Archive of SID

نشریه علمی – پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحه ۱۷۹ تا ۱۹۲

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی – پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی تأثیر انواع مختلف سنگدانه بازیافتی بتنی بر روی خواص بتن

میلاد عقیلی لطف[۱]، امیر محمد رمضانیان پور[۲*]، مسعود پلاسی[۳]

۱-دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر همزمان با افزایش نرخ ساخت و ساز و همچنین تخریب سازه‌های قدیمی، معضلات زیست محیطی مختلفی پدیدار شده است. از جمله این معضلات می‌توان به کمبود منابع طبیعی مانند سنگدانه و کمبود مراکز دفن اشاره کرد. راه حلی که محققین مهندسی عمران اخیراً پیشنهاد کرده‌اند، بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب و استفاده مجدد از آن به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در تولید بتن است. سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت کمتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارند. لذا عموماً انتظار می‌رود بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی بتنی (بتن بازیافتی) دارای خواص مهندسی ضعیف‌تری نسبت به بتن معمولی باشد.هر چند که این موضوع به شدت تحت تأثیر کیفیت و کمیت سنگدانه بازیافتی مصرفی در بتن است. در این مقاله باتوجه به اهمیت موضوع، تأثیر بتن اولیه سنگدانه‌های بازیافتی بتنی برروی خواص مهندسی سنگدانه بازیافتی بتنی و همچنین بتن بازیافتی تحقیق و بررسی شده است. برای این منظور سه نوع شن بازیافتی بتنی تهیه و تولید شد. سپس مشخصات عملکردی سنگدانه‌های تولیدی با استفاده از آزمایش‌های جذب آب، چگالی، سایش لوس آنجلس و دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان تعیین شد. در ادامه با استفاده از مصالح تولیدی، مجموعاً ۸ طرح اختلاط بتن ساخته شد و با انجام آزمایش‌های درصد جذب آب، مقاومت فشاری و همچنین دوام در برابر پوسته‌شدگی، عملکرد نمونه های بتنی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در حیطه این پژوهش، نوع بتن اولیه چندان برروی عملکرد بتن‌های بازیافتی تأثیرگذار نیست. همچنین در خصوص دوام بتن‌های بازیافتی در برابر پوسته‌شدگی که با اعمال چرخه‌های مختلف ذوب و یخبندان صورت گرفت، با افزایش نسبت جایگزینی، حجم تخریب سطح نمونه‌های بتنی افزایش یافت.با این وجود، کماکان بتن‌های بازیافتی از عملکرد قابل قبولی در برابر پوسته‌شدگی برخوردار بودند.

کلمات کلیدی: سنگدانه بازیافتی بتنی، مقاومت فشاری، چرخه‌های ذوب و یخبندان، دوام در برابر پوسته شدگی، بتن اولیه سنگدانه‌های بازیافتی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2018.127001.1519
۱۳۹۷/۰۱/۲۵	۱۳۹۷/۰۶/۲۸	۱۳۹۷/۰۷/۲۰	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	doi: 10.22065/jsce.2018.127001.1519

*نویسنده مسئول: امیرمحمد رمضانیان پور

پست الکترونیکی: ramezanian@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

Investigation the effect of Different Types of Recycled Concrete Aggregates on the Engineering Properties of Concrete

Milad Aghili Lotf [1], Amir Mohammad Ramezanianpour [2, *], Massoud Palassi [3]

1- Ph.D. student, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Associate Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent decades, concurrent with expansion of cities, the demand for new buildings and structures has increased. On the other hand, aggregates constitute the biggest portion of concrete. As such, providing natural aggregates for producing concrete has become a challenge due to shortage of resources. Also, treatment of construction waste materials resulted from demolition of old structures has been another concern. One way to handle these problems is reusing concrete waste as a new material in new construction. Nowadays, recycled concrete aggregate (RCA) is used in concrete as a partial or complete replacement for natural aggregate (NA). Performance of recycled aggregate concrete (RAC) is influenced by the characteristics of the parent concrete from which RCA is obtained. In this research, the mechanical properties and the durability of three types of RCAs from different sources were evaluated. For this purpose, the aggregates' Los Angeles abrasion value and freeze/thaw soundness value were determined. Moreover, eight concrete mixes incorporating different amounts of the RCAs as coarse aggregate were cast and their water absorption coefficient, compressive strength and deicer-salt scaling resistance were assessed. The results showed that the mechanical properties of RCAs had a direct relationship with the mechanical properties and durability of RACs. Also, the type of RCAs had no significant impact on the performance of RACs. However, increasing the replacement amount of RCA decreased the strength and deicer-salt scaling resistance of RACs.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 April 2018
Revise Date: 19 September 2018
Accept Date: 12 October 2018

Keywords:
Recycled concrete aggregate (RCA)
Compressive strength
Freeze and thaw soundness
Deicer-salt scaling
Parent concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.127001.1519

