

مطالعه ویژگی‌های مکانیکی بتن حاوی مواد باطله معدن مس

جمشید اسماعیلی *

دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

حسین اصلانی

دانشجوی دوره دکترای عمران، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

مس یکی از پرمصرف‌ترین عناصر فلزی است که از دیرباز در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در فرآیند جداسازی محصولات ارزشمند مس از سنگ معدن، ضایعات معدن به‌عنوان مواد باطله تولید و به محل دپو انتقال می‌یابد. دفع مناسب و نگهداری این مواد از نظر زیست‌محیطی یک چالش بزرگ بوده و هزینه زیادی بر شرکت‌های تولیدکننده به همراه دارد. مطالعات متعددی در سراسر جهان برای به‌کارگیری این مواد در تولید مصالح ساختمان و استفاده از آن به‌عنوان سنگ‌دانه ریز یا جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی انجام شده است. در این تحقیق مواد باطله معدن مس سونگون به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد مواد باطله انجام گرفته است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خمیرسیمان حاوی این مواد تهیه و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج آزمایش نمونه‌های ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز نشان می‌دهد که به‌کارگیری این مواد به‌عنوان جایگزین سیمان می‌تواند منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی بتن می‌گردد. تحلیل آماری داده‌ها حاکی از معنی‌دار بودن استفاده از این مواد است. بررسی اثرات زیست‌محیطی مخلوط تولیدشده حاکی از کاهش مخاطرات زیست‌محیطی است.

واژه‌های کلیدی: مواد باطله معدن مس، خصوصیات مکانیکی، تحلیل آماری، اثرات زیست‌محیطی.

* نویسنده مسئول: J-Esmaeili@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

جهانی است. استفاده از این مواد به عنوان تثبیت کننده خاک ریزها، مواد بستر جاده، کانال، استخر و مخازن، محصول تحقیقات Sultan در سال ۱۹۷۹ و Kundu و همکاران در سال ۲۰۱۶ است [۱۰، ۱۱].

بر اساس گزارش Qiu و همکاران در سال ۲۰۱۱، مصرف این مواد منجر به کاهش مصرف زغال سنگ و نیز انرژی لازم در طول پخت کلینکر می شود [۱۲]. تحقیقات Onuaguluchi و همکار در سال ۲۰۱۲ نشان می دهد که استفاده از این مواد به عنوان مواد مضاف در خمیرسیمان، افزایش جزئی زمان گیرش شده و اسلامپ بتن را کاهش می دهد [۱۳]. مطابق با نتایج این محققان، مقدار ۵ درصد مواد باطله معدن مس آبدار می تواند منجر به بهبود در مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه های بتنی گردد.

تحقیق Thomas و همکاران در سال ۲۰۱۳، ساخت نمونه بتن با مواد باطله معدن مس به عنوان جایگزین سنگ دانه ریز رودخانه طبیعی با نسبت آب به سیمان مختلف بوده که نتایج گزارش آن ها بهبود مقاومت فشاری است [۹]. Huang و همکاران گزارش کرده اند که در ساخت بتن سبک هوادار می تواند از مواد باطله معدن مس و سرباره استفاده نمود [۱۴]. نتایج آزمایش های آن ها نشان می دهد که به کارگیری این مواد سبب کاهش تولید گازهای گلخانه ای شده و بتن تولیدی سازگار با محیط زیست است.

امروزه تولید بتن سبز و به کارگیری آن در صنعت ساخت و ساز از نظر زیست محیطی اهمیت بسزایی دارد. در این راستا، استفاده از مواد زائد به عنوان جایگزین یکی از اجزاء ترکیب دهنده بتن (سیمان) در تولید بتن رو به افزایش است. در این تحقیق استفاده از مواد باطله معدن مس به عنوان جایگزین سیمان در نمونه های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- اطلاعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع یک کارخانه سیمان صوفیان استفاده شده است. مواد باطله معدن مس سونگون به صورت مواد جامد آبدار از مجتمع مس سونگون تهیه گردیده است. فرآیند آماده سازی مواد باطله برای آزمایش به صورت شکل ۱ انجام گردید.

توسعه صنعت ساخت و ساز در کشورهای مختلف نیاز به تولید سیمان به عنوان مصالح مهم در تولید بتن را به همراه دارد. امروزه تولید این مصالح با ارزش در حال افزایش بوده و انرژی زیادی برای تولید آن صرف می گردد. از طرف دیگر، در فرآیند تولید آن حدود ۵ الی ۷ درصد گازهای گلخانه ای وارد اتمسفر می شود [۱]. توقف و یا تقلیل آلاینده های زیست محیطی یک چالش بزرگ جهانی است که از یک طرف نباید منجر به توقف پیشرفت و توسعه صنعت ساخت و ساز شده و از طرف دیگر، اثرات زیست محیطی محصولات تولید شده بایستی کاهش یابد. در این راستا، استفاده از مواد مکمل مختلف در بتنی مصرفی می تواند یک روش مناسب برای حل این معضل جهانی باشد [۲-۴]. به کارگیری مواد زائد به عنوان جایگزین سیمان در تولید بتن می تواند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و باعث تقلیل آلاینده های زیست محیطی شده و کمک شایانی به حفظ محیط زیست نماید [۵، ۶].

