

Comparison of the Effect of crushed Cement Block and Construction Waste on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete

Mahbobeh Mirzaie Aliabadi^{1*}, Mohammad Sadegh Shahidzadeh¹, Hossein Piran Shahi², Heydar Rashidi Fard², Amir Hossein Derakhshan Nezhad²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. mirzaie@bkatu.ac.ir

2- M.Sc. Student in civil-structural engineering, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 15 March 2024 Revised: 27 May 2024 Accepted: 28 May 2024

Research paper

Abstract:

Self-compacting concrete is widely used in construction due to its efficiency, fluidity, resistance and durability. With increasing environmental concerns about solid waste disposal and the limitation of landfill space, this research has investigated the use of construction waste and small cement blocks as replacement of sand in self-compacting concrete. Influence of different percentages of these materials (0, 25, 50, 75, 100 percent by weight of sand) in concrete were tested. Fresh concrete properties were evaluated by slump flow, V funnel, L box, J ring, U box tests and hardened properties were evaluated by compressive strength, tensile strength and permeability tests. This research used nano silica gel and Viscosity Modifying Admixtures to increase the strength, viscosity and rheological properties of concrete. The results showed that the addition of small cement blocks improves the performance of self-compacting concrete due to porosity and water absorption. Also, the compressive and tensile strength of self-compacting concrete samples containing waste at 28 days increased by 9.73%, 5.85%, 11.30% and 13.53%, respectively, compared to the control samples. This research shows that construction waste can improve the quality of self-compacting concrete and contribute to environmental sustainability

Keywords: Self-compacting Concrete, Crushed Cement Block, Construction Waste, Compressive Strength, Tensile Strength, Permeability

*Corresponding Author: Mahbobeh Mirzaie Aliabadi

Mirzaie Aliabadi, M., Shahidzadeh, M. S., Piran shahi, H., Rashidi Fard, H., Derakhshan Nezhad, A. H. Comparison of the effect of crushed cement block and construction waste on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-19.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.448781.1365>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقایسه اثر خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی بر خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم

محبوبه میرزائی علی آبادی^{۱*}، محمد صادق شهیدزاده^۱، حسین پیران شاهی^۲، حیدر رشیدی فرد^۲، امیرحسین درخشان نژاد^۲

۱-استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mirzaie@bkatu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

بتن خودتراکم^۱ به دلیل کارایی، روانی، مقاومت و دوام به طور گسترده‌ای در ساخت و ساز استفاده می‌شود. با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی درباره دفع زباله‌های جامد و محدودیت فضای دفن زباله، این پژوهش به بررسی استفاده از ضایعات ساختمانی و خرده بلوک‌های سیمانی به‌عنوان جایگزین ماسه در بتن خودتراکم پرداخته است. تأثیر درصدهای مختلف این مواد (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد وزنی ماسه) در بتن آزمایش شد. خواص تازه بتن با آزمون‌های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L، حلقه J و جعبه U و خواص سخت شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و نفوذپذیری ارزیابی شد. این پژوهش از ژل نانو سیلیس و VMA برای افزایش مقاومت، گرانروی و خواص رئولوژیکی بتن استفاده کرد. نتایج نشان داد که افزودن خرده بلوک‌های سیمانی به دلیل تخلخل و جذب آب، عملکرد بتن خودتراکم را بهبود می‌بخشد. همچنین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی ضایعات، در ۲۸ روز، به ترتیب ۹/۷۳٪، ۱۳/۵۳٪ و ۵/۸۵٪، نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است. این تحقیق نشان می‌دهد که ضایعات ساختمانی می‌توانند کیفیت بتن خودتراکم را بهبود داده و به پایداری زیست‌محیطی کمک کنند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، خرده بلوک سیمان، ضایعات ساختمانی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری

^۱ SCC

امروزه بتن خود متراکم به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین پیشرفت‌ها در صنعت بتن شناخته شده است و از آن در ساخت و ساز استفاده می‌کنند [۳-۱]. بتن خودتراکم، بتنی است که دارای تنش تسلیم کم، تغییرشکل‌پذیری بالا، مقاومت در برابر جدایش، کارایی و روانی است [۴-۶]. بتن خود متراکم یک ترکیب بسیار روان با ویژگی‌های عملی متمایز نسبت به بتن معمولی است. بتن خودتراکم با کارایی و روانی خود می‌تواند به‌راحتی داخل و اطراف قالب را بدون ارتعاش پر کند و قابلیت خود تراز شدن در سطح را دارد [۷-۱۰]. بتن خودتراکم معمولاً از نظر زمان‌گیرش، عمل‌آوری (به‌دست‌آوردن مقاومت) و دوام از بتن معمولی نیز بهتر است [۱۱-۱۳]. نسبت آب به سیمان در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی کمتر است و خواص سیال خود را با فوق روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های افزایش‌دهنده ویسکوز به دست می‌آورد [۱۴-۱۶]. در نتیجه، استفاده از بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی، بهتر و کارآمدتر است [۱۷-۲۰]. افزایش مداوم هزینه‌های مصالح ساختمانی و همچنین اثرات جانبی زیست محیطی ناشی از صنعت ساخت و ساز، رویکرد پژوهشگران را به سمت استفاده از ضایعات به دلیل هزینه کمتر، دوام و مقاومت تغییر داده است [۲۱-۲۴]. امروزه افزایش استفاده از سنگدانه‌های طبیعی، آلودگی روزبه‌روز در محیط‌زیست، کاهش مواد اولیه برای ساخت و سازها، افزایش زباله‌های ساختمانی و آلودگی‌های زیست محیطی تبدیل به یک مشکل ضروری شده است [۲۵-۲۶]. تخریب سازه‌های قدیمی‌یک‌روند روب‌ه‌افزایش است که عمدتاً به دلیل وضعیت فنی، پایان عمر مفید و برنامه‌های نوسازی آن‌ها مورد تخریب یا بازسازی قرار می‌گیرند. نقطه‌ضعف این فرایند، ضایعات مصالح تخریبی است که نیاز به حمل‌ونقل به مکان‌های دور از شهر را دارند و در صورت عدم بازیافت، در محل‌های دفن زباله تخلیه می‌شوند [۲۷-۲۸]. از جمله این ضایعات ساختمانی خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی هستند که بازیافت آن‌ها نیازمند مدیریت صحیح به دلیل مقادیر زیاد را دارند. ضایعات ساختمانی شامل مصالحی مانند؛ (مواد خرده شده از جمله کاشی، بتن، سرامیک، آجر، سیمان، سنگ و غیره هستند). در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی برای استفاده مجدد از آن‌ها انجام شده است که موجب کاهش آلودگی‌های محیط زیستی، صرفه‌جویی و بازیافت می‌شود. ضایعات ساختمانی به دلیل خواص مکانیکی مانند، چگالی، مقاومت شیمیایی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته بالا، طول عمر بالا، دوام و عایق حرارتی به بهبود خواص بتن کمک می‌کند [۲۹-۳۰]. استفاده از ضایعات ساختمانی به‌عنوان یک افزودنی و ماده پرکننده در راستای کمک به مقاومت فشاری در بتن و در راستای محور توسعه علمی‌مهندسی - سازه، توسعه پایداری، بهسازی و کمک به محیط‌زیست تقاضا را برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که دارای خصوصیات بهبودیافته‌های هستند، افزایش می‌دهد [۳۱]. استفاده از ضایعات ساختمانی در بتن خودتراکم از عواملی مانند ضربه، ارتعاش، انفجار، باد، زلزله و غیره که موجب خرابی و آسیب‌دیدگی در سازه و جان افراد نیز می‌شوند، کاهش می‌دهد. در کشور ایران سالانه ۱۰۰ میلیون تن بلوک سیمانی تولید می‌شود که آلاینده‌های سیمان مصرفی در آن بسیار زیاد است و مقدار زیادی از آن در حوادث ساختمانی و یا تولید خرد، شکسته و باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی قابل‌توجهی می‌شوند. از آنجاکه کاهش ضایعات ساختمانی یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی است به همین دلیل، از خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن برای حفاظت محیط‌زیست و افزایش خواص مکانیکی بتن استفاده می‌شود [۳۲-۳۴]. ترکیبات اصلی خرده بلوک سیمانی عبارت‌اند از؛ سیمان، شن، ماسه و آب است. استفاده از خرده بلوک در بتن، سبب کاهش شکنندگی بتن و دوام می‌شود و می‌تواند خواص مکانیکی شامل، بارهای فشاری، کششی، خمشی، برشی، خزش، جمع‌شدگی، سایش، فرسایش، کاهش استفاده از سنگدانه‌های طبیعی، کاهش سیمان مصرفی در طرح مخلوط، کاهش ضایعات، افزایش سلامت محیط‌زیست و مقاومت بتن کمک کند [۵]. پژوهش‌های مختلفی در رابطه با استفاده از ضایعات ساختمانی جهت بهبود خواص مکانیکی بتن صورت گرفته است که نمونه‌هایی از آن، در ادامه بررسی شده‌اند:

