



## ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن های ساخته شده با ضایعات متاکائولن، سرباره ی ذوب آهن و سرباره ی ذوب مس

مهدی درویش نژادعلی آباد<sup>۱\*</sup>، یوسف زندی<sup>۲</sup>، زهرا درویش نژادعلی آباد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد عمران سازه دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۳</sup> کارشناس ارشد معماری، موسسه آموزش عالی معماری و هنر پارس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۰۳  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۱۸

### کلمات کلیدی:

تکنولوژی بتن  
مشخصات مکانیکی بتن  
ضایعات متاکائولن  
سرباره ذوب آهن  
سرباره ذوب مس

**خلاصه:** بتن مهم ترین مصالح مصرفی در ساخت و سازهای عمرانی می باشد که استفاده از آن رو به افزایش است. سیمان به عنوان یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن انرژی فراوانی برای تولید آن مصرف می شود و از سوی دیگر موجب تولید ۸ درصد گاز کربنیک تولید شده در جهان است. در تحقیق حاضر به بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ساخته شده با پوزولان های سرباره ذوب مس، سرباره ذوب آهن و متاکائولن به عنوان جایگزین سیمان پرداخته شده است. تعداد ۱۶ طرح اختلاط با درصد های مختلف جایگزینی سرباره ذوب مس، سرباره ذوب آهن، ضایعات متاکائولن جمعاً ۳۸۴ نمونه ساخته شد. طرح اختلاط طبق آیین نامه آمریکا ACI ۲۱۱،۱ و شرایط مصالح SSD<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است، ابتدا سنگدانه های خشک سپس مواد سیمانی پس از آن آب و در نهایت محلول فوق روان کننده به تدریج به مخلوط اضافه شد. بر روی طرح ها در حالت تازه، آزمایش اسلامپ و در حالت سخت شده در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS ۱۸۸۱ و در سن ۲۸ روزه آزمایش نفوذ آب تحت فشار طبق DIN ۱۰۴۸-۵ انجام گرفت. در تمامی طرح های حاوی پوزولان شاهد کاهش جذب آب در مقایسه با طرح بدون پوزولان هستیم. در، درصد ثابت جایگزینی نفوذ آب تحت فشار مربوط به طرح های حاوی متاکائولن و بیشترین مربوط به طرح های حاوی سرباره ذوب مس می باشد.

1-Saturated surface dry

### ۱-مقدمه

تحقیقات نشان می دهند که کارخانه های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی اکسید کربن وارد شده به اتمسفر کره زمین می باشند [۱]. از جمله مسائل مهمی که در زمینه ی بتن مورد بحث است در مورد پایایی بتن ها در شرایط سخت محیطی می باشد. سازه های بتنی معمولی، عموماً دارای عملکرد مناسبی در شرایط سخت محیطی و عوامل مهاجم نمی باشند و در مدت کوتاهی دچار زوال می گردند. یکی از راهکارهایی که محققان برای رفع این نقیصه پیشنهاد نموده اند، استفاده از مواد پوزولانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند موجود در مخلوط بتن می باشد [۲]. پوزولان ها عبارتند از مواد سیلیسی، یا سیلیسی-آلومینی که خود به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی بوده یا دارای ارزش چسبانندگی کم هستند،

یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان، سیمان است که انرژی زیادی صرف تولید آن می گردد. از جمله راه هایی که به صرفه جویی در مصرف انرژی می گردد، جایگزین نمودن سیمان با مصالحی نظیر پوزولان ها می باشد. علاوه بر این استفاده از پوزولان ها، باعث بهبود بسیاری از خواص مهندسی و پایایی بتن های سخت شده و همچنین سبب صرفه جویی در مصرف مواد اولیه ای نظیر آهک که در تولید سیمان به مقدار زیادی مصرف می شود نیز می گردد. جدا از انرژی زیادی که صرف تولید سیمان می گردد، کارخانه های تولید کننده سیمان نیز نقش زیادی در آلوده نمودن محیط زیست دارند.

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: mahdidarvishnezhadaliabad@gmail.com





شکل ۱. تصویر سرباره ذوب آهن  
Fig. 1. Image of the iron smelting slag

**خاکستر پوسته برنج:** اگر ضایعات پوسته برنج سوزانده شود در حدود ۸۸-۸۵ درصد سیلیس باقی می‌ماند که می‌تواند به عنوان پوزولان عمل کرده و با آهک تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته و خاصیت چسبندگی دهد. در درجه حرارت‌های مختلف مقدار فعالیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج متفاوت است برای همین باید در حرارت مناسب سوزانده شود تا مقدار فعالیت پوزولانی حداکثر باشد [۲].

به منظور رسیدن به توسعه پایدار می‌بایست از مصالح نوین در ساخت و ساز بویژه در سازه‌های بتنی استفاده نمود و تلاش کرد تا با کاربرد مصالح مناسب برای جایگزینی بخشی از سیمان، بتن با کارایی بهتر تولید کرد. در تحقیق حاضر به بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ساخته شده با پوزولان‌های سرباره ذوب مس، سرباره ذوب آهن و ضایعات متاکائولن به عنوان جایگزین سیمان پرداخته شده است. که در ادامه به اختصار به معرفی هریک از این مواد می‌پردازیم:

**سرباره ذوب آهن (شکل ۱):** محصول جانبی ذوب سنگ معدن

آهن است که به منظور جدا کردن بخش فلزی از دیگر اجزاء غیر فلزی است که می‌توان آن را ترکیبی از اکسیدهای فلزی در نظر گرفت. در کارخانه‌های صنعت آهن و صنعت فولاد به طور اجمال تولید سرباره را می‌توان در دو دسته سرباره کوره بلند و سرباره فولاد تقسیم کرد. سرباره کوره بلند از لحاظ ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی، با سرباره فولاد تفاوت‌هایی عمده دارد. در حالت کلی سرباره کوره بلند دارای ترکیبات کمتر و بافتی یکنواخت است و وزن مخصوص آن از مصالح سنگین معمولی پایین‌تر است. یکی از تفاوت‌های عمده سرباره کوره بلند با سرباره فولاد وجود مقدار بیشتر سیلیس آمورف ( $\text{SiO}_2$ ) در این سرباره است از این رو سرباره کوره بلند خاصیت پوزولانی بیشتری دارد و قابل کاربرد در صنایع سیمان است [۵]. امروزه بیشتر تولیدات سرباره کوره بلند در آمریکا در صنایع سیمان و

اما به شکل بسیار ریز در مجاورت رطوبت طی واکنش شیمیایی با کلسیم هیدروکسید در دمای معمولی ترکیب‌هایی با خاصیت سیمانی به وجود می‌آورند. این واکنش را واکنش پوزولانی می‌نامند. [۱] واژه پوزولان از پوزولی (به ایتالیایی Pozzuoli) منطقه‌ای در ایتالیا گرفته شده که حدود ۲۰۰۰ سال پیش برای اولین بار پوزولان در آنجا پیدا شده‌است. اگر چه بتن دارای پوزولان، نسبت به بتن با سیمان پرتلند آهسته‌تر به مقاومت اولیه می‌رسد، اما مقاومت نهایی آن، برابر یا بیشتر از مقاومت بتن با سیمان پرتلند می‌باشد. با اختلاط بین سیمان و پوزولان نوعی سیمان آمیخته با عنوان سیمان پوزولانی تهیه می‌شود [۳].

- کاهش میزان مصرف سیمان
  - کاهش سرعت و میزان حرارت حاصل از فرایند آب‌گیری سیمان
  - بهبود کارایی بتن
  - افزایش مقاومت بتن در پایان ۲۸ روز
  - افزایش پایایی بتن از طریق کاهش نفوذپذیری
  - صرفه اقتصادی
  - بالابردن مقاومت در برابر حمله اسیدها و قلیایی سنگدانه‌ها
- پوزولان‌ها بر دو نوعند:

۱- پوزولان‌های طبیعی خام یا تکلیس شده مثل خاکسترهای آتشفشانی

۲- پوزولان‌های صنعتی مثل خاکستر بادی، رس کلسینه، دوده سیلیس، سرباره ذوب آهن، خاکستر پوسته برنج

**خاکستر بادی:** خاکستر بادی (fly ash) پسماندی از گاز‌های خروجی حاصل از سوخت در کوره‌های زغال سنگ یا سیلت غیر پلاستیک و نیروگاه‌های برقی حرارتی با سوخت زغال است. غبار و گاز‌های متصاعد شده از سوخت توسط فیلترهای کیسه‌ای و یا ته نشین‌کننده‌های الکترواستاتیکی مخصوص مهار می‌شوند.

**میکروسیلیس یا دوده سیلیسی:** ماده‌ای است خاکستری رنگ به شکل آمورف با خاصیت پوزولانی که باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن می‌شود. میکروسیلیس یک محصول فرعی از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس می‌باشد. این ماده با داشتن بیش از ۹۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی و به شکل ذرات بی‌نهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ متوسط میکرون شدیداً پوزولانی است [۴].