مس یکی از پر مصرف ترین عناصر فلزی است که از دیرباز در صنایع مختلف در سرتاسر جهان استفاده می شود. در فرآیند جداسازی محصولات ارزشمند مس از سنگ معدن، پسماند یا ضایعات معدن به عنوان مواد باطله تولید و به محل دپو انتقال می یابد. دفع مناسب و نگهداری این مواد از نظر زیست محیطی یک چالش بزرگ بوده و هزینه زیادی بر شرکت تولید کننده به همراه دارد. با افزایش تولید مس، حجم مواد باطله معدنی نیز افزایش پیدا می کند. ذخیره سازی و نگهداری این مواد هزینه زیادی بر شرکت تولید کننده اعمال نموده و علاوه بر آن منبع بزرگ آلوده کننده محیط زیست به حساب می آید. در سال ۲۰۱۶ حدود ۲۰ میلیون تن مس در جهان تولید شده که حجم مواد باطله آن بالغ بر ۲/۵۶ بیلیون تن است [۷، ۸]. مقایسه ویژگی شیمیایی مواد باطله معدن مس مورد مطالعه از نظر سه عنصر اصلی سیلیس، آلومینت و اکسید آهن بر اساس استاندارد ASTM C618 نشان می دهد که مجموع این عناصر برابر ۸۱/۸۸ درصد است. از این رو، این مواد را می توان از جمله کلاس N (خام) و پوزولان طبیعی به حساب آورد. بنابراین مواد باطله معدن مس با داشتن پوزولان با کیفیت بالا دارای پتانسیل مناسب برای استفاده در تولید فرآورده های پایه سیمانی است [۹].

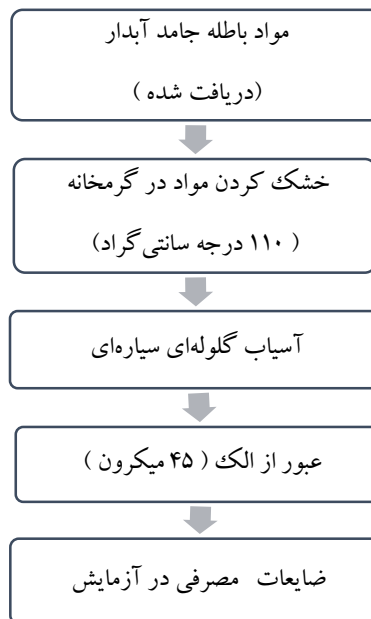
پژوهش های انجام شده در به کارگیری مواد باطله معدن مس در تولید مصالح ساختمانی بیانگر تلاش محققان برای حل این معضل

مصالح سنگی با بزرگ‌ترین قطر سنگ‌دانه ۱۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان درشت‌دانه در بتن مورد استفاده قرار گرفته است. ماسه رودخانه‌ای معدن سرام تبریز در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌های آزمایش و مشخصات مخلوط‌های بررسی شده به ترتیب در جداول شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است.

فوق روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق بر پایه نفتالین بوده و دارای میزان مواد جامد، وزن مخصوص، رنگ، PH و حالت فیزیکی به ترتیب ۲۸ درصد، ۱/۱۸ گرم در سانتی‌متر مکعب، محلول قهوه‌ای سیاه، ۷/۵ و مایع است. در ساخت نمونه‌های بتنی از آب شرب شهر تبریز استفاده شده است.

