



Research Article

Evaluation of the Effect of Metallurgical Aggregates (Steel and Copper Slag) on Mechanical Properties of Concrete in Jointed Plain Concrete Pavements (JPCP)

Seyed Mohsen Mirnezami ^a, Abolfazl Hassani ^{b*}, Arash Bayat ^c

^a Master Candidate of Raod and Transportation, Civil and Enviromental Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, I. R. Iran.

^b Professor, Department of Raod and Transportation, Civil and Enviromental Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Khomein Branch, Khomein, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-29

Revised: 2025-01-13

Accepted: 2024-12-26

Keywords:

Jointed plain concrete pavement (JPCP);
Mechanical properties;
Slag aggregates.

ABSTRACT

This paper investigates and evaluates the use of slag as aggregate in concrete and its effect on concrete properties including mechanical strengths (compressive, flexural, abrasion, etc.) for its application in simple jointed plain concrete pavements (JPCP). The main variable of changing the type of aggregate in the concrete mixture is natural aggregate (silica), copper slag and steel slag. The aforementioned slags have been replaced with natural aggregate in fine and coarse scales and percentages of 0, 50 and 100. Results showed that concrete samples made of copper slag aggregate (100CSA) had the highest resistance in compressive strength, indirect tensile strength, flexural strength and concrete workability (slump) compared to the other samples. The use of copper slag, due to its high specific gravity, also increased the specific gravity of concrete, which is considered a negative point. Concrete samples with silica aggregate (100NA) showed the best abrasion resistance after 600 abrasion cycles. Finally, considering the results of the tests and the importance of each test, it was found that concrete samples made of 50% copper slag aggregate and 50% silica aggregate (50NA+50CSA) increased the concrete performance among the 5 mix designs made in this study.

* Corresponding author.

E-mail address: hassani@modares.ac.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر سنگدانه‌های متالورژیک (سرباره فولاد و مس) بر خصوصیات مکانیکی بتن در روسازی‌های بتنی ساده در زردار (JPCP)

سید محسن میرنظامی^۱، ابوالفضل حسنی^{۲*}، آرش بیات^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۳ استادیار، گرایش مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد خمین، خمین، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷	این مقاله به بررسی و ارزیابی استفاده از سرباره به عنوان سنگدانه در بتن و تأثیر آن بر خصوصیات بتن، از جمله مقاومت‌های مکانیکی (فشاری، خمشی، سایشی و ...) برای کاربرد آن در روسازی‌های بتنی ساده در زردار (JPCP) می‌پردازد. متغیر اصلی، تغییر نوع سنگدانه مخلوط بتنی شامل سنگدانه طبیعی (سیلیسی)، سرباره مس و سرباره فولاد است. سرباره‌های مذکور در مقیاس ریزدانه و درشت‌دانه و درصد‌های صفر، ۵۰ و ۱۰۰، جایگزین سنگدانه طبیعی شده است. نتایج نشان داد که نمونه‌های بتنی ساخته شده از سنگدانه سرباره مس (100CSA) در مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خمشی و کارایی بتن (اسلامپ) نسبت به بقیه نمونه‌ها بیشترین مقدار مقاومت را داشتند. استفاده از سرباره مس، به دلیل وزن مخصوص زیاد، موجب افزایش وزن مخصوص بتن نیز گردید که یک امتیاز منفی محسوب می‌گردد. نمونه‌های بتنی با سنگدانه سیلیسی (100NA) بهترین مقاومت سایشی بعد از ۶۰۰ سیکل سایش را از خود نشان دادند. در نهایت، با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده و اهمیت هر آزمایش، مشخص شد که نمونه‌های بتنی ساخته شده از ۵۰ درصد سنگدانه سرباره مس و ۵۰ درصد سنگدانه سیلیسی (50NA+50CSA)، عملکرد بتن را در بین پنج طرح اختلاط ساخته شده در این پژوهش افزایش داد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶	
واژه‌های کلیدی:	
روسازی بتنی ساده در زردار؛	
خصوصیات مکانیکی؛	
سنگدانه سرباره‌ای.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hassani@modares.ac.ir

۱. مقدمه

سنگدانه‌های سرباره‌ای یکی از معضلات کارخانه‌های تولید فلزات است که جاگیر بوده و فضایی برای دفع آنها موجود نمی‌باشد (منشی و عسگرانی، ۱۹۹۹). از مشکلات موجود در روسازی‌های بتنی بحث ترک‌های خستگی ناشی از تکرار بار در دال بتنی است که ایجاد تنش‌های کششی و فشاری و در نهایت گسیختگی دال را در پی دارد. همچنین، با گذشت عبور ترافیک از روی روسازی به عللی از جمله عبور لاستیک از روی روسازی و بروز پدیده پامپینگ که ناشی از نفوذ آب به زیر دال بتنی و فرسایش مصالح است، باعث خرابی و ترک در دال بتنی می‌شود (هوانگ، ۱۹۹۳). طبق تحقیقات صورت گرفته، سنگدانه‌های سرباره‌ای از خصوصیات مکانیکی خاصی نظیر مقاومت سایشی زیاد برخوردارند و نسبت به سنگدانه معمولی ارجحیت دارند. اما این نوع سنگدانه‌ها به لحاظ اثر بخشی بر خصوصیات مکانیکی بتن در حالتی که تمام سنگدانه را سرباره تشکیل می‌دهد، مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. سعی بر آن است تا از مقاومت زیاد فلزاتی نظیر آهن و مس که سرباره آنها به عنوان مواد ضایعاتی دورریز محسوب می‌شود، در بتن استفاده شود تا بتوان تنش‌های بارگذاری و ترک‌خوردگی‌های ناشی از آن را کاهش داد (وو و همکاران، ۲۰۱۰).

در تکنولوژی بتن، تأکید بیش از حد به ارتباط بین نسبت آب به سیمان به مقاومت بتن باعث ایجاد مشکلاتی شده است. به عنوان مثال، می‌توان به تأثیر سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن اشاره کرد که نادیده گرفته شده است. این حقیقت وجود دارد که مقاومت سنگدانه‌ها در بتن‌های معمولی به عنوان یک عامل تأثیرگذار به حساب نمی‌آید به این دلیل که با استثنا در نظر گرفتن سنگدانه‌های سبک، سنگدانه‌ها مقاومتی تا چندین برابر

خمیره و ناحیه انتقالی (ITZ)^۱ در بتن دارند (مهتا و مونتیرو، ۲۰۰۶).

