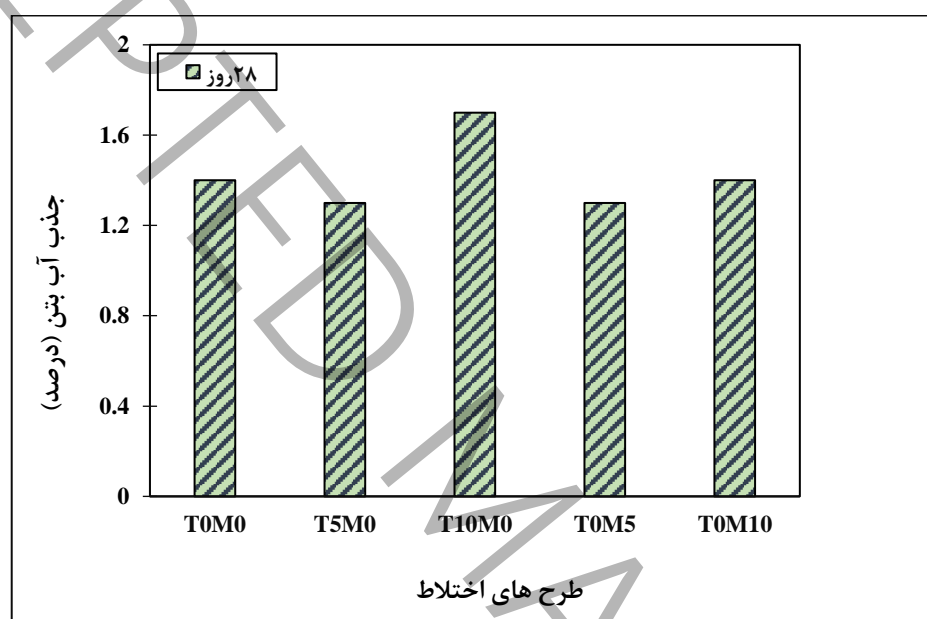
شکل ۱۱- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های حاصل از طرح‌های مختلف اختلاط

Figure 11. The results of the electrical resistance test on the samples obtained from different mixing designs

۲-۳-۴- نتایج حاصل از آزمایش جذب آب بتن

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری جذب آب بتن از نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر استفاده شد که نتایج ۲۸ روزه آن در شکل ۱۲، نشان داده شده است. کمترین درصد جذب آب (۱/۳ درصد)، در نمونه حاوی ۵ درصد باطله مس، و بیشترین مقدار جذب آب (۱/۷ درصد)، در نمونه حاوی ۱۰ درصد باطله مس مشاهده شد که نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب ۷/۱۴ درصد کاهش و ۲۱/۴۳

درصد افزایش داشت (مقدار جذب آب برای نمونه شاهد، ۱/۴ درصد بود). وقتی از ۵ درصد باطله مس استفاده شد، کاهش جذب آب رخ داد که این امر می‌تواند به دلیل بهبود ریز ساختار و در نتیجه، افزایش چگالی بتن باشد. با افزایش باطله مس به ۱۰ درصد، افزایش جذب آب اتفاق افتاد که دلیل آن را می‌توان به جذب آب ذرات باطله مس در درصدهای بالاتر مربوط دانست. صغیرشمس آبادی^۱ و عباسی دزفولی^۲ [۳۶]، تأثیر متاکائولین را به عنوان جایگزین سیمان در بتن ارزیابی کردند. در صورت استفاده از متاکائولین، کاهش میزان جذب آب در مقایسه با نمونه شاهد گزارش شد. پاچیده^۳ و قلهکی^۴ [۳۷]، نشان دادند که اضافه کردن پوزلان به بتن، باعث کاهش قابل توجه در جذب آب بتن می‌شود. در این تحقیق، دلیل کاهش جذب آب بتن، کاهش نفوذپذیری بتن در صورت استفاده از پوزلان‌های مختلف بیان شد. مشاهده می‌شود که در مورد جذب آب استفاده از باطله مس به مقدار ۵ درصد بعنوان یک جایگزین در مخلوط بتن، مشابه استفاده از میکرو سیلیس است (نمودار برای هر دو عدد ۱/۳ مگا پاسکال را نشان می‌دهد).