*Corresponding author: Amir Mohammad Ramezanianpour
Email address: ramezanian@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و بهبودهای اقتصادی، نیاز به مسکن‌های جدید و تخریب سازه‌های قدیمی را به‌دنبال داشته‌است. به‌دلیل رخداد این نوع تخریب‌های بزرگ‌مقیاس، مقادیر بسیار زیادی نخاله‌های ساخت و تخریب[1] سالانه در سراسر دنیا تولید می‌شود که منجربه پدید آمدن معضلات زیست‌محیطی متعددی مانند کمبود محل‌های دفن نخاله شده است. در اتحادیه اروپا مقدار نخاله‌های ساخت و تخریب در سال ۲۰۰۹ نزدیک به ۸۵۰ میلیون تن برآورد شده است که این مقدار حدوداً ۳۱٪ از کل زباله تولیدی در این قاره را به‌خود اختصاص داده است [۱-۲]. نخاله‌های ساختمانی شامل مصالح اولیه مصرف‌شده در صنعت مهندسی عمران می‌شوند. از جمله این مصالح می‌توان به قطعات بتنی تخریب شده، آرماتور، آجر و بلوک‌های فشاری، شیشه، گچ، چوب... اشاره نمود. به همین دلیل پژوهشگران، دولتمردان و نهادهای بین‌المللی حفاظت از محیط‌زیست همواره به دنبال یافتن راهکارهایی مناسب به‌منظور رفع معضلات پدیدآمده هستند. در این بین، یکی از مؤثرترین اقداماتی که درخصوص رفع معضل نخاله‌های ساخت و تخریب و همچنین افزایش توان عرضه مصالح سنگدانه‌ای پیشنهاد و اجرا شده است، راهکار بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب و استفاده مجدد از آن به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در تولید بتن است. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن می‌تواند در رفع بحران کمبود منابع سنگدانه‌ای و همچنین افزایش میزان عرضه آن نقش مهمی داشته باشد [۳-۶]. مطابق باطبقه‌بندی BS 8500 [۷] سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از خردایش نخاله‌های ساخت و تخریب به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند؛ گروه اول شامل سنگدانه‌هایی هستند که حداقل از ۹۵٪ نخاله بتنی تشکیل شده باشند که به "سنگدانه بازیافتی بتنی[2]" (RCA) شناخته می‌شوند. گروه دوم نیز تماماً از نخاله‌های بنایی (شامل نخاله بتنی، قطعات دیوار بنایی، شیشه، آجر و ....) تشکیل شده‌اند که به "سنگدانه بازیافتی[3]" (RC) شناخته می‌شوند. اما عملاً سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به دلیل کیفیت به مراتب بهتر نسبت به سایر انواع سنگدانه‌های بازیافتی، کاربرد بیشتری در تولید بتن دارند [۸]. به‌طورکلی سنگدانه بازیافتی بتنی از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: الف) سنگدانه (های) طبیعی اولیه و ب) ملات سیمان هیدراته‌ی چسبیده به سطح سنگدانه (های) طبیعی اولیه [۹-۱۰]. تحقیقات اخیر نشان داده است که به دلیل کیفیت کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی بتنی (بتن بازیافتی[4]) مقاومت مکانیکی و دوام کمتری نسبت به بتن معمولی دارد [۲، ۶، ۸، ۱۱-۱۴]. در این خصوص ملات سیمان و نوع بتن مادر منشأ خواص نامطلوب سنگدانه بازیافتی شامل چگالی پایین، جذب آب بالا و عملکرد مکانیکی و دوامی ضعیف می‌باشند که این خواص به‌طور محسوسی بر خواص بتن تأثیرگذارند. در اغلب موارد مشخصات بتن اولیه[5] (یا بتن مادر) در دسترس نیست [۱۵]. از سوی دیگر، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی معمولا بسیار غیریکنواخت، متخلخل و آمیخته با مقدار زیادی ناخالصی هستند که کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در صنعت ساخت و سازرا با چالش‌های متعددی همراه می‌کند. لذا مدل کردن و پیش‌بینی نتایج مشخصه‌های سازه ساخته شده با سنگدانه بازیافتی مشکل است؛ اگرچه شناخت بهتر مشخصات سنگدانه‌های بازیافتی اطمینان لازم را برای استفاده از آن‌ها در ساخت و سازهای جدید افزایش می‌دهد. در این مقاله باتوجه به اهمیت موضوع، تأثیر بتن مادر بر روی کیفیت و رفتار عملکردی سنگدانه تولیدی و بتن بازیافتی تحقیق و بررسی شده است. بدین منظور در پژوهش پیش رو ۳ نوع سنگدانه بازیافتی بتنی با بتن مادر متفاوت تهیه و تولید شد. سپس با انجام آزمایش‌های تعیین درصد جذب آب، سایش لوس آنجلس و دوام در برابر چرخه های ذوب و یخبندان، عملکرد سنگدانه های بازیافتی ارزیابی شد. در ادامه با طراحی ۸ طرح اختلاط، عملکرد مکانیکی و دوامی نمونه‌های بتنی با انجام آزمایش‌های جذب آب، مقاومت فشاری و دوام در برابر پوسته‌شدگی تحقیق و بررسی شد.

[1] Construction and Demolition Waste (C&D)
[2] Recycled concrete aggregate
[3] Recycled aggregate
[4] Recycled aggregate concrete
[5] Parent concrete

www.SID.ir

Archive of SID

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

در این پژوهش یک نوع شن طبیعی شکسته (NCA[6]) با درصد جذب آب ۲/۷٪ و چگالی ۲/۶۲ Ton/m^3 و یک نوع ماسه طبیعی رودخانه‌ای (NFA[7]) با درصد جذب آب ۳/۴۱٪ و چگالی ۲/۵۱ Ton/m^3 مورد استفاده قرار گرفتند. سنگدانه‌های مذکور از معدن صحرا شن واقع در جاده مخصوص کرج تهیه شدند. همچنین از آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران به عنوان محل انجام پژوهش استفاده شد.

به منظور تهیه و تولید سنگدانه بازیافتی بتنی نیز ۳ نوع شن بازیافتی با بتن اولیه متفاوت درنظر گرفته شد. سنگدانه بازیافتی RCA-1 و RCA-2 به‌ترتیب از خردایش بتن خودتراکم و بتن معمولی تهیه و تولید شدند. این بتن‌ها به صورت نمونه‌های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ cm^3 واقع در محل پروژه شرکت ایران مال (دریاچه چیتگر) تهیه و به محل آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران منتقل شدند. علت اصلی انتخاب بتن خودتراکم، وجود درصد ریزدانه بیشتر نسبت به بتن معمولی و همچنین مواد جایگزین سیمان (مانند میکروسیلیس) در طرح اختلاط آن بوده است. به‌طور کلی مقدار ریزدانه بیشتر در طرح اختلاط به مقدار شن طبیعی کمتر و درنتیجه مقدار ملات سیمانی بیشتر می‌انجامد. در نهایت این نمونه‌ها بعداز گذشت سن ۹۰ روز، با خردایش به صورت دستی، به مصالح سنگدانه‌ای با قطر اسمی ۲۵ mm تبدیل شدند. در جدول ۱ مشخصات طرح اختلاط این دو شن بازیافتی بتنی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط بتن اولیه شن‌های بازیافتی RCA-1 و RCA-2