در طبیعت، سنگ‌های معدنی به شکل غیرخالص و عموماً به شکل اکسید شده و ترکیب با سیلیکات‌ها و سایر فلزات شکل گرفته‌اند. سرباره، محصول جانبی ذوب سنگ معدن به منظور جداکردن بخش فلزی از دیگر اجزای غیرفلزی است و می‌توان آن را که ترکیبی از اکسیدهای فلزی است برای کمک به ذوب فلز، جدا کردن ناخالصی‌ها و حفاظت بدنه نسوز کوره از گدازآورها استفاده کرد. در تولید آهن، سنگ آهک و دولومیت و در تولید فولاد، آهک بدین منظور به کار می‌رود (NSA، ۲۰۰۱). در کوره بلند، عملیات احیا و ذوب مواد شارژی صورت می‌گیرد. با توجه به محیط احیایی کوره که توسط گازهای H_2 و CO ایجاد می‌شود، آهن و سایر فلزات موجود در بوته به مقدار بسیار کمی در سرباره حضور دارند. بر اساس تعریف ASTM، سرباره کوره بلند محصولی است غیرفلزی که عمدتاً شامل کلسیم سیلیکات‌ها و دیگر عناصر پایه است که در شرایط مذاب همزمان با آهن در کوره بلند تولید می‌شود (ASTM، ۲۰۲۰).

سرباره مس محصول جانبی فرایند تولید فلز مس می‌باشد که با توجه به میزان زیاد تولید سالانه آن در جهان، به عنوان یک پسماند صنعتی و معدنی به دپو در محیط زیست، می‌توان از آن در صنایع ساخت و ساز استفاده نمود (ICSG، ۲۰۱۵). همان طور که اشاره شد، با توجه به درصد زیاد اکسید آهن و سیلیکات موجود در سرباره مس و همچنین خصوصیات مکانیکی و دوام مشابه یا بهتر سرباره، نسبت به سنگدانه طبیعی، این اجازه را به ما می‌دهد که به عنوان یک مصالح جایگزین سنگدانه می‌تواند در بتن با مقاومت زیاد که دارای نسبت آب به سیمان کم است، استفاده شود (گورای و جانا، ۲۰۰۳).

1- Interfacial Transition Zone

الجبری و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق خود، با جایگزینی صفر تا ۱۰۰ درصد ریزدانه با سرباره مس، تأثیرات افزودن این ماده به بتن و ملات سیمان را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، هفت مخلوط بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. روی ملات سیمان تولید شده، آزمایش مقاومت فشاری انجام گرفت. همچنین روی نمونه‌های بتنی تولید شده، آزمایش‌های کارایی، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، خمشی و دوام انجام شد. نتایج آزمایش ملات سیمان بیانگر افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد سرباره مس نسبت به طرح شاهد بود. آنها اعلام کردند که در جایگزینی ۵۰ درصد، مقاومت فشاری حدود ۷۰ درصد بهبود می‌یابد. افزایش ۵ درصدی وزن مخصوص و افزایش قابل ملاحظه در کارایی از دیگر نتایج افزودن سرباره مس در بتن بود که مشاهده گردید. مناسب‌ترین مقدار سرباره برای حصول مقاومت زیاد در جایگزینی ۴۰ تا ۵۰ درصد بیان گردید. ضمناً تا ۵۰ درصد جایگزینی، جذب آب بتن کاهش می‌یابد؛ ولی در درصدهای بیشتر، این پارامتر افزایش می‌یابد (الجبری و همکاران، ۲۰۰۹).

یکی از محدود تحقیقات صورت گرفته در زمینه استفاده از درشت‌دانه سرباره مس، مربوط به کالسیکان و بهنود (۲۰۰۴) می‌باشد که با جایگزینی تدریجی سرباره مس به جای درشت‌دانه در بتن معمولی انجام شده است. در این تحقیق، به این نتیجه رسیده شد که با افزایش میزان سرباره و جایگزینی تدریجی آن، مقاومت افزایش می‌یابد که دلیل آن احتمالاً چسبندگی بهتر سرباره مس با خمیر سیمان می‌باشد.

سرباره دارای مقاومت سایشی و وزن مخصوص زیاد است و به دلیل داشتن سطح ناهموار دانه‌ها، قابلیت چسبندگی زیاد به ماده چسبنده مانند سیمان را دارد (بیلدیریم و پرزی، ۲۰۰۹). همچنین، به دلیل مقاومت

فشاری زیادتر دانه‌ها، معمولاً بتن تهیه شده از سرباره مقاومت بیشتری دارد؛ هرچند این امر کاملاً بستگی به مشخصات دانه‌ها، نحوه تولید فلز و فرآیند سرد شدن و جداسازی دارد (بنتور و میندس، ۲۰۰۶). سرباره دارای تخلخل بیشتری نسبت به دانه‌های سنگ طبیعی است. در حالی که قابلیت جذب مواد در سرباره کمتر از سنگدانه‌های طبیعی است و این امر باعث افزایش مقاومت بتن ساخته شده با دانه‌های سرباره‌ای شده و دوام آن را در برابر شرایط محیطی افزایش می‌دهد (سیواسختی و همکاران، ۲۰۲۰).

بزرگترین مشکل بالقوه در مورد استفاده از سرباره در بتن، خصوصیت افزایش حجم شدید دانه‌های آن در مجاورت با رطوبت و واکنش شیمیایی نامطلوب با مواد تشکیل‌دهنده بتن است (USEPA، ۲۰۱۱). دانه‌های سرباره‌ای عموماً به دلیل وجود آهک آزاد زنده (هیدرات شده)^۱ و اکسیدهای منیزیم^۲ قابلیت افزایش حجم در مجاورت رطوبت را دارند. بر اساس گزارش دپارتمان حمل‌ونقل آمریکا (DOT)^۳ و اداره راه‌های فدرال آمریکا (FHWA)^۴، مقداری کلسیم آزاد و اکسیدهای منیزیم در فرایند تولید آهن به طور کامل مصرف نشده و در سرباره باقی می‌ماند. هیدراتاسیون این مواد در سرباره در مجاورت رطوبت، عامل اصلی افزایش حجم سرباره است. آهک آزاد به سرعت هیدراته می‌شود و افزایش حجم پیدا می‌کند؛ در حالی که هیدراتاسیون اکسیدهای منیزیم به کندی و حتی تا سال‌ها ادامه می‌یابد (USEPA، ۲۰۱۱).