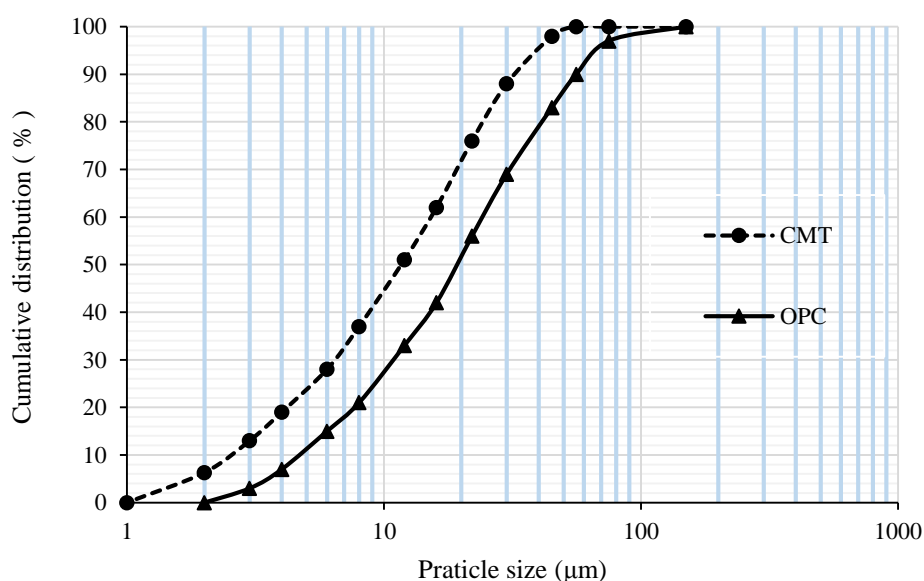
۲-۲- نمونه‌ها و آزمایش‌ها

بعد از آماده‌سازی مصالح مورد نیاز با مشخصات و طرح اختلاط فوق‌الذکر، نمونه‌های آزمایشگاهی طبق جدول شماره ۴ ساخته شد. میانگین سه نمونه ساخته شده به‌عنوان نتایج آزمون گزارش شده است. همه نمونه‌ها بعد از بتن‌ریزی در داخل قالب‌ها با نایلون پوشش داده شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محیط آزمایشگاه، قالب برداری شده و تا روز آزمایش در داخل مخزن آب حاوی آهک اشباع شده در دمای آزمایشگاه نگهداری گردیده‌اند.



شکل ۱- فرآیند آماده‌سازی مواد باطله معدن مس

فرآیند خشک کردن مواد در داخل گرمخانه با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۸ ساعت انجام گردید. برای آسیاب نمودن مواد باطله، از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای استفاده گردید تا تقریباً ۹۸ درصد مواد از الک شماره ۳۲۵ (۴۵ میکرون) عبور نماید. نمودار دانه‌بندی سیمان و مواد باطله مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان (OPC) و مواد باطله معدن مس (CMT) مصرفی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سیمان و مواد باطله معدن مس

جدول ۱- مشخصات سیمان و مواد باطله مورد استفاده

ویژگی شیمیایی (%)		
سیمان	مواد باطله	
۲۱/۵۷	۶۳/۳	SiO ₂
۴/۶۵	۱۵/۲۹	Al ₂ O ₃
۳/۶۳	۳/۲۹	Fe ₂ O ₃
۶۳/۳۲	۵/۲۱	CaO
۲/۴	۳/۶۸	MgO
۲/۱۵	۱/۹۳	SO ₃
۰/۳۲	۰/۸۵	Na ₂ O
۰/۳۱	۲/۷۲	K ₂ O
-	۰/۰۳۵	CuO
۱/۲۳	۱/۸۳	LOI
-	۸۱/۸۸	SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃
ویژگی فیزیکی		
۳۱۵۰	۲۷۵۰	چگالی (kg/m ³)
۳۲۳۴	۵۷۷۶	نرمی (Cm ² /gr)

جدول ۲- مشخصات مخلوط‌های بررسی شده

سایز الک (mm)	ماسه (%)	سنگ‌دانه درشت (%)	سنگ‌دانه مخلوط (%)
۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵	۱۰۰	۷۵	۸۹/۲
۴/۷۵	۸۳/۷	۲۵	۵۷/۸
۲/۳۸	۵۵/۲	۰	۳۲/۴
۱/۱۹	۳۶/۸	۰	۲۱/۹
۰/۶	۲۵/۵	۰	۱۵/۳
۰/۳	۱۱/۱	۰	۸/۱
۰/۱۵	۱/۷	۰	۱/۰۱

جدول ۳- مشخصات مخلوط‌های بررسی شده

شماره مخلوط	مقدار سیمان مصرفی (kg / m ³)	مقدار مواد باطله (kg / m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی	سنگ‌دانه درشت (kg / m ³)	ماسه (kg / m ³)	فوق روان کننده (%)
A 1	۳۵۰	۰	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۰
A 2	۳۳۲/۵	۱۷/۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۲
A 3	۳۱۵	۳۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۵
A 4	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۸
A 5	۲۸۰	۷۰	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۸۱
A 6	۲۶۲/۵	۸۷/۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۸۵
A 7	۲۴۵	۱۰۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۸۸

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

استاندارد	اندازه قالب نمونه (میلی‌متر)	نوع قالب نمونه	نوع آزمایش
EN 12390-3	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعبی	مقاومت فشاری
ASTM C 496	۱۰۰×۲۰۰	استوانه‌ای	مقاومت کششی
ASTM C 469	۱۵۰×۳۰۰	استوانه‌ای	مدول الاستیسیته

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه کمترین افزایش را به خود اختصاص داده است. با افزایش سنین نمونه‌ها این افزایش در مقاومت فشاری قابل توجه بوده و در مدت یک سال نمونه A4 با ۱۵ درصد مواد باطله دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری است. رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌تواند به دلیل مشارکت و واکنش پوزولانی موجود در مواد باطله در مخلوط باشد.

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استون‌های به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C 496 در سنین ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز انجام گردید.

۵-۲- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

برای تعیین مدول الاستیسیته بتن از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر طبق شکل ۳ استفاده شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C469 در سن ۹۰ روزگی بتن انجام گرفت.