باي و همكاران در سال ۲۰۲۰ [۲۸]، به ارزيابي ويژگي سنگدانه‌هاي بازيافتي و خواص مكانيكي سنگدانه بتن بازيافتي پرداختند. لويز و همكاران در سال ۲۰۲۰ [۲۹]، به بررسي تأثير سنگدانه بتن بازيافتي ريز بر رفتار مكانيكي بتن خود تراكم پرداختند. سان و همكاران در سال ۲۰۲۰ [۳۰]، به بررسي استفاده از ضايعات بلوك سيماني خرده شده در بتن خود تراكم پرداختند. دوان و همكاران در سال ۲۰۲۰ [۳۱]، به بررسي استفاده تركيبی از پودر بازيافتي و سنگدانه درشت بازيافتي حاصل از ضايعات ساختماني در بتن خود تراكم پرداخته شد. فرناندو و همكاران در سال ۲۰۲۱ [۳۲]، به ارزيابي استفاده از ضايعات ساختماني براي جايگزيني سنگدانه‌هاي معمولي در بتن پرداختند. لي و همكاران در سال ۲۰۲۱ [۳۳]، به بررسي عملکرد مكانيكي و اثرات زيست‌محيطي بتن خود تراكم با بلوك‌هاي سيماني تخریب شده بازيافتي پرداختند. الطيب و همكاران در سال ۲۰۲۲ [۳۴]، به مطالعه تجربي و شبیه سازي مقادير بالای سنگدانه‌هاي ريز با زباله‌هاي پلاستيكي در بتن و تعيين مقاومت بتن در برابر ضربه را پرداختند. آوودايبان و همكاران در سال ۲۰۲۲ [۳۵]، به بررسي ويژگي‌هاي مكانيكي و ريزساختاري استفاده از سنگدانه بازيافتي در بتن پرداختند. دا سيلوا و همكاران در سال ۲۰۲۲ [۳۶]، به ارزيابي رابطه بين خواص مكانيكي و كرناته شدن بتن با ضايعات ساختماني پرداختند. ژونگ و همكاران در سال ۲۰۲۲ [۳۷]، به بررسي اثر خواص سنگدانه درشت بازيافتي در بتن پرداختند. مالازدروبيچ و همكاران در سال ۲۰۲۳ [۳۸]، به بررسي بتن خود متراكم با سنگدانه‌هاي درشت بازيافتي حاصل از ضايعات ساخت و ساز و تخریب بتن پرداختند. جوزف و همكاران در سال ۲۰۲۳ [۳۹]، به بررسي بازيافت زباله‌هاي تخریب ساختماني در بتن را پرداختند. پژوهش حاضر يكي از مهمترين و قابل‌تأمل‌ترين مسائل موجود در توليد علم و لحاظ نمودن رويکرد توسعه پايدار است. توسعه پايدار به مفهوم استفاده از پتانسيل موجود با در نظر گرفتن نيازهاي نسل آتي در راستاي استفاده بهينه از منابع موجود و در دسترس حائز اهميت است. در اين پژوهش، از خرده بلوك سيمان و ضايعات ساختماني به‌عنوان جايگزين وزن ماسه در بتن خودتراكم مورداستفاده قرار گرفت. هدف از اين پژوهش، مقايسه، بررسي و مزيت استفاده از خرده بلوك سيمان و ضايعات ساختماني جهت توليد بتن خودتراكم با كيفيت بالا و افزايش مقاومت فشاري، مقاومت كششي، کاهش نفوذپذيري و کاهش وزن آزمون‌ها نسبت به بتن خودتراكم (معيار) است. خرده بلوك با توجه به تخلخل و جذب آب، مناسبترين عامل براي اصلاح كارايي بتن خودتراكم است. جنبه نوآوري اين طرح، استفاده بهينه از منابع ضايعاتي و به‌حداقل رساندن ضايعات است. در طرح اختلاط بتن خودتراكم از ژل نانو سيليس و VMA جهت افزايش مقاومت، تقويت ناحيه انتقال بتن (فاز سوم)، تقويت ويسكوزيته افزايش‌يافته و افزايش خواص رئولوژيكي بتن استفاده شد. تفاوت اين پژوهش با بقيه طرح‌ها اين است كه آزمون نفوذپذيري براي نمونه‌هاي مكعبي بتن خودتراكم با و بدون خرده بلوك سيمان و ضايعات ساختماني مورد ارزيابي قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط

۲-۱-۱- سیمان

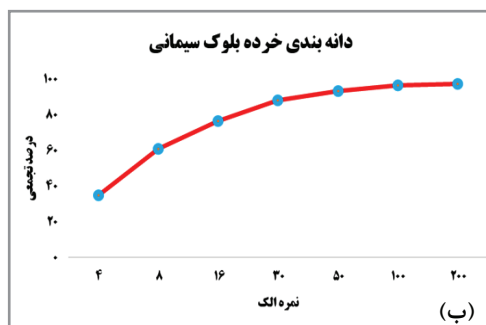
در تمام طرح اختلاط‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان بهبهان که دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی است، استفاده گردید. مشخصات سیمان منطبق بر ASTM C150 [۴۰] است (مطابق جدول ۱).

جدول ۱ - مشخصات سیمان پرتلند تیپ ۲

C4AF	C3A	C2S	C3S	LOI	Fe2O3	SiO2	تحلیل شیمیایی
۱۱/۸۰	۶/۲۱	۱۶/۴۶	۶۰/۶۳	۰/۲۰	۳/۸۸	۲۱/۶۸	درصد

۲-۱-۲- خرده بلوک سیمانی

ابتدا بلوک‌های سیمانی را با دستگاه بلوک شکن شکسته و خرده می‌شوند، سپس به وسیله الک با شماره ۸ دانه‌بندی می‌گردند و به‌عنوان یک ماده افزودنی، ارزان و قابل دسترس از آن در بتن خودتراکم استفاده می‌شود. استفاده از خرده بلوک سیمانی در بتن خودتراکم می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین پایدار و اقتصادی برای مصالح سنتی در بتن باشد. برخی از خواص و تأثیرات آن عبارت‌اند از: افزایش مقاومت فشاری، کاهش نیاز به سنگدانه‌های طبیعی، افزایش مقاومت در برابر سایش، کاهش وزن خاص، افزایش پایداری، توانایی انعطاف‌پذیری مصالح و بهبود اقتصادی. استفاده از خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم می‌تواند نفوذپذیری بتن را کاهش دهد. استفاده از خرده بلوک سیمانی با سختی بالا می‌تواند به تقویت بتن و کاهش نفوذپذیری آن کمک کند (مطابق شکل ۲ و جدول ۲).