در این تحقیق، هدف ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتنی است که با سنگدانه‌های سرباره‌ای ساخته می‌شود و بررسی این موضوع که آیا سنگدانه سرباره فولاد و مس می‌تواند مقاومت خمشی و سایشی بتن را افزایش دهد؟ آیا سرباره‌های مذکور می‌توانند تنش‌های خمشی و

3- Department of Transportation
4- Federal Highway Administration

1- Hydrated lime
2- Magnesium oxide

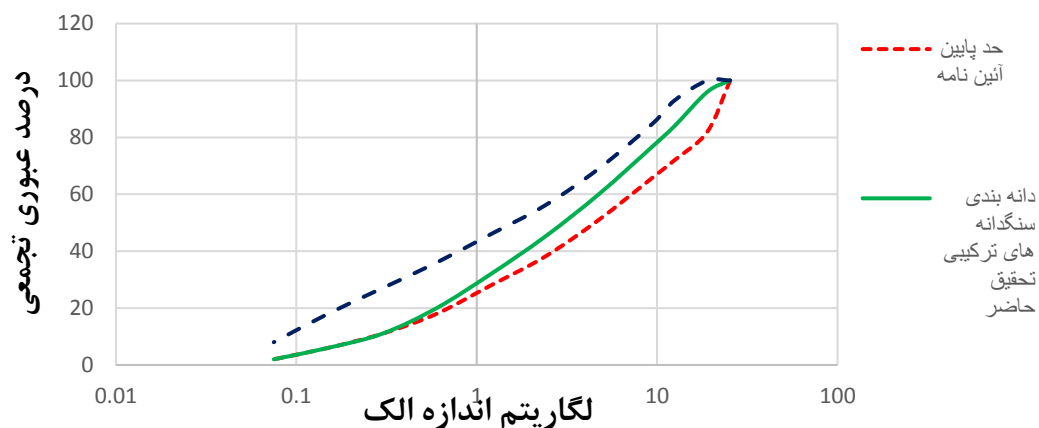
دی بود که از معادن تولید سنگدانه شهریار در اطراف شهر شهریار تهیه شده است. ترکیبات شیمیایی سنگدانه مصرفی شامل سنگدانه سیلیسی، سرباره مس و فولاد در این تحقیق به شرح جدول ۱ می‌باشد. بزرگترین درشت-دانه استفاده شده دارای قطر اسمی ۱۹ میلی‌متر می‌باشد زیرا مطابق استاندارد بتن ایران (۲۰۱۷)، اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه باید از یک پنجم کوچکترین بُعد داخلی کوچکتر باشد. همچنین، مطابق استاندارد ASTM C31 (۲۰۱۵)، کوچکترین بُعد قالب باید حداقل سه برابر اندازه بزرگترین سنگدانه باشد. در شکل ۱، نمودار منحنی دانه‌بندی مذکور ارائه شده است.

ساییده شدن سطح روسازی که ناشی از بارگذاری ترافیکی است را در روسازی‌های بتنی ساده درزدار کاهش دهند؟ در گام بعدی، هدف تعیین نوع سنگدانه‌ای است که بتواند بیشترین تأثیر را بر افزایش مقاومت‌های ذکر شده در بتن بگذارد.

۲. مواد و مصالح

۱-۲. مصالح سنگی طبیعی

مصالح سنگی طبیعی استفاده شده در این پژوهش، سنگدانه‌های شکسته سیلیسی خریداری شده از شرکت



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های ترکیبی برای ساخت نمونه‌ها

جدول ۱. درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌های مصرفی

درصد وزنی ماده تشکیل دهنده			ماده تشکیل دهنده
سرباره فولاد	سرباره مس	سنگدانه سیلیسی	
۱۹/۶۳	۲۷/۹۴	۵۳/۹۴۹	SiO _۲
۲۹/۶۱۵	۲/۷۰۱	۱۲/۲۴	CaO
۴/۴۶۴	۴/۴۱	۱۱/۸۳۶	Al ₂ O ₃
—	—	۱۱/۵	L.O.I
۳۵/۷۵۲	۵۷/۲۵	۲/۹۳۸	Fe ₂ O ₃
۰/۵۴	۰/۶۳۱	۲/۴۶۴	Na ₂ O
۰/۱۹۸	۰/۷۰۴	۲/۴۳	K ₂ O
۶/۴۰۳	۱/۵۵۷	۱/۹۴۷	MgO

جدول ۲. طرح کلی اختلاط استفاده شده

ردیف	کد نمونه	نمونه	سیمان (kg)	آب (kg)	سنگدانه سیلیسی (kg)	سرباره فولاد (kg)	سرباره مس (kg)
۱	100NA	۱۰۰ درصد سنگدانه سیلیسی	۴۲۵	۲۰۰	۱۶۹۰	-	-
۲	100CSA	۱۰۰ درصد سنگدانه سرباره مس	۴۲۵	۲۰۰	-	-	۲۷۸۵
۳	100SSA	۱۰۰ درصد سنگدانه سرباره فولاد	۴۲۵	۲۰۰	-	۲۳۹۰	-
۴	50NA+50CSA	۵۰٪ سنگدانه سرباره مس + ۵۰٪ سنگدانه سیلیسی	۴۲۵	۲۰۰	۸۴۵	-	۱۳۹۲
۵	50NA+50SSA	۵۰٪ سنگدانه سرباره فولاد + ۵۰٪ سنگدانه سیلیسی	۴۲۵	۲۰۰	۸۴۵	۱۱۹۵	-

۲-۲. سرباره فولاد

سرباره استفاده شده در این تحقیق، سرباره کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد خوزستان می باشد. این سرباره، ترکیبی غیرفلزی است که دارای درصدهای مختلفی از انواع اکسیدهای آهن، آلومینوم، منگنز، منیزیم و سایر عناصر می باشد که همزمان با فولاد تولید می شود و به عنوان محصول جانبی کارخانجات فولادسازی در موارد مختلف مانند جایگزین سیمان، جایگزین سنگدانه ها در بتن، به عنوان سنگدانه در آسفالت، استفاده در بالاست، تهیه تراورس بتنی و آجر، راه سازی و سایر موارد به کار گرفته می شود.