شکل ۱۲- نتایج آزمایش جذب آب بتن بر روی نمونه‌های حاصل از طرح‌های مختلف اختلاط

Figure 12. The results of concrete water absorption test on the samples obtained from different mixing designs

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای کمک به توسعه پایدار و کاهش آلودگی حاصل از تولید سیمان، از باطله مس به عنوان جایگزین جزئی سیمان استفاده شد. در این راستا، برای تعیین خواص مکانیکی بتن، آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی، و برای بررسی دوام آن، آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که با اضافه شدن ۵ و ۱۰ درصد باطله مس به ترکیب بتن، خواص حالت تازه بتن بهبود پیدا می‌کند؛ بنابراین، افزودن این باطله به بتن باعث می‌شود در مقابل سایش سطح مقاوم‌تر باشد. با اضافه کردن باطله مس به ترکیب بتن، مقاومت فشاری آن نسبت به نمونه شاهد بهبود پیدا کرد. همچنین، ترکیب الیاف فولادی با باطله مس، سبب افزایش بیشتر مقاومت فشاری شد. با افزایش درصد باطله مس، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافت؛ البته حتی در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس در ترکیب بتن، باز هم مقدار مقاومت کششی بتن، عدد قابل قبولی است. استفاده از باطله مس به میزان ۵ درصد در ترکیب سیمان، باعث کاهش جذب آب بتن شد، اما با افزایش این میزان به ۱۰ درصد، افزایش چشمگیری در جذب آب مشاهده شد. مقاومت الکتریکی با اضافه کردن باطله مس به

¹ Saghirshams abadi

² Abbasi Dezfuli

³ Pachideh

⁴ Golehki

ترکیب سیمان، کاهش پیدا کرد. البته حتی در صورت استفاده از ۱۰ درصد باطله مس در ترکیب بتن، باز هم مقدار مقاومت الکتریکی بتن عدد قابل قبولی است.

بنابراین، نتایج تحقیق نشان داد که باطله مس به عنوان یک جایگزین مناسب و پایدار برای جایگزینی جزئی سیمان در بتن قابل استفاده است. این امر، یک گام مهم در راستای توسعه پایدار صنعت ساخت و ساز محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این تحقیق مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولین معدن مس چهل کوره که در پیشبرد این تحقیق همکاری داشته‌اند، بیان می‌دارد.

فهرست علائم

نشانه	علامت
وزن خشک مصالح درشت دانه	A ₂
وزن نمونه اشباع با سطح خشک	B ₂
وزن نمونه اشباع در آب	C ₂
میکروسیلیس	M
باطله مس	T
وزن خشک شده نمونه در آزمایش جذب آب	W _k
وزن اشباع نمونه در آزمایش جذب آب بتن	W _s

فهرست منابع

- [1] M. Mostaghelchi, R. Zahiri, Management of mineral tailings, solutions for control, reduction and processing of mineral tailings, 4th Conference of Iran's Economic Geology Association, (2013). (In Persian)
- [2] G. L. Bernd, Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes, Elements, 7(6) (2013) 405-410.
- [3] M. Davoudi Fard, G. Farghani, Evaluation of the environmental effects of mineral tailings, 30th Earth Sciences Conference, (2019). (In Persian)
- [4] B. Geoffrey, Mine Waste: A Brief Overview of Origins, Quantities, and Methods of Storage, Waste, A Handbook for Management, (2011) 77-88.
- [5] F.A. de Carvalho, J.N. Nobre, R.P. Cambraia, A.C. Silva, J.D. Fabris, A.B. dos Reis, B.V. Prat, Quartz Mining Waste for Concrete Production: Environment and Public Health, Sustainability, 14(1) (2021) 389.
- [6] R. Ince, Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes, Engineering Fracture Mechanics, 82 (2012) 100-114.
- [7] A. Ebadipour, S. Ebrahimi, Effect of mineral tailings as a substitute for cement on concrete strength, Iran's National Environmental Research Conference, (2013). (In Persian)
- [8] C. Meyer, The greening of the concrete industry, Cement and Concrete Composites, 31(8) (2009) 601-605.
- [9] R. K. Dhir, Z. Fan, C. Limbachiya, Use of Copper Slag as Concrete Sand, Sustainable Construction Materials: Copper Slag, 31(4) (2017) 87-163.
- [10] B. Rezaei, Investigation of the possibility of recovering copper from the tailings of Sarcheshmeh copper processing plant, Tehran University, 34(1) (2000) 79-85. (In Persian)
- [11] S. T. Blessen, R.C. G. Alok Damare, Strength and durability characteristics of copper tailing concrete, Construction and Building Materials, 48 (2013) 894-900.
- [12] A. Darb Honary, Laboratory study of the effect of copper mine tailings on the mechanical properties of concrete, National Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning and Horizons of Islamic Art in the Declaration of the Second Step of the Revolution, (2021). (In Persian)
- [13] H. Abdollahpour, A. Darb Honary, Laboratory investigation of mortar resistance by replacing cement with copper mining tailings, 8th National Conference of Applied Researches in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, (2021). (In Persian)
- [14] J. Esmaili, H. Aslani, Investigation of the effect of copper mine tailings on the stress-strain behavior of encased concrete, Civil and Environmental Engineering, 51(2) (2021) 11-19. (In Persian)
- [15] B. G. Ahad, J. Ahmad, N. Hamidreza, Clinkerisation of copper tailings to replace Portland cement in concrete construction, Journal of Building Engineering, 51 (2022) 104275.