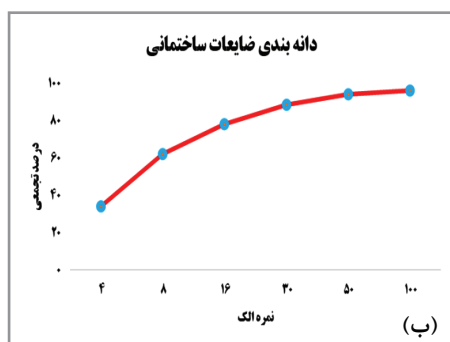
شکل ۲ - الف) بلوک سیمانی ب) دانه‌بندی خرده بلوک سیمانی

جدول ۲ - مشخصات خرده بلوک سیمانی

ویژگی‌ها	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	درصد جذب آب (۲۴ ساعته)	مقاومت کششی ۷ روزه (Kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm ²)
مقدار	۵	۱۲۵۰	٪۲۶	۲۳۶	۱۷۸

۳-۱-۲- ضایعات ساختمانی

ابتدا ضایعات ساختمانی را با دستگاه خردکن شکسته و خرده می‌گردند، سپس به وسیله الک با شماره ۸ دانه‌بندی و به‌عنوان یک ماده افزودنی، ارزان و قابل دسترس از آن در بتن خودتراکم استفاده می‌شود. استفاده از ضایعات ساختمانی در بتن خودتراکم می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین پایدار و اقتصادی برای مصالح سنتی در بتن باشد. استفاده از ضایعات ساختمانی، مانند خاکستر سیلیسی، پودر بتن، و مصالح بازیافتی، می‌تواند به بهبود خواص بتن خودتراکم کمک کنند. این ضایعات به‌عنوان جایگزینی برای ماسه مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، استفاده از ضایعات ساختمانی می‌تواند خواص مکانیکی بتن را افزایش دهد، مانند مقاومت به فشار، خمش، کشش و بهبود قابلیت جریان بتن. همچنین، این اقدام می‌تواند به کاهش تولید پسماندهای محیطی و حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند (مطابق شکل ۳ و جدول ۳).



شکل ۳- الف) ضایعات ساختمانی ب) دانه‌بندی ضایعات ساختمانی

جدول ۳ - مشخصات خرده بلوک سیمانی

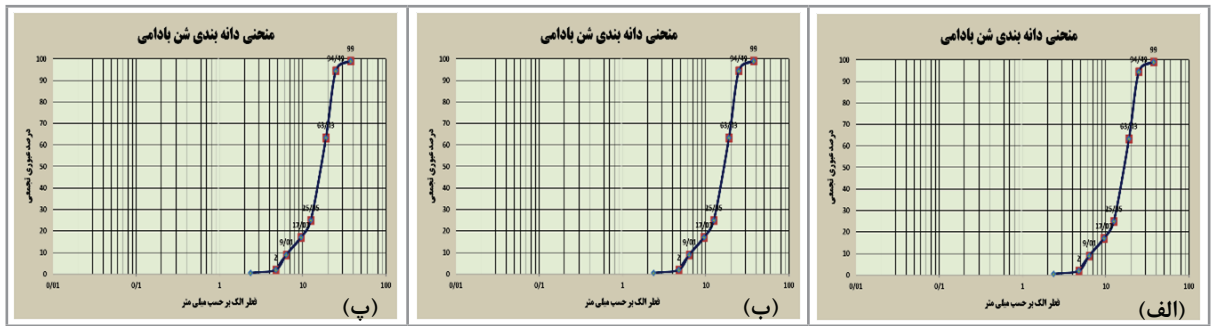
ویژگی‌ها	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	درصد جذب آب (۲۴ ساعته)	مقاومت کششی ۷ روزه (Kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm ²)
مقدار	۷	۱۵۲۰	٪۳۱	۳۶۵	۲۰۵

۳-۱-۴- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های درشت با حداکثر اندازه ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متری و ماسه با حداکثر ۲/۳۶ میلی‌متر انتخاب و بر اساس منحنی درجه‌بندی ارائه شده توسط استاندارد [ASTM C33] [۴۱] استفاده شدند. شن و ماسه مورد استفاده در این طرح اختلاط از هفتکل خوزستان تهیه گردید. برای ماسه از الک رد شده با شماره ۸، برای شن نخودی از الک رد شده با شماره ۳/۸ همچنین شن بادامی از الک با شماره ۱/۲ استفاده شد (مطابق جدول ۴ و شکل ۴).

جدول ۴ - مشخصات سنگدانه‌ها

ویژگی‌ها	درصد جذب آب ماسه	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ماسه	درصد جذب آب	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک نخودی	درصد جذب آب	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک نخودی
مقدار (%)	۱/۰۲	۲/۷۲	۰/۸۰	۲/۷۳	۰/۹۱	۲/۸۰



شکل ۴ - الف) منحنی دانه‌بندی شن بادامی ب) منحنی دانه‌بندی شن نخودی پ) منحنی دانه‌بندی شن ماسه

۵-۱-۲- فوق روان کننده و ژل نانو سیلیس

در این پژوهش، برای رسیدن به خواص مکانیکی بتن خودتراکم، از (S.P.A.PLAST-M4) که بر پایه پلی کربوکسیلات اتر به‌عنوان یک نوع آب کاهندگی و افزاینده بسیار قوی بتن است، استفاده شد. استفاده از روان‌کننده پلی کربوکسیلاتی می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شود. این افزایش مقاومت بتن در برابر فشار و نیروهای خارجی به دلیل بهبود خواص فیزیکی بتن از جمله جمع‌شدگی و ویسکوزیته بتن است. استفاده از روان‌کننده پلی کربوکسیلاتی می‌تواند خواص کارایی بتن را افزایش دهد. همچنین برای رسیدن به خواص رئولوژیک در حالت خمیری و بهبوددهنده کیفیت بتن خودتراکم، از ژل نانو سیلیس که بر پایه دوده سیلیسی و کاهنده قوی آب بتن است، استفاده شد. استفاده از ژل نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری بتن شده و امکان سهولت بتن‌ریزی با افزایش اسلامپ بتن و کارایی بالا را میسر گردد. ژل نانو سیلیس می‌تواند ناحیه انتقال را تقویت و بر مقاومت نهایی بتن تأثیرگذار باشد. ژل نانو سیلیس نوع پیشرفت‌های از افزودنی معدنی بتن است که دارای ساختار آمورف (غیر بلوری) هستند. این ژل باعث ایجاد خاصیت روان‌کنندگی بالا در بتن تازه و بهبود خواص سخت‌شدن آن می‌شود. ژل نانو سیلیس در بتن باعث افزایش تراکم، چسبندگی بتن، کاهش نفوذپذیری، افزایش دوام، مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن شود. ژل نانو سیلیس می‌تواند میکروساختار بتن را بهبود بخشد و نفوذپذیری آب در بتن سخت را کاهش دهد. چون نانو سیلیس ۱۰۰۰۰۰ مرتبه کوچک‌تر از ذرات تشکیل‌دهنده سیمان است در نتیجه نانو سیلیس می‌تواند حفره‌های باقی‌مانده موجود در بتن را پراکنده و در نتیجه (چگالی) بتن را افزایش دهد. اضافه کردن فوق روان‌کننده و ژل نانو سیلیس به بتن خودتراکم مطابق با استاندارد ASTM C 494 [۴۲] است (مطابق جدول ۵).

جدول ۵ - مشخصات فنی فوق روان‌کننده و ژل نانو سیلیس

ویژگی‌ها	حالت فیزیکی	جرم مخصوص (کیلوگرم بر لیتر)	PH	رنگ
فوق روان‌کننده				
مشخصات	مایع	۱/۱	۶/۲	زرد
ژل نانو سیلیس				
مشخصات	مایع غلیظ	۱/۳۵	۹	خاکستری

۶-۱-۲- آب

در این پژوهش، برای تولید و عمل‌آوری نمونه‌ها از آب شرب استفاده شد. آب شرب مصرفی در بتن بر اساس استاندارد ASTM C 94 [۴۳] است (مطابق جدول ۶).

جدول ۶ - مشخصات آب شرب

Chlorides (Cl-) total (mg/L)	TDS (ppm)	EG ₅₀ (%)	PH	تجزیه و تحلیل شیمیایی
۱۸	۱۷	۳۲	۷/۱	درصد

۷-۱-۲- پودر سنگ

پودر سنگ به دلیل وجود ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی بین حفره‌ها، ذرات سیمان و سنگدانه‌ها شده و دارای مقدار زیادی انعطاف‌پذیری است که باعث توپری بتن خودتراکم می‌شود. تجزیه شیمیایی و مشخصات فیزیکی پودر سنگ در جدول ۷ نشان داده شده است. پودر سنگ می‌تواند به دوام بتن، مقاومت بر برابر فرسایش، کاهش ساییدگی و ترک کمک کند.