۳-۲. سرباره مس

سرباره مس استفاده شده در این تحقیق، محصول جانبی تولید شده در معدن مس سرچشمه کرمان می باشد. سرباره مس، از نقطه نظر تولید، به دو دسته اصلی سرباره سرد شده در هوا^۱ و سرباره سرد شده با آب^۲ تقسیم بندی می شود. با توجه به اینکه سردسازی سرباره مس با آب، موجب تولید سرباره با اندازه ذرات کمتر از ۴ میلی متر می شود و در این تحقیق، هدف جایگزینی سرباره با

درشت دانه مخلوط می باشد، در این کار از سرباره سرد شده در هوا استفاده گردید.

۴-۲. سیمان

برای انجام این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان تهران با وزن مخصوص $3/15 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$ و مدول نرمی $2910 \text{ (cm}^2\text{/gr)}$ استفاده گردید. زمان گیرش اولیه آن ۱۵۴ دقیقه و گیرش نهایی ۱۹۵ دقیقه اندازه گیری شد.

۵-۲. طرح اختلاط بتن

انتخاب طرح مخلوط برای این پژوهش بر اساس آیین نامه ۷۳۱ طراحی و اجرای روسازی های بتنی بوده است (نشریه ۷۳۱، ۲۰۱۷). ابتدا تمام سنگدانه های سیلیسی، سرباره فولاد و سرباره مس دانه بندی شدند. سپس، با توجه به منحنی دانه بندی و جدول ۲، سنگدانه ها پس از مخلوط کردن، سیمان نیز به سنگدانه ها اضافه می شود. سپس به مدت سه دقیقه مخلوط کردن، آب نیز اضافه خواهد شد و به مدت چهار دقیقه مخلوط هم زده می شود. تمامی نمونه های بتنی ساخته شده دارای مقادیر یکسان آب و سیمان می باشند. نمونه ها به دو صورت ۱۰۰

1- Air-cooled copper slag

2- Water-cooled copper slag

درصد و ۵۰ درصد حجمی بتن از هر نوع سنگدانه ساخته شدند.

(غوطه ور کردن در حوضچه آب) انجام شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب داخل نایلون در دمای آزمایشگاه باقی ماند. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها درون حوضچه آب (به صورت غوطه‌ور) نگهداری شدند. پس از زمان‌های ۲۸ روزه و ۹۰ روزه، آزمایش‌های مورد نظر انجام شد.

۶-۲. عمل‌آوری

عمل‌آوری نمونه‌های بتن به دو صورت عایقی (نگهداری نمونه‌ها در نایلون و حفظ رطوبت نمونه‌ها) و مرطوب

جدول ۳. برنامه آزمایش‌های صورت گرفته

آزمایش	استاندارد آزمایش	سن عمل‌آوری (روز)	ابعاد نمونه (میلی‌متر)	تعداد نمونه هر اختلاط
اسلامپ (ASTM، ۲۰۱۵)	ASTM C143-90	بعد از اختلاط	-	-
وزن مخصوص (ASTM، ۲۰۱۰)	ASTM C1688	بعد از اختلاط	-	-
مقاومت فشاری (BS، ۲۰۰۳)	BS EN12390-3	۲۸ و ۹۰	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	۳ و ۳
مقاومت کششی غیرمستقیم (ASTM، ۲۰۰۴)	ASTM C496	۲۸ و ۹۰	استوانه ۱۰۰×۲۰۰	۳ و ۳
مقاومت خمشی (ASTM، ۲۰۱۶)	ASTM C78	۲۸ و ۹۰	۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰	۳ و ۳
مقاومت سایشی (ASTM، ۱۹۹۹)	ASTM C944	۲۸	استوانه ۶۰×۱۵۰	۳
فراصوت (ASTM، ۲۰۰۹)	ASTM C597	۲۸	۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰	۳