- [16]. X. Ruosong, G. Rui, L. Zhishuncheng, Q. Guangfei, Z. Yingjie, X. Youxiao, Z. Yingda, L. Ziying, Synthesis and influencing factors of high-performance concrete based on copper tailings for efficient solidification of heavy metals, *Journal of Environmental Management*, 325(1) (2023) 116469.
- [17]. M.H. Nabawi, An introduction to the geology of Iran. Tehran: Geological Organization of the country, (1976). (In Persian)
- [18]. D. Jan, A. Uliasz-Bochenczyk, M. Eugeniusz, CO₂ emissions from Polish cement industry, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(4) (2010) 583-588.
- [19]. R. Rehan, M. Nehdi, Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry, *Environmental Science & Policy*, 8(2) (2005) 105-114.
- [20]. G. Ellis, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, *Cement and Concrete Research*, 34(9) (2004) 1489-1498.
- [21]. D.J. Flower, J.G. Sanjayan, Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5) (2007) 282-288.
- [22]. M. Glavind, C. Munch-Petersen Ravindra, K. Dhir, D. Thomas Dyer, Green Concrete – A Life Cycle Approach, *Sustainable Concrete Construction*, 5 (2002).
- [23]. ASTM C33-Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, (2010).
- [24]. ASTM C188-Density of Hydraulic Cement, (2010).
- [25]. N. Soliman, Effect of using Marble Powder in Concrete Mixes on the Behavior and Strength of R.C. Slabs, *Materials Science Engineering*, 3(5) (2013).
- [26]. L. Robert, F. Per, Microsilica as an Addition, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition)*, (2019) 509-535.
- [27]. British Standards Institution, BS 1881 Part 124, Testing Concrete Methods for Analysis of Hardnesd ConCrete, (2009).
- [28]. ASTM Standard C 496/C, Plitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (2010).
- [29]. Bureau of Compilation and Promotion of National Building Regulations, "9th Topic: Concrete Buildings", 5th Edition, Tehran: Ministry of Roads and Urban Development, (2019). (In Persian)
- [30]. BS 1881-108 Methods of testing concrete. Method for making test cubes from fresh concrete (AMD 6105) (AMD 9074) (1983).
- [31]. BS 1881-110 Methods of testing concrete. Methods for making test cylinders from fresh concrete (AMD 6103) (1983).
- [32]. A.S. Abdulazeez, M.A. Idi, M.A. Kolawole, B. Hamza, Effect of waste glass powder as a pozzolanic material in concrete production, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(2) (2020) 589-594.
- [33]. P. Azarsa, R. Gupta, Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Advances in Materials Science and Engineering*, (1) (2017) 1-30.
- [34]. J. F. Lataste, Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures, *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, 2(1) (2010) 243-275.
- [35]. P.A.M. Basheer, P.R.V. Gilleece, A.E. Long, W.J. Mc Carter, Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration, *Cement and Concrete Composites*, 24(5) (2002) 437-449.
- [36]. Gh. Saghiri Shamsabadi, A.K. Abbasi Dezfouli, Investigation of some effects of using metakaolin as pozzolan in concrete, *Structure– Earthquake Analysis*, 13(1) (2015) 57-66. (In Persian)
- [37]. Q. Pachideh, M. Gholhaki, A. Mushtaq, Effect of adding different pozzolans on mechanical properties and water absorption of porous concrete pavement, *Transportation Journal*, 19(3) (2022) 51-66. (In Persian)

The use of copper tailing of mineral processing plant in the preparation of concrete in order to prevent environmental pollution

ABSTRACT

Copper tailing is the by-product of copper processing plants, and due to their large volume and physical and chemical characteristics, they bring many environmental and economic problems. The recent research examines the effect of using mineral processing tailings of copper as a substitute for cement on the mechanical properties and durability of concrete. For this purpose, five mixing plans with different percentages of copper tailings from Chehel-Koreh mine were used in concrete production. This tail contains Si, Fe, Mg and Al. 105 samples including 75 cubic samples with dimensions of 10×10×10 cm and 30 cylindrical samples with dimensions of 15×30 cm were prepared. The results showed that using 5% copper tail improve the compressive strength compared to the control sample. If the copper tail increased to 10%, a decrease in the compressive strength was observed, and despite this decrease, the compressive strength was still higher than the control sample. By using copper tailings, there was a slight decrease in tensile strength. Electrical resistance and water absorption tests at the age of 28 days showed that using copper tail cause a slight decrease in electrical resistance and water absorption. In addition, adding 5 to 10 percent of copper tailings instead of cement will reduce concrete production costs and energy consumption with less cement consumption, reduce damage to the environment with less cement production and optimal use of copper tailings. Therefore, copper tailings can be used as a suitable alternative for partial replacement of cement in concrete.

KEYWORDS

Mineral tailings, Chehel-Koreh copper mine, construction materials, environment, concrete.