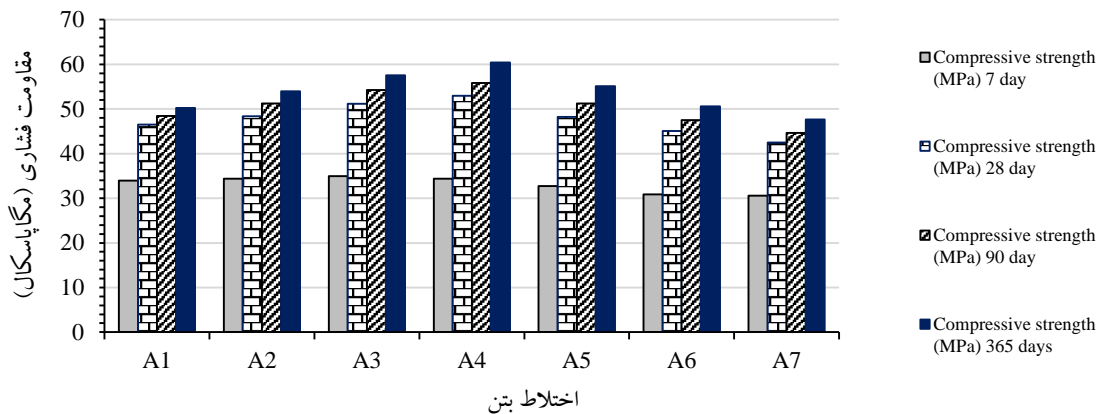
۳- نتایج آزمایش‌ها

۱-۳- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش شده در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز در جدول ۵ و شکل ۴ گزارش شده است.

جدول ۵- مقادیر ویژگی مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش

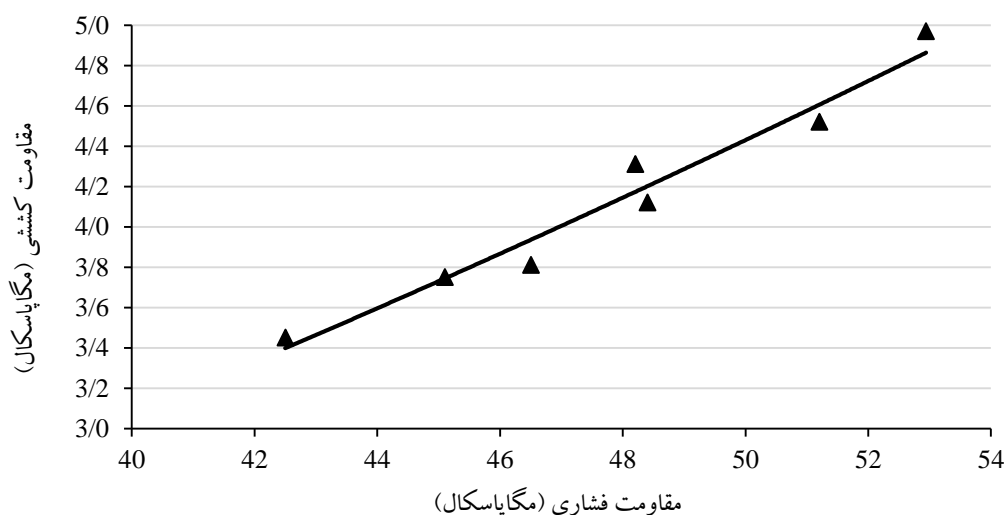
اختلاف بتن	مواد CMT %	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)				مقاومت کششی (مگاپاسکال)			مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال) ۹۰ روز
		۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز	۳۶۵ روز	۲۸ روز	۹۰ روز	۳۶۵ روز	
A1	۰	۳۳/۹۵	۴۶/۵۰	۴۸/۴۵	۵۰/۲۴	۳/۸۱	۳/۹۲	۴/۰۸	۳۲/۸۳
A2	۵	۳۳/۳۶	۴۸/۴۰	۵۱/۲۲	۵۳/۹۹	۴/۱۲	۴/۲۱	۴/۳۷	۳۴/۱۲
A3	۱۰	۳۴/۹۷	۵۱/۲۰	۵۴/۲۷	۵۷/۵۶	۴/۵۲	۴/۵۶	۴/۶۴	۳۵/۳۱
A4	۱۵	۳۴/۴۱	۵۲/۹۴	۵۵/۸۰	۶۰/۴۲	۴/۹۷	۵/۰۵	۵/۲۶	۳۶/۰۳
A5	۲۰	۳۲/۷۵	۴۸/۲۰	۵۱/۲۴	۵۵/۱۳	۴/۳۱	۴/۴۵	۴/۶۷	۳۴/۹۲
A6	۲۵	۳۰/۸۵	۴۵/۱۰	۴۷/۴۹	۶۲/۵۰	۳/۷۵	۳/۸۵	۴/۰۲	۳۲/۷۸
A7	۳۰	۳۰/۶۰	۴۲/۵۰	۴۴/۶۳	۴۷/۶۵	۳/۴۵	۳/۵۵	۳/۷۱	۳۲/۵۳



شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

نمونه تا ۳۶۵ روز، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس شکل ۵ که حاصل از نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های ۲۸ روز است، می‌توان معادله تجربی شماره ۱ را با ضریب تعیین ۰/۹۶ برای نمونه‌های بتنی حاوی مواد باطله پیشنهاد نمود. این معادله با ضریب تعیین بالا رابطه‌ی مناسبی را بین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها با پراکندگی کمتر برقرار می‌نماید. شایان ذکر است که اکثر متخصصین آمار، ضریب تعیین ۰/۹۰ یا بالاتر را برای یک مدل ریاضی قابل قبول در نظر می‌گیرند [۱۵].