مشخصه	شن بازیافتی بتنی	
	RCA-1	RCA-2
W/C	۰/۳۴	۰/۳۴
سیمان (kg/m^3)	۳۹۰	۴۲۰
میکروسیلیس (kg/m^3)	۳۰	-
آب (kg/m^3)	۱۳۲/۶	۱۴۲/۸
سنگدانه ۱۹-۹/۵ mm (kg/m^3)	۲۵۳	۳۳۵
سنگدانه ۱۲/۵-۴/۷۵ mm (kg/m^3)	۱۶۰	۲۵۸
سنگدانه ۶-۰ mm (kg/m^3)	۱۱۹۷	۱۲۳۸
پودر سنگ (kg/m^3)	۱۶۰	-

از سوی دیگر به منظور درنظرگیری شرایطی که بتن اولیه سنگدانه بازیافتی ناشناخته است و یا سنگدانه بازیافتی از خردایش نخاله‌های بتنی مخلوط تولید شده است، یک نوع سنگدانه بازیافتی بتنی با بتن اولیه نامشخص درنظر گرفته شد. بدین منظور نخاله‌های بتنی موجود در محل آزمایشگاه مصالح ساختمانی تفکیک و خرد شدند. فرآیند تولید هر سه نوع سنگدانه بازیافتی به صورت دستی و با استفاده از چکش‌های فولادی صورت پذیرفت. در ادامه به دلیل دقت پایین‌تر خردایش دستی نسبت به خردایش مکانیکی، سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از الک‌های استاندارد دانه‌بندی شدند. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و الک ۴/۷۵

[6] Natural coarse aggregate
[7] Natural fine aggregate

www.SID.ir

Archive of SID

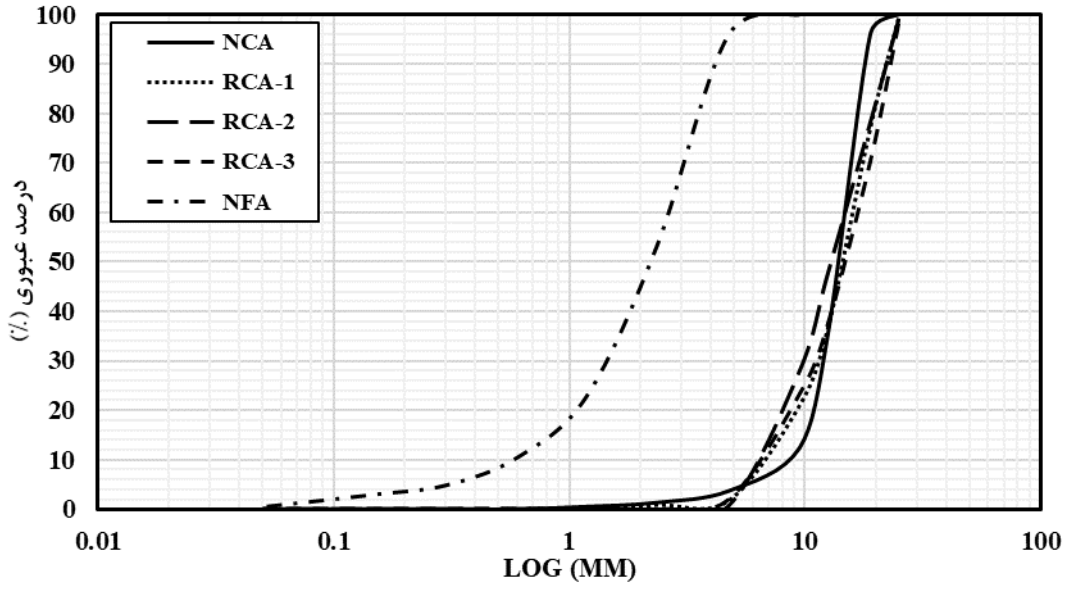
میلی‌متری نیز به منظور جداسازی شن بازیافتی از ماسه بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۲ ترکیبات تشکیل‌دهنده شن‌های بازیافتی مطابق با استاندارد DIN 4226-100 [۱۶] نشان داده شده است. استاندارد DIN 4226-100 مجموعاً ۴ طبقه‌بندی برای سنگدانه‌های بازیافتی مطرح می‌کند که سنگدانه‌های RCA-1 و RCA-2 در طبقه‌بندی اول (بهترین کیفیت) و سنگدانه RCA-3 در طبقه‌بندی دوم (کیفیت متوسط) این استاندارد قرار گرفتند. در شکل ۱ نیز نمودار دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیبات شن‌های بازیافتی بتنی

اجزاء	کد سنگدانه بازیافتی بتنی		
	RCA-1	RCA-2	RCA-3
بتن و سنگدانه‌های طبیعی اولیه مطابق با استاندارد DIN 4226-100	۹۸	۹۸/۵	۸۷/۴
قطعات آجری، آجر ملات اندود	–	–	۴/۲
ماسه سنگ آهکی	–	–	–
مواد معدنی دیگر*	۲	۱	۵
آسفالت	–	۰/۵	۲
سایر مواد خارجی**	–	–	۱/۴

*برای مثال: آجر متخلخل، بتن سبک، بتن متخلخل، اندود ملات، سرباره و مواد مشابه

**برای مثال: شیشه، سرامیک، فرآورده‌های پلاستیکی، چوب و مواد مشابه



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای مصرفی

در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ ۲تولیدی کارخانه سیمان تهران مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳ نیز نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی آورده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- ترکیبات تشکیل‌دهنده سیمان پرتلند

ترکیب شیمیایی (٪)	سیمان
SiO_2 (%)	۲۷/۳۰
Al_2O_3 (%)	۴/۶۰
Fe_2O_3 (%)	۲/۷۰
CaO (%)	۴۶/۷۰
MgO (%)	۳/۵۰
SO_3 (%)	۲/۰۴
Na_2O (%)	۰/۳۴
K_2O (%)	۰/۵۲
Equivalent alkali (%)	۰/۶۸
LOI (%)	۴/۸۴

