

ارزیابی تأثیر سرباره مس در بهبود خصوصیات مخلوط‌های بتنی متخلخل

علی رضایی لری، کارشناسی ارشد مهندسی عمران راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
ابوالفضل حسنی*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از روسازی‌های بتنی متخلخل، به دلیل مزایای عمده زیست‌محیطی، رو به رشد می‌باشد. وجود فضای خالی زیاد در این روسازی‌ها موجب کاهش مقاومت و دوام آن‌ها شده است. این امر، استفاده از این روسازی‌ها را محدود به معابر شهری با ترافیک سبک، پیاده‌روها و پارکینگ‌ها کرده است. در این نوع بتن، سنگ‌دانه نقش به‌سزایی در عملکرد آن ایفا می‌کند. به طوری که استفاده از سنگ‌دانه با خصوصیات مطلوب، موجب بهبود عملکرد آن می‌شود. سرباره مس، محصول فرعی تولید فلز مس می‌باشد که به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مناسب، استفاده از آن علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، می‌تواند موجب بهبود عملکرد این نوع بتن شود. در این پژوهش، به بررسی و ارزیابی استفاده از سرباره مس در بتن متخلخل و تأثیر آن بر خصوصیات این بتن پرداخته شد. درصد‌های مختلف سرباره مس، به صورت حجمی، جایگزین درشت‌دانه مخلوط (سنگ‌دانه دولومیتی) گردید. در مجموع، ۶ طرح اصلی با مقادیر مختلف سرباره مس از صفر تا ۱۰۰ درصد، ساخته شد. به منظور شناخت بهتر تأثیر این سنگ‌دانه بر عملکرد بتن متخلخل، به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این طرح‌ها پرداخته شد. نتایج حاکی از این بود که استفاده از سرباره مس به دلیل وزن مخصوص زیاد، موجب افزایش وزن مخصوص بتن می‌شود. همچنین، به دلیل خصوصیات ظاهری و جذب آب کمتر نسبت به سنگ‌دانه دولومیتی، با جایگزینی تدریجی آن، درصد تخلخل و نفوذپذیری افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم نشان‌دهنده این موضوع بود که جایگزینی سرباره مس در مخلوط موجب بهبود این خصوصیات شده است و بیشترین افزایش مقاومت نسبت به طرح کنترلی مربوط به طرح CS60 می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روسازی، بتن متخلخل، سرباره مس، خصوصیات مکانیکی، تخلخل

۱. مقدمه

در عملکرد سازه‌ای این روسازی‌ها برخوردار هستند. به طو معمول، مقاومت فشاری بتن متخلخل بین ۲/۸ تا ۲۸ مگاپاسکال و مقاومت خمشی آن نیز به میزان ۱ تا ۳/۸ مگاپاسکال می‌باشد. دلیل مقاومت کم این روسازی به وجود خلل و فرج موجود در ساختار آن برمی‌گردد. به طوری که، این مشکل، موارد استفاده از این روسازی را محدود به راه‌های با ترافیک کم، پیاده‌روها و پارکینگ‌ها نموده است. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه روش‌های بهبود مقاومت روسازی‌های بتنی متخلخل در سال‌های اخیر انجام پذیرفته است. از این روش‌ها می‌توان به استفاده از مواد پلیمری (گیستوزی، ۲۰۱۶)، مواد نانو (شیرگیر و همکاران، ۲۰۱۱)، الیاف (کورن و همکاران، ۲۰۱۴)، افزایش درصد ریزدانه (ژو و همکاران، ۲۰۱۸) و همچنین سنگ‌دانه‌های پرمقاومت نظیر سرباره فولاد (بیه و همکاران، ۲۰۱۵) اشاره نمود.

باید به این نکته توجه داشت که رفتار بتن متخلخل به دلیل وجود فضای خالی زیاد و اتصال سنگ‌دانه به سنگ‌دانه، به میزان قابل توجهی به خصوصیات سنگ‌دانه مورد استفاده، مرتبط است. استفاده از سنگ‌دانه‌ای با خصوصیات مکانیکی خوب، موجب بهبود مقاومت بتن متخلخل می‌شود. یکی از سنگ‌دانه‌های مناسب که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، سرباره مس می‌باشد.

سرباره مس یکی از سنگ‌دانه‌های با مقاومت و عملکرد مناسب است که با توجه به زائد بودن آن، استفاده از آن دارای مزایای زیست‌محیطی می‌باشد. سرباره مس، یک محصول جانبی در فرایند ذوب سنگ مس است. به طور تقریبی، به ازای تولید هر تن فلز مس، ۲/۲ تا ۳ تن سرباره مس به عنوان محصول جانبی تولید می‌شود (گوری و جانا، ۲۰۰۳). مقدار تولید شده این سرباره در ایران طبق مطالعات قبلی، به میزان ۳۶۰،۰۰۰ تن در سال

طبیعت غیر قابل نفوذ سیستم‌های روسازی سستی، منجر به افزایش حجم رواناب و در نتیجه ایجاد سیلاب‌های ناگهانی و افزایش آلودگی آب‌های سطحی می‌شود. علاوه بر این، این حجم از رواناب، نیاز به سیستم‌های زهکشی برای دفع آب‌های سطحی دارد و موجب بروز مشکلاتی نظیر پدیده آب سطحی، کاهش اصطکاک سطحی روسازی و کاهش ایمنی می‌شود (چندراپا و بیلگیری، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر، استفاده از روسازی‌های بتنی متخلخل^۱ و همچنین تحقیقات روی آن، به دلیل دارا بودن مزایای عمده و منحصر به فرد زیست‌محیطی، کاهش آلودگی صوتی، بهبود شرایط ایمنی و کاهش گرادیان حرارتی محیط اطراف، رو به رشد می‌باشد. بتن متخلخل، با جذب آب باران و اجازه نفوذ آن به بستر، موجب ذخیره و بازیابی مجدد سفره‌های آب زیرزمینی، کاهش رواناب سطحی و کاهش پدیده آب سطحی می‌شود. در حقیقت، استفاده از بتن متخلخل یکی از بهترین روش‌های مدیریتی^۲ (BMP) سیلاب‌هاست که توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست^۳ (EPA)، دیگر آژانس‌ها و همچنین مهندسين ژئوتکنیک توصیه شده است (تیس و همکاران، ۲۰۰۴). طبق تعریف آیین‌نامه ACI 522R (۲۰۱۰)، بتن متخلخل معمولاً به بتنی با اسلامپ نزدیک به صفر، تشکیل شده از مواد با دانه‌بندی باز شامل سیمان پرتلند، درشت‌دانه، بدون یا با میزان کمی ریزدانه، افزودنی و آب گفته می‌شود. تخلخل این مخلوط بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و نرخ نفوذپذیری آن معمولاً بین ۰/۱۴ الی ۱/۲۲ cm/s می‌باشد. هر چند که در این روسازی‌ها، پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری معیارهای اصلی در شناخت آن به عنوان یک روسازی بتن متخلخل می‌باشند، خصوصیات مکانیکی مثل مقاومت فشاری و خمشی از اهمیت ویژه‌ای

^۲- Environmental Protection Agency

^۱- Pervious Concrete Pavement

^۲- Best Management Practices

نظیر بتن و آجر بازیافتی در بتن متخلخل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن حاوی مصالح بازیافتی نسبت به مصالح طبیعی مقاومت کمتری داشته است. همچنین، این تحقیق نشان داد که بتن حاوی بتن بازیافتی تخلخل و نفوذپذیری بیشتری نسبت به بتن کنترلی و بتن حاوی خرده آجر بازیافتی داشته است. همچنین، در تحقیق ابراهیم و عبدالرزاق (۲۰۱۶) درصدهای مختلف کلینکر روغن پالم^۲ (محصول جانبی تولید روغن پالم) جایگزین درشت‌دانه شده است. نتایج این تحقیق نشان از این داشت که افزایش درصد این ماده در بتن متخلخل موجب کاهش مقاومت فشاری و چگالی ولی افزایش تخلخل و نفوذپذیری شده است. اثر استفاده از سنگ‌دانه سبک‌وزن در بتن متخلخل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. زاتانگ و همکاران (۲۰۱۳) سه نوع سنگ‌دانه دیاتومیت، پومیس و بتن بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بتن ساخته شده با دیاتومیت، خصوصیات مکانیکی بهتری نسبت به دیگر سنگ‌دانه‌ها داشته است؛ در صورتی که بتن حاوی پومیس نرخ نفوذ بیشتری داشت.