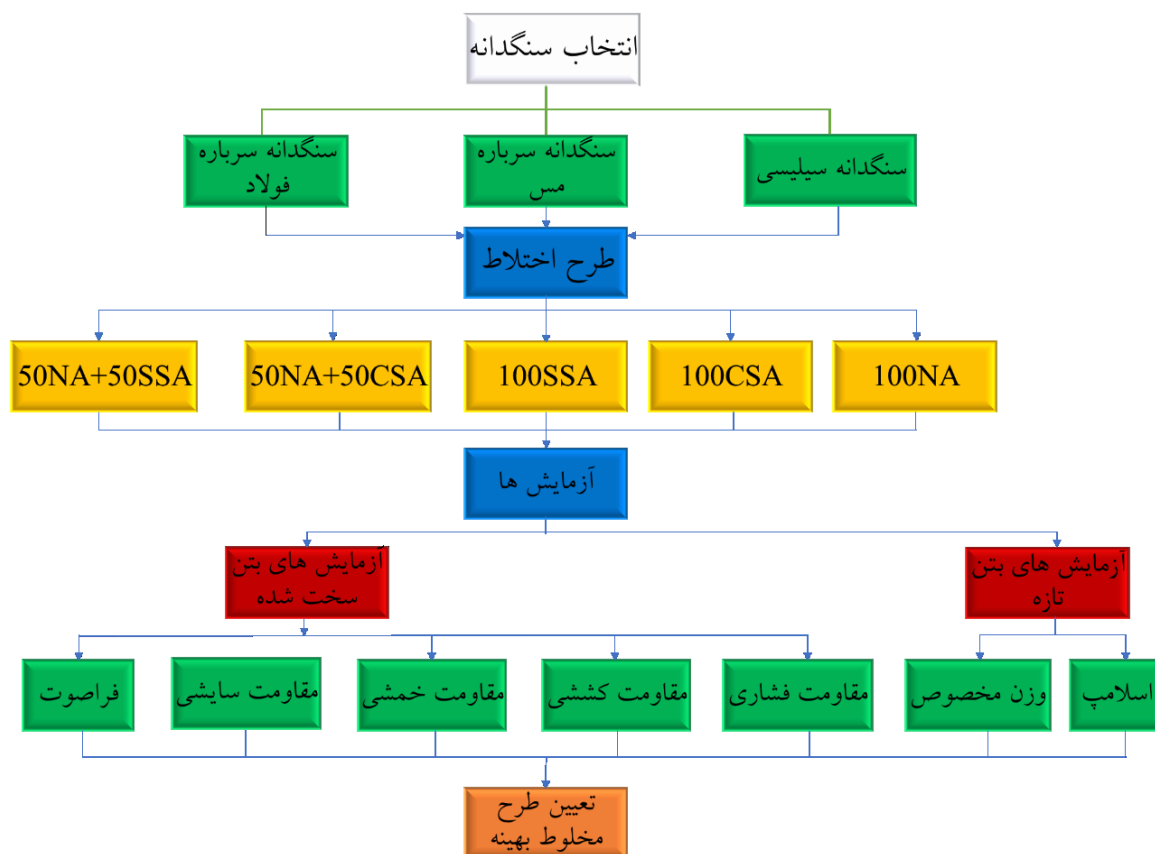
۷-۲. روش آزمایش

برنامه آزمایشگاهی این پژوهش به صورت خلاصه در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است. به طور کلی، دو گروه آزمایش انجام شد که شامل آزمایش‌های بتن تازه و آزمایش‌های بتن سخت شده بودند. در آزمایش بتن تازه، میزان کارایی بتن (اسلامپ) برای پر کردن قالب و مقدار وزن مخصوص بتن اندازه‌گیری شد. در آزمایش بتن

سخت شده، مقدار مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم، خمشی، سایشی و فراصوت اندازه‌گیری شد. انجام آزمایش مقاومت سایشی در این تحقیق بر مبنای ASTM C944 (ASTM، ۱۹۹۹) صورت پذیرفت. این روش سایشی اثر سریع تری نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی ASTM ایجاد می‌کند. این روش برای اندازه‌گیری کاهش وزن و عمق ساییده شده در نمونه بتنی است. هنگامی که نمونه‌ها توسط چرخ ساییده

دو دقیقه دستگاه را روشن می‌کنیم و با اعمال بار دستگاه، سایش صورت می‌گیرد. این کار در سه مرحله دو دقیقه‌ای برای هر نمونه انجام می‌شود که پس از پایان هر مرحله توسط یک برس سیمی روی نمونه پاک و عاری از هر گونه گرد و غبار می‌شود. در ادامه، وزن نمونه توسط ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود.

(شکل ۳) تحت نیروی تراش و لغزش قرار می‌گیرند. یک کاتر چرخان مطابق شکل ۳، که از ۲۲ چرخ ساینده ستاره‌ای شکل ساخته شده برای اندازه‌گیری سایش نمونه بتن استفاده می‌شود. برای کنترل میزان سایش در این آزمایش، از دو معیار درصد کاهش وزن نمونه استفاده شد. نمونه آماده شده را زیر دستگاه قرار داده و به مدت



شکل ۲. فلوچارت روند انجام آزمایش

که نمونه‌های دارای سنگدانه سرباره فولاد به مراتب افت روانی کمتری نسبت به نمونه‌های با سنگدانه سرباره مس و سنگدانه سیلیسی دارند. نمونه‌های با سنگدانه سرباره فولاد کمترین اسلامپ و نمونه‌های با سنگدانه سرباره مس بیشترین اسلامپ را داشتند. سرباره فولاد به دلیل سطح زبرتر و خشن‌تر نسبت به سرباره مس و سنگدانه سیلیسی، نمونه‌های ساخته شده از آن اسلامپ کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر سنگدانه‌ها داشتند. در حالی که

۳. بررسی و تحلیل نتایج

۳-۱. نتایج آزمایش اسلامپ

نتایج آزمایش روانی بتن (اسلامپ) در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است. کارایی بتن به عوامل مختلفی از قبیل میزان آب، نوع سنگدانه‌ها، دانه‌بندی مصالح سنگی، ریزی سیمان و نوع و میزان مواد افزودنی بستگی دارد که البته مؤثرترین فاکتور میزان آب می‌باشد. نتایج نشان داد

سنگدانه‌های سرباره مس دارای سطح صیقلی‌تر و تخلخل کمتر نسبت به سرباره فولاد بودند.

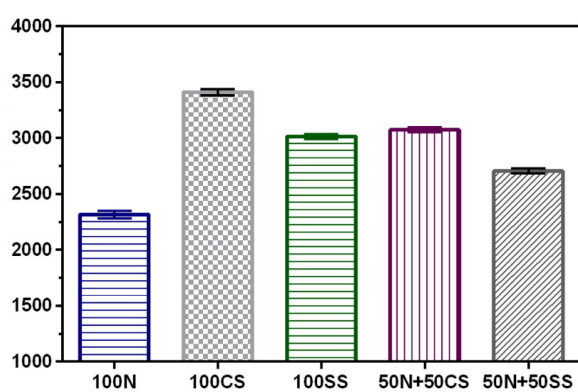
۲-۳. نتایج آزمایش وزن مخصوص

با توجه به نمودار شکل ۵، وزن مخصوص نمونه‌های با سنگدانه سیلیسی مانند نمونه‌های بتن معمولی در حدود ۲۳۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود. با توجه به اینکه سرباره مس، وزن مخصوص بیشتری نسبت به سرباره فولاد داشته در نتیجه نمونه‌های با سنگدانه سرباره مس وزن مخصوص بیشتری در حدود ۳۴۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب داشتند. در حالی که نمونه‌های با سنگدانه سرباره