۲-۲- طرح های اختلاط

برای ارزیابی طرح‌های بتنی ساخته شده با شن بازیافتی بتنی، شن طبیعی در نسبت‌های جایگزینی ۳۰ و ۵۰٪ با شن‌های بازیافتی بتنی جایگزین شد (این طرح‌ها به ترتیب با کدهای RCAC1-30 و RCAC1-50 برای شن بازیافتی RCA-1، RCAC2-30 و RCAC2-50 برای شن بازیافتی RCA-2، RCAC3-30 و RCAC3-50 برای شن بازیافتی RCA-3 مشخص شده‌اند). همچنین به منظور بررسی اثر ۱۰۰٪ جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی بتنی، طرح RCAC2-100 با استفاده از شن بازیافتی RCA-2 طراحی شد. مجموعاً ۸ طرح اختلاط برای این پژوهش در نظر گرفته شد. برای این طرح‌ها، مقاومت فشاری هدف ۴۰ MPa در سن ۲۸ روزه تعریف شد. در ادامه با ساخت طرح‌های آزمایشی برای بتن شاهد، مقادیر بهینه عیار سیمان مصرفی ۳۵۰ kg/m^3 و نسبت آب به سیمان ۰/۵ به‌دست آمد. برای تأمین روانی $10\pm$ ۸۰ mm، یک نوع فوق روان‌کننده برپایه پلی کربوکسیلیک اتر[8]، در مقادیر مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۴ مشخصات اجزای تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط ارائه شده است. اختلاط بتن به‌دلیل درصد جذب آب بالای شن‌های بازیافتی با اصلاح روش طرح مخلوط ASTM C 192 [۱۷] و به صورت پیش اشباع‌سازی [۱۸] صورت گرفت. در تحقیقاتی که برروی ناحیه انتقال [9] در بتن‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی انجام شده است، مشاهده شد که استفاده از سنگدانه بازیافتی بتنی اشباع با سطح خشک می‌تواند منجربه ضعف عملکردی در ناحیه انتقال شود [۱۹]. از سوی دیگر کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی کاملاً خشک نیز به دلیل جذب سریع آب آزاد در بتن، منجربه افت شدید کارایی می‌گردد [۲۰-۲۱]. به همین دلیل در این پژوهش، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با درصد رطوبت ۸۰ الی ۹۰٪ استفاده شدند. به همین منظور، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ۶ ساعت قبل از اختلاط با استفاده از آب مورد نیاز برای اختلاط، اشباع شده و سپس در حین اختلاط، آب باقی‌مانده به اجزای اختلاط اضافه شد. ۲۴ ساعت بعداز ساخت نیز نمونه‌ها از قالب خارج و در حوضچه‌های آب-آهک تا سن انجام آزمایش در شرایط استاندارد (دمای محیط ۳±۲۵ درجه سلسیوس) عمل‌آوری شدند. در شکل ۲ نحوه شکل گیری ناحیه انتقال در بتن بازیافتی نشان داده شده است.

[8] Polycarboxylic ether
[9] Interfacial transition zone

www.SID.ir

Archive of SID

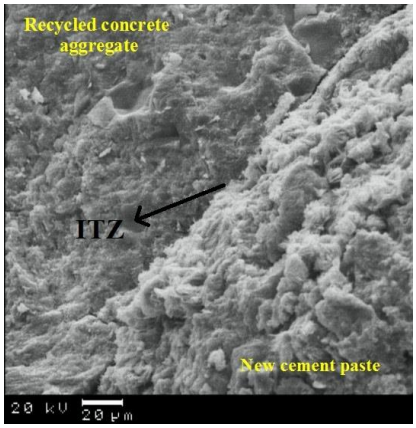
جدول ۴- مشخصات طرح اختلاط بتن‌های بازیافتی

عنوان طرح	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	WC	ماسه طبیعی (kg/m^3)	شن طبیعی (kg/m^3)	RCA-1 (kg/m^3)	RCA-2 (kg/m^3)	RCA-3 (kg/m^3)	فوق روان کننده (gr/m^3)	روانی بتن (cm)
NC	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۸۰۰	–	–	–	۹۵۰	۸
RCAC1-30	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۵۶۰	۲۴۰	–	–	۱۲۵۰	۷/۵
RCAC1-50	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۴۰۰	۴۰۰	–	–	۱۱۸۰	۸
RCAC2-30	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۵۶۰	–	۲۴۰	–	۱۲۴۰	۸/۵
RCAC2-50	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۴۰۰	–	۴۰۰	–	۱۲۰۰	۷/۵
RCAC2-100	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۰	–	۸۰۰	–	۱۲۳۰	۸
RCAC3-50	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۵۶۰	–	–	۲۴۰	۱۲۶۰	۸/۵
RCAC3-30	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	۴۰۰	–	–	۴۰۰	۱۱۹۰	۷

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

۲-۳-۱- آزمایشهای سنگدانه

برای تعیین مشخصه‌های فیزیکی سنگدانه‌ها، آزمایش‌های تعیین چگالی و درصد جذب آب انتخاب و مورد استفاده قرار گرفتند. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM C 127 [۲۲] برروی سه نمونه از هر نوع سنگدانه انجام شد و مقدار میانگین به عنوان نتیجه آزمایش ارائه گردید. به‌منظور تعیین مشخصه‌های مکانیکی سایش، خردشدگی و مقاومت ضربه‌ای سنگدانه‌ها، آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس نیز انتخاب شد. آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس مطابق با دستورالمعل استاندارد ASTM C 131 [۲۳] برروی دو نمونه سنگدانه ۹/۵ -۱۹ mm اجرا شد. در آخر نیز به منظورتعیین رفتار دوامی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی بتنی، آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان درنظر گرفته شد. این آزمایش با استفاده از روش مندرج در استاندارد CSA A23.2-24A [۲۴] برروی ۳ نمونه ۴/۷۵-۲۵ میلی‌متری انجام شد.