$$f_{sp} = 0.0075 \times f'_{ck}{}^{1.6314} R^2 = 0.96 \quad (1)$$



شکل ۵- نمودار نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی نمونه ۲۸ روز

الاستیسیته نمونه‌های ۹۰ روزه، دارای افزایش متناسب با مقاومت فشاری است. همانند روند افزایشی مشاهده گردید که در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی مواد باطله تا ۱۵ درصد

۳-۳- مدول الاستیسیته

مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی دارای رابطه معنی دار هستند. در جدول ۵ می‌توان مشاهده نمود که مدول

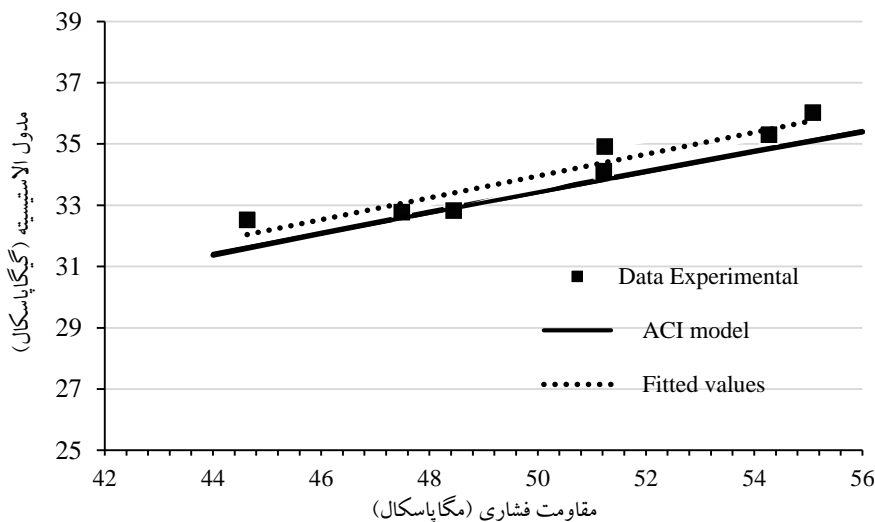
محصولات هیدراسیون در ساختار مخلوط از تصویربرداری الکترونی روبشی استفاده گردید. تصاویر میکروسکوپی خمیرسیمان مربوط به مخلوط کنترل و مخلوط حاوی ۱۵ درصد مواد باطله در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه دو تصویر نشان‌دهنده اثر مواد باطله معدن مس در تسریع واکنش‌های پوزولانی و ایجاد ماتریس متراکم‌تر و منسجم‌تر است. نمونه شکل ۸-ب ساختار متراکم‌تر و فشرده‌تر نمونه‌های حاوی مواد باطله را نسبت به نمونه شکل ۸-الف (مخلوط کنترل) نشان می‌دهد؛ بنابراین، به کارگیری مواد ریز و غنی از سیلیس مواد باطله منجر به کاهش میزان خلل و فرج شده و بلورهای سوزنی شکل اترینگایت و کریستال‌های بزرگ مونوسولفات هیدراته (Afm) و هیدروکسید کلسیم را تقلیل داده و با تشکیل ژل C-S-H، منجر به ایجاد ماتریس متراکم‌تر می‌گردد. این ماتریس منسجم باعث بهبود خصوصیات مکانیکی می‌شود.

جایگزین نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۶ مقادیر مدول الاستیسیته نمونه بتنی حاوی مواد باطله با مقادیر به‌دست‌آمده از مقررات ACI 363 مقایسه شده است. از شکل فوق‌الذکر و رگرسیون داده‌های حاصل از نتایج آزمایش می‌توان معادله تجربی شماره ۲ با ضریب تعیین $R^2 = 0.91$ را پیشنهاد نمود.

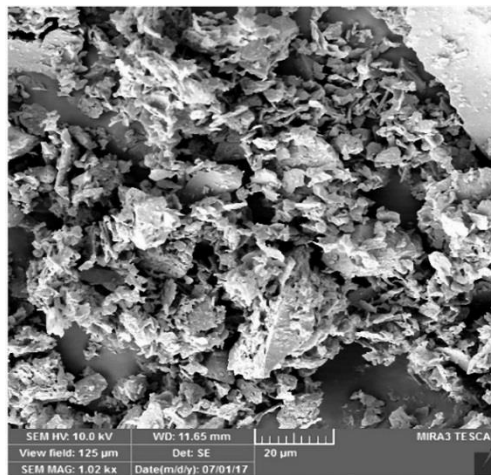
$$E_c = 4.7834 \times \sqrt{f_{ck}} \quad R^2 = 0.91 \quad (2)$$