بتن به مصرف می رسد [۶].

مطابق تعریف موسسه مواد و آزمایشات آمریکا، سرباره فولاد ترکیبی غیر فلزی است که از موادی همچون سیلیکات کلسیم، فریت های کلسیم، اکسید کلسیم، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید منگنز و اکسید منیزیم تشکیل شده است که به طور همزمان با فولاد تولید می شوند [۷]. تولید فولاد عبارت است از زدودن سنگ آهن از سیلیکون و کربن اضافی توسط اکسیداسیون. در فرایند تولید فولاد در کوره، مواد سنگ آهن، عنوان مواد اصلی تغذیه محسوب می شوند. کربن و سیلیکات ها به شکل دی اکسید کربن زدوده شده و عناصر اکسید شده باقیمانده با آهنی که افزوده شده است سرباره ذوب آهن را تولید می کنند [۵].

یکی از مهمترین کاربردهای سرباره استفاده از آن در تولید بتن به منزله ماده مکمل سیمانی در جایگزینی بخشی از سیمان است همچنین کاربرد سرباره در بتن دارای مزایایی شامل کاهش نیاز آبی بتن، افزایش زمان گیرش، کاهش حرارت هیدراتاسیون، کاهش تخلخل موئینه، بهبود ریز ساختار بتن، افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی و نفوذ عوامل مخرب در بتن می شود [۸]. لازم به ذکر است که بر خلاف پوزولان های دیگر که خاصیت چسبانندگی ندارند و از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان ماده چسباننده تولید می کنند، سرباره خود به تنهایی دارای قابلیت چسبندگی است. لذا برخلاف پوزولان های متعارف که تا ۳۰٪ وزنی مواد سیمانی مورد استفاده قرار می گیرد، سرباره میتواند تا بیش از ۷۰٪ وزنی مواد سیمانی قابل مصرف باشد. اولین تحقیقاتی که در مورد پودر آسیاب شده سرباره به عنوان یک ماده سیمانی به عمل آمد در سال ۱۷۷۴ توسط فردی به نام لوریت بود که از پودر سرباره در ساخت نوعی شفته آهنی استفاده کرد [۹]. در ادامه استفاده از سرباره در فرانسه در سال ۱۹۸۹ از سیمان های سرباره های که از پودر آسیاب شده سرباره و سیمان معمولی ساخته شد، از این مخلوط برای ساخت متروی پاریس استفاده به عمل آمد. هم اکنون از پودر سرباره در تولید سیمان های مخلوط نزدیک به ۲۰ درصد وزنی سیمان در اروپا استفاده به عمل می آید [۹]. طی آزمایش هایی که برای استفاده از پودر سرباره در تهیه بتن انجام دادند به این نتیجه رسیدند که افزودن سرباره موجب کاهش گرمای هیدراتاسیون می شود. همچنین استفاده از پودر سرباره در درصد های بالاتر از ۶۰٪ موجب کاهش شدید مقاومت و کارایی بتن

می شود. ولی با استفاده از پودر سرباره به عنوان جانشین سیمان به مقدار ۳۰ تا ۶۰ درصد نتایج قابل قبولی از نظر میزان مقاومت فشاری حاصل شده است. با در نظر گرفتن اینکه مقاومت بتن های حاوی سرباره در کوتاه مدت کم است [۱۰]. کارباتی اصل [۱۱] در تحقیق خود با استفاده از درصد های مختلف سرباره ی ذوب آهن به جای سیمان در بتن به بررسی تاثیرات آن بر اسلامپ بتن پرداخت. زینعلی [۱۲] در تحقیقی بر روی تاثیر جایگزینی ضایعات متاکائولن به جای سیمان در بتن خودتراکم سبک انجام داده اند. قدوسی و همکاران [۱۳] در تحقیقی به بررسی بتن های خودتراکم حاوی درصد های مختلف متاکائولن و سرباره و ترکیب آنها پرداختند. فدایی و همکاران [۱۴] مطالعاتی را در خصوص جایگزینی درصد های مختلف سرباره ذوب مس و اثرات آن بر مقاومت فشاری انجام داده اند. کارنیرو<sup>۱</sup> و ملو<sup>۲</sup> [۱۵] در سال ۲۰۱۱ میلادی مطالعاتی را در خصوص افزودن بیش از حد ضایعات متاکائولن، به بتن انجام دادند و تاثیرات آن را بر مقاومت فشاری گزارش دادند. در تحقیقاتی هم Wild [۱۶] در خصوص افزایش مقاومت در رده های پایین جایگزینی در سال ۱۹۹۶ میلادی نتایجی را ارائه کرده اند. و بعد از آن در سال ۲۰۰۶ میلادی Poon و همکاران [۱۷] آزمایشات متشابهی را در خصوص جذب و نفوذ آب انجام داده اند. در سال ۱۳۹۴ شمسی سیاحی و همکاران [۱۸] در تحقیقی به بررسی درصد های مختلف جایگزینی سرباره ذوب آهن به جای سیمان و تاثیر آن بر نفوذپذیری پرداختند. سقط چی و همکاران [۱۹] در سال ۱۳۹۲ شمسی به بررسی تاثیر سرباره ذوب آهن بر روی نفوذ آب تحت فشار در بتن پرداختند. شریفی و همکاران [۲۰] در تحقیق خود بر روی مقاومت بتن خودتراکم حاوی درصد های مختلف سرباره ی ذوب مس به جای سیمان پرداختند، میر حسینی و همکاران [۲۱] با جایگزینی درصد های مختلف سرباره ذوب مس آسیاب شده به جای سیمان به بررسی مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ تا ۹۰ روزه به روند رشد مقاومت فشاری پرداختند.

#### سرباره ذوب مس (شکل ۲): تاریخچه تولید سرباره ی ذوب مس

به آغاز استخراج فلز از سنگ معدن به وسیله فرآیندهای بیولوژیکی بر می گردد. سرباره ی ذوب مس یک محصول جانبی می باشد که در طی تصفیه مس خام و ذوب مس به دست می آید، طی تولید یک تن مس حدود ۳-۲/۲ تن سرباره ی مس تولید می شود. میزان

1 Carneiro

2 Melo



شکل ۲. تصویر سرباره ذوب مس  
Fig. 2. Image of copper smelting slag

مس تغییر می کند. (یعنی ذرات کوچکتر سرباره ذوب مس با تأخیر بیشتری نشت می کند.) اگرچه اثر سرباره ذوب مس بر روی زمان نشت با افزایش زمان شستشو کاهش پیدا کرده است. از آنجایی که یکی از کاربردهای مفید سرباره ذوب مس به عنوان سنگدانه استفاده از آن در سطح زیرین بتن به خاطر داشتن سختی زیاد و خصوصیات مکانیکی خوب، می باشد، شناخت تاثیرات آن بر روی نفوذپذیری چنین بتنی در مقابل هوازدایی، مهم می باشد. هوازدایی اینگونه تعریف می شود که حرکت آب در بتن تازه، به سطح آن و این یک شکلی از ته نشینی مواد جامد سنگین تر در بتن است در حالیکه آب به سطح آن حرکت می کند. زمانی که هوازدایی بیش از حد باشد، اثرات منفی در کیفیت بتن با تولید ناقص افزایش پیدا می کند مانند تشکیل روزنه های آب، حفره های آب زیرسنگدانه ها، نسبت آب به سیمان را در نزدیکی سطح و تشکیل لایه بالایی ضعیف افزایش می دهد این نقصان در بتن ناپایدار رخ می دهد.

**متاکائولن:** متاکائولن از اواسط دهه ۹۰ میلادی به صورت تجاری در صنعت راه و ساختمان وارد شده است و این پوزولان یکی از جدیدترین مصالح جایگزین سیمان برای تهیه بتن های توانمند محسوب می شود. متاکائولن از کلسینه شدن کائولن خالص در درجه حرارت زیاد بدست می آید. این حرارت دادن آب شیمیایی کائولن را خارج نموده و ساختار ساختار کریستالی آن را از بین می برد و تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می شود. در تقسیم بندی ASTM متاکائولن به عنوان پوزولان کلاس N قابل دسته بندی است [۲۶]. متاکائولن به عنوان یک محصول با پایه سیلیسی می باشد که در واکنش با  $Ca(OH)_2$  در دمای معمولی ژل CSH تولید می کند. متاکائولن همچنین دارای آلومینا (Alumina) می باشد که با CH واکنش داده و فازهای آلومیناتی که حاوی  $C_4AH_3$  و  $C_3ASH_8$  و  $C_4AH_7$  است را تولید می کند [۲۷].