شکل ۲- آنالیز SEM ناحیه انتقال بین شن بازیافتی بتنی و ملات جدید با ۵۰۰ برابر بزرگنمایی

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳-۲- آزمایش‌های بتن

برای ارزیابی عملکرد نمونه‌های بتنی آزمایش‌های مختلفی برروی بتن سخت‌شده انجام شد. آزمایش تعیین درصد جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C 642 [۲۵] برروی سه نمونه مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ cm در سن ۵۶ روزه انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN BS 12390-3 [۲۶] برروی ۳ نمونه مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ cm در سن‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. اما در خصوص تعیین دوام در برابر پوسته‌شدگی نیزاستاندارد ASTM C 672 [۲۷] مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد سطح نمونه‌های استفاده شده در این استاندارد ۱۵*۳۰ cm (حداقل مساحت سطح در این آزمایش ۰/۰۴۵ m^2 است) با ارتفاع ۱۰ cm انتخاب شد. ارزیابی نتایج این آزمایش به دو صورت کیفی و کمی صورت پذیرفت. ارزیابی کیفی سطح بتن در معرض ذوب و یخبندان با نسبت دادن یک عدد بین ۰ تا ۵ انجام شد. در این ارزیابی چشمی، مقیاس ۰ به سطح فاقد پوسته‌شدگی (بهترین عملکرد دوامی) و مقیاس ۵ به سطح کاملاً پوسته‌شده (ضعیف‌ترین عملکرد دوامی) اطلاق می‌گردد. همچنین به‌منظور قیاس کمی بین نتایج در کنار قیاس کیفی، از یک روش کمی نیز استفاده شد، بدین صورت که بعداز اتمام هر ۵ چرخه، کل ذرات پوسته‌شده سطح از طریق شستشو جمع‌آوری و سپس در گرم‌خانه خشک شدند. سپس با تقسیم وزن این مواد جداشده بر مساحت کل سطح افقی، معیار کمی بر حسب kg/m^2 محاسبه گردید. .

۳- بررسی و تحلیل نتایج

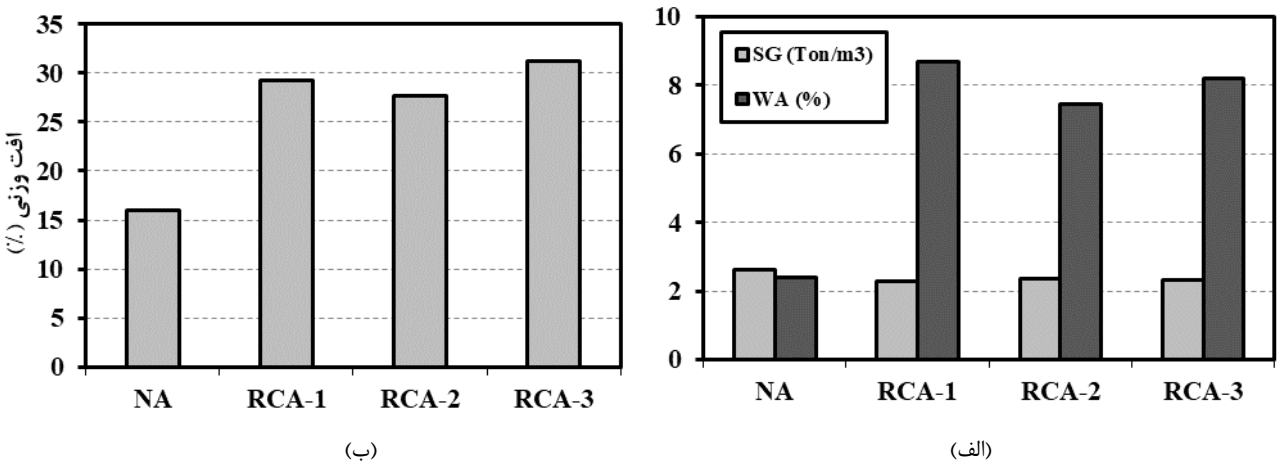
۱-۳- نتایج آزمایش‌های سنگدانه

میانگین نتایج آزمایش‌های چگالی و جذب آب سنگدانه‌های آزمون در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. در این شکل SG چگالی و WA درصد جذب آب است. همانگونه که مشاهده می‌شود، شن‌های بازیافتی به‌مراتب دارای درصد جذب آب بیشتر و چگالی کمتری نسبت به شن‌های طبیعی هستند. به‌طور متوسط شن‌های بازیافتی ۳/۳۸ برابر جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. در این بین سنگدانه بازیافتی RCA-1 با درصد جذب آب ٪۸/۷۰ دارای بیشترین درصد جذب آب است. یکی از دلایل جذب آب بیشتر شن RCA-1 نسبت به سایر شن‌های بازیافتی را می‌توان درصد بیشتر ملات چسبیده به سطح سنگدانه‌های بازیافتی عنوان نمود. از سوی دیگر شن‌های طبیعی به‌طور میانگین حدوداً ٪۱۳ چگالی بیشتری نسبت به شن‌های بازیافتی دارند. علت اصلی درصد جذب آب بیشتر و چگالی کمتر شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی را می‌توان تخلخل بیشتر و چگالی کمتر ملات سیمانی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی عنوان کرد. ملات سیمانی به شدت ظرفیت جذب آب در سنگدانه‌های بازیافتی را افزایش می‌دهد.

میانگین نتایج آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود شن‌های بازیافتی به مراتب درصد افت وزنی بیشتر نسبت به شن طبیعی دارند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شن‌های طبیعی مجموعاً ٪۱۳/۵ افت وزنی بیشتری نسبت به شن طبیعی دارند. این موضوع نشان‌دهنده کیفیت به مراتب کمتر شن‌های بازیافتی نسبت به شن طبیعی است که دلیل اصلی آن وجود ذرات سست در سطح سنگدانه‌های بازیافتی، وجود پیوندهای ضعیف بین ملات سیمانی و سنگدانه‌های طبیعی اولیه و همچنین مقاومت مکانیکی کمتر ملات سیمانی نسبت به سنگدانه طبیعی اولیه است. در بین شن‌های بازیافتی نیز شن RCA-3 ضعیف‌ترین عملکرد را در این آزمایش داشت.