علاوه بر این موارد، می‌توان گفت که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌دانه نظیر مقاومت در برابر سایش، ارزش فشاری سنگ‌دانه (ACV)، ارزش ضربه‌ای سنگ‌دانه (AIV)، چگالی سنگ‌دانه، سختی موس، دوام در برابر سولفات‌ها، وزن مخصوص و درصد جذب آب سنگ‌دانه بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژیک بتن متخلخل تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، ارزش فشاری سنگ‌دانه نقش اساسی در مقاومت فشاری بتن متخلخل دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). مصالح با جذب آب بیشتر، و وزن مخصوص کمتر، منجر به بتنی بادوام در برابر سیکل ذوب و یخ کمتری می‌شوند (کورن و همکاران، ۲۰۰۹). نمونه‌های ساخته شده با وزن مخصوص سنگ‌دانه کمتر، چگالی بتن تازه و سخت شده

می‌باشد (بهنود، ۲۰۰۵). این ماده، با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد، در صنایع ساخت و ساز متفاوت نظیر بتن کاربرد دارد. در سال‌های اخیر، از این محصول به عنوان جایگزین سیمان، به عنوان بخشی از کلینکر سیمان، جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه در مخلوط‌های بتنی و ملات سیمان استفاده گردیده است.

۲. مروری بر ادبیات فنی موضوع

۲-۱. بتن متخلخل

با توجه به اینکه در این تحقیق هدف بررسی تأثیر استفاده از سرباره مس درشت‌دانه بر خصوصیات بتن متخلخل است و متغیر اصلی تحقیق نوع سنگ‌دانه می‌باشد. بدین منظور، به بررسی تحقیقات در زمینه تأثیر سنگ‌دانه بر خصوصیات بتن متخلخل پرداخته و در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

جنس و نوع سنگ‌دانه تأثیر به‌سزایی بر عملکرد بتن متخلخل دارد. اگر چه سنگ‌دانه آهکی به طور معمول در ساخت بتن متخلخل استفاده می‌شود، در بعضی از مطالعات نشان داده شده است که مصالح دولومیتی، مقاومت فشاری و تخلخل بیشتری در مقایسه با مخلوط‌های مشابه ساخته شده با آهک و سرباره فولاد دارد (کوسیچ و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۵ روی تأثیر استفاده از سرباره آهن کوره قوس الکتریکی^۱ (EAFS) به جای شن رودخانه‌ای انجام شد، نشان داده شد که بتن ساخته شده با EAFS نفوذپذیری و مقاومت فشاری بیشتری را دارا می‌باشد (بیه و همکاران، ۲۰۱۵). استفاده از مصالح بازیافتی در بتن نظیر بتن، آجر، آسفالت بازیافتی و بلوک‌های ساختمانی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. در مورد بتن متخلخل نیز مانند دیگر انواع مخلوط‌های بتنی، تحقیقاتی انجام گرفته است. ساتا و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی استفاده از مصالح بازیافتی

^۲- Palm Oil Clinker

^۱- Air-cooling Electric Arc Furnace Slag

کمتری دارند (زاتانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

ماده بر مقاومت فشاری و کششی بتن با مقاومت زیاد بررسی شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری و کششی هر سه طرح حاوی سرباره مس نسبت به بتن با سنگ‌دانه آهکی، به ترتیب ۱۲ و ۱۱ درصد افزایش یافته است.

با توجه به اینکه مخلوط بتن متخلخل عمدتاً از درشت‌دانه تشکیل شده است، درشت‌دانه اسلکت‌بندی مخلوط را تشکیل داده و یکی از پارامترهای اصلی و تأثیرگذار در خصوصیات بتن متخلخل می‌باشد و تاکنون هیچگونه تحقیقی مبنی بر استفاده از سرباره مس به عنوان درشت‌دانه در بتن متخلخل انجام نگرفته است، در تحقیق حاضر، به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل و کاهش حجم پسماندهای صنعتی، از سرباره مس به عنوان درشت‌دانه در مخلوط استفاده گردیده و خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳. روش تحقیق

۳-۱. مواد و مصالح آزمایش

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ ۱، محصول تولیدی کارخانه آبیگ قزوین، استفاده گردیده است. مشخصات فیزیکی این سیمان در جدول ۱ آمده است. به منظور افزایش کارایی بتن در هنگام عملیات ساخت و تراکم، از فوق‌روان‌کننده با پایه کربوکسیلات اتر، محصول شرکت صنایع شیمیایی پنتا، استفاده گردید.

۲-۲. سرباره مس

با توجه به درصد بالای اکسید آهن و سیلیکای موجود در سرباره مس و همچنین خصوصیات مکانیکی و دوام مشابه یا بهتر سرباره نسبت به سنگ‌دانه طبیعی، می‌توان از آن به عنوان جایگزین سیمان، به عنوان بخشی از کلینکر سیمان، جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه در مخلوط‌های بتنی و ملات سیمان استفاده کرد (گورای و جانا، ۲۰۰۳). پژوهش گو (۲۰۰۳) موفقیت‌آمیز بودن جایگزینی سرباره به جای پودر آهن در ترکیب کلینکر سیمان را نشان می‌دهد. سرباره مس به دلیل اینکه مجموع اجزای $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ بیش از ۷۰٪ است و حداقل‌های مورد نیاز خاکستر بادی تیپ F مطابق استاندارد ASTM C618 (۲۰۰۵) را دارا می‌باشد، به عنوان یک ماده پوزولانی جایگزین سیمان شناخته می‌شود. موراو و همکاران (۱۹۹۹) از ضایعات سرباره مس به عنوان مواد مکمل سیمانی در بتن استفاده کردند. آن‌ها اعلام کردند که افزودن سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن می‌شود. وو و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی خصوصیات مکانیکی بتن‌های با مقاومت زیاد که با جایگزینی ریزدانه‌ها با سرباره مس ساخته شده بودند، به این نتیجه دست یافتند که در مقادیر کمتر از ۴۰٪، مقاومت برابر یا حتی بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌شود. در تحقیق دیگری توسط خانزادی و بهنود (۲۰۰۹)، با جایگزینی سرباره مس به جای درشت‌دانه، تأثیر این

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان تیپ I مورد استفاده در این تحقیق

مقاومت فشاری			زمان گیرش		درصد	انبساط طولی	سطح مخصوص	مقدار
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی	اولیه	آب	(mm)	(cm ² /g)	
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(دقیقه)	(دقیقه)				
۵۲/۹	۳۴/۲	۲۰/۶	۲۱۰	۱۵۴	۲۳	۰/۲	۳۰۶۹	

مشخص است، سرباره مس سیاه رنگ بوده و بافتی به اصلاح شیشه‌ای^۱ دارد. همچنین، به منظور شناسایی خصوصیات فیزیکی سرباره مس و دولومیت روی این مصالح، آزمایش‌های درصد جذب، وزن مخصوص، سختی موس، سایش لس آنجلس، ارزش فشاری، ارزش ضربه‌ای و درصد شکستگی انجام پذیرفت. مشخصات فیزیکی این سرباره همراه با مشخصات سنگ‌دانه دولومیتی در جدول ۲ آمده است.

دو نوع سنگ‌دانه درشت‌دانه، در این تحقیق استفاده گردید. یکی مصالح سنگ‌دانه طبیعی شامل مصالح شکسته دولومیتی که از معدن شرکت کندوان پارس واقع در منطقه دماوند تهران تهیه گردید. سنگ‌دانه استفاده شده دیگر، سرباره مس مجتمع صنعتی و معدنی مس سرچشمه کرمان است. در شکل ۱ می‌توان شکل ظاهری این دو نوع سنگ‌دانه را در کنار یکدیگر مشاهده نمود. همانگونه که از شکل ۱



شکل ۱. مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق: الف) سنگ‌دانه دولومیتی و ب) سرباره مس