فرآیند تولید متاکائولن کنترل شده است و در بعضی نتایج به عنوان پوزولان مهندسی شده شناخته می شود. این تولید با آلاینده کمیتر و مصرف انرژی محدودتر همراه است. در سال های اخیر موضوع مصرف متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کشورهای مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و این مطالعات نشان می دهد متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال است و موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه مدت و دراز مدت می شود. استفاده از

سرباره ی ذوب مس تولید شده در آمریکا حدود ۴ میلیون تن و در ژاپن حدود ۲ میلیون تن در سال است [۲۲]. در ایران، برزیل و عمان به ترتیب ۶۰، ۲۴۴ و ۳۶۰ هزار تن سرباره ذوب مس در سال تولید می شود [۲۳].

گزارش های انجمن سیمان پرتلند حاکی از آن است که سرباره ی ذوب مس به میزان زیادی برای ساخت سیمان های گوناگون استفاده می شود. فرآیند تولید سیمان پرتلند شامل خرد کردن مواد خام و گرما دادن به آنها در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و خرد کردن کلینکر سیمان با سنگ گچ می باشد. انرژی متوسط ورودی مورد نیاز برای تولید یک تن سیمان حدود  $4/8$  Million Btu می باشد. بنابراین تولید سیمان پرتلند به همان اندازه که مسایل اقتصادی را در بر می گیرد، مشکلات زیست محیطی را نیز به همراه دارد که از آن جمله می توان به تولید آلودگی  $CO_2$  اشاره کرد [۲۴]. با استفاده از سرباره به عنوان جایگزین جزئی از سیمان، مقدار زیادی از انرژی که برای تولید سیمان نیاز است، ذخیره می شود، زیرا استفاده از سرباره فقط خرد کردن لازم دارد. همچنین میزان زیادی از سرباره مس به عنوان سنگدانه در بتن، مورد بهره برداری قرار می گیرد چون که بیش از ۷۵٪ حجم بتن را سنگدانه ها اشغال کرده اند [۲۵]. بسیاری از محققان امکان استفاده از سرباره ذوب مس به عنوان سنگدانه در بتن و اثرات آن روی مکانیک های مختلف و خصوصیات بلند مدت ملات و بتن را بررسی کرده اند. با وجود فواید استفاده از سرباره ذوب مس به عنوان سنگدانه، برخی اثرات منفی مانند تأخیر زمان نشست گزارش شده است [۱]، مخصوصاً وقتی سرباره ذوب مس فقط به عنوان ریزدانه، استفاده شده است. Ayano و Sakata [۲۲] گزارش داده اند که اثر سرباره ذوب مس بر روی زمان نشت با اندازه ذرات



جدول ۱. مشخصات فوق روان کننده P10-3R<sup>۵</sup>  
Table 1. P10-3R Lubricant Specifications

نام	P10-3R
نوع	پلی کربوکسیلیک اتر اصلاح شده
ظاهر	سبز تیره
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۰۳
Ph	۷±۱
حالت فیزیکی	مایع
طبیعت یونی	آنیونی

5-www.shimisakhteman.com



شکل ۳. تصویر متاکائولن  
Fig. 3. Meta-kaolin image

جدول ۲. مشخصات ضایعات متاکائولن  
Table 2. Specifications of Meta-kaolin Waste

مصالح	LOI	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
ضایعات متاکائولن	۲/۰۱	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۲	۱/۶	۴۲/۸	۵۲/۱۰



شکل ۴. تصویر سرپاره ذوب آهن آسیاب نشده  
Fig. 4. Picture of unmilled iron smelting slag

(شکل ۳) است که دارای وزن مخصوص ۲۶۰۰ Kg/m<sup>۳</sup> می باشد. این افزودنی بدون حل کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی

متاکائولن ریز ساختار بتن را بهبود می بخشد و مقاومت بتن را در برابر نفوذ سیالات مهاجم (یون کلر و یون های سولفات و ...) افزایش می دهد. همچنین استفاده از متاکائولن واکنش های قلیایی سنگدانه ها را کنترل می کند. نفوذپذیری بتن حاوی متاکائولن بسیار پایین است و این مطلب را اینگونه تفسیر می شود که این عمل در نتیجه ی توزیع حفرات مناسب تر آن هم با اکثریت حفرات ریزتر از ۵۰ nm و حجم بسیار پایین حفرات موینه است [۲۸].

با این حال به دلیل حرارت هیدراتاسیون نسبتا زیاد، استفاده از آن در بتن ریزی حجیم توصیه نمی شود. آزمایش های مقایسه ای نشان می دهد خواص این پوزولان در بهبود ویژگی های مکانیکی و پایایی بتن با دوده سیلیس قابل رقابت است. علاوه بر آن با توجه به رنگ روشن این ماده، استفاده از بتن حاوی متاکائولن در کاربردهای خاص معماری توصیه می شود [۲۹]. در کشور ایران علی رغم وجود معادن متعدد و متنوع کائولن تاکنون، در مقیاس صنعتی متاکائولن تولید نشده است.

با تولید ۱ تن سیمان حدود ۰/۹۴ دی اکسید کربن وارد اتمسفر می شود [۳۰]. در واقع ۵-۸٪ دی اکسید کربن جهان توسط صنعت سیمان تولید می شود [۳۱]. دی اکسید کربن تولید شده توسط سیمان دلیلی بر انتشار گازهای گلخانه ای و باران های اسیدی می باشد [۳۲]. برای کاهش اثرات زیست محیطی از مواد جایگزین سیمانی استفاده می شود. متاکائولن به عنوان یک افزودنی سیمانی با آب واکنش شیمیایی می دهد. علاوه بر خواص زیست محیطی آن، باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می شود، متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم سفید رنگ و آمورف می باشد که با هیدروکسید کلسیم واکنش می دهد تا کریستال های سیمانی شکل بگیرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

سیمان مصرفی در این طرح سیمان تیپ ۲ شرکت سیمان هرمزگان، آب مصرفی آب شرب شهر بندرعباس، شن و ماسه از معدن محلی (شن و ماسه میناب) تهیه و با حداکثر سائز سنگدانه به ترتیب ۲۵ و ۴/۷۵ میلیمتر در بتن استفاده شدند و فوق روان کننده P10-3R شرکت شیمی ساختمان با مشخصات شیمیایی فوق روان کننده در جدول شماره ۱ مشاهده می شود:

ضایعات متاکائولن مصرفی تولید کارخانه کاویان صنعت ایران

جدول ۳. آنالیز عمومی شیمیایی سرباره ذوب آهن اصفهان  
Table 3. General Chemical Analysis of Isfahan Iron Smelting Slag

Fe	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	FeO	SiO <sub>2</sub>	Cao	ترکیبات
۰/۵-۱۰	۰-۰/۱	۰/۵-۱	۱-۳	۵-۱۰	۵-۸	۱۰-۴۰	۱۰-۱۹	۴۰-۵۲	درصد وزنی



شکل ۵. تصویر سرباره ذوب مس آسیاب نشده  
Fig. 5. Image of unmelted copper smelting slag

جدول ۴. آنالیز عمومی شیمیایی سرباره ذوب مس مسبار خاورمیانه  
Table 4. General Chemical Analysis of Middle East Copper Melt Slag

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	cao	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cuo	Mgo	ترکیبات
۳۵-۶۰	۲۵-۴۰	۲-۱۰	۳-۱۵	۰/۳-۲/۱	۰/۷-۳/۵	درصد وزنی

جدول ۵. خصوصیات فیزیکی سرباره ذوب مس  
Table 5. Physical Properties of Copper Melting Slag

شکل ذرات	منظم
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۳/۳-۱۶/۸۷
نفوذپذیری (%)	۰/۰-۱۵/۵۵
سختی (mohs)	۷-۶
کلراید محلول در آب (ppm)	< ۵۰
استحکام (%)	۰/۰-۸/۹
ارزش خرد شدگی مصالح سنگی (%)	۲۱-۱۰
ارزش تصادفی مصالح سنگی (%)	۸-۲/۱۶
تلفات سایش (%)	۲۴/۱
قابلیت رسانایی (us/cm)	۵۰۰

میکسر، اجازه داده شد تا میکسر چند ثانیه ای همراه با آب بچرخد تا علاوه بر کاهش اصطکاک مواد با بدنه میکسر، چسبندگی مصالح با سطح میکسر کاهش پیدا کرده که با توجه به حجم محدود بتن

از وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه شده است. مشخصات شیمیایی متاکائولن مصرفی در جدول شماره ۲ مشاهده می شود: سرباره ذوب آهن مورد استفاده در این تحقیق سرباره کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان (شکل ۴) با ترکیبات شیمیایی جدول شماره ۳ در ذیل آورده شده است.