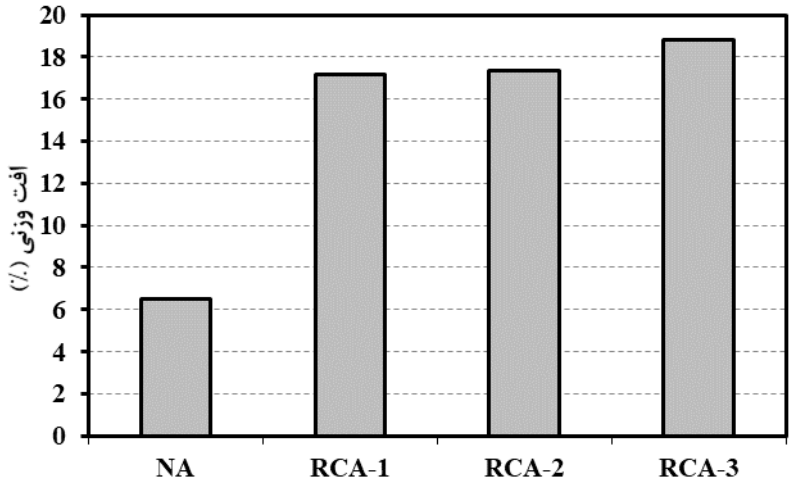
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- میانگین نتایج آزمایشات الف) چگالی و جذب آب و ب) سایش لوس آنجلس سنگدانه‌های مصرفی

نتایج حاصل از انجام آزمایش استاندارد CSA A23.2-24A در شکل ۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور متوسط سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ۱۱/۲۷٪ افت وزنی بیشتری نسبت به شن طبیعی دارند. استاندارد **A23.1-09/A23.2-09** [۲۸] حداکثر افت وزنی در آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان را برای سنگدانه‌های مصرفی در بتن، هنگامی که بتن در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دارد را به ۶٪ و برای سایر شرایط محیطی خورنده دیگر به ۱۰٪ محدود می‌کند. با مقایسه نتایج و الزامات این استاندارد می‌توان دریافت که هیچ‌یک از سنگدانه‌های بازیافتی حدود مجاز ۶ و ۱۰٪ را رعایت نکرده و در نتیجه مطابق با این استاندارد اجازه استفاده در بتن در معرض شرایط محیطی خورنده و نامطلوب را ندارند. همچنین شن طبیعی نیز به دلیل افت وزنی بیش از ۶٪ امکان استفاده در بتن با شرایط یخبندان را ندارد. اگرچه باید قید نمود که این استاندارد بسیار سخت‌گیرانه عمل می‌کند. به منظور تحقیق این موضوع در قسمت تحلیل نتایج نمونه‌های بتنی در برابر پوسته شدگی، ارتباط بین نتایج این آزمایش و آزمایش دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی بررسی خواهد شد.



شکل ۴- میانگین نتایج آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان سنگدانه‌های مصرفی

۲-۳- نتایج آزمایش‌های بتن

میانگین نتایج حاصل از انجام آزمایش جذب آب نمونه‌های بتنی در جدول ۵ و شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش نسبت جایگزینی، درصد جذب آب طرح‌های بتنی افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان به درصد جذب

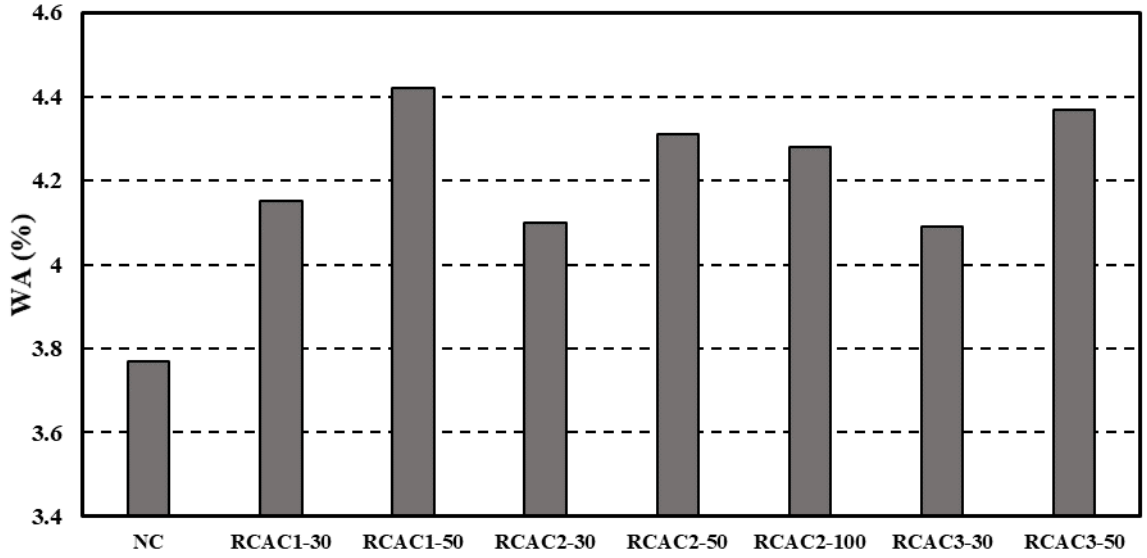
www.SID.ir

Archive of SID

آب بالاتر شن‌های بازیافتی در مقایسه با شن طبیعی نسبت داد. لازم به ذکر است که تحلیل‌های آماری نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین درصد جذب آب طرح‌های RCAC2-50 و RCAC2-100 وجود ندارد. در بین تمامی طرح‌های اختلاط، طرح‌های دارای شن RCA-1 (که دارای بیشترین درصد جذب بین شن‌های بازیافتی است) بیشترین مقدار درصد جذب آب را بین سایر طرح‌ها با نسبت جایگزینی مشابه دارند.

جدول ۵- نتایج آزمایشات انجام شده برروی نمونه‌های بتنی

عنوان طرح	مقدار جذب آب (٪)	مقاومت فشاری (MPa)		نسبت مقاومت فشاری به طرح شاهد (MPa)		فاکتور پوسته شدگی سطح نمونه های بتنی (Kg/m^2)	مقدار پوسته شدگی سطح نمونه های بتنی (از مقیاس ۰ تا ۵)
		۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه		
NC	۳/۷۷	۳۳/۳	۴۰/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱/۴۶	۲
RCAC1-30	۴/۱۵	۲۷/۲	۳۵/۷	۸۲	۸۹	۲/۱۲	۲
RCAC1-50	۴/۴۲	۲۶/۴	۳۳/۹	۷۹	۸۵	۳/۹۶	۳
RCAC2-30	۴/۱۰	۲۸/۷	۳۵/۱	۸۶	۸۸	۱/۱۷	۱
RCAC2-50	۴/۳۱	۲۷/۱	۳۲/۵	۸۱	۸۱	۳/۲۱	۳
RCAC2-100	۴/۲۸	۲۲/۸	۲۹/۹	۶۸	۷۴	۲/۶۷	۲
RCAC3-30	۴/۰۹	۲۵/۷	۳۲/۳	۷۷	۸۱	۲/۶۰	۲
RCAC3-50	۴/۳۷	۲۵/۲	۳۰/۲	۷۶	۷۵	۳/۴۷	۳