۳-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی

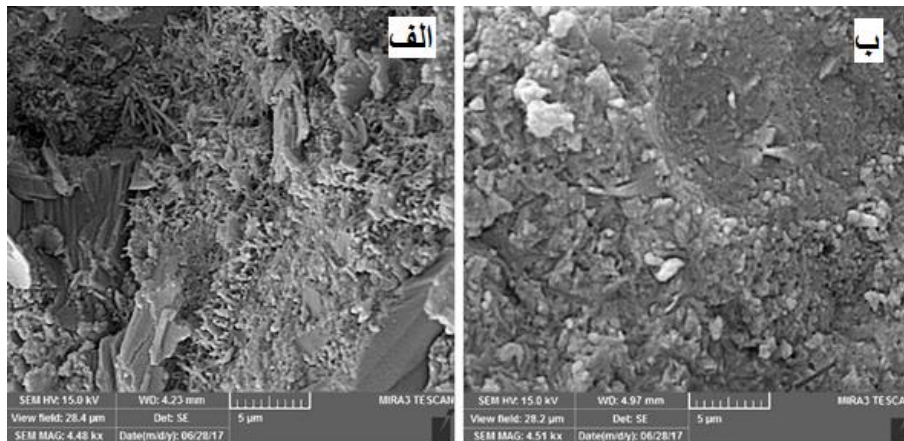
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر مواد باطله در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که ذرات مواد باطله حالت جامد، شکسته، نامنظم و زاویه‌دار داشته و ذرات ریز و نامنظم بر روی ذرات دیگر متصل شده است. به‌منظور بررسی اثرات ذرات مواد باطله بر بهبود ریزساختار، وضعیت تراکم و



شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای مدول الاستیسیته نمونه بتن با مدل ACI



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات مواد باطله



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی خمیر سیمانی الف. نمونه کنترل، ب. نمونه حاوی مواد باطله

وجود رابطه بین متغیر عامل‌ها و متغیر وابسته تأیید می‌گردد؛ بنابراین، تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتنی تحت تأثیر درصدهای مختلف مواد باطله جایگزین سیمان بوده و به کارگیری مواد باطله در مخلوط بر اساس آزمایش‌های انجام شده معنی‌دار است.

۳-۶- اثرات زیست‌محیطی

در این قسمت از تحقیق، نمونه‌های بتنی کنترل و همچنین نمونه‌های بتنی حاوی مواد باطله با درصدهای مختلف در یک مترمکعب مخلوط از نظر اثرات زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه بر اساس شش طبقه‌بندی: انرژی تجمعی مورد نیاز (CED)، پتانسیل گرم شدن کره زمین (GWP)، پتانسیل تخریب اوزون (ODP)، پتانسیل اسیدی شدن (AP)، پتانسیل اوتروفیکاسیون (EP) و پتانسیل ایجاد فتوشیمیایی اوزون (POCP) انجام گردید. مقادیر و ضرایب مورد نیاز برای هر کدام از مصالح بر اساس گزارش Müller و همکاران و استاندارد EN ISO 14040, EN ISO 14044 به عنوان منابع محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. همچنین مواد باطله به عنوان مواد زائد صنعتی در محاسبات منظور شده است. بر اساس نتایج حاصل و ارائه شده در شکل ۹ به کارگیری مواد باطله منجر به تقلیل اثرات زیست‌محیطی می‌شود. مقایسه نتایج مربوط به بتن حاوی ۱۵ درصد مواد باطله نسبت به بتن کنترل (۱۰۰ درصد سیمان) نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل کاهش در شش طبقه‌بندی مورد تحقیق متعلق به پتانسیل تخریب اوزون (ODP) و پتانسیل ایجاد فتوشیمیایی اوزون