جدول ۷ - پودر سنگ

LOI	SO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	تجزیه و تحلیل شیمیایی
۴۳/۲	۱/۲۴	۵۱/۲۲	۱/۸	۰/۵	۰/۳۵	۲/۸	درصد

۸-۱-۲- قوام دهنده و کنترل کننده رئولوژی بتن

افزودنی پودری VMA برای تولید بتن خودتراکم با ویسکوزیته افزایش یافته و خواص رئولوژیکی کنترل شده توسعه دهد. در این تحقیق از افزودنی Master Matrix VMA 358 با پایداری فوق‌العاده‌ای استفاده گردید. استفاده از VMA در بتن خودتراکم می‌تواند به چندین شکل بهبودبخشی دهد که عبارت‌اند از: کاهش لغزندگی و جدایی دانه‌ها، کاهش رفتار ترشدار، کنترل خواص رآکتیو، کاهش خرابی ناشی از حرارت، کاهش میزان آب انداختگی بتن، افزایش لزجت بتن، افزایش کارایی و پیوستگی بتن، افزایش پایداری، کاهش جداشدگی و کاهش آبشستگی بتن. VMA در بتن خودتراکم منطبق بر ASTM C 494/C 494M [۴۴] است.



شکل ۵ - مصالح مورد مصرف در طرح اختلاط بتن خودتراکم (۱- ماسه، ۲- شن نخودی، ۳- شن بادامی، ۴- پودر سنگ، ۵- سیمان، ۶- آب، ۷- فوق روان کننده، ۸- زل نانو سیلیس، ۹- افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته، ۱۰- خرده بلوک سیمان، ۱۱- ضایعات ساختمان)

۲-۲- طرح مخلوط

در این پژوهش، ۹ طرح اختلاط بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان مورد بررسی قرار گرفتند. خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی با میزان درصد‌های مختلف ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ نسبت به وزن ماسه در نظر گرفته شد. در تمامی ۹ طرح اختلاط، مقدار مصالح ثابت بوده و میزان درصد‌های خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی متغیر است. نحوه محاسبه درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی بر حسب وزن ماسه در طرح اختلاط بتن خودتراکم:

$$\text{وزن ماسه} - \left((25,50,75,100\%) \times \text{وزن ماسه} \right)$$

جدول ۸ - طرح اختلاط بتن خودتراکم با بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان

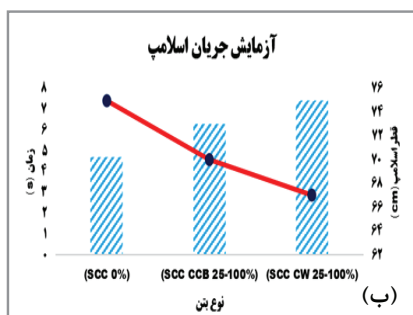
طرح اختلاط بتن خودتراکم (۰٪)								
(SCC 0%)								
خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان (kg/m ³)	VMA (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	فوق روان کننده - ژل نانو سیلیس (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن بادامی (kg/m ³)	شن نخودی (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)
-	۱/۵	۱۲۰	۷ - ۳/۷۸	۱۰۰	۹۰۰	۸۵	۲۳۴	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۲۵٪ خرده بلوک سیمان (SCC CCB 25%)								
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۲۵٪ ضایعات ساختمان (SCC CW 25%)								
۲۲۵	۱/۵	۱۲۰	۷ - ۳/۷۸	۱۰۰	۶۷۵	۸۵	۲۳۴	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۵۰٪ خرده بلوک سیمان (SCC CCB 50%)								
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۵۰٪ ضایعات ساختمان (SCC CW 50%)								
۴۵۰	۱/۵	۱۲۰	۷ - ۳/۷۸	۱۰۰	۴۵۰	۸۵	۲۳۴	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۷۵٪ خرده بلوک سیمان (SCC CCB 75%)								
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۷۵٪ ضایعات ساختمان (SCC CW 75%)								
۶۷۵	۱/۵	۱۲۰	۷ - ۳/۷۸	۱۰۰	۲۲۵	۸۵	۲۳۴	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۱۰۰٪ خرده بلوک سیمان (SCC CCB 100%)								
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۱۰۰٪ ضایعات ساختمان (SCC CW 100%)								
۹۰۰	۱/۵	۱۲۰	۷ - ۳/۷۸	۱۰۰	-	۸۵	۲۳۴	۳۵۰

۲-۳-۲- انجام آزمایش

در ابتدا برای رسیدن به یک طرح مخلوط بهینه و مناسب بتن خودتراکم لازم است با مصالح ذکر شده به دفعات مکرر باتوجه به شرایط محیطی (دمای هوای ۲۵ درجه سانتیگراد) آزمایش انجام گردد. معیارهای انتخاب طرح اختلاط در این پژوهش باتوجه به مدول نرمی ماسه، مقاومت‌های فشاری و کششی مکعبی و استوانه‌ای، مقاومت مصالح تعیین شد. مصالح ذکر شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه در بتونیر مخلوط شوند. پس از ترکیب شدن مصالح در مخلوط کن لازم است برای خواص تازه بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش V، آزمایش جعبه L، آزمایش حلقه J و آزمایش جعبه U انجام شود.

۲-۳-۱- آزمایش جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ به دلیل سادگی در اجرا و برای تعیین کارایی بتن خودتراکم بسیار متداول است. استفاده از آزمایش جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم به دلیل اندازه‌گیری قابلیت جریان و ارزیابی کیفیت بتن است. آزمایش جریان اسلامپ یکی از آزمون‌های استاندارد برای ارزیابی کیفیت بتن است. نتایج داده‌های آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در شکل ۶ به دست آمده است. آزمایش جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم بر اساس استاندارد ASTM C1611 [۴۵] است.

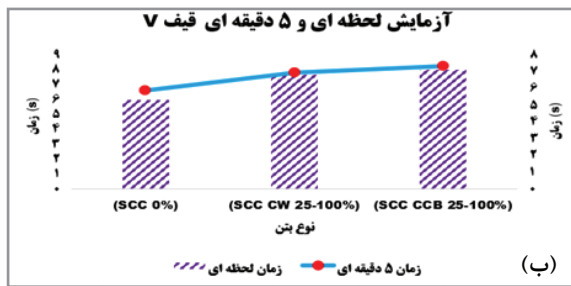


شکل ۶ - الف) آزمایش جریان اسلامپ ب) نتایج آزمایش جریان اسلامپ

با افزایش درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در بتن خودتراکم قطر جریان اسلامپ نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش می‌یابد. همچنین زمان جریان اسلامپ نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش می‌یابد. این مسئله به دلیل سنگین، سخت‌تر شدن و کاهش جریان‌پذیری بتن با افزایش مقدار ضایعات می‌باشد.

۲-۳-۳- آزمایش قیف V

آزمایش قیف V جهت سنجش توانایی عبور بتن از میان مقاطع مسلح مقید بدون جداشدگی دانه‌ها و وقوع انسداد در جریان در نظر گرفته شده است. این آزمایش برای ارزیابی توانایی مقاومت بتن در برابر تراکم استفاده می‌شود. زمانی که بتن، خودتراکم می‌شود، حجم آن کاهش می‌یابد و حجم آب درون بتن به دلیل فشار اعمال شده تغییر می‌کند. از آزمایش قیف V این تغییر در حجم آب را می‌توان اندازه‌گیری کرد و از طریق آن می‌توان مقدار خودتراکمی بتن را تعیین کرد. این اطلاعات برای مهندسان عمران و سازندگان بسیار ارزشمند است؛ زیرا با اندازه‌گیری خواص خودتراکم بتن، می‌توانند از عملکرد بتن در معرض بارهای مختلف اطمینان حاصل کنند و کیفیت بتن را بهبود بخشند. میانگین نتایج آزمایش قیف V بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در شکل ۷ به دست آمده است. آزمایش قیف V برای سنجش توانایی و ویسکوزیته بتن خودتراکم بر اساس استاندارد ISISIR 3203-9 [۴۶] است.

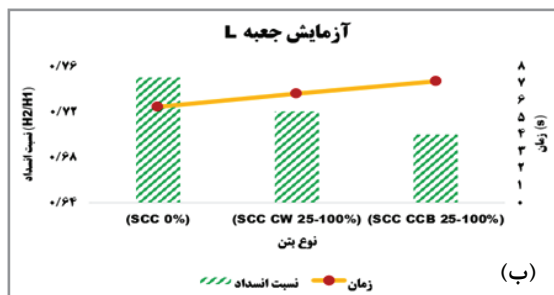


شکل ۷ - الف) آزمایش قیف V (ب) نتایج آزمایش قیف V

با افزایش درصد ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم زمان لحظه‌ای و ۵ دقیقه‌ای نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافت این مسئله به دلیل کاهش جریان‌پذیری بتن با افزایش مقدار ضایعات است.