سرباره ذوب مس تهیه شده از شرکت ایمن مسبار خاورمیانه (شکل ۵) با مشخصات در جدول شماره ۴ و ۵ مشاهده می شود:

سرباره ضایعاتی ابتدا در آسیاب فکی به اندازه ی کوچک تر تبدیل شده، و سپس در یک آسیاب فکی کوچک آسیاب شده تا اندازه ی آن به حدی رسیده که قابلیت استفاده در بتن را داشته باشد. کلیه ی دانه ها از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) عبور کرده است.

**طرح اختلاط:** طرح اختلاط طبق آیین نامه آمریکا ۲۱۱،۱ ACI و شرایط مصالح SSD در نظر گرفته شده است به دلیل اینکه دانه های مصرفی به صورت خشک بودند، تأثیر جذب آب دانه ها در مقدار آب نیز در نظر گرفته شده و اصلاحات لازم که در ادامه ذکر می گردد در مقدار آب صورت گرفت.

قبل از استفاده ی سنگدانه ها در ساخت بتن آنها را سه روز در هوای آزاد و البته زیر سایه بان به منظور جلوگیری از مرطوب شدن قرار داده و پس از آن برای هر سری ساخت وزن کرده و در کیسه قرار داده ایم. از آنجایی که در نسبت آب به سیمان لحاظ شده در طرح اختلاط شرایط مصالح SSD<sup>۱</sup> در نظر گرفته می شود، اما مصالح مصرفی ما که به طریق فوق الذکر جمع آوری می گردد شرایط SSD بودن مصالح را ارضا نمی کند. بنابراین میزان جذب آب سنگدانه ها و نیز رطوبت آنها محاسبه کرده و مقدار تفاضل جذب از رطوبت را به میزان آبی که از نسبت آب به سیمان به دست می آید، اضافه شده تا بدین صورت شرایط مصالح به حالت SSD نزدیک شود.

ترتیب اختلاط مصالح برای ساخت بتن ها این گونه بوده که ابتدا قبل از مخلوط کردن مواد در مخلوط کن، با اضافه کردن آب درون

1 Saturated surface dry

جدول ۶. مشخصات طرحهای ساخته شده  
Table 6. Specifications of made designs

شماره	اسم	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	سرباره		ذوب آهن		سرباره		سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	اسم	شماره
			سرباره مس	سرباره	ذوب آهن	سرباره	ضایعات متاکائولن	ضایعات متاکائولن			
٪	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	٪	٪
۱	R۰	۴۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	C۱۰	۴۰۵	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	C۱۵	۳۸۲/۵	۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	C۲۰	۳۶۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	M۱۰	۴۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	M۱۵	۳۸۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۷	M۲۰	۳۶۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸	S۱۰	۴۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	S۱۵	۳۸۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	S۲۰	۳۶۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	C۱۰-M۱۰	۳۶۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	C۱۰-S۱۰	۳۶۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	S۱۰-M۱۰	۳۶۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	C۱۰-S۵M۵	۳۶۰	۱۰	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
۱۵	C۵S۱۰-M۵	۳۶۰	۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱۶	C۵S۵M۱۰	۳۶۰	۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

روغن کاری شده بودند، ریخته شده و نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در محیط آزمایشگاه قرار داده و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها را از قالب خارج کرده و در حوضچه آب نگهداری می شدند. مشخصات طرح اختلاط های ساخته شده در جدول شماره ۶ مشاهده می شود.

در جدول فوق مقدار مصرف پوزولان ها برحسب درصد وزنی سیمان نوشته شده است. در نامگذاری طرح ها حرف C نشانگر سرباره ذوب مس، حرف S نشانگر سرباره ذوب آهن، حرف M نشانگر ضایعات متاکائولن و عدد سمت راست هر حرف نشانگر درصد

باعث جلوگیری از جداسازی مصالح میگردد. سپس سنگدانه های خشک با قسمتی از آب اختلاط (در حدود نصف آب اختلاط) به اضافه آب معادل جذب آب مصالح مخلوط شده سپس مواد سیمانی که شامل سیمان و افزودنی های سیمانی می باشد به مخلوط اضافه شده و پس از آن باقیمانده آب به مخلوط اضافه گردید و در نهایت فوق روان کننده که با مقداری از آب اختلاط مخلوط شده بود به تدریج به مخلوط اضافه شد. آزمایش اسلامپ بلافاصله پس از این مرحله برای هر یک از طرح های اختلاط انجام گرفت. پس از اختلاط مصالح با یکدیگر، بتن را به داخل قالب هایی که از قبل آماده و

در تماس با رکاب های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند، انتخاب گردید (مطابق شکل ۶) که با قرارگیری مکعب ها تنش فشاری مکعبی حاصل نیز با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه بدست می آید.

**آزمایش نفوذپذیری:** از آنجا که آزمایش های نفوذپذیری در برابر آب همراه با چالش های فراوانی است، در برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان آزمایش دیگری انجام می شد که تحت فشار آب، در زمان معینی، عمق آب نفوذی در بتن طبق طبق ۱۰۴۸ DIN<sup>۱</sup>-۵ بدست می آمد [۳۴]. سپس در EN ۱۲۳۹۰-۸ با تغییرات مختصر، این آزمایش با سهولت بیشتر ارائه شد که در آن نمونه بتنی سه روز از سطح زیرین تحت فشار (۵ بار) قرار می گیرد و سپس حداکثر عمق نفوذ آب بدست می آید که پارامتری در جهت ارزیابی نفوذ آب در بتن می باشد [۳۵]. شکل ۷ نحوه قرارگیری نمونه ها در دستگاه نفوذپذیری تحت فشار را نشان می دهد.

### ۳- بررسی و تحلیل نتایج

در تحقیق حاضر به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده در ۱۶ طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی سرباره ذوب مس، سرباره ذوب آهن و ضایعات متاکائولن پرداخته شده است. بر روی این طرح ها در حالت تازه آزمایش اسلامپ و در حالت سخت شده در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایش مقاومت فشاری و در سن ۲۸ روزه نفوذ آب تحت فشار انجام گرفت. در جدول شماره ۷ نتایج حاصل از آزمایشات صورت گرفته مشاهده می شود.

**آزمایشات بتن تازه (اسلامپ):** کارایی بتن در حالت تازه بر روی خواص مکانیکی آن در حالت سخت شده تاثیر گذار است. اگر بتن در حالت تازه خمیری و کارایی خوب داشته باشد، راحت در قالب جا داده شده و بدون اینکه سنگدانه های ریز و درشت از هم و از دوغاب سیمان جدا شوند، پس از ویبره شدن گوشه و زوایای قالب را پر کرده و آرماتورها را احاطه می نماید. نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ در شکل شماره ۸ در قالب نمودار مشاهده می کنید:

همانطور که در شکل شماره ۸ مشاهده می شود، افزودن پوزولان به بتن در تمامی حالات افت اسلامپ را در پی دارد. بطور کلی افزودن پوزولان ها با توجه به جذب آب بیشتری که در مقایسه با سیمان



شکل ۶. نحوه قرارگیری نمونه زیر جک مقاومت فشاری  
Fig. 6. How to place the sample under the compressive strength jack



شکل ۷. قرارگیری نمونه ها در دستگاه نفوذپذیری تحت فشار  
Fig. 7. How to put the specimens in the pressure-permeable apparatus

جایگزینی پوزولان مربوطه می باشد. از آنجایی که هدف تعیین بررسی تاثیر پوزولان ها بر خواص بتن است.

**آزمایش مقاومت فشاری:** براساس استاندارد BS ۱۸۸۱ [۳۳] انجام شد. آزمایش های مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی متر انجام شده است. ابتدا سمپل هایی از نمونه مکعبی جهت بررسی اختلاف مقاومت های فشاری در نحوه قرارگیری مکعب ها در دستگاه فشاری صورت گرفت تا در صورت محسوس نبودن نتایج، برای سهولت کار از عمل کپینگ صرف نظر گردد. که با اختلاف  $\pm 1\%$  درصد در نتایج مقاومت فشاری، نحوه قرارگیری نمونه ها به صورت دو سطح مقابل که در موقع بتن ریزی مجاور قالب بودند،



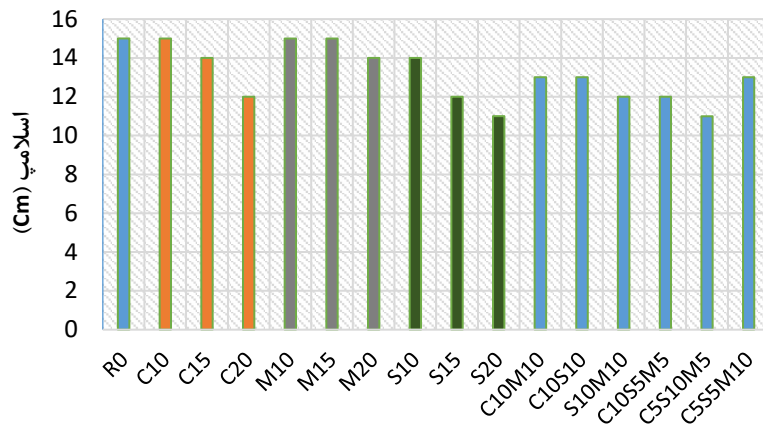
جدول ۷. نتایج مجموع آزمایشات  
Table 7. Total test results