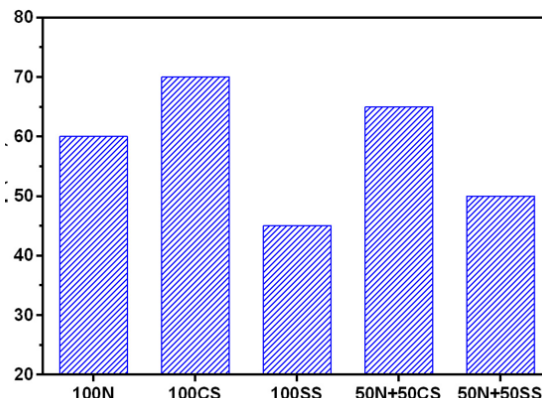
فولاد وزن مخصوصی در حدود ۳۰۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب داشتند. به طور کلی، نمونه‌های با سرباره مس ۴۷ درصد افزایش وزن مخصوص داشته و نمونه‌های با سنگدانه سرباره فولاد در حدود ۳۰ درصد افزایش وزن مخصوص داشتند. در مجموع، مخلوط بتنی با وزن مخصوص زیاد یک امتیاز منفی محسوب می‌شود زیرا جهت ساخت روسازی بتنی باید کامیون حامل بتن را از محل ساخت تا محل اجرا حمل کند. کامیون، ظرفیت محدودی دارد و بتن با وزن مخصوص زیاد حجم کمی را در کامیون اشغال می‌کند. در نتیجه باعث افزایش تردد کامیون برای حمل حجم مشخصی از بتن شده و این خود باعث ایجاد هزینه برای پروژه ساخت روسازی می‌شود.



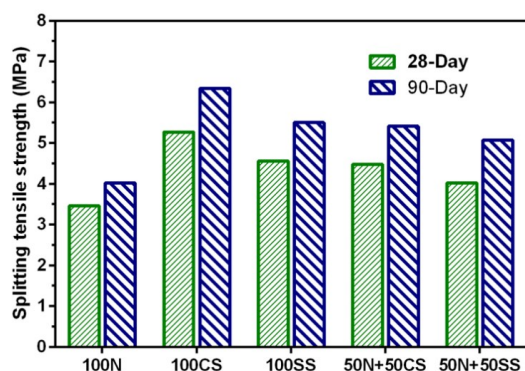
شکل ۳. دستگاه سایش مطابق با استاندارد (ASTM, 1999) ASTM C944



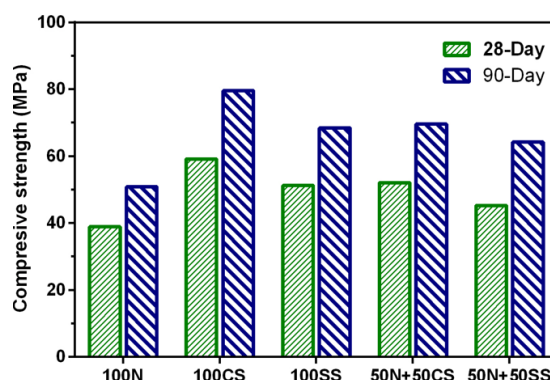
شکل ۵. نتایج وزن مخصوص نمونه‌های بتنی ساخته شده



شکل ۴. نتایج اسلامپ اندازه‌گیری شده



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم



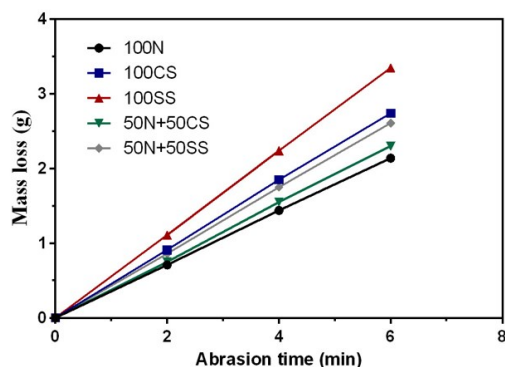
شکل ۶. مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۹۰ روزه

۳-۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

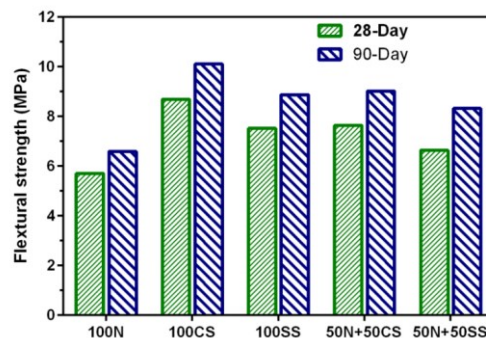
مطابق با شکل ۶، بتن با سنگدانه سرباره مس بیشترین مقاومت فشاری را دارد و کمترین مقاومت فشاری هم مربوط به بتن با سنگدانه سیلیسی بود. مشاهده می‌شود که افزودن سرباره به بتن و به‌خصوص جایگزینی آن با سنگدانه سیلیسی نتایج به مراتب بهتری در مقاومت فشاری ایجاد می‌کند. اگر چه سرباره فولاد به اندازه سرباره مس مقاومت فشاری را در بتن بهبود نداد ولی مقاومت خیلی بیشتری نسبت به بتن معمولی داشت. مخلوط حاوی سرباره مس به دلیل چگالی بیشتر و چسبندگی بهتر با خمیر سیمان، موجب مقاومت فشاری بیشتر آن نسبت به طرح بدون سرباره شده است.

۳-۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مطابق با شکل ۷، نتایج این آزمایش نیز مانند آزمایش مقاومت فشاری نشان‌دهنده افزایش مقاومت با افزایش میزان سرباره فولاد و سرباره مس می‌باشد. این افزایش مقاومت کششی در تحقیقات انجام گرفته روی جایگزینی درشت‌دانه مخلوط با سرباره مس مشاهده شده است (خانزادی و بهنود، ۲۰۰۹). همچنین، به دلیل کاهش تردشدگی بتن، که در نتیجه استفاده از سنگدانه‌های متخلخل سرباره‌ای می‌باشد، مقاومت کششی مقطع نیز به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. علت افزایش مقاومت بتن با سنگدانه سرباره مس و فولاد پس از ۲۸ روز، واکنش‌های شیمیایی این سرباره‌ها با ملات سیمان و ساخت شبکه مستحکم از پیوند بین سیمان و سرباره، به‌خصوص سرباره مس، می‌باشد.