۳-۳-۲- آزمایش جعبه L

هدف از آزمایش جعبه L برای بررسی قابلیت روانی، قدرت عبور بتن از بین میلگردها، پایداری در مقابل جداسازی دانه‌ها و قابلیت پرکنندگی است. استفاده از آزمایش جعبه L برای بتن خودتراکم به دلیل ارزیابی دقیق تراکم و خواص رئولوژیکی بتن است. این آزمایش میزان تراکم بتن را در هنگام فشرده‌شدن نشان می‌دهد. میانگین نتایج آزمایش جعبه L برای بتن خودتراکم با اثر درصد‌های مختلف خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در شکل ۸ به‌دست‌آمده است. آزمایش جعبه L برای بتن خودتراکم بر اساس استاندارد INSO 3203-10 [۴۷] است.

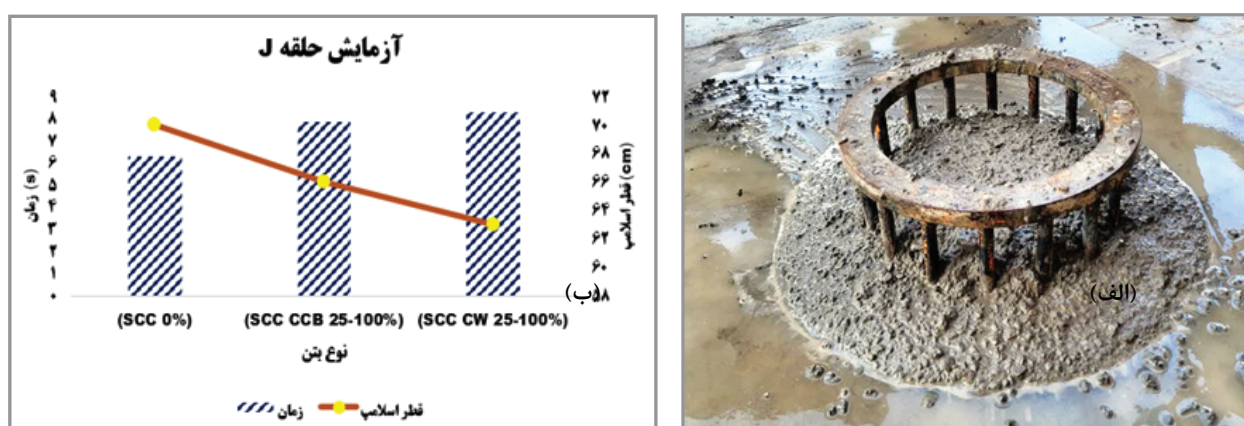


شکل ۸ - الف) آزمایش جعبه L (ب) نتایج آزمایش جعبه L

با افزایش درصد ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم نسبت انسداد (H_2/H_1) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش شد همچنین زمان آزمایش جعبه L نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش یافت. این مسئله به دلیل سخت‌تر شدن و کاهش جریان‌پذیری بتن با افزایش مقدار ضایعات می‌باشد.

۴-۳-۲- آزمایش حلقه J

هنگامی که بتن خودتراکم در قالب‌هایی که شامل میلگردهای فولادی هستند، قرار می‌گیرد، می‌بایست همگنی خود را حفظ کند و در هنگام جریان یافتن بتن، سنگدانه نباید از مخلوط بتنی جدا شوند. آزمایش حلقه J در واقع شبیه‌سازی عبور بتن از میان میلگردها است و به منظور بررسی قابلیت عبور به کار گرفته می‌شود. آزمایش حلقه J یکی از روش‌های استاندارد برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم است. دلیل استفاده از این آزمایش سادگی و قابلیت اجرا و دقت نسبتاً خوب آن است. نتایج این آزمایش می‌تواند مکمل مناسبی برای آزمایش‌های جریان اسلامپ، اریمت و قیف V باشد. آزمایش حلقه J برای بتن خودتراکم بر اساس استاندارد INSO 11271 [۴۸] است. میانگین نتایج آزمایش حلقه J برای بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در شکل ۹ به دست آمده است.



شکل ۹ - الف) آزمایش حلقه J ب) نتایج آزمایش حلقه J

با افزایش درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در بتن خودتراکم قطر جریان اسلامپ نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش می‌یابد. همچنین زمان جریان اسلامپ نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش می‌یابد. این مسئله به دلیل سنگین‌تر شدن و کاهش جریان‌پذیری بتن با افزایش مقدار ضایعات می‌باشد.

۵-۳-۲- آزمایش جعبه U

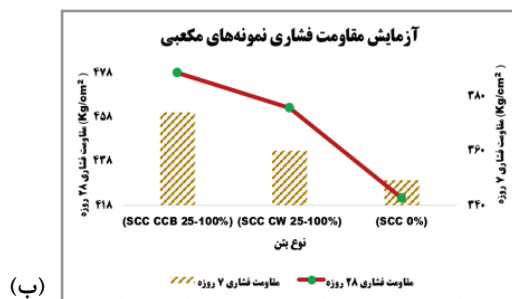
آزمایش جعبه U یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری خصوصیات بتن خودتراکم است. این آزمایش به ارزیابی وضعیت جریان بتن خودتراکم کمک می‌کند، از جمله اندازه‌گیری قابلیت تراکم و رفتار آن در معرض تغییرات تکنولوژیکی است. از این آزمایش جهت اندازه‌گیری نرخ تراکم بتن استفاده می‌شود. آزمایش جعبه U مطابق با استاندارد UNI 11044 [۴۹] است. میانگین نتایج آزمایش جعبه U برای بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی در شکل ۱۰ به دست آمده است.

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

مقاومت در مقابل فشار در حقیقت نشان‌دهنده مرغوبیت بتن است. میزان آن به وسیله آزمایش فشاری روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر پس از یک دوره زمانی مشخص می‌شود. نیروی فشاری قائم بر روی سطوح فوقانی و تحتانی که کاملاً مسطح و صاف شده‌اند، وارد می‌شود. حد مقاومت بتن، زمانی است که نمونه خرد و از هم گسیخته شود. معمولاً مقاومت بتن پس از ۲۸ روز از ساخت ملاک محاسبات قرار می‌گیرد. آنچه مسلم است مقاومت فشاری نسبت به سن بتن افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش و میانگین داده‌های مقاومت فشاری به دست آمده نمونه‌های ساخته شده در هر ۹ طرح اختلاط بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصد‌های مختلف (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مطابق شکل ۱۱ انجام شد. در راستای نتایج تحقیق پژوهشگران قبلی در ارتباط با این موضوع از جمله سان [۳۰] فرناندو [۳۲]، باگذشت زمان با افزایش خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان در طرح اختلاط بتن خودتراکم مقاومت فشاری نسبت به بتن خودتراکم (معیار) افزایش یافت. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی ۱۰۰ درصد خرده بلوک سیمان و حاوی ۱۰۰ درصد ضایعات ساختمان در همه سنین از نمونه بتن خودتراکم (شاهد) بیشتر شد. دلیل افزایش مقاومت در آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم با ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان برای نمونه‌های مکعبی ناشی از تأثیر مثبت فضای خالی ایجاد شده در بتن به سبب مقدار، ترکیب مثبت شیمیایی خرده بلوک سیمان با سیمان، تقویت فاز سوم بتن و افزایش روند هیدراته شدن در بتن است. همچنین، با افزایش درصد ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان در بتن ناشی از کاهش تخلخل به دلیل افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال بتن و انسجام کافی بتن است. با افزایش درصد خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم مقاومت فشاری نسبت به ضایعات ساختمان در بتن خودتراکم نیز افزایش داشت. دلیل اصلی آن هم جنس بودن خرده بلوک سیمانی با بتن است و عناصر داخلی بتن با خرده بلوک ترکیب شده و ناحیه انتقال بتن چسبندگی و مقاومت بیشتری کسب می‌کند. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر اساس استاندارد [۵۰] ISIRI 3206 است.