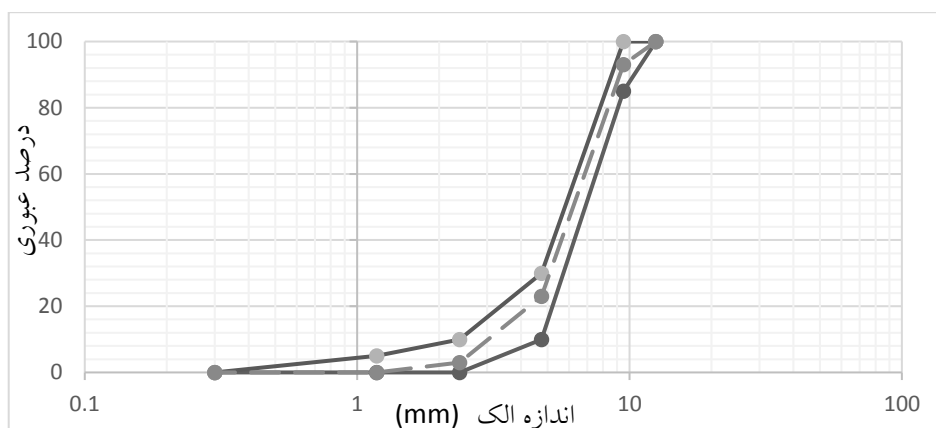
جدول ۲. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته روی مصالح دولومیتی و سرباره مس

ردیف	آزمایش	استاندارد	دولومیت	سرباره مس
۱	درصد جذب	ASTM C127	۱/۱۰	۰/۴۸
۲	چگالی حقیقی سنگ‌دانه	ASTM C127	۲/۶۷	۳/۸۵
۳	چگالی ظاهری سنگ‌دانه	ASTM C127	۲/۶۲	۳/۸۰
۴	وزن مخصوص خشک میل خورده (kg/m ³)	ASTM C29	۱۴۷۴	۲۱۶۴
۵	سختی (موس)	-	۵-۴	۷-۶
۶	سایش لس آنجلس	ASTM C535	۲۲/۱۳	۱۵/۴۳
۷	ارزش فشاری (ACV)	BS812: Part 110	۲۳	۱۳/۲
۸	ارزش ضربه‌ای (AIV)	BS812: Part 112	۱۷/۴۸	۸/۰۰

دانه‌بندی استفاده شده در این تحقیق، دانه‌بندی شماره ۸ آیین‌نامه ASTM C33 می‌باشد که طبق مطالعات پیشین این دانه‌بندی نسبت به دیگر دانه‌بندی‌های مرسوم توصیه شده توسط آیین‌نامه ACI 522R (۲۰۱۰) بهینه می‌باشد (شیرگیر و

^۱- Glassy

همکاران، ۱۳۹۰). نمودار دانه بندی در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. نمودار دانه بندی استفاده شده در این تحقیق

جایگزین سنگ دانه دولومیتی گردید. مشخصات این شش طرح در جدول ۳ آمده است. عملیات ساخت، تراکم و عمل آوری نمونه ها مطابق استاندارد ASTM C192 (۲۰۰۷) انجام پذیرفت.

۳-۲. طرح اختلاط و روش ساخت

طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق مطابق آیین نامه ACI 522R (۲۰۱۰) انجام پذیرفت و سرباره مس در شش طرح به صورت حجمی در مقادیر صفر تا ۱۰۰٪،

جدول ۳. طرح اختلاط مخلوط های حاوی سرباره مس

ردیف	نام طرح	سیمان (kg)	آب (kg)	فوق روان کننده (kg)	درشت دانه (kg)		ریزدانه (kg)
					دولومیت	سرباره مس	
۱	CS0	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	۱۱۴۰	-	۳۴۰
۲	CS20	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	۹۱۱	۳۲۴	۳۴۰
۳	CS40	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	۶۸۴	۶۴۷,۵	۳۴۰
۴	CS60	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	۴۵۶	۹۷۱	۳۴۰
۵	CS80	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	۲۲۸	۱۲۹۵	۳۴۰
۶	CS100	۳۴۰	۱۰۲	۱/۷	-	۱۶۱۸	۳۴۰

باید در ۲۰ ضربه با استفاده از چکش تراکم آزمایش پرکتور استاندارد متراکم گردد. سپس، وزن بتن تازه متراکم شده ثبت گردد. با استفاده از معادله (۱) می توان وزن مخصوص بتن متخلخل تازه را به دست آورد:

$$D_f = \frac{(M_c - M_m)}{V_m} \quad (1)$$

در این رابطه، D_f چگالی یا وزن مخصوص بتن تازه M_c ، (kg/m³) وزن قالب پر شده با بتن (kg)، M_m وزن

۳-۳. شرح آزمایش ها

۳-۳-۱. آزمایش وزن مخصوص

وزن مخصوص بتن تازه و تخلخل، تست های معمول برای کنترل کیفیت بتن متخلخل می باشند. وزن مخصوص بتن تازه طبق استاندارد ASTM C1688 (۲۰۱۰) انجام پذیرفت. مخلوط تازه را باید در دو لایه تقریباً مساوی در قالب مخصوص ریخته، و سپس هر لایه

از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر استفاده گردید. ابتدا اطراف نمونه با چسب سیلیکون عایق‌بندی شد. سپس، نمونه در دستگاه بار افتان قرار داده شد. در هنگام آزمایش، مدت زمان بین هد آب اولیه (۳۵۰ میلی‌متر) و هد آب نهایی (۱۰۰ میلی‌متر) با دو بار تکرار برای هر نمونه قرائت گردید. تصویر دستگاه مورد استفاده در شکل ۳ آمده است. در آخر، میانگین نتایج آزمایش سه نمونه به عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش شد.



شکل ۳. دستگاه آزمایش نفوذپذیری بتن متخلخل

۳-۳-۵. آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی
آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر مطابق استاندارد BS EN 12390 (۲۰۰۳) انجام گرفت. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، پس از اینکه آب خود را از دست دادند، ولی هنوز دارای رطوبت بودند، با دستگاه بارگذاری فشاری، مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۴- الف). نرخ بارگذاری طبق استاندارد برابر ۱/۳ mm/min بود و در آخر میانگین نتایج آزمایش سه نمونه به عنوان مقاومت

قالب (kg) و V_m حجم قالب (m^3) می‌باشد.

۳-۳-۲. آزمایش تخلخل

خواص نفوذپذیری و تخلخل بتن، بهترین ویژگی برای توصیف یک ماده نفوذپذیر و متخلخل است. تخلخل میزان منافذ و حفرات داخل بتن است که به صورت درصدی از حجم ماده نشان داده می‌شود (شیرگیر و همکاران، ۱۳۹۰). میزان تخلخل بتن متخلخل از روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری (W_{sum}) و وزن خشک نمونه (W_{dry}) مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. متوسط نتایج آزمایش سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، به عنوان درصد تخلخل گزارش می‌شود.

$$P = \left(1 - \frac{W_{dry\ oven} - W_{sum}}{V * \rho_w}\right) * 100 \quad (2)$$

که V حجم نمونه، D_{avg} و H_{avg} میانگین قطر و ارتفاع نمونه، W_{dry} وزن خشک شده در آون، W_{sum} وزن غوطه‌وری و ρ_w چگالی آب می‌باشد.

۳-۳-۴. آزمایش نفوذپذیری

نفوذپذیری به میزان توانایی یک ماده یا مخلوط، برای عبور آب در واحد زمان از واحد سطح مقطع، تحت یک شیب هیدرولیکی واحد گفته می‌شود. ضریب نفوذپذیری را می‌توان طبق قانون دارسی با استفاده از آزمایش بار افتان محاسبه نمود. در این آزمایش، زمان افت بار (هد) آب بین دو بار ارتفاعی مشخص بر اساس معادله (۳) به دست می‌آید:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

که k ضریب نفوذپذیری (mm/s)، a سطح مقطع لوله (mm^2)، L طول نمونه (mm)، A سطح مقطع نمونه بتن متخلخل (mm^2)، t زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از h_1 به h_2 (s)، h_1 و h_2 ارتفاع اولیه و ثانویه آب (mm) می‌باشد. در این پژوهش، برای تعیین ضریب نفوذپذیری

فشاری گزارش شد.

می باشند.