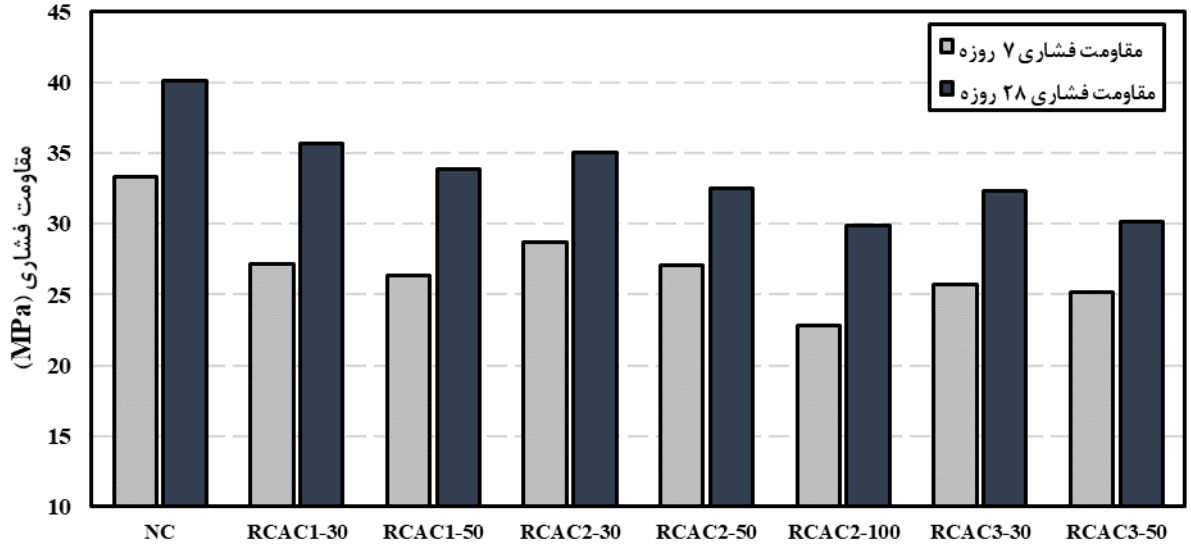
شکل ۵- میانگین نتایج آزمایش درصد جذب آب طرح‌های بتنی

در جدول ۵ و شکل ۶ نیز میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه قابل مشاهده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت جایگزینی، مقادیر مقاومت فشاری در هر دو سن آزمون کاهش می‌یابد. در نسبت‌های جایگزینی ۳۰ و ۵۰٪ ، طرح‌های دارای RCA-3 (که کمترین کیفیت را در بین سایر شن‌های بازیافتی دارد) دارای کمترین مقدار مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به طرح‌های مشابه با نسبت جایگزینی یکسان بودند. به طوری که طرح RCAC3-50، ۲۵٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری نسبت

www.SID.ir

Archive of SID

به طرح شاهد دارد. همچنین با مقایسه طرح‌های دارای شن RCA-2، ملاحظه می‌شود کـه طـرح RCAC2-100 بـه ترتیـب ۲۶، ۱۹ و ۱۲٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری نسبت به طرح‌های NC، RCAC2-30 و RCAC2-50 دارد.

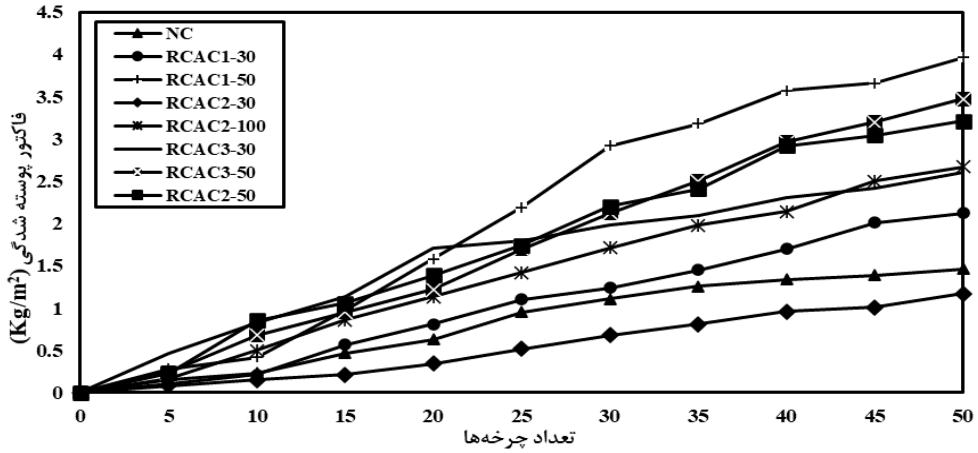


شکل ۶- نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سن‌های ۷ و ۲۸ روزه (MPa)