مقایسه ضایعات ساختمان با خرده بلوک سیمان بر آزمایش مقاومت فشاری آزمونه‌های مکعبی (مقاومت فشاری):

$$(SCC CCB) > (SCC CW) > (SCC)$$



(الف)

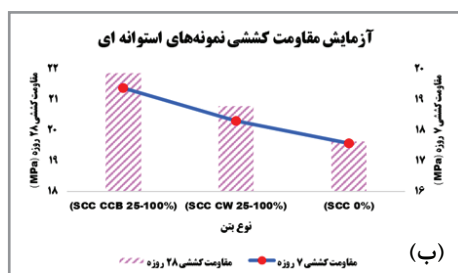
شکل ۱۱ - الف) شکست نمونه مکعبی با دستگاه مقاومت فشاری ب) نتایج داده‌های آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصد‌های مختلف نشان داد که در نمونه‌های مکعبی طی ۷ و ۲۸ روزه مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

۵-۲- آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

مقاومت کششی بتن بسیار کم و مقدار آن در حدود ۸ تا ۱۲ درصد مقاومت فشاری است. مقاومت در مقابل کشش در حقیقت نشان‌دهنده مرغوبیت بتن است. میزان آن به وسیله آزمایش کششی (برزیلی) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای پس از یک دوره زمانی مشخص می‌شود. مقاومت کششی به‌عنوان ویژگی دیگر مهم بتن خودتراکم است که نشان‌دهنده توانایی بتن برای مقاومت در برابر نیروهای کششی است که به آن اعمال می‌شود. این ویژگی می‌تواند بر اساس نسبت بین استحکام کششی و استحکام فشاری مصالح بتن متفاوت باشد. معمولاً مقاومت کششی بتن پس از ۲۸ روز از ساخت ملاک محاسبات قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش و میانگین داده‌های مقاومت کششی به‌دست‌آمده نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده در هر ۹ نوع بتن خودتراکم (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان در عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مطابق شکل ۱۲ انجام شد. باگذشت زمان در هر ۸ طرح اختلاط بتن با افزایش ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان در بتن، مقاومت کششی نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافت. مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی ضایعات ساختمان ۱۰۰ درصد و حاوی خرده بلوک سیمان ۱۰۰ درصد در همه سنین از نمونه‌های بتن خودتراکم (شاهد) بیشتر شد. دلیل افزایش مقاومت در آزمایش مقاومت کششی بتن خودتراکم با ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان برای نمونه‌های استوانه‌ای ناشی از تأثیر مثبت مدول الاستیسیته ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان در بتن به سبب مقدار، ترکیب مثبت شیمیایی خرده بلوک سیمان با سیمان، تقویت فاز سوم بتن و افزایش روند هیدراته شدن در بتن است. همچنین، با افزایش درصد ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمان در بتن ناشی از کاهش تخلخل به دلیل افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی در ناحیه انتقال بتن و انسجام کافی بتن است. با افزایش درصد خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم مقاومت کششی نسبت به ضایعات ساختمان در بتن خودتراکم نیز افزایش داشت. دلیل اصلی آن هم جنس بودن خرده بلوک سیمانی با بتن است و عناصر داخلی بتن با خرده بلوک ترکیب شده و ناحیه انتقال بتن چسبندگی و مقاومت بیشتری کسب می‌کند. آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بر اساس استاندارد ASTM C496 [۵۱] می‌باشد. مقایسه ضایعات ساختمان با خرده بلوک سیمان بر آزمایش مقاومت کششی آزمونه‌های استوانه‌ای (مقاومت کششی):

$$(SCC CCB) > (SCC CW) > (SCC)$$



شکل ۱۲ - الف) شکست نمونه استوانه‌ای با دستگاه مقاومت کششی (برزیلی) ب) نتایج داده‌های آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

آزمایش مقاومت کششی بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصدهای مختلف نشان داد که در نمونه‌های مکعبی طی ۷ و ۲۸ روزه مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

۶-۲- آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های مکعبی

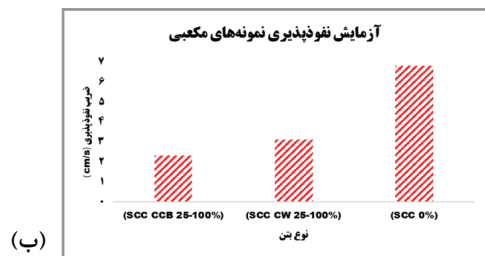
استفاده از آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌های بتن جهت تعیین نفوذ آب در بتن استفاده می‌شود. نفوذ آب، گازها و مواد شیمیایی می‌توانند به دوام بتن آسیب بزنند. اگر بتن نفوذپذیری کمتری داشته باشد، آب و مواد شیمیایی کمتری قادر به نفوذ و تخریب بتن خواهند شد که این موجب افزایش دوام و عمر مفید بتن می‌شود. آزمایش نفوذپذیری برای بتن خودتراکم اهمیت زیادی دارد از جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

ارزیابی کیفیت بتن، پیش‌بینی عمر مفید سازه، مقایسه اثربخشی اضافه‌کننده‌ها و مواد مخلوط‌کننده در بتن، کنترل کیفیت ساخت. آزمایش نفوذپذیری، این قابلیت را فراهم می‌کند که میزان نفوذ آب در بتن را اندازه‌گیری کرده و به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای کیفیت بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش نفوذپذیری بتن خودتراکم با و بدون ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان با درصدهای مختلف (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) برای آزمون‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر جهت حفظ آزمون‌ها در برابر نفوذ آب، یون‌ها، سولفات‌ها و دوام بتن در نظر گرفته شد. این آزمایش در معرض فشار هیدرواستاتیک ۵ بار که مطابق با استاندارد DIN 1048 [۵۲] است، اندازه‌گیری شد. فشار آب و هوا در بازه زمانی ۷۲ ساعت و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد مورد ارزیابی قرار گرفت و ضریب نفوذپذیری محاسبه شد (مطابق شکل ۱۳). نتایج آزمایش نفوذپذیری بر روی آزمون‌ها نشان داد که با افزایش درصد ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان در بتن خودتراکم نفوذپذیری کاهش یافت. استفاده از خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان موجب کاهش آزمایش نفوذپذیری در بتن خودتراکم می‌شود؛ زیرا این خرده بلوک‌ها معمولاً حاوی مواد جاذب هستند که باعث کاهش نفوذ آب و سایر مواد در بتن می‌شوند. خرده بلوک‌های سیمانی دارای شکل هندسی نامنظم هستند که باعث پر کردن فضاهای خالی بین ذرات بتن می‌شوند. این پرکنندگی فضاهای خالی باعث می‌شوند که مسیرهای نفوذ آب و سایر مواد در بتن کاهش یابند. برخی از خرده بلوک‌های سیمانی شامل مواد پوزولانی مانند پرک، سنگ‌آهک و خاک رس باشند که باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب و مواد دیگر می‌شوند. ضایعات ساختمان ممکن است دارای سطحی نامنظم و خلل‌هایی باشند که باعث ایجاد موانع فیزیکی برای نفوذ آب و سایر مواد در بتن می‌شوند. با توجه به اینکه ضایعات ساختمانی معمولاً از مواد خرد شده و با ابعاد متفاوت تشکیل شده‌اند، استفاده از آن‌ها می‌تواند به کاهش ترکیدگی بتن کمک کند که این نیز منجر به کاهش نفوذپذیری می‌شود.