۳-۵- تحلیل آماری داده‌ها

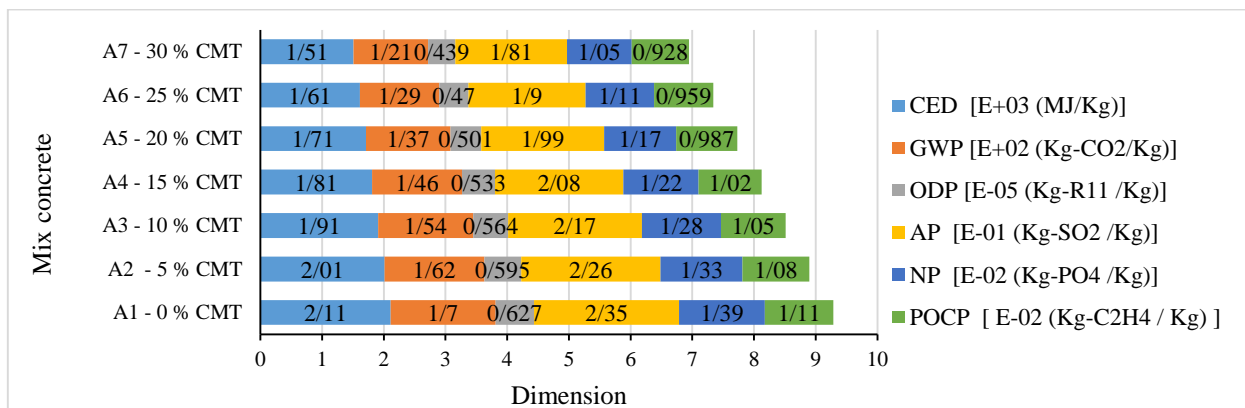
پارامترهای مهم تأثیرگذار بر ویژگی‌های مکانیکی بتن شامل نوع و مقدار سنگ‌دانه، سیمان، نرمی و مقدار مواد مکمل سیمانی جایگزین سیمان، روش عمل‌آوری و عمر نمونه‌ها است. در این راستا، اثرات نوع، نرمی و مقدار مواد مکمل سیمانی به عنوان جایگزین سیمان به عنوان یک متغیر می‌تواند پراکنندگی در نتایج آزمایش را ایجاد نماید. این پراکنندگی می‌تواند منجر به عدم پذیرش استفاده از مواد مکمل سیمانی در مخلوط شود که با استفاده از تحلیل آماری قابل بررسی است. در این مطالعه، برای تحلیل آماری داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام شده در مورد به کارگیری مواد باطله در مخلوط‌های بتنی از نرم‌افزار آماری SPSS و آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شده است. مقایسه تفاوت گروه‌ها از آزمون تعقیبی توکی (Tukey) صورت گرفته است. بر اساس علم آمار، داده‌های به دست آمده با مقادیر P (P-Value) کمتر از پنج درصد نشانگر معنی‌دار بودن سطح سیستم است. در مدل آنالیز آماری واریانس (ANOVA) یک‌طرفه استفاده شده در این تحلیل آماری، دو متغیر به نرم‌افزار آماری SPSS معرفی گردید. این دو متغیر، متغیر عامل (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته) و متغیر وابسته (مواد باطله تا ۳۰ درصد جایگزین سیمان) است. نتایج به دست آمده در جدول شماره ۶ گزارش شده است. مقدار P (P-Value) مندرج در ستون Sig جدول، برای هر یک از متغیر عامل‌ها کمتر از ۵ درصد است که فرضیه صفر را رد می‌کند. به عبارت دیگر، فرض

CED – Cumulative Energy Demand
 GWP – Global Warming Potential
 ODP – Ozone Depletion Potential
 AP – Acidification Potential
 EP – Eutrophication Potential
 POCP – Photochemical Ozone Creation Potential

(POCP) به ترتیب ۱۷/۶۴ درصد و ۸/۸۲ درصد است. نتایج حاصل در این بخش نشان می‌دهد که با افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط مواد باطله معدن مس، اثرات زیست‌محیطی بتن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

جدول ۶- نتایج تحلیل آماری داده‌های آزمایش‌های انجام شده

خواص		Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Sig.
مقاومت فشاری ۷ روز	PC-CMT system	۵۶/۸۳۸	۶	۹/۴۷۳	۱۱/۸۲۸	۰/۰۰۰
	Error	۱۱/۲۱۳	۱۴	۰/۸۰۱		
	Total	۶۸/۰۵۱	۲۰			
مقاومت فشاری ۲۸ روز	PC-CMT system	۲۲۶/۵۲۶	۶	۳۷/۷۵۴	۱۸/۳۳۵	۰/۰۰۰
	Error	۲۸/۸۲۸	۱۴	۲/۰۵۹		
	Total	۲۵۵/۳۵۴	۲۰			
مقاومت فشاری ۹۰ روز	PC-CMT system	۲۷۳/۲۵۲	۶	۴۵/۵۴۲	۱۶/۵۴۴	۰/۰۰۰
	Error	۳۸/۵۴۰	۱۴	۲/۷۵۳		
	Total	۳۱۱/۷۹۲	۲۰			
مقاومت فشاری ۳۶۵ روز	PC-CMT system	۳۶۰/۶۳۵	۶	۶۰/۱۰۶	۱۲/۱۷۰	۰/۰۰۰
	Error	۳۷/۹۵۵	۱۴	۲/۷۱۱		
	Total	۳۹۸/۵۹۰	۲۰			
مدول الاستیسیته ۹۰ روز	PC-CMT system	۳۴/۹۶۵	۶	۵/۸۲۷	۱۰/۱۰۳	۰/۰۰۰
	Error	۸/۰۷۵	۱۴	۰/۵۷۷		
	Total	۴۳/۰۴	۲۰			
مقاومت کششی ۲۸ روز	PC-CMT system	۴/۷۹۸	۶	۰/۸۰۰	۵/۴۷۷	۰/۰۰۴
	Error	۲/۰۴۴	۱۴	۰/۱۴۶		
	Total	۶/۸۴۲	۲۰			
مقاومت کششی ۳۶۵ روز	PC-CMT system	۴/۷۷۵	۶	۰/۷۹۶	۵/۷۹۱	۰/۰۰۳
	Error	۱/۹۲۴	۱۴	۰/۱۳۷		
	Total	۶/۶۹۹	۲۰			



شکل ۹- نمودار اثرات زیست‌محیطی یک مترمکعب بتن

Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002, 2002. Thomas Telford Publishing.

[6]. Kumar, A.A. Santhi, A. and G.M. “Ganesh, Strength and durability of green concrete”. *International Journal of Structural Engineering*, 6(1): 23-32, 2015.

[7]. Survey, U.G. O. S, and U.G. Survey, “Mineral Commodity Summaries, 2018”. Government Printing Office, 2018.