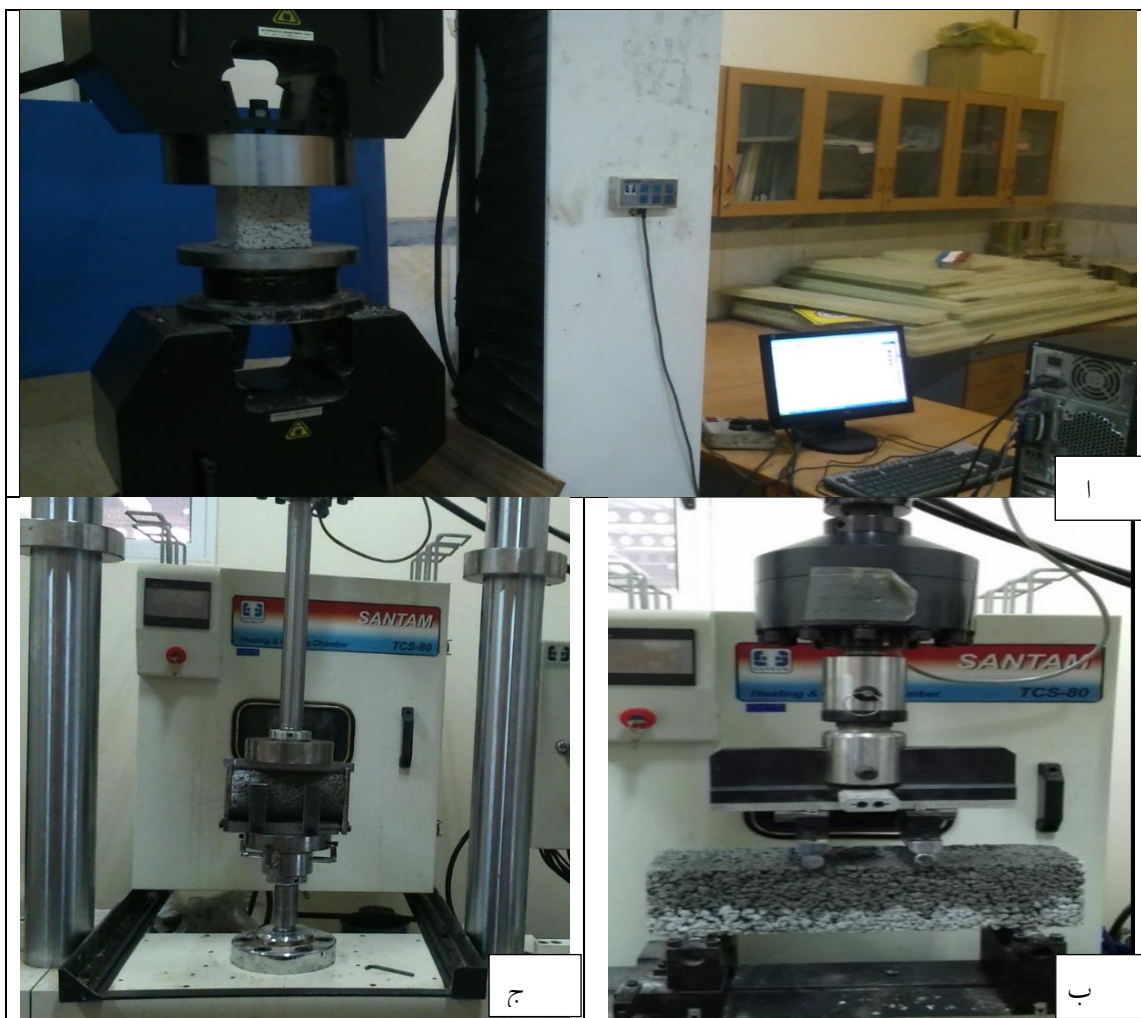
مقاومت خمشی بتن متخلخل بر اساس استاندارد ASTM C78 (۲۰۰۴) روی نمونه های تیرهای منشوری با ابعاد $100 \times 100 \times 400$ میلی متر به صورت بارگذاری یک سوم دهانه، با طول دهانه ۳۰۰ میلی متر، انجام گرفت. نمونه ها بعد از ۲۸ روز عمل آوری از مخزن آب خارج شده و بعد از زهکشی آب آن ها، قبل از اینکه رطوبت خود را از دست بدهند، مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۴-ب).

مقاومت کششی بتن متخلخل نیز بر اساس استاندارد ASTM C496 (۲۰۰۴) روی نمونه های استوانه ای با ابعاد 100×200 میلی متر به صورت بارگذاری فشاری روی قطر نمونه، انجام پذیرفت. نمونه ها مانند آزمایش مقاومت خمشی و فشاری، بعد از ۲۸ روز عمل آوری از مخزن آب خارج شده و بعد از زهکشی آب آن ها، قبل از اینکه رطوبت خود را از دست بدهند، مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۴-ج). نتایج نهایی، میانگین سه نمونه

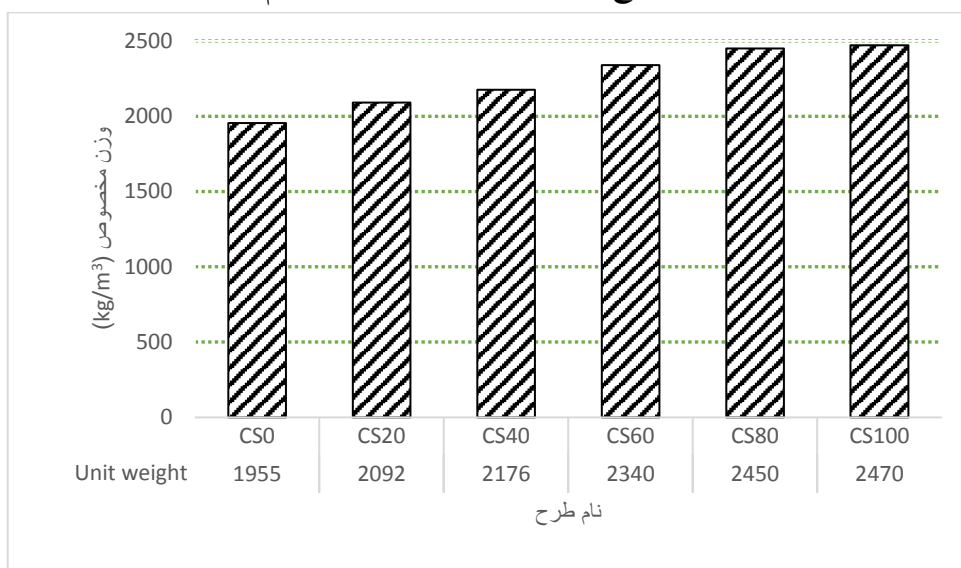
۴. نتایج و تفسیر آن

۴-۱. نتایج آزمایش وزن مخصوص تازه

نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه هر طرح اختلاط در شکل ۵ آمده است. وزن مخصوص نمونه ها بین ۱۹۰۰ تا ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. با توجه به جدول ۲، سرباره مس (ACS) وزن مخصوص بیشتری (در حدود ۳/۸۵) نسبت به دولومیت (۲/۶۷) داشته و با افزایش درصد جایگزینی سرباره مس با دولومیت، وزن مخصوص بتن تازه افزایش یافته است. به طوری که با جایگزینی ۱۰۰٪ سرباره مس با دولومیت (CS100)، وزن مخصوص برابر با ۲۴۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که مقدار آن نزدیک به وزن مخصوص بتن معمولی می باشد، همچنین با جایگزینی ۱۰۰٪ سرباره، وزن مخصوص نسبت به نمونه شاهد، ۲۶٪ افزایش یافته است.



شکل ۴. نمونه بتن متخلخل در هنگام آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی: الف) آزمایش مقاومت فشاری، ب) آزمایش مقاومت خمشی و ج) آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم



شکل ۵. وزن مخصوص بتن تازه مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره مس

۲-۴. نتایج آزمایش های درصد تخلخل و نفوذپذیری

در جدول ۴، نتایج آزمایش های درصد تخلخل و نفوذپذیری نمونه های بتن متخلخل آمده است.

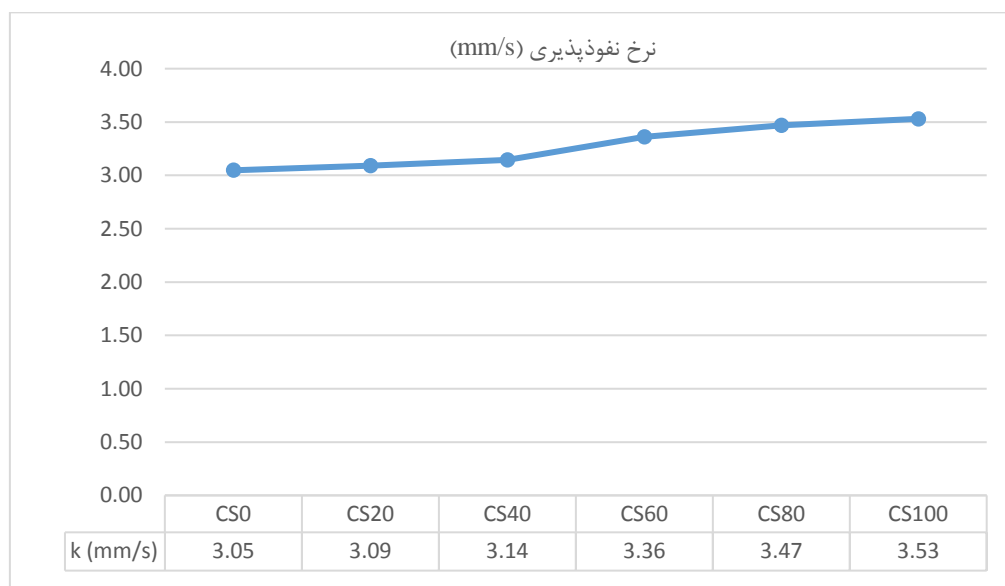
جدول ۴. نتایج آزمایش های درصد تخلخل و نفوذپذیری نمونه های بتن متخلخل