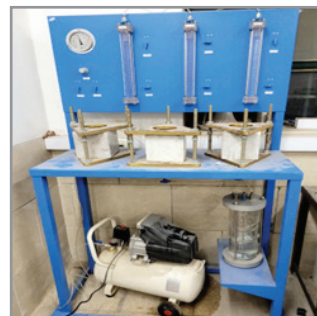
مقایسه ضایعات ساختمان با خرده بلوک سیمان بر آزمایش نفوذپذیری آزمون‌های مکعبی

(آزمایش نفوذپذیری):

(SCC CCB) > (SCC CW) > (SCC)



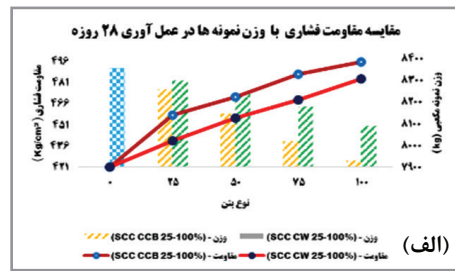
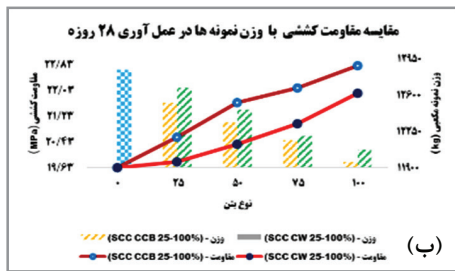
(ب)



(الف)

شکل ۱۳ - دستگاه نفوذپذیری بتن و نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های مکعبی

آزمایش نفوذپذیری بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصدهای مختلف نشان داد که در نمونه‌های مکعبی طی ۷۲ ساعت ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند.



شکل ۱۴ - الف) مقایسه میانگین مقاومت فشاری با وزن نمونه‌ها در عمل‌آوری ۲۸ روزه ب) مقایسه میانگین مقاومت کششی با وزن نمونه‌ها در عمل‌آوری ۲۸ روزه

مقایسه مقاومت فشاری و کششی با وزن نمونه‌های بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصد‌های مختلف نشان داد که وزن نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با افزایش ضایعات در بتن خودتراکم نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند.

۳- نتیجه گیری

باتوجه به فراوانی خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان در سرتاسر کشور ایران و دسترسی آسان و ارزان به این ضایعات، در این پژوهش به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان در خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم پرداخته شد. استفاده از ضایعات مصالح ساختمانی یکی از روش‌های ارتقا کیفیت و مقاومت بتن خودتراکم است. استفاده از ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمانی در بتن خودتراکم باعث کارایی، ایجاد مقاومت در برابر جدایش‌ها، افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود پایداری می‌شود. بدین ترتیب می‌توان از ظرفیت خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان جهت بهبود مقاومت خمشی، کششی و همچنین بهبود مقاومت در برابر تنش‌ها استفاده نمود. استفاده از ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمانی در بتن خودتراکم به‌عنوان جایگزین وزن ماسه استفاده شد. استفاده از این ضایعات در بتن خودتراکم می‌تواند ویژگی‌های محیطی را بهبود یابد، از جمله به کاهش آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی. استفاده از خرده بلوک سیمانی یا ضایعات ساختمانی در بتن خودتراکم باعث افزایش مقاومت مکانیکی بتن با توانایی انتقال بار مؤثرتر و افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن شوند. استفاده از ضایعات منجر به کاهش وزن و حجم بتن می‌شود این امر می‌تواند بهبود مقاومت به فشار و توانایی باربری سازه را ارتقا دهد. استفاده از ضایعات ساختمان و خرده بلوک سیمانی در بتن خودتراکم می‌تواند هزینه تولید بتن را کاهش دهد؛ زیرا این مواد به‌عنوان فرآورده‌های دستیابی آسان و با هزینه کمتر در دسترس هستند. استفاده از آن‌ها به‌عنوان جایگزین ماسه، می‌توان مصرف منابع طبیعی را کاهش داد و همچنین مقداری از پسماندهای ساختمانی را که معمولاً دفن می‌شوند، بازیافت کرد. خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان در بتن خودتراکم باعث افزایش مقاومت کششی، فشاری و نفوذپذیری گردید. خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان، در حال حاضر کاربردی نداشته و با تلبار شدن به‌عنوان ضایعات باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند؛ اما به‌کارگیری از آن‌ها در بتن خودتراکم با دیدگاه استفاده از ضایعات، باعث کاهش آلودگی محیط‌زیست و افزایش مقاومت مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر افزودن خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان بر مقاومت فشاری، کششی و نفوذپذیری بتن خود تراکم بود که نتایج ذیل را در برداشت: نتایج میانگین داده‌های آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصد‌های مختلف (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ نسبت به وزن ماسه) نشان داد که:

(SCC CW 25-100%)^۲، (SCC CCB 25-100%)^۲ در نمونه‌های مکعبی طی ۷ روزه به ترتیب ۳/۱۵٪ و ۷/۱۶٪ مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

(SCC CW 25-100%)، (SCC CCB 25-100%) در نمونه‌های مکعبی طی ۲۸ روزه به ترتیب ۹/۷۳٪ و ۱۳/۵۳٪ مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

نتایج میانگین داده‌های آزمایش مقاومت کششی بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصدهای مختلف (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ نسبت به وزن ماسه) نشان داد که:

(SCC CW 25-100%)، (SCC CCB 25-100%) در نمونه‌های استوانه‌ای طی ۷ روزه به ترتیب ۴/۲۱٪ و ۱۰/۳۶٪ مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

(SCC CW 25-100%)، (SCC CCB 25-100%) در نمونه‌های استوانه‌ای طی ۲۸ روزه به ترتیب ۵/۸۵٪ و ۱۱/۳۰٪ مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

نتایج میانگین داده‌های آزمایش نفوذپذیری بتن خودتراکم با و بدون خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمان با درصدهای مختلف (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ نسبت به وزن ماسه) نشان داد که:

(SCC CW 25-100%)، (SCC CCB 25-100%) در نمونه‌های مکعبی طی ۷۲ ساعت به ترتیب ۵۴/۴۱٪ و ۶۶/۱۷٪ ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند.

نتایج میانگین آزمایش جریان اسلامپ نشان داد که با افزایش درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی به مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در بتن خودتراکم قطر جریان اسلامپ به ترتیب (۶/۶۶ و ۱۰/۶۷ درصد) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند همچنین زمان جریان اسلامپ به ترتیب (۱/۶ و ۲/۷ ثانیه) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش یافتند. نتایج میانگین آزمایش قیف V نشان داد که با افزایش درصد ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان به مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در بتن خودتراکم زمان لحظه‌ای و ۵ دقیق‌های به ترتیب (۱/۵، ۱/۸، ۱/۲ و ۱/۶ ثانیه) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند.

نتایج میانگین آزمایش جعبه L نشان داد که با افزایش درصد ضایعات ساختمانی و خرده بلوک سیمان به مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در بتن خودتراکم نسبت انسداد (H_2/H_1) به ترتیب (۴ و ۶/۶۷ درصد) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند همچنین زمان آزمایش جعبه L به ترتیب (۰/۸ و ۱/۵ ثانیه) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش یافتند. نتایج میانگین آزمایش حلقه J نشان داد که با افزایش درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی به مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در بتن خودتراکم قطر جریان اسلامپ به ترتیب (۵/۷۱ و ۱۰ درصد) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) کاهش یافتند همچنین زمان جریان اسلامپ به ترتیب (۱/۶ و ۲ ثانیه) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش یافتند.

نتایج میانگین آزمایش جعبه U نشان داد که با افزایش درصد خرده بلوک سیمان و ضایعات ساختمانی به مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد نسبت به وزن ماسه) در بتن خودتراکم اختلاف ارتفاع (H_2/H_1) به ترتیب (۳ و ۵ سانتیمتر) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) افزایش یافتند همچنین زمان آزمایش جعبه U به ترتیب (۰/۸ و ۱/۷ ثانیه) نسبت به بتن خودتراکم (شاهد) نیز افزایش یافتند.

^۲ بتن خودتراکم با ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ خرده بلوک سیمان

^۳ بتن خودتراکم با ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ ضایعات ساختمان

تمامی آزمایش‌های این مقاله در آزمایشگاه مرکز بتن‌های خاص (SCC) دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان انجام شده است. بدین وسیله از مسئول آزمایشگاه مرکز بتن‌های خاص جناب آقای مهندس علیرضا دادپور و همچنین مسئولین محترم دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان بابت فراهم نمودن تجهیزات و امکان استفاده از آزمایشگاه، کمال تشکر و قدردانی می‌گردد.