شکل ۹. نتایج آزمایش سایش نمونه‌های بتنی



شکل ۸. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی



شکل ۱۰. سطح ساییده شده نمونه بتنی

آزاد در بتن تازه رخ می‌دهد که در پژوهش رضائی لری و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. نتایج این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است.

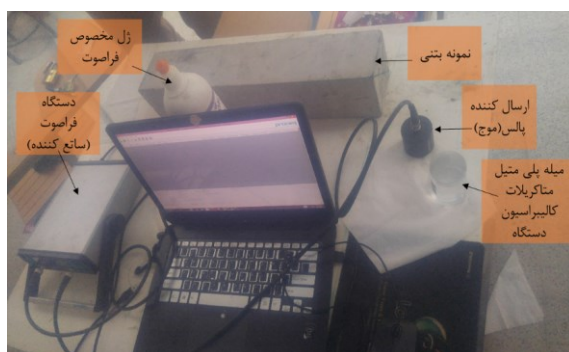
۳-۶. نتایج آزمایش مقاومت سایشی

مطابق با شکل ۹، کمترین میزان سایش مربوط به نمونه بتنی با سنگدانه سیلیسی، به میزان ۲/۱۴ گرم، بعد از ۶۰۰ دور سایش اتفاق افتاد. در حالی که نمونه‌های با سنگدانه سرباره مس و سنگدانه سرباره فولاد، مقاومت سایشی کمتری داشتند. در این بین، نمونه‌های سرباره مس مقاومت سایشی بهتری از خود نشان دادند. علت این امر را هم می‌توان چسبندگی بهتر خمیر سیمان با سنگدانه سرباره مس عنوان کرد. در حالی که در نمونه‌های با سنگدانه سرباره فولاد، با وجود قفل و بست بیشتر نسبت به سنگدانه سرباره مس، به دلیل واکنش‌های شیمیایی پوزولانی بیشتر بین سرباره مس و خمیر سیمان نسبت به

۳-۵. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نمونه‌های بتنی با سنگدانه سرباره مس بیشترین مقاومت خمشی را در هر دو سن ۲۸ روز و ۹۰ روز عمل‌آوری را داشتند که با نتایج پژوهش رضائی لری و همکاران (۲۰۱۹) کاملاً مطابقت دارد. سطح سرباره مس، متراکم و بدون تخلخل‌های ظاهری است و این سطح صاف و به ظاهر صیقلی به نظر باید از چسبندگی ضعیف در بتن برخوردار باشد. ولی مطابق با نتایج سایر پژوهش‌ها، که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده شده، در ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) مرز بین خمیر سیمان با سنگدانه در بتن‌های با سنگدانه سرباره مس نسبت به سنگدانه‌هایی نظیر سنگدانه سیلیسی و دولومیتی که از سطح زیر و خشن‌تری برخوردار است، اتصال بهتری دارد. این چسبندگی بهتر سرباره مس با خمیر سیمان ناشی از پیوندهای سیلیکات‌های کلسیم هیدراته بین آن-هاست که در نتیجه واکنش پوزولانی سنگدانه و آهک

سرعت موج فراصوت نیز کاسته شد. اگرچه به ظاهر نتایج این آزمایش نشان از تراکم یا تخلخل نمونه‌های بتنی دارد اما نباید از این موضوع غافل شد که به دلیل تأثیر عواملی از جمله نوع سنگدانه بتن، ترکیب کانی-شناسی، بافت، اندازه و شکل دانه‌ها، دانسیته، تخلخل، ناهمسانگردی، رطوبت و حرارت، بر سرعت انتشار امواج صوتی در نمونه‌های بتنی تأثیر گذارند و به طور قطع نمی‌توان گفت وجود سرعت زیاد یا سرعت کم امواج صوتی در نمونه‌های بتنی نشان ۱۰۰ درصدی از تراکم زیاد یا کم در نمونه‌های بتنی دارد. در شکل ۱۲، تجهیزات و نحوه انجام آزمایش فراصوت نشان داده شده است.

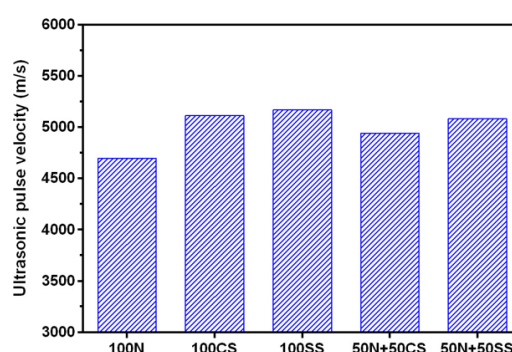


شکل ۱۲. دستگاه آزمایش فراصوت

سرباره فولاد، باعث شده که مقاومت سایشی نمونه‌های بتنی با سرباره فولاد، نسبت به نمونه‌های با سرباره مس، کاهش یابد.

۷-۳. نتایج آزمایش فراصوت

مطابق با نمودار شکل ۱۱، سرعت موج فراصوت به خوبی از روند رو به رشد مقاومت نمونه‌ها حکایت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در سن ۲۸ روزه بیشترین سرعت موج مربوط به نمونه بتنی با ۱۰۰ درصد سنگدانه سرباره فولاد (100SSA) و با کمی اختلاف نمونه با سنگدانه ۱۰۰ درصد سرباره مس (100CSA) می‌باشد و این سرعت با کاهش میزان سرباره‌های فولاد و مس از



شکل ۱۱. نمودار نتایج آزمایش فراصوت

اعداد مختلف و با فاصله، استفاده شد. در این روش، به اعداد حاصل از آزمایش‌ها با توجه به اهمیت بیشتر هر آزمایش نسبت به دیگر آزمایش‌ها، یک ضریب وزنی تعلق می‌گیرد. علت قرار دادن جداول با مقادیر حداقل و حداکثر نتایج آزمایشگاهی برای ورودی روش ویکور است. علاوه بر مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، پارامترهای دیگری شامل کمک به حفاظت از محیط‌زیست و اقتصادی بودن مصالح نیز در