ردیف	نام طرح	درصد تخلخل	نرخ نفوذپذیری (mm/s)
۱	CS0	۲۰/۴۴	۳/۰۵
۲	CS20	۲۱/۴۲	۳/۰۹
۳	CS40	۲۱/۹۸	۳/۱۴
۴	CS60	۲۲/۴۲	۳/۳۶
۵	CS80	۲۲/۵۱	۳/۴۷
۶	CS100	۲۲/۷۷	۳/۵۳

سرباره مس دارای بافتی شیشه ای بوده و همچنین سطوح تیز گوشه آن نسبت به سنگ دانه دولومیتی کمتر است. همین امر موجب شده تا تخلخل نمونه های دارای سرباره مس با نمونه شاهد متفاوت باشد.

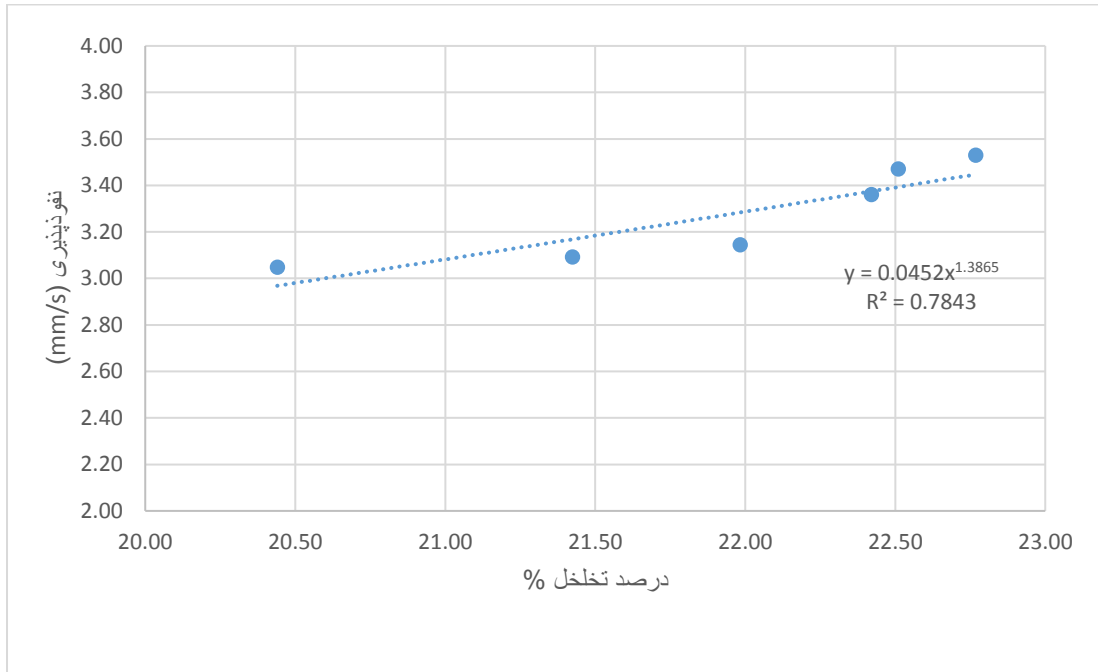
نتایج آزمایش نفوذپذیری به صورت نمودار در شکل ۸ آمده است. همان گونه که از شکل ۸ پیداست، نفوذپذیری نمونه ها بین ۳/۰۵ تا ۳/۵۳ mm/s متغیر است. این پارامتر نیز با افزایش درصد سرباره، افزایش می یابد.

همان طور که از جدول ۴ مشاهده می شود، تخلخل کلی نمونه ها بین ۲۰ تا ۲۳ درصد تغییر می کند. با افزایش درصد سرباره مس در مخلوط، میزان تخلخل افزایش یافته است. به طوری که با جایگزینی ۱۰۰٪ حجمی سرباره مس، میزان تخلخل در حدود ۲٪ بیشتر از نمونه شاهد می باشد. این میزان افزایش احتمالاً به دلیل شکل ظاهری سرباره مس نسبت به مصالح دولومیتی می باشد. چرا که همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است،



شکل ۸. نتایج آزمایش نفوذپذیری

به منظور بررسی ارتباط نتایج آزمایش تخلخل با نفوذپذیری نمونه‌ها، در شکل ۹ نمودار این دو پارامتر نسبت به یکدیگر رسم شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، تخلخل نمونه با نفوذپذیری آن رابطه مستقیم دارد و نمونه با درصد تخلخل بیشتر، نرخ نفوذپذیری بیشتری دارد.



شکل ۹. ارتباط بین نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌ها

۳-۴. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، به صورت خلاصه در جدول ۵ آمده است.

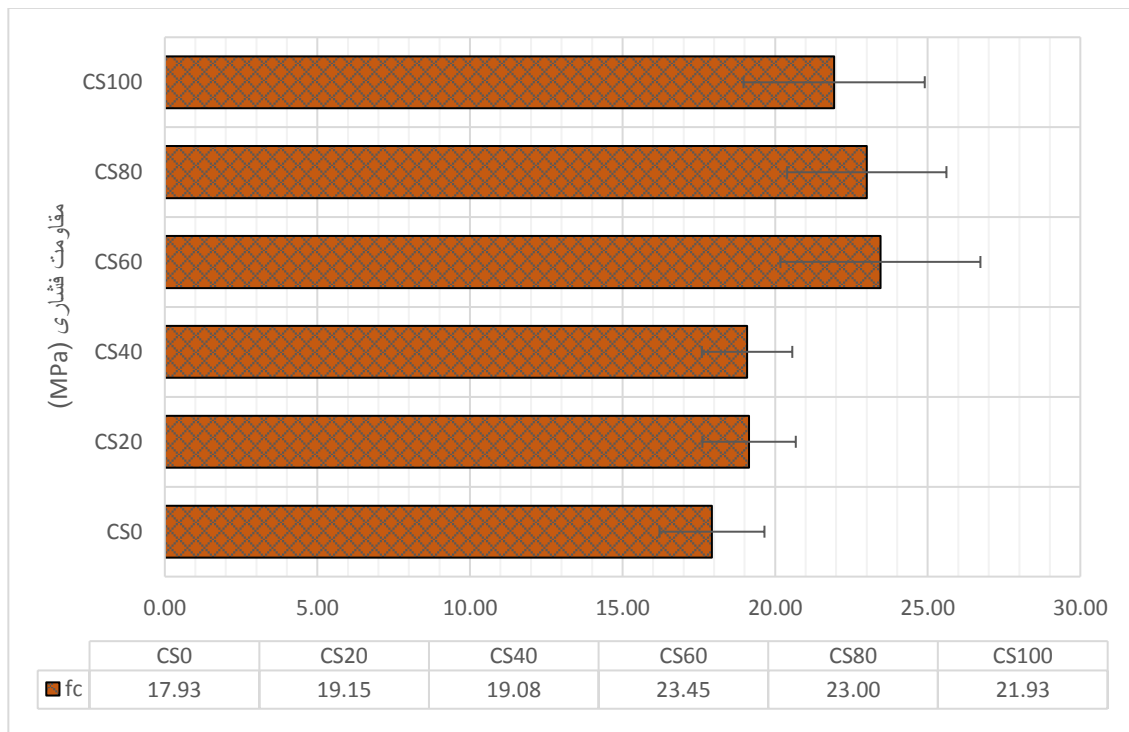
جدول ۵. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و کشش غیرمستقیم نمونه‌های بتن متخلخل بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