اسلامپ (mm)	نفوذ آب تحت فشار (mm)	مقاومت فشاری				اسم	شماره
		۹۰ (MPa:روز)	۲۸ (MPa:روز)	۱۴ (MPa:روز)	۷ (MPa:روز)		
۱۵۰	۳/۷	۳۱	۲۹	۲۱	۱۸	R۰	۱
۱۵۰	۳/۵	۳۲/۵	۲۹	۲۰/۵	۱۷/۵	C۱۰	۲
۱۴۰	۳/۱	۳۰/۵	۲۶	۱۹	۱۶	C۱۵	۳
۱۲۰	۲/۹	۲۹/۵	۲۵	۱۷	۱۴	C۲۰	۴
۱۵۰	۳	۳۳	۳۱	۲۳	۱۹	M۱۰	۵
۱۵۰	۲/۶	۳۲	۲۹/۵	۲۲	۱۸	M۱۵	۶
۱۴۰	۲/۴	۳۰	۲۸	۲۰/۵	۱۷	M۲۰	۷
۱۴۰	۳/۳	۳۰/۵	۲۸	۲۰/۵	۱۷	S۱۰	۸
۱۲۰	۲/۸	۳۳	۳۰	۲۲	۱۸	S۱۵	۹
۱۱۰	۲/۵	۳۲	۲۹/۵	۲۱	۱۷/۵	S۲۰	۱۰
۱۳۰	۳/۱	۳۵	۳۲	۲۴	۲۰	C۱۰-M۱۰	۱۱
۱۳۰	۳/۳	۳۰	۲۸	۲۰	۱۷	C۱۰-S۱۰	۱۲
۱۲۰	۲/۸	۳۳	۳۰	۲۲	۱۸	S۱۰-M۱۰	۱۳
۱۲۰	۲/۷	۳۲/۵	۳۰	۲۳	۱۹/۵	C۱۰-S۵M۵	۱۴
۱۱۰	۲/۵	۳۱	۲۸	۲۱	۱۷	C۵S۱۰-M۵	۱۵
۱۳۰	۲/۳	۳۳	۳۱	۲۳	۲۰	C۵S۵M۱۰	۱۶

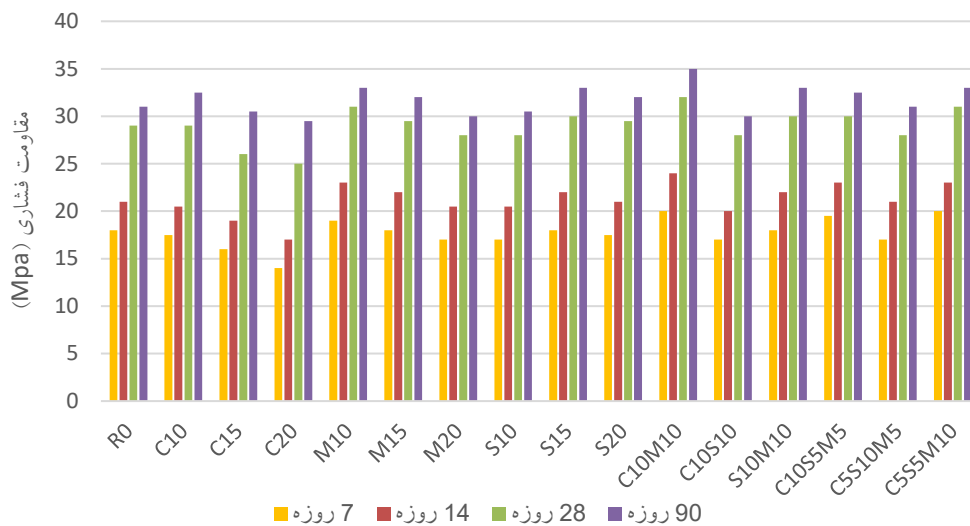
بزرگ تری دارند جذب آب بیشتری نسبت به سیمان داشته و از کارایی بتن تازه می کاهند .

**مقاومت فشاری:** با بالا رفتن سن نمونه ها مقاومت فشاری آنها نیز افزایش یافت. در طرح های اختلاط این مطالعه نسبت آب به سیمان یکسان می باشد. لذا تأثیر این عامل در تمامی بتن ها یکسان بوده و عامل متغیر در این مطالعه درصد مختلف پوزولان در بتن است.

دارند در بیشتر حالات کاهش آب انداختگی و افت جریان پذیری بتن را باعث می گردند. با توجه به شکل فوق مشاهده می کنیم تاثیر سرباره ذوب آهن بر روی افت اسلامپ بیشتر از متاکائولن و سرباره ی مس می باشد. در طرح های ترکیبی نیز، سرباره ی آهن نقش غالب را در افت اسلامپ ایفا می کند. علت این امر را می توان به ریزتر بودن ذرات سرباره و متاکائولن نسبت داد که چون سطح مخصوص



شکل ۸. نمودار نتایج آزمایش اسلامپ  
Fig. 8. Slump test results graph

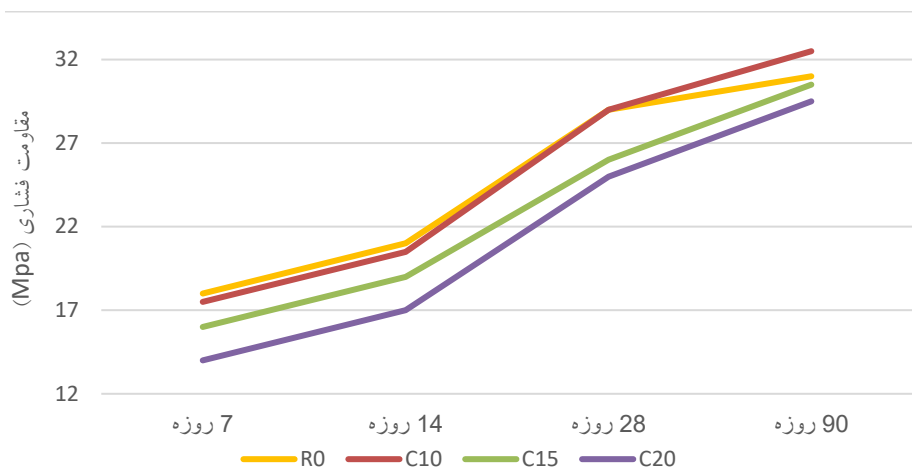


شکل ۹. نمودار مقاومت فشاری  
Fig. 9. Compressive strength diagram

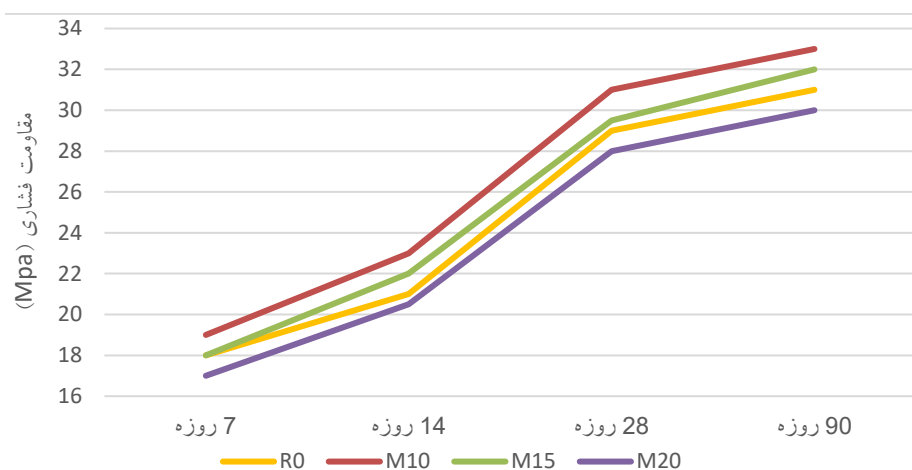
فشاری می باشیم روند افزایش مقاومت برای طرح های حاوی ضایعات متاکائولن مشابه طرح شاهد می باشد. ولی با افزایش درصد جایگزینی بیش از ۱۰ درصد با توجه به خاصیت شبه سیمانی متاکائولن و کمتر بودن خاصیت چسبندگی آن نسبت به خود سیمان با افت مقاومت فشاری همراه شد تا جایی که بعد از ۱۷ درصد جایگزینی مقاومت حاصل پایین تر از نمونه شاهد می باشد.