[8]. Gordon, R.B. “Production residues in copper technological cycles”. *Resources, Conservation and Recycling*, 36(2): 87-106, 2002.

[9]. Thomas, B.S. Damare, A. and Gupta, R. “Strength and durability characteristics of copper tailing concrete”. *Construction and Building Materials*, 48: 894-900, 2013.

[10]. Sultan, H.A. “Stabilized copper mill tailings for highway construction”. *Transportation research record*, (734), 1979.

[11]. Kundu, S. Aggarwal, A. Mazumdar, S. and Dutt, K.B. “Stabilization characteristics of copper mine tailings through its utilization as a partial substitute for cement in concrete: preliminary investigations”. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), p.227, 2016.

[12]. Qiu, G. Luo, Z. Shi, Z. and Ni, M. “Utilization of coal gangue and copper tailings as clay for cement clinker calcinations”. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 26(6), 1205-1210, 2011.

[13]. Onuaguluchi, O. and Eren, Ö. “Rheology, strength and durability properties of mortars containing copper tailings as a cement replacement material”. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(1): 19-31, 2013.

[14]. Huang, X.Y. Ni, W. Cui, W.H. Wang, Z.J. and Zhu, L.P. “Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag”. *Construction and Building Materials*, 27(1), 1-5, 2012.

[15]. Ostle, B. “Engineering statistics: the industrial experience”. Wadsworth Publishing Company, 1996.

[16]. Müller, H.S. Haist, M. and Vogel, M. “Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime”. *Construction and Building Materials*, 67: 321-337, 2014.

۴- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج به دست آمده، می توان اظهار داشت که سیلیس فعال موجود در مواد باطله معدن مس می تواند منجر به بهبود ویژگی های مکانیکی بتن (مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته) گردد. البته این بررسی نشان می دهد که می توان بر به کارگیری این مواد تا ۱۵ درصد و عملکرد مناسب آن تأکید داشت.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییر ساختار خمیر سیمانی حاوی مواد باطله را نشان می دهد. استفاده از این مواد می تواند بلورهای سوزنی شکل اترینگایت و کریستال های بزرگ مونوسولفات هیدراته (Afm) و هیدروکسید کلسیم مخلوط را کاهش داده و سبب تشکیل ژل C-S-H گردد.
- در بررسی آماری، داده های آزمایش های انجام شده مقدار σ_{ig} کمتر از پنج درصد است که باعث رد فرضیه صفر می شود. به عبارت دیگر، به کارگیری مواد باطله در مخلوط بتنی بر اساس آزمایش های انجام شده معنی دار است.
- مقایسه اثرات زیست محیطی بتن کنترل و بتن حاوی مواد باطله با درصد های مختلف در یک مترمکعب نشان می دهد که استفاده از این مواد می تواند مخاطرات زیست محیطی را کاهش دهد.

۵- مراجع

- [1]. Deja, J. Uliasz-Bochenczyk, A. and Mokrzycki, E. “CO2 emissions from Polish cement industry”. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4(4): 583-588, 2010.
- [2]. Rehan, R. and Nehdi, M. “Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry”. *Environmental Science & Policy*, 8(2): 105-114, 2005.
- [3]. Gartner, E. “Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements”. *Cement and Concrete research*, 34(9): 1489-1498, 2004.
- [4]. Flower, D.J. and Sanjayan, J.G. “Green house gas emissions due to concrete manufacture”. *The international Journal of life cycle assessment*, 12(5): p. 282, 2007.
- [5]. Glavind, M. and Munch-Petersen, C. “Green concrete—a life cycle approach”. In *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of*

A Study on the Mechanical Properties of Concrete Containing Copper Mine Tailing

Jamshid Esmaeili *

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Hossein Aslani

Candidate phd, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Copper Mine Tailing (CMT) is a solid-state waste material created through the purification process of copper. Separation of these materials is conducted during the purification Process of copper from copper ores. Since CMT material is an environmental pollutant. The mining enterprises have already been costs a lot for maintenance of these materials. Thus, the disposal of CMT material is a controversial environmental issue which necessitates the reuse/recycle of these materials. Numerous studies have been implemented around the world to dispose these waste materials as partial or complete substitution of fine aggregates or cement in mortars and concrete. This study is aimed at investigating the use of CMT materials as a partial replacement of Ordinary Portland Cement (OPC) in concrete. Specimens were prepared with 0%-30% of CMT material replacement of cement in concrete mixtures. Tests were conducted to determine the mechanical properties of concrete. In addition, the microstructure of cement paste including CMT-materials was investigated using Scanning Electron Microscopy tests. Results revealed that CMT material could be utilized up to 15% as partial replacement of cement. It was observed that CMT concrete (up to 15% substitution) had got improved mechanical properties in comparison to those of OPC concrete at different ages. It is an SiO_2 -rich material used as the potential source material for all construction projects. The statistical analysis illustrated that properties of CMT concrete were significant at 5% confidence level. Further, the environmental impact was computed and results shown that CMT concrete is more sustainable than control concrete and eco-friendly.

Keywords: Copper mine tailing, Mechanical properties, Statistical analysis, Environmental impact.

* Corresponding Author: J-Esmaeili@tabrizu.ac.ir