ردیف	نام طرح	مقاومت فشاری (f_c cube) (MPa)		مقاومت خمشی (f_r) (MPa)		مقاومت کششی (f_t) (MPa)	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
۱	CS0	۱۷/۹۳	۱/۷۲	۳/۱۵۵	۰/۱۹۱	۲/۵۵	۰/۱۴۲
۲	CS20	۱۹/۱۵	۱/۵۳	۳/۳۴	۰/۰۹۹	۲/۷۸۹	۰/۰۹۵
۳	CS40	۱۹/۰۸	۱/۴۸	۳/۵۶	۰/۲۷۸	۲/۸۲	۰/۲۵۱
۴	CS60	۲۳/۴۵	۳/۲۸	۳/۷۶	۰/۰۳۸	۳/۰۱	۰/۱۷۶
۵	CS80	۲۳/۰۰	۲/۶۱	۳/۶۳	۰/۱۹۱	۲/۸۰	۰/۲
۶	CS100	۲۱/۹۳	۲/۹۷	۳/۴۹	۰/۱	۲/۷۶	۰/۱

۳-۱-۴. تحلیل نتایج مقاومت فشاری

طبق آیین نامه ACI 522R (۲۰۱۰)، به طور معمول، مقاومت فشاری نمونه های بتن متخلخل بین ۲/۸ تا ۲۸ متغیر است. در این تحقیق، نتایج مقاومت فشاری نسبت به درصد جایگزینی سرباره مس، در شکل ۱۰ گزارش شده است. به طور کلی، می توان ادعان داشت که

استفاده از سرباره مس به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن متخلخل، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه ها شده است. همان طور که از شکل ۱۰ مشخص است، مقاومت فشاری نمونه کنترلی، برابر با ۱۷/۹۳ MPa است. بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه دارای ۶۰٪ سرباره مس می باشد. مقاومت فشاری این طرح برابر ۲۳/۴۵ MPa است.



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن متخلخل

با توجه به اینکه در بتن متخلخل درصد خمیر سیمان در اطراف سنگدانه کم است، در این مخلوط ها، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگدانه مورد استفاده تأثیر مستقیمی بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل، از جمله مقاومت فشاری، آن دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ابراهیم و عبدالرزاق، ۲۰۱۶). در این تحقیق نیز می توان اظهار داشت که افزودن سرباره مس به دلیل نتایج بهتر ارزش فشاری و ضربه ای نسبت به سنگدانه دولومیتی، موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل، نظیر مقاومت فشاری، شده است. علاوه بر این، تحقیقات

گذشته نشان دهنده رابطه مستقیم چگالی خشک میل خورده و مقاومت سایشی سنگدانه با مقاومت فشاری مخلوط می باشند (ساتا و همکاران، ۲۰۱۳؛ چینداپراسیرت و همکاران، ۲۰۰۸). از همین رو، مخلوط حاوی سرباره مس به دلیل چگالی بیشتر و مقاومت سایشی بهتر موجب مقاومت فشاری بیشتر آن نسبت به طرح بدون سرباره شده است. همچنین، کاهش مقاومت بعد از ۶۰٪ در مطالعات پیشین روی مخلوط های بتنی خودمتراکم، بتن معمولی و بتن با مقاومت زیاد حاوی ریزدانه نیز دیده شده است. بعضی از این تحقیقات، مقدار بهینه سرباره

است که بیشتر به متغیر های طرح اختلاط (نظیر دانه بندی، عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و نسبت سنگ دانه به سیمان)، خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده و همچنین مواد افزودنی شیمیایی و مواد مکمل سیمانی (نظیر خاکستر بادی) بستگی دارد. در نتیجه، می توان در خصوص ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری و میزان تخلخل در بتن متخلخل، طبق مطالعات گذشته، گفت که هنگامی که متغیر تأثیرگذار نوع دانه بندی، نسبت آب به سیمان، درصد ریزدانه و درصد خمیر سیمان باشد، این دو پارامتر با یکدیگر رابطه عکس دارند. ولی هنگامی که متغیر تأثیرگذار نوع مواد و مصالح مصرفی باشد، این رابطه برقرار نبوده و نمی توان همبستگی خاصی بین آن ها در نظر گرفت. به عنوان مثال، در بعضی از مطالعات نشان داده شده که مصالح دولومیتی مقاومت فشاری و تخلخل بیشتری در مقایسه با مخلوط های مشابه ساخته شده با آهک و سرباره فولاد دارد (کوسیچ و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۵ روی تأثیر استفاده از سرباره آهن کوره قوس الکتریکی (EAFS) به جای شن رودخانه ای، نشان داده شد که بتن ساخته شده با EAFS تخلخل و مقاومت فشاری بیشتری دارد (بیه و همکاران، ۲۰۱۵). در این تحقیق نیز با توجه به این که متغیر ما جنس سنگ دانه و درصد های مختلف سنگ دانه مورد استفاده است، نمی توان بین این دو پارامتر همبستگی و رابطه خاصی در نظر گرفت.

مس را بین ۴۰-۵۰ درصد (شارما و خان، ۲۰۱۸؛ الجبری و همکاران، ۲۰۰۹) و بعضی ۶۰٪ (شارما و خان، ۲۰۱۷؛ دانیل و همکاران، ۲۰۱۶) گزارش کرده اند. در این تحقیقات و با توجه به عکس های SEM گرفته شده از ریزساختار بتن در درصد های زیاد (۸۰ و ۱۰۰ درصد جایگزینی در مقایسه با درصد های دیگر)، سرباره مس به دلیل ساختار فیزیکی و شیمیایی خاص (سطح شیشه ای و صاف همراه با جذب آب کم) موجب افزایش آب آزاد بتن شده که این امر منجر به ایجاد تخلخل موئینی در خمیر بتن شده و همین امر، دلیلی بر افت مقاومت بعد از ۶۰٪ باشد (شارما و خان، ۲۰۱۷؛ وو و همکاران ۲۰۱۰). دلیل دیگری نیز برای این افت گزارش شده که سرباره مس با داشتن فلزات سنگین و وزن مخصوص زیاد نسبت به سنگ دانه معمولی، در هنگام ساخت و مرحله قبل از گیرش بتن، ته نشین شده که این امر باعث بالا آمدن آب مخلوط و افزایش تخلخل در مخلوط می گردد و میکروساختار بتن را متخلخل نموده و باعث بروز منافذ موئین و ایجاد ترک در ناحیه ITZ و افزایش ضخامت این ناحیه می شود (شارما و خان، ۲۰۱۷). البته این دلایل نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری دارند. در هر حال، تمامی طرح ها مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه کنترل داشته اند و در این طرح ها مقاومت فشاری بین ۶ تا ۳۰ درصد افزایش داشته است.

۲-۳-۴. ارتباط مقاومت فشاری و درصد تخلخل

نمونه ها

۲-۳-۴. تحلیل نتایج مقاومت خمشی

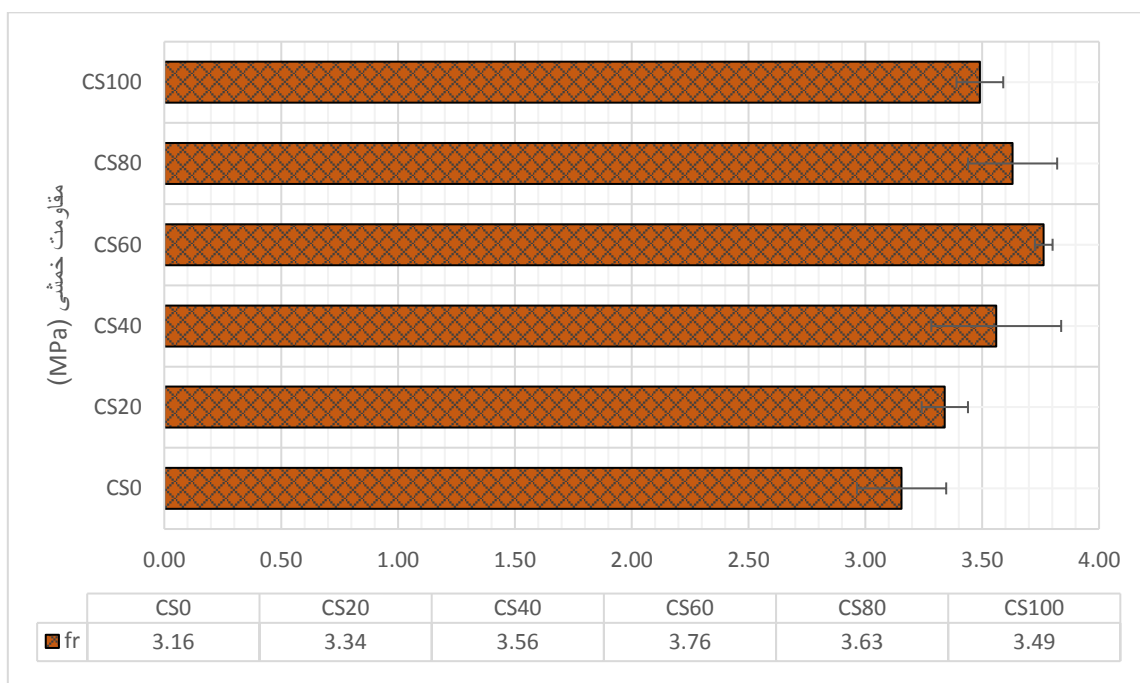
به طور معمول، مقاومت فشاری و خمشی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. این امر، در نتایج مربوط به مقاومت خمشی نمونه های مورد آزمایش نیز دیده شده است.