همانطور که در شکل شماره ۱۰ در ذیل مشاهده می شود، در تمامی طرح ها با افزایش سن، شاهد افزایش مقاومت هستیم. با جایگزینی ۱۰٪ سرباره ذوب مس با سیمان، در سنین پایین تغییری در مقاومت حاصل نشده ولی در ۹۰ روزه شاهد رشد مقاومت

در شکل ۹ مقایسه ای از مقاومت فشاری ارائه شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود در تمامی طرح ها با افزایش سن شاهد افزایش مقاومت فشاری هستیم. در مقایسه بین درصدهای مختلف پوزولان که به تنهایی جایگزین سیمان شده اند، بیشترین مقاومت فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن، و بیشترین مقاومت فشاری ۹۰ روزه مشترکاً مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن و طرح حاوی ۱۵ درصد سرباره ذوب آهن می باشد. همچنین کمترین مقاومت فشاری در تمامی سنین مربوط به طرح حاوی ۲۰٪ سرباره ذوب مس می باشد. با جایگزینی متاکائولن از صفر تا ۱۰ درصد شاهد افزایش مقاومت



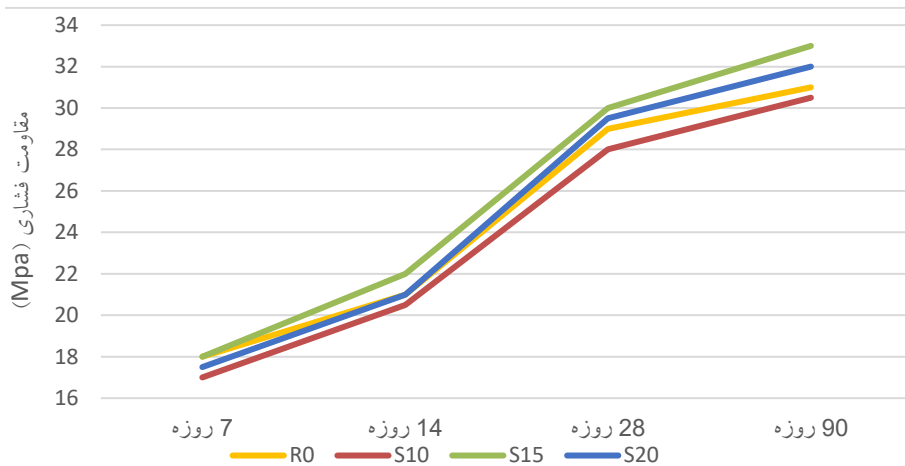
شکل ۱۰. نمودار مقاومت فشاری طرح های حاوی سرباره ذوب مس  
 Fig. 10. Compressive strength diagram of designs containing copper smelting slag



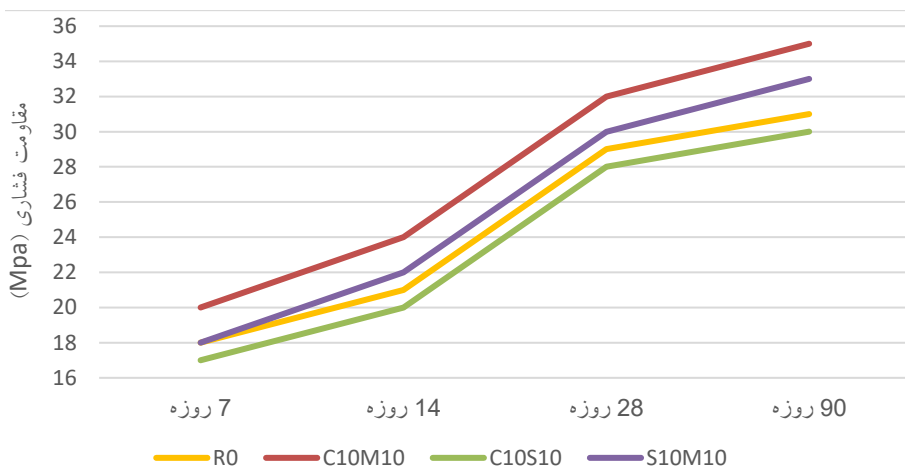
شکل ۱۱. نمودار مقاومت فشاری طرح های حاوی ضایعات متاکائولن  
 Fig. 11. Compressive strength diagram of designs containing Meta-kaolin Waste

درصد جایگزینی در تمامی سنین از طرح شاهد بیشتر و در ۲۰ درصد جایگزینی در تمامی سنین از طرح شاهد کمتر می باشد. بیشترین رشد مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به طرح حاوی ۱۰ درصد ضایعات متاکائولن بوده که ۶ درصد می باشد. روند افزایش مقاومتی برای طرح های حاوی ضایعات متاکائولن مشابه طرح شاهد می باشد. مشاهده می شود ضایعات متاکائولن در مقادیر ۱۰ درصد جایگزینی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در تمام سنین می شود اما در ۱۵ درصد جایگزینی کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با ۱۰ درصد جایگزینی دیده می شود. در آنجا نیز علت کاهش مقاومت با افزایش درصد جایگزینی را می توان مربوط به اثرات رقیق کنندگی ضایعات

مقایسه با بتن شاهد هستیم. در ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی سرباره ذوب مس، در تمام سنین کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با طرح شاهد مشاهده می شود. در ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه در مقایسه با طرح شاهد مشاهده می شود. روند رشد مقاومت برای طرح های حاوی سرباره ذوب مس با طرح شاهد متفاوت بوده و در سنین ۲۸ تا ۹۰ روزه رشد مقاومت در این بتن ها بیشتر از نمونه شاهد می باشد. ولی در بتن شاهد بعد از سن ۲۸ روزه سرعت رشد مقاومت کاسته می شود. همانطور که در شکل شماره ۱۱ در ذیل مشاهده می شود، مقاومت فشاری طرح های حاوی ضایعات متاکائولن در ۱۰ و ۱۵



شکل ۱۲. نمودار مقاومت فشاری طرح های حاوی سرباره ذوب آهن  
 Fig. 12. Compressive strength diagram of designs containing iron smelting slag

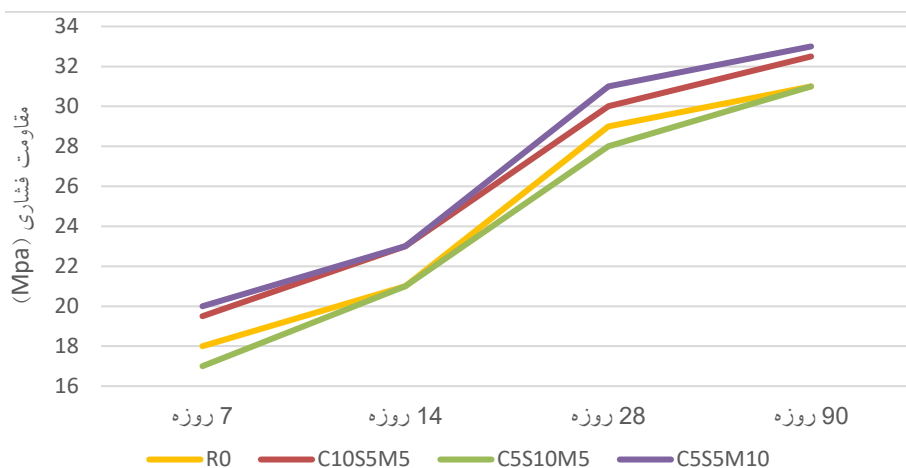


شکل ۱۳. نمودار مقاومت فشاری طرح های ترکیبی دو جزئی  
 Fig. 13. Compressive strength diagram of two-component composite designs

سرباره ذوب آهن به جای سیمان در سنین پایین تاثیر چندانی بر روی مقاومت بتن نداشته ولی در ۹۰ روزه افزایش مقاومت فشاری را نتیجه می دهد. که هر چقدر سن بالاتر می رود، رشد مقاومت در نمونه های حاوی درصد بالاتر پوزولان، بیشتر شده که نشان دهنده ی عملکرد مناسب پوزولان در سنین بالا است. در ۱۰٪ جایگزینی مقاومت فشاری در تمام سنین کمتر از بتن شاهد است ولی در ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت فشاری افزایش پیدا می کند. بیشترین رشد مقاومت فشاری در اثر جایگزینی سرباره ذوب آهن در ۱۵ درصد جایگزینی اتفاق می افتد. با توجه به شکل شماره ۱۳ در ذیل مشاهده می کنیم که روند افزایش مقاومت در طرح های ترکیبی دو جزئی نیز مانند طرح شاهد است. در طرح های حاوی ضایعات متاکائولن شاهد رشد مقاومت