۵- منابع

- [1] Boukendakdji, O. Kenai, S. Kadri, E.H. Rouis, F. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Constr. Build. Mater.* 23,2019, 25-93.
- [2] Aslani, F. Ma, G. Yim Wan, D. Muselin, G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.074.
- [3] Topcu, I.B. Sengel, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* 34, 2004, 1307–1312.
- [4] Yong-Huang, L. Yaw-Yauan, T. Ta-Peng, C. Ching-Yun, C. An, assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Res.* 34, 2004, 1373-1380.
- [5] Fonseca, N. De Brito, J. Evangelista, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste, *Cem. Concr. Compos.* 33 (6), 2011, 637–643.
- [6] Omrane, M. Kenai, S. Kadri, E. Mokhtar, A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *J. Clean. Prod.* 165, 2017, 415–430.
- [7] Sun, C. Chen, Q. Xiao, J. Liu, W. Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete, *Volume 161*, 2020, 104-930
- [8] Senas, L. Priano, C. Marfil, S. Influence of recycled aggregates on properties, of self-consolidating concretes. *Constr. Build. Mater.* 113, 2016, 498-505.
- [9] Tabsh, S.W. Abdelfatah, A.S. Influence of recycled concrete aggregates on strength, properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 23 (2), 2009, 1163–1167.
- [10] Xiao, J. Ma, Z. Sui, T. Akbarnezhad, A. Duan, Z. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *J. Clean. Prod.* 188, 2018, 720–731.
- [11] Cuesta, V. López, V. O. Skaf, M. Manso, J, M. Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 263, 2020, 120-671
- [12] Ju, M. Park, K. Park, W, J. Mechanical Behavior of Recycled Fine Aggregate Concrete with High Slump Property in Normal- and High-Strength, *International Journal of Concrete Structures and Materials* volume 13, Article number: 61, 2019.
- [13] Ghorbani, S. Sharifi, S. Ghorbani, S. Effect of crushed concrete waste's maximum size as partial replacement of natural coarse aggregate on the mechanical and durability properties of concrete, *Resources Conservation and Recycling* 149: 2019, 664-673.
- [14] Bai, G. Zhu, C. Liu, C. Liu, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the

- recycled aggregate concrete mechanical properties, *Construction and Building Materials* 240(2): 2020, 117-978.
- [15] Tarek Aly, S. El-Dieb, M. ASCE, A.S. Taha, M. ASCE, M.R. Effect of High-Volume Ceramic Waste Powder as Partial Cement Replacement on Fresh and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volume 31, 2018, Issue 2.
- [16] Adesina, A. Awoyera, P. Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production. *SN Applied Sciences*, 2019.
- [17] Ezhilarasi, R. Reya George. K. Experimental Investigation on Self Compacting Concrete by Replacing Industrial Waste Materials. *International Journal of Engineering Research & Technology* Vol. 9 Issue 05, 2020.
- [18] Sun, C. Chen, Q. Xiao, J. Liu, W. Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 161, 2020.
- [19] Ghasemi.A.H, Nematzadeh.M, Fallahnejad.H. Post-fire residual fracture characteristics and brittleness of self-compacting concrete containing waste PET flakes: Experimental and theoretical investigation. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 261, 2022, 108-263.
- [20] Jaskowska-Lemańska.J, Kucharska.M, Matuszak.J, Nowak.P, Łukaszczyk.W. Selected Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled PET Aggregate. *Materials (Basel)*. 15(7): 2022, 2566.
- [21] Basser, H., Shaghaghi, T. M., Afshin, H., Ahari, R. S., & Mirrezaei, S. S. An experimental investigation and response surface methodology-based modeling for predicting and optimizing the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing steel fiber and PET. *Construction and Building Materials*, 315, 2022, 125370.
- [22] Ahmed, S. El-Zohairy, A. S. Eisa, A. Badran Mohamed, M.A. Abdo, A. Experimental Investigation of Self-Compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregate. *Journal Buildings*. Volume 13. Issue 4, 2023.
- [23] Malazdrewicz, S. Ostrowski, K.A. Sadowski, L. Self-compacting concrete with recycled coarse, 2023.
- [24] Felekoğlu, B., Sarikahya, H. Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 22, 2008, 1972-1980.
- [25] Hemalatha, T., Ram Sundar, K.R., Murthy, A.R., Iyer, N.R., Influence of mixing protocol on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 98, 2015, 119-127.
- [26] Huang, F., Li, H., Yi, Z., Wang, Z., Xie, Y. The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent. *Constr. Build. Mater.* 166, 2018, 833-838.
- [27] Ji, T. Chen, C.-Y. Chen, Y.-Y. Zhuang, Y.-Z. Chen, J.-F. Lin, X.-J. Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete. *Constr. Build. Mater.* 44, 2013, 726-733.
- [28] Bai, G. Zhu, C. Liu, C. Liu, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties, *Construction and Building Materials* 240(2): 2020, 117-978.

- [29] Cuesta, V. López, V.O. Skaf, M. Manso, J, M. *Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, Volume 263, 2020, 120-671*
- [30] Suna, C. Chena, Q. Xiaob, J. Liu, W. (2020). *Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. Resources, Conservation and Recycling, Volume 161, October 2020, 104-930.*
- [31] Resources, Duan, Z. Singh, A. Xiao, J. Hou, S. *Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Volume 254, 2020. 119323.*
- [32] Fernando, A. N. S. João, M. P. Q. António, C. A. Lima, G. B. Castorina, S. V. (2021). *Preliminary Analysis of the Use of Construction Waste to Replace Conventional Aggregates in Concrete. Journals Buildings, Volume 11, Issue 3. 1103-0081.*
- [33] Li, J. Zhang, J. Ni, S. Liu, L. Walubita, L.F. *Mechanical performance and environmental impacts of self-compacting concrete with recycled demolished concrete blocks. Journal of Cleaner Production, Volume 293. 2021, 126-129.*
- [34] Al-Tayeb a, Yazan, M.M. Aisheh, A. Shaker, M.A. Qaidi, C, Bassam, A.T. (2022). *Experimental and simulation study on the impact resistance of concrete to replace high amounts of fine aggregate with plastic waste. Case Studies in Construction Materials. Volume 17. 13-24.*
- [35] Joseph, H.S. Pachiappan, T. Avudaiappan, S. Flores, E.S. (2022). *A Study on Mechanical and Microstructural Characteristics of Concrete Using Recycled Aggregate. Journals Materials. Volume 15. Issue 21.*
- [36] da Silva, S.R. Cimadon, F.N. Borges, P.M. Schiavon, J.Z. Possan, E. de Oliveira Andrade, J.J. (2022). *Relationship between the mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste. Case Studies in Construction Materials. Volume 16. 60-80.*
- [37] Zhong, C. Tian, P. Long, Y. Zhou, J. Peng, K. Yuan, C. (2022). *Effect of Composite Impregnation on Properties of Recycled Coarse Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Journals Buildings. Volume 12 Issue 7.*
- [38] Malazdrewicz, S. Ostrowski, K.A. Sadowski, T. (2023). *Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste – Current state-of-the art and perspectives. Construction and Building Materials. Volume 370, 130-702.*
- [39] Joseph, H.S. Pachiappan, T. Avudaiappan, S. Carsalade, N.M. Videla, A.R. Guindos, P. Pablo F.P. (2023). *A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. Journals Sustainability. Volume 15. Issue 6.*
- [40] ASTM C150/C150M (2012) *Standard Specification for Portland Cement.*
- [41] ASTM C 33. (2003). *Standard specification for concrete aggregates. American Society of Testing and Materials Standards.*
- [42] ASTM C 494. (2002). *Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards.*
- [43] ASTM C 94, (2009). *Standard specification for Ready – Mixed Concrete, American Society of Testing and Materials Standards.*
- [44] ASTM C 494/C 494M. (2002). *Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards,*

- [45] ASTM C1611 . (2009). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.*
- [46] INSO 3203-9. (2013). *Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete V-funnel test.*
- [47] INSO 3203-10. (2013). *Testing fresh concrete – Part 9: Self- compactin g concrete -L box test.*
- [48] INSO 11271. (2014). *Concrete -Measurement of passing ability of self-consolidating concrete by J-ring- Test Method.*
- [49] UNI 11044. (2012). *Standard UTC-0547 U Shape Box Apparatus. Rilem Report No.23*
- [50] ISIRI 3206. (2003). *Standard Test Determining the compressive strength of concrete samples.*
- [51] ASTM C496. (2002). *ASTM C496 Tensile Concrete Test Equipment.*
- [52] DIN 1048. (2012). *Standard test Concrete Impermeability Test.*