تخلخل، پارامتری است که به اندازه قطر سنگ دانه مورد استفاده، شکل ظاهری آن و طرح اختلاط بتن بستگی دارد. در صورتی که مقاومت فشاری پارامتری

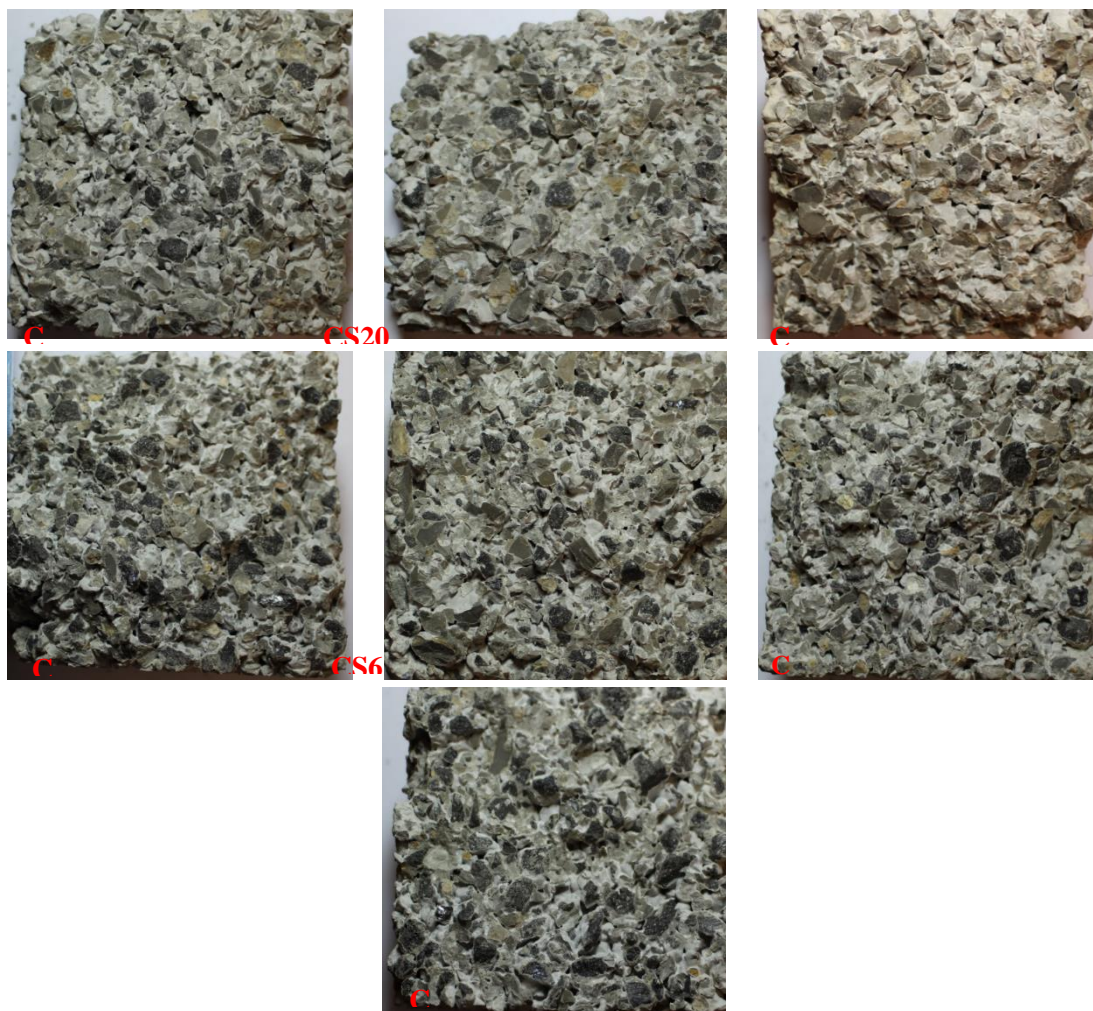
مقاومت در طرح CS60 دارای بیشترین مقدار بوده و در این طرح میزان مقاومت نسبت به طرح کنترل ۱۹٪ افزایش داشته است. با توجه به شکل ۱۲ که در آن سطح شکست نمونه های خمشی دیده می شود، درصد بالایی از سطح شکست به جای ناحیه اتصال سنگدانه و خمیر، در سنگدانه اتفاق افتاده است. این امر دلیلی بر مقاومت زیاد خمشی این مخلوط ها می باشد. همچنین، در درصد های زیاد سرباره مس، میزان شکست در سطح تماس بین سنگدانه و خمیر نسبت به طرح کنترل و درصد های کم سرباره افزایش یافته، که دلیل آن همان گونه که در قسمت مقاومت فشاری اشاره شد به ضعیف بودن ناحیه ITZ در درصد های زیاد برمی گردد، که این امر موجب کاهش مقاومت در درصد های زیاد می شود.

همان طور که در شکل ۱۱ آمده است، مقاومت خمشی نمونه های ساخته شده بین ۳/۱۵ تا ۳/۸۰ مگاپاسکال متغیر می باشد. با توجه به آیین نامه ACI 522R (۲۰۱۰) محدوده معمول مقاومت خمشی روسازی بتن متخلخل در حدود ۱ تا ۳/۸۰ مگا پاسکال می باشد و در نتیجه می توان طرح ساخته شده را جزو روسازی های بتنی متخلخل با مقاومت زیاد دسته بندی کرد.

نتایج حاکی از این است که مانند مقاومت فشاری، افزودن سرباره مس به جای درشت دانه مخلوط، موجب افزایش مقاومت خمشی بتن متخلخل گردیده است. جنس خاص، جذب آب کمتر، سختی زیاد و همچنین خصوصیات مکانیکی مناسب سرباره موجب بهبود مقاومت خمشی مخلوط گردیده است. این افزایش