متاکائولن دانست. با افزایش جایگزینی ضایعات متاکائولن با سیمان و کاهش مقدار سیمان، واکنش های هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه میزان پرتلندیت تولیدی کاهش می یابد. با افزایش سطح جایگزینی وضعیتی به وجود خواهد آمد که پرتلندیت کافی برای انجام واکنش پوزولانی وجود نداشته و مقداری پوزولان در واکنش شرکت نخواهد کرد، علاوه بر این واکنش های هیدراتاسیون سیمان نیز کاهش یافته و در مجموع کل واکنش های هیدراتاسیون رو به کاهش خواهد گذاشت. در نتیجه ی کاهش واکنش ها، خواص مقاومتی و دوام بتن دچار افت شدید خواهد شد. این پدیده را اثر رقیق کنندگی می نامند [۳۶]. که می توان به اثر فیلری پوزولان نسبت داد. با توجه به شکل ۱۲ در ذیل مشاهده می شود که جایگزینی





شکل ۱۴. نمودار مقاومت فشاری طرح‌های ترکیبی سه جزئی  
 Fig. 14. Compressive strength diagram of three-component composite designs



شکل ۱۵. شکافتن نمونه جهت بررسی عمق نفوذ  
 Fig. 15. sample Split to Investigate penetration Depth



شکل ۱۶. اندازه‌گیری عمق نفوذ آب  
 Fig. 16. Measuring the Depth of water penetration

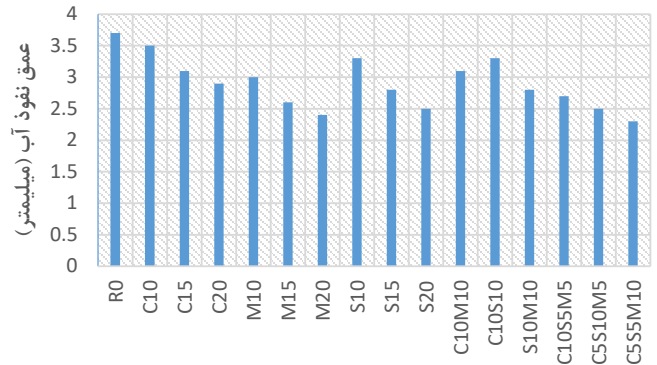
جایگزینی پوزولان‌ها شاهد کاهش میزان نفوذ آب به درون نمونه‌های بتنی هستیم. با توجه به آیین‌نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس [۳۷] حداکثر میزان نفوذ قابل قبول برای بتن

فشاری در تمامی سنین در مقایسه با طرح شاهد هستیم. ولی در طرح C10S10 که حاوی ۱۰٪ از هر کدام سرباره‌ها می‌باشد در تمامی سنین شاهد کاهش مقاومت در مقایسه با طرح شاهد هستیم. همانطور که در شکل شماره ۱۴ در ذیل مشاهده می‌شود در طرح‌های ترکیبی سه جزئی نیز شاهد رشد مقاومت با افزایش سن هستیم. در طرح C5S10M5 مقاومت فشاری در سنین اولیه کمتر از طرح شاهد است ولی در ۹۰ روزه تقریباً به مقاومت طرح شاهد می‌رسد. در دو طرح دیگر مقاومت‌های فشاری در سنین اولیه نزدیک به یکدیگر بوده ولی در ۹۰ روزه طرح C5S5M10 مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد. این امر می‌تواند متأثر از عملکرد بهتر ضایعات متاکائولن دانست.

**نفوذ آب تحت فشار:** برای انجام این آزمایش چهار عدد نمونه از هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه پس از قرارگیری به مدت ۴۸ ساعت در اون به منظور خشک شدن، در داخل دستگاه نفوذ آب تحت فشار قرار گرفته و به مدت ۳ روز از سطح زیرین تحت فشار ۵ بار قرار گرفتند. همانطور که در شکل شماره ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود نحوه شکافتن و عمق نفوذپذیری را نمایش داده شده است.

سپس از شکافته شدن نمونه‌ها نسبت به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در داخل آنها می‌پردازیم. که نتایج حاصل از این آزمایش میانگین چهار عدد اندازه‌گیری در شکل شماره ۱۷ در ذیل ارائه شده است.

همانطور که در شکل شماره ۱۷ مشاهده شد با افزایش درصد



شکل ۱۷. نمودار عمق نفوذ آب  
Fig. 17. Water penetration Depth chart

۵۰ میلیمتر می باشد که در بیشترین حالت نیز عمق نفوذ آب به بتن مقادیر این استاندارد را ارضا می نماید. کمترین میزان نفوذ مربوط به طرح ترکیبی سه جزئی C۵S۵M۱۰ می باشد. با توجه نتایج که اکثر بتن های حاوی پوزولان در محدوده نفوذ کمتر از ۳۰ میلیمتر قرار می گیرند با توجه به رده بندی آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، می توان گفت نمونه های آزمایشگاهی همگی در رده محیطی B و C قرار دارند. شرایط محیطی B عبارت است از: سازه های رو زمینی درنواحی نزدیک به ساحل و در معرض وزش بادهای حاوی یون های کلرید و شرایط محیطی C عبارت است از: قسمت هایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیه مویینگی خاک واقع شده است (به علت فشار کم آب یا وجود سیستم زهکشی، خطر نفوذ شدید آب از سطح به داخل بتن وجود ندارد) و یا قسمت هایی که دائماً در زیر آب دریا واقع اند [۳۷].

همانطور مشاهده نفوذ آب تحت فشار به نمونه های حاوی پوزولان در تمامی حالات کمتر از نمونه شاهد می باشد. در این حالت نیز کمترین میزان نفوذ مربوط به طرح های حاوی ضایعات متاکائولن می باشد.

همانطور در نفوذپذیری طرح های ترکیبی مشاهده می کنیم که بیشترین مقدار نفوذ پذیری مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن و سرباره ی ذوب آهن است و کمترین مقدار مربوط به طرح حاوی ۱۰ درصد ضایعات متاکائولن به همراه ۵ درصد از هرکدام سرباره ها می باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ۲۰٪ سرباره ذوب آهن به بتن باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن در برابر عوامل

بیرونی می شود. دلیل این امر را زیاد بودن مقدار سیلیکات در سرباره نسبت به سیمان است که باعث تولید سیلیکات کلسیم در بتن شده که کاهش حجم منافذ بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری را در پی دارد. باید اینچنین اعلام کرد که در مجموع بررسی های زیاد و کنکاش در نمونه های بتنی با سیمان سرباره ای متوجه شدیم که سیمان های سرباره ای در محیط های با سولفات بالا نظیر یک سیمان ضد سولفات عمل می کنند. همچنین در محیط های کلرید با داشتن نفوذ پذیری کم پایداری خوبی در برابر خوردگی آرماتور در بتن مسلح از خود نشان می دهند. در صورت کاربرد سرباره ها به صورت مناسب مطابق با این مطالعات می توان سبب کاهش مصرف سیمان در سازه ها و در نتیجه کاهش آلودگی محیط زیست گردید. از آنجا که نفوذ یون ها و گازها و مایعات از سطح بتن به داخل آن مهمترین مشخصه تعیین دوام سازه های بتنی در شرایط مختلف از جمله محیط های دریایی می باشد، آزمایش ها و روش های مختلفی برای اندازه گیری این انتقال و نفوذ در بتن ارائه شده است. آزمایش نفوذپذیری تحت فشار یکی از آسان ترین و در عین حال کاربردی ترین این آزمایشات می باشد. با توجه به ساخت و سازهای روزافزون در مناطق جنوبی و حاشیه دریای عمان و خلیج فارس (محیط های سولفاتی توام با کلرید) و لزوم در نظرگیری دوام بتن، پارامتر نفوذپذیری بتن در مقابل مایعات بسیار حائز اهمیت است. از آنجا که پدیده حاکم در این مناطق، نفوذ یون کلرید و خوردگی میلگرد است، اعمال این معیارها می تواند افزایش دوام سازه های بتنی را به همراه داشته باشد. اساس انتخاب این روش ها و معیارهای مربوط به کارهای انجام شده در مناطق جنوبی کشور و نیز پیشنهادهای ارائه شده در مشخصات فنی و دستورالعمل های کشورهای با شرایط مشابه و نزدیک آب و هوایی منطقه می باشد. استفاده از پوزولان های طبیعی که قیمت ناچیزی دارند به منظور کاهش نفوذپذیری بتن یکی از بهترین راه ها برای مقابله با شرایط محیطی جنوب کشور می باشد. در تحقیق حاضر مشخص شد که با افزودن ۲۰٪ سرباره مس، متاکائولن و سرباره آهن به ترتیب ۲۱، ۳۵ و ۳۲ درصد از میزان نفوذپذیری بتن ها در سن ۲۸ روزه کاسته شد.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

- افزودن پوزولان به دلیل جذب آب بیشتر پوزولان ها، کاهش اسلامپ بتن را در پی دارد. کمترین نفوذ آب مربوط به طرح های