۸-۳. انتخاب طرح مخلوط بهینه

با توجه به نتایج به دست آمده، امکان انتخاب طرح مخلوط مناسب جهت بهبود خصوصیات مکانیکی بتن و کمک به حفاظت از محیط‌زیست از میان طرح‌های ساخته شده در این پژوهش وجود نداشته و لذا برای انتخاب نمونه مناسب از روش ویکور^۱ (صیادی و همکاران، ۲۰۰۹) مبتنی بر حل مشکلات تصمیم‌گیری در مورد

1- Vikor

این روش گنجانده شده است. برای تعیین طرح مخلوط بهینه در این پژوهش، ضریب انتخابی برای حفاظت از محیط‌زیست و آزمایش‌های مقاومت خمشی و سایشی که از مهم‌ترین و اصلی‌ترین آزمایش‌ها هم بوده است، ۳ در نظر گرفته شده است. ضرایب هر آزمایش به صورت کامل در جدول ۴ قرار داده شده است. پس از انجام یک-سری عملیات ریاضی روی داده‌های هر آزمایش و اعمال ضریب هر آزمایش، در نهایت به جدول ۵ ختم می‌شود. در این جدول، هر چه اعداد ستون کوچکتر باشد، آن طرح به خواسته پژوهش نزدیک‌تر است. مطابق با جدول ۵، بهترین و مناسب‌ترین طرح (طرح مخلوط بهینه این پژوهش)، طرح استفاده از ۵۰ درصد سنگدانه سیلیسی و ۵۰ درصد سنگدانه سرباره مس (50NA+50CSA) می‌باشد.

جدول ۴. ضرایب پارامترها

شماره	عنوان پارامتر	ضریب پارامتر
۱	اسلامپ	۱
۲	وزن مخصوص	۲
۳	مقاومت فشاری	۲
۴	مقاومت کششی غیرمستقیم	۲
۵	مقاومت خمشی	۳
۶	مقاومت سایشی	۳
۷	فراصوت	۱
۸	حفاظت از محیط‌زیست	۳
۹	مصالح اقتصادی	۲

۴. نتیجه‌گیری

به تمامی نتایج حاصل شده، بهترین طرح اختلاط برای رسیدن به عملکرد مطلوب بتن در برابر تنش‌های وارد شده ناشی از بارگذاری، طرح مخلوط ۵۰ درصد سرباره مس و ۵۰ درصد سنگدانه سیلیسی (50NA+50CSA) بود که در تمام آزمایش‌ها نتایج قابل قبولی از خود نشان داد.

باتوجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده می‌توان استنباط کرد که سرباره مس و پس از آن سرباره فولاد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد مکانیکی بتن داشتند. به جز مقاومت در برابر سایش، در مابقی موارد افزایش مقاومت به طور کاملاً واضح مشهود بود. با توجه

جدول ۵. تعیین طرح مخلوط بهینه پژوهش

طرح مخلوط	رتبه بندی	Q
100NA	۳	0.3215786
100CSA	۲	0.1492902
100SSA	۵	1.1485583
50NA+50CSA	۱	0.0937991
50NA+50SSA	۴	0.3584770

- Al-Jabri, K. S., et al. 2009. "Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 23(6): 2132-2140.
- Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H. and Taha, R. 2011. "Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 933-938.
- ASTM C944. 1999. "Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method". American Society for Testing and Materials.
- ASTM C496. 2004. "Standard test method-for-splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C597. 2009. "Standard test method for pulse velocity through concrete". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C1688. 2010. "Fresh concrete density (unit weight) and void content". American Society for Testing and Materials.
- ASTM C31. 2015. "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field". American Society for Testing and Materials.
- ASTM C143. 2015. "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete". American Society for Testing and Materials.
- ASTM C78. 2016. "Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading)". American Society for Testing and Materials.
- ASTM. 2020. "ASTM D8021-20, standard guide for blast furnace and steel furnace slag as produced during the manufacture of iron and steel", International, West Conshohocken, PA.
- Bentur, A. and Mindess, S. 2006. "Fiber Reinforced Cementitious Composites". Spons Architecture Price Book.
- Caliskan, S. and Behnood, A. 2004. "Recycling copper slag as coarse aggregate: hardened properties of concrete". *Seventh International Conference on Concrete Technology in Developing Countries*.
- Gorai, B. and Jana, R. 2003. "Characteristics and utilisation of copper slag-a review". *Resour., Conserv. Recy.*, 39(4): 299-313.
- Huang, Y. H. 1993. "Pavement analysis and design". Prentice Hall, The University of Kentucky.
- ICSG. 2015. "The world copper-factbook". International Copper Study Group, Lisbon, Portugal, 64 p.
- Khanzadi, M. and Behnood, A. 2009. "Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 23(6): 2183-2188.
- Mehta, P. and Monteiro, K. 2006. "Concrete microstructure, properties, and materials". 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Ministry of Road and Urban Development, Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs. 2017. "Design, construction and maintenance manual for highways concrete pavements". No. 731. [In Persian]
- Monshi, A. and Asgarani, M. K. 1999. "Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone". *Cement Concrete Res.* 29: 1373-1377.
- NSA. 2001. "Steel slag a premier construction aggregate". www.nationalslag.org/Archive/nsa_steel_furnace_brochure.pdf. Accessed Online: 5/8/2016.
- Rezaei Lori, A., Bayat, A. and Azimi, A. 2019. "Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete". *Road Mater. Pavement Design*, 22: 835-851.
- Sayadi, M. K., Heydari, M. and Shahanaghi, K. 2009. "Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers". *Appl. Math. Model.*, 33(5): 2257-2262.
- Sivasakthi, M., Jeyalakshmi, R. and Rajamane, N. P. 2020. "Fly ash geopolymer mortar: Impact of the substitution of river sand by copper slag as a fine aggregate on its thermal resistance properties". *J. Clean Prod.*, 279: 123766.
- USEPA. 2011. Identification of nonhazardous secondary materials that are solid waste". US Environmental Protection Agency.
- Wu, W., Zhang, W. and Ma, G. 2010. "Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression". *Constr. Build. Mater.*, 24(6): 910-917.
- Yildirim, I. Z. and Prezzi, M. 2009. "Use of steel slag in subgrade applications". *Joint Transportation Research Program, Indiana*, 270 p.