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن متخلخل

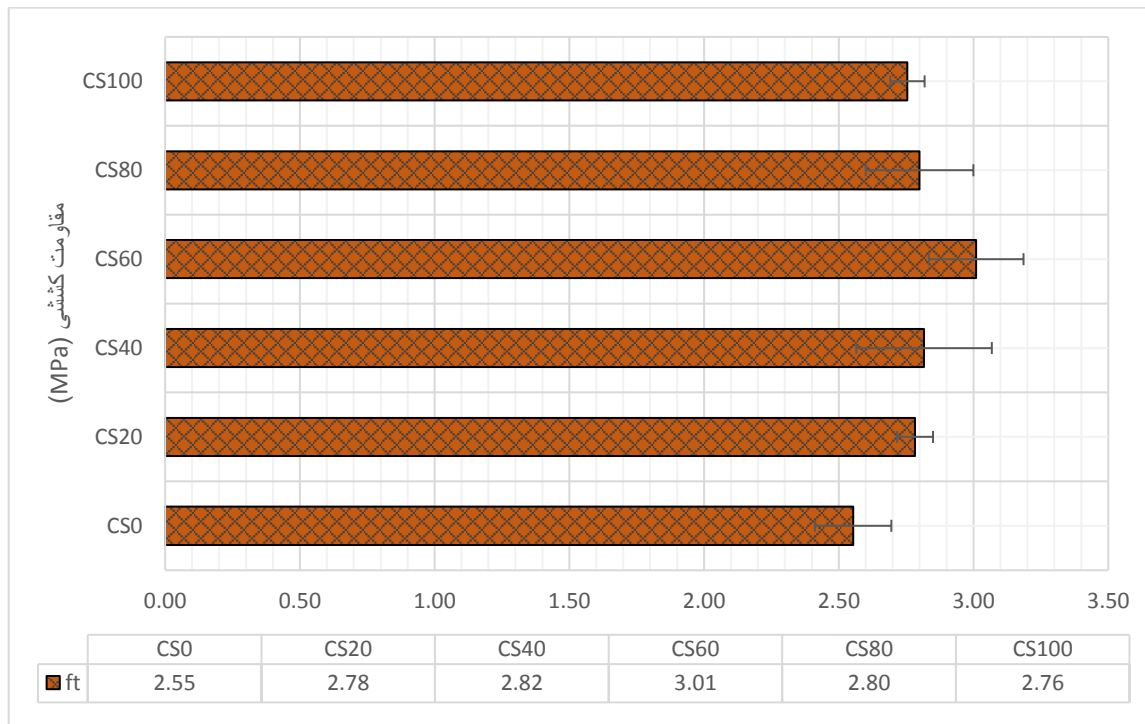


شکل ۱۲. سطح شکست در نمونه‌های خمشی

دارای بیشترین مقدار است. در این مقدار سرباره مس، میزان افزایش مقاومت در حدود ۱۸٪ نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین، این افزایش مقاومت کششی در تحقیق انجام گرفته روی جایگزینی درشت‌دانه مخلوط با سرباره مس مشاهده شده است (خانزادی و بهنود، ۲۰۰۹). همچنین، در تحقیقات شارما و خان (۲۰۱۷) و الجبری و همکاران (۲۰۰۹) روی بتن‌های حاوی سرباره مس به عنوان ریزدانه نیز تأیید گردیده است.

۳-۳-۴. تحلیل نتایج مقاومت کششی

نتایج مربوط به آزمایش کشش غیرمستقیم در شکل ۱۳ آورده شده است. نتایج این آزمایش بین ۲/۵ MPa تا ۳ MPa متغیر بود. نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که مانند مقاومت فشاری و خمشی مخلوط، مقاومت کششی نیز با افزایش درصد سرباره مس بیشتر شده است. این افزایش مانند نتایج مقاومت خمشی و فشاری، برای نمونه‌های دارای ۶۰٪ سرباره مس جایگزین درشت‌دانه



شکل ۱۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن متخلخل

نسبت به دولومیت باشد.

- آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و کششی نیز روی این طرح‌ها انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده این موضوع بود که در حالت کلی، سرباره مس به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مناسب نظیر ارزش فشاری و ضربه‌ای بهتر، سختی و مقاومت در برابر سایش بیشتر، همچنین جذب آب کم و چگالی زیاد، موجب افزایش مقاومت بتن می‌گردد. این افزایش برای ۶۰٪ جایگزینی به ترتیب موجب ۳۱، ۱۹ و ۱۸ درصد برای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و کششی مخلوط بود.
- با توجه به مقادیر مقاومت، تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها، طرح CS60 به دلیل عملکرد بهتر در فشار، خمش و کشش و با توجه به اینکه تخلخل آن به حداکثر تخلخل به دست آمده نزدیک بود، به عنوان درصد بهینه انتخاب گردید.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی نقش سرباره مس در بتن متخلخل پرداخته شد. بدین منظور، با جایگزینی تدریجی در ۶ طرح، سرباره مس از صفر تا ۱۰۰ درصد جایگزین درشت‌دانه مخلوط گشت و خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی بتن متخلخل بررسی گردید و نتایج زیر حاصل گشت:

- در مخلوط تازه بتن متخلخل، با افزایش درصد سرباره مس، به دلیل وزن مخصوص بیشتر این سنگ‌دانه نسبت به سنگ‌دانه دولومیتی، وزن مخصوص بتن تازه افزایش می‌یابد. این افزایش برای طرح ۱۰۰٪ سرباره (CS100) برابر ۲۶٪ می‌باشد.
- نتایج آزمایش تخلخل و نفوذپذیری، نشان‌دهنده افزایش تخلخل و نفوذپذیری مخلوط با افزایش درصد سرباره مس بود. این افزایش با توجه به طیف تغییرات کم، می‌تواند به دلیل بافت شیشه‌ای و خاص سرباره مس

۶. مراجع

- شیرگیر، ب.، حسنی، ا. و عزیزاده گودرزی، ه. ۱۳۹۰. "تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل در روسازی". فصل‌نامه مهندسی عمران مدرس، ۱۱(۱): ۶۰-۴۹.
- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Oraimi, S. K. and Al-Saidy, A. H. 2009. "Copper slag as sand replacement for high performance concrete". *Cement Concrete Compos.*, 31(7): 483-488.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 522. 2010. "Report on pervious concrete. ACI 522R-10". American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ASTM C39. 2004. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International, West Conshohocken, PA, 8 p.
- ASTM C192/C192M-07. 2007. "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory". ASTM International, West Conshohocken, PA, 8 p.
- ASTM C496. 2004. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International, West Conshohocken, PA, 8 p.
- ASTM C 618e15. 2005. "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, 8 p.
- ASTM C 1688. 2010. "Fresh concrete density (unit weight) and void content". ASTM International, West Conshohocken, PA., 8 p.
- Behnood, A. 2005. "Effects of high temperatures on the high-strength concretes incorporating copper slag as coarse aggregate". *Proc. 7th Int. Symp. on Utilization of High-Strength/Performance Concrete*, Washington, DC, USA.
- BS EN12390-3. 2003. "Testing hardened concrete- Part 3: Compressive strength of test specimens". 18 p.
- Chandruppa, A. K. and Biligiri, K. P. 2016. "Pervious concrete as a sustainable pavement material– Research findings and future prospects: A state-of-the-art review". *Constr. Build. Mater.*, 111: 262-274.
- Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N. and Yuasa, Y. 2008. "Cement paste characteristics and porous concrete properties". *Constr. Build. Mater.*, 22(5): 894-901.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V. and Netinger, I. 2015. "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 78: 69-76.
- Daniel, C., Shelton, J. and Jebadurai, V. S. 2016. "Studies on strength properties of self compacting concrete with copper slag as fine aggregate for M25 grade". *Int. J. Res Eng. Technol.*, 5(2): 74-78.
- Giustozzi, F. 2016. "Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures". *Constr. Build. Mater.*, 111: 502-512.
- Gorai, B. and Jana, R. 2003. "Characteristics and utilisation of copper slag- A review". *Resour., Conserv. Recy.*, 39(4): 299-313.
- Guo, Y. 2003. "Investigations on the use of industrial wastes in cement production". *Arid Environ. Monit.*, 17(3): 177-179.
- Ibrahim, H. A. and Abdul Razak, H. 2016. "Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 115: 70-77.
- Kevern, J. T., Wang, K. and Schaefer, V. R. 2009. "Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(5): 469-475.
- Kevern, J., Biddle, D. and Cao, Q. 2014. "Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties". *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(9): 06014031.
- 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.
- Martin, W. D. and Putman, B. J. 2016. "Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 125: 299-305.
- Montes, F., Valavala, S. and Haselbach L. M. 2005. "A new test method for porosity measurements of Portland

- cement pervious concrete". *J. ASTM Int.*, 2(1): 1-13.
- Moura, W., Masuero, A., Dal Molin, D. and Vilela, A. 1999. "Concrete performance with admixtures of electrical steel slag and copper concerning mechanical properties". 2nd CANMET/ACI International Conference, SP 186, pp. 81-100.
- Sata, V., Wongsu, A. and Chindaprasirt, P. 2013. "Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 42: 33-39.
- Sharma, R. and Khan, R. A. 2017. "Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 155: 617-629.
- Sharma, R. and Khan, R. A. 2018. "Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete". *J. Clean. Prod.*, 171: 1171-1186.
- Shi, C., Meyer, C. and Behnood, A. 2008. "Utilization of copper slag in cement and concrete". *Resour., Conserv. Recy.*, 52(10): 1115-1120.
- Shirgir, B., Hassani, A. and Khodadadi, A. 2011. "Experimental study on permeability and mechanical properties of nanomodified porous concrete". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2240: 30-35.
- Tennis, P. D., Leming, M. L. and Akers, D. J. 2004. "Pervious concrete pavements". Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA.
- Wu, W., Zhang, W. and Ma, G. 2010. "Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete". *Mater. Design*, 31(6): 2878-2883.
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W. and Ji, X. 2018. "Investigation on the properties of porous concrete as road base material". *Constr. Build. Mater.*, 158: 141-148.
- Yeih, W., Fu, T. C., Chang, J. J. and Huang, R. 2015. "Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 93: 737-745.
- Zaetang, Y., Wongsu, A., Sata, V. and Chindaprasirt, P. 2013. "Use of lightweight aggregates in pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 48: 585-591.
- Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., Chindaprasirt, P., 2016. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 111, 15-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Yan, C. and Liu, Y. 2017. "Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 135: 112-118