- [6]. I. Yildirim and M. prezzi , “Use of steel slag in subgrade Applications,” in joint Transportation Research Program Indiana, USA, 209.
- [7]B. Das, S. Prakash , R. Reddy P.S and V. Misra , “An overview of utilization of slag and sludge from steel industries,” Resources Conservation and Recycling, vol. 50, pp. ,57-40 2007.
- [8]A. C. 233, Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part1, American Concrete Institute, Farmington Hills., 2005.
- [9]R. Oliver, “Ground Granulated Blast Furnace Slag as Cementitious in concrete,” Journal of Materials, 1987.
- [10]C. Ozyildirim, “Laboratory Investigation of low-permeability Concretes Containing Slag and silica Fume,” Journal of Materials, 1994.
- [11]R. Original carbide, Investigation of the Impact of Slag Powder Replacement on Concrete Properties, in: Third National Iranian Concrete Conference, Tehran, Iranian Concrete Association, 2011 (in Persian).
- [12]R. Zeinali Miankoh, The role of polypropylene fiberglass and fibers on self-compacting lightweight concrete containing lyca and cement containing methaacolen and zeolite, University of Gilan, 2015 (in Persian).
- [13]P. Ghoddousi, J. Ibrahim, S. Ranjbar, Investigation of short and long term compressive strength of self-compacting self-compacting concrete containing microsilica, methaqualone and slag, in: 1st National Conference on Building Materials and New Technologies in Building Industry, Islamic Azad University Maybod, 2013 (in Persian).
- [14]M. Fadaee, S.R. Mir Hosseini, M.J. Fadaee, T. Najaf Abadipour, M. Haj Ghadiri, Investigation of mechanical properties of self - compacting concrete using tailings of Sarcheshmeh Copper Mine Complex as part of cementitious materials replacement, in: P.A.R. Company, M.i.t.S.o.C. Engineering (Eds.) conference of new materials and structures in civil engineering, Shiraz, 2014 (in Persian).
- [15]Melo KA, Carneiro AMP. 2011 “Effect of metakaolin’s finesses and content in selfconsolidating concrete”. Construction and Building Materials, Vol.24, pp-1529
- حاوی ضایعات متاکائولن و بیشترین مربوط به طرح های حاوی سرباره ذوب مس می باشد.
- در طرح های حاوی ضایعات متاکائولن بهترین نتیجه مقاومت فشاری را از خود نشان داده است و در طرح های حاوی سرباره ذوب مس کمترین مقاومت فشاری را نشان می دهد.
- سرباره ذوب مس و آهن تاثیری بر مقاومت سنین پایین نداشته ولی در ۹۰ روزگی افزایش مقاومت بتن را در پی دارند.
- علت کاهش مقاومت با افزایش درصد جایگزینی پوزولان را می توان مربوط به اثر رقیق کنندگی آنها دانست. با افزایش جایگزینی پوزولان با سیمان و کاهش مقدار سیمان، واکنش های هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه پرتلندیت تولیدی کاهش خواهد یافت.
- در تمامی حالات با جایگزینی پوزولان شاهد کاهش نفوذپذیری بتن و جذب آب هستیم که اکثر بتن های حاوی پوزولان ها در محدوده نفوذ کمتر از ۳۰ میلیمتر قرار گرفتند .

#### مرجع.

- [1]Y. Zandi, M. Darvishnezhad Aliabad, M. Shariati, A. Nosrati and K. Khademi, “Portland cement structure and its major oxides and fineness,” SMART STRUCTURES AND SYSTEMS, vol. 22, no. 4, pp. 2018 10 01 ,432-425.
- [2]M. Siasi Sharifi, The role of polypropylene fibers and glass on self-compacting lightweight concrete containing lyca and composite cement containing rice husk ash ash and silica soot, University of Gilan, 2015 (in Persian).
- [3]A.A. Maghsoudi, H. Ahmadi Moghaddam, Investigation of Flexural Strength of Conventional Pozzolani Concrete in Sulfate Environment, in: National Conference on Earthquake and Building Reinforcement, Islamic Azad University of Behbahan, 2007 (in Persian).
- [4]Y. Zandi and M. Husem, “The Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction in Concrete,” International Journal of Natural and Engineering Sciences, vol. 4, no. 2, pp. 5-1, 2012.
- [5]H. Dashti, A. Safi Khani, B. Rafiei, Investigation of Laboratory Results of Embankment Slag, Basis, Sub-Basis and Asphalt Mixtures, in: Fourteenth Conference of Civil Engineering Students Nationwid, Semnan University, 2008 (in Persian).

- [26] ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete’.
- [27] Changling, H., Osbaeck, B., Makovicky, E., 1995. Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research* 1702–1691, (8) 25.
- [28] K. Shahpoori Arani, Y. Zandi, J. Katebi, M. Mohammadhassani and S. Khalafi, “Computational optimized finite element modelling of mechanical interaction of concrete with fiber reinforced polymer,” 2019.
- [29] Joy M. Justice ‘Evaluation of Metakaolins for USE as supplementary cementitious materials’ master of science thesis in Georgia Institute of Technology April 2005.
- [30] Gartner E. “Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements”, *Cement and concrete composite* 2004, pp 1498–1489.
- [31] Scrivener KL, Kirkpatrick RJ. “Innovation in use and research on cementitious material” In: 12th International congress of chemistry of cement, Montreal, Canada; 2007.
- [32] Rashad Alaa M, Zeedan Sayieda R. “The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load” *Construction And Building Materials* 2011, pp3107–3098.
- [33] BS 1881, Part 1983) 122), “Testing concrete – Part 122: Method for Determination of Water Absorption”, British Standard, London, England ..
- [34] DIN 991) 5-1048), “Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)”, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- [35] EN 2000) 8-12390), “Testing Hardened Concrete - Part 8: Depth of Penetration of Water Under Pressure”, European Committee for Standardization.
- [36] Potgieter-Vermaak S.S, Potgieter J.H, 2006 “Metakaolin as an Extender in South African Cement”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.18, pp 623-619.
- [37] B.a.H.R. Center, National Code of Concrete Reliability in the Persian Gulf and Oman Sea Environment, First edition, in: Journal No. D428-, Tehran, 2005 (in Persian).
- [38] ASTM C642, “Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete”, Annual Book 1535.
- [16] Wild S, Khatib J.M, Jones A, 1996 “Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.26, pp1544-1537.
- [17] Poon C.S, Kou S.C, Lam L, 2006 “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol.20, pp 865-858.
- [18] F. Sayahi, H. Shirzadi, Investigation of the Effect of Using Silica with Esfahan Long Melting Furnace Slag in Concrete, in: I.M.C.o.I. Capital (Ed.) International Conference on Modern Research in Civil, Tehran, 2015 (in Persian).
- [19] G. Abortion, F. Modi, Effect of slag iron furnace slag on chlorine ion penetration in concrete, in: I.C. Society (Ed.) Fifth National Iranian Concrete Conference, Tehran, 2013 (in Persian).
- [20] Y. Sharifi, F. Afshun, M.A. Momeni, Reinforced Concrete Resistant to Reinforced Cement Replaced Copper at High Temperatures, in: I.C. Association (Ed.) 6th Annual Iranian Concrete Conference, Tehran, 2014 (in Persian).
- [21] S.R. Mir Hosseini, M. Fadai, R. Tabatabai Mir Hosseini, M.J. Fadai, Investigation of Concrete Properties Made Using Slag Sarcheshmeh Copper Mine Complex as Part of Cement Replacement, in: M.S.I.I.o.A.a.U. Studies (Ed.) National Conference on Architecture and Sustainable Urban Landscape, Mashhad, 2014 (in Persian).
- [22] S. Ayano T, “Durability of concrete with copper slag fine aggregate,” in Proceedings of the fifth CANMET, ACI international conference on durability of concrete, SP-2000 ;192. p. 2000 ,58–141.
- [23] R. Collins and S. Ciesielski, “Recycling and use of wastematerials and by-products in highway,” construction national cooperative highway research programsynthesisof highway practice no, p. 199, 1994.
- [24] A. Behnood, “Effects of high temperatures on high-strength concrete incorporating copper slag aggregates,” Proceedings of seventh international symposium on high-performance concrete, vol. 75–1063, pp. SP2005 ,66-228-.
- [25] “Utilization of copper slag in the cement industry,” Taeb A, Faghihi S. . ZKG International, vol. 4)55), p. ,100–98 2002.



Structures – “State Of The Art Report”. CEB Bull 192;  
1989: pp 85–83.

of ASTM Standards, Volume 2006) ;04.02).  
[39]CEB-FIP. Diagnosis And Assessment Of Concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. DarvishNezhad Aliaba., Y. Zandi, Z. DarvishNezhad Aliabad, Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Made with Metakaolin Scrap, Melting Iron Slag and Copper Smelting Slag, Amirkabir J. Civil Eng., 52(11) (2021): 2945-2962.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15623.6196](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15623.6196)