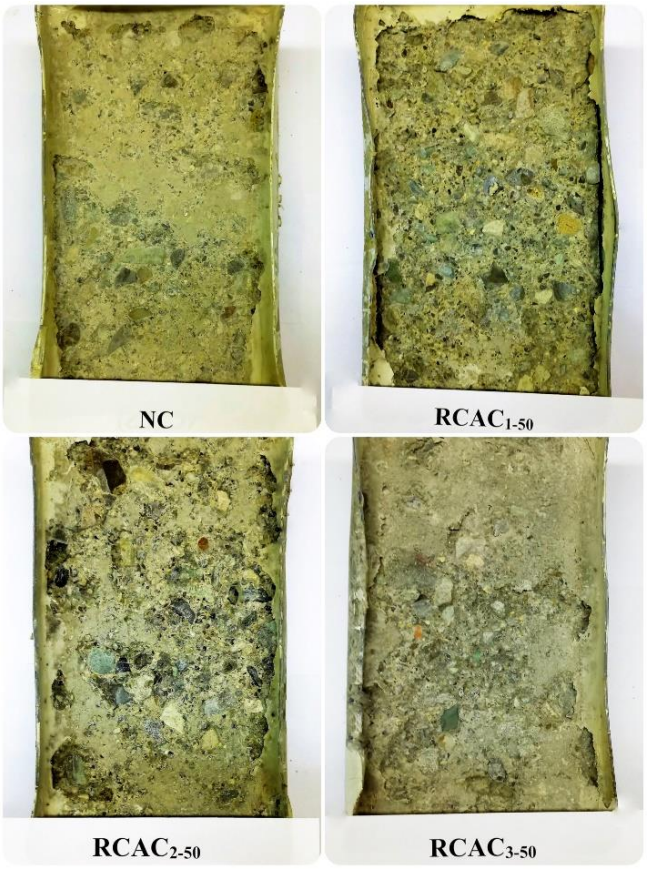
میانگین نتایج آزمایش ارزیابی دوام سطوح افقی نمونه‌های بتنی در برابر پوسته‌شدگی نیز در جدول ۵ و شکل ۷ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مجموعاً با افزایش نسبت جایگزینی، فاکتور پوسته‌شدگی (هم به صورت کیفی و هم به صورت کمی) افـزایش می‌یابد (به استثنای طرح RCAC2-30 نسبت به طرح شاهد و طرح RCAC2-100 نسبت بـه طـرح RCAC2-50)، بـه‌طـوری کـه در طـرح RCAC1-50، فاکتور پوسته‌شدگی سطح حدوداً ۲/۷۱ برابر بزرگتر از طرح NC و ۱/۸۷ برابر بزرگتر از طرح RCAC1-30 بود. از سوی دیگـر با مقایسه مقادیر کیفی و کمی پوسته‌شدگی طرح‌های بتنی، ملاحظه می‌گردد که طرح RCAC2-30 دارای بهترین عملکـرد دوامـی و طـرح RCAC3-50 دارای ضعیف‌ترین عملکرد دوامی بودند. اگرچه باید اشاره کرد که همه طـرح‌هـای مـذکور بعـداز ۵۰ چرخـه ذوب و یخبنـدان دارای عملکرد مطلوبی بودند و کماکان قابلیت سرویس پذیری داشتند (به غیر از طرح RCAC1-50). در خصوص تـأثیر بـتن مـادر بـر روی عملکرد دوامی شن‌های بازیافتی مصرفی در بتن نیز باید عنوان نمود که نتایج این تحقیق نشان داد کـه بـتن‌هـای بازیـافتی چنـدان از ایـن موضوع تأثیر نمی‌پذیرند. اگرچه شن بازیافتی RCA-3 دارای کمترین کیفیت بین سایر شن‌های بازیافتی بودند، امـا طـرح RCAC1-50 کـه دارای شن RCA-1 بود، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین سایر طرح‌های بتنی داشت. از سوی دیگر با مقایسه نتایج مـأخوذه و نتـایج آزمـایش دوام سنگدانه در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، مشاهده می‌شود علی‌رغم اینکه مطابق بـا اسـتاندارد **A23.1-09/A23.2-09** هـیچ یـک از شن‌های مصرفی (طبیعی و بازیافتی) امکان استفاده در بتن با شرایط یخبندان را نداشتند، اما نتایج آزمایش دوام بتن در برابر پوسته‌شـدگی نشان داد که این سنگدانه‌ها با تخمین بسیار خوبی قابلیت کاربرد را در شرایط تهاجمی از جملـه چرخـه‌هـای ذوب و یخبنـدان دارنـد. لـذا باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق پیشنهاد می‌گردد به‌منظور بررسی عملکـرد سـنگدانه‌هـای مصـرفی در بـتن در شـرایط ذوب و یخبندان‌های متوالی، ابتدائا نمونه‌های بتنی ساخته شده و در معرض آزمایش‌های دوام در برابر پوسته‌شدگی یـا ذوب و یخبنـدان قـرار داده شوند؛ سپس بعداز اخذ نتایج، آزمایشات دوام سنگدانه در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان انجام گردد. به‌نظر می‌رسد با انجـام ایـن فرآینـد، عملکرد دوامی سنگدانه‌های مصرفی در بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان با دقت بیشتری وارسی گردد. در شکل ۸ سطح نمونـه‌هـای بتنی بعداز ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- فاکتور پوسته شدگی نمونه های بتنی در طول ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان (Kg/m^2)



شکل ۸- سطح پوسته شده نمونه‌های بتنی بعداز ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان

۴- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر بتن مادر بر روی عملکرد مکانیکی و دوامی شن‌های بازیافتی مصرفی در بتن تحقیق و بررسی شد. نتایج زیر از این تحقیق مستخرج گردید:

www.SID.ir

Archive of SID

- سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه طبیعی از درصد جذب آب بیشتری برخوردار بودند، به طوری که شن‌های بازیافتی ۳/۳۸ برابر جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی داشتند.
- در خصوص آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس نیز شن‌های بازیافتی به مراتب درصد افت وزنی بسیار بیشتری نسبت به شن طبیعی داشتند. مقایسه نتایج نشان داد که شن‌های طبیعی مجموعاً ۱۳/۵٪ افت وزنی بیشتری نسبت به شن طبیعی دارند.
- در خصوص آزمایش دوام سنگدانه در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان نیز شن‌های بازیافتی به مراتب درصد افت وزنی بسیار بیشتری نسبت به شن طبیعی داشتند. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ۱۱/۲۷٪ افت وزنی بیشتری نسبت به شن طبیعی دارند. همه این موارد نشان از کیفیت کمتر شن‌های بازیافتی نسبت به شن طبیعی دارد.
- با مقایسه نتایج آزمایشات جذب آب، سایش در دستگاه لوس انجلس و دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان سنگدانه‌های بازیافتی بتنی، مشخص گردید که نوع بتن اولیه برروی کیفیت عملکردی سنگدانه‌های بازیافتی در آزمون‌های مذکور تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.
- با افزایش نسبت جایگزینی شن طبیعی با هریک از شن‌های بازیافتی بتنی، رفتار طرح‌های بتنی در آزمایش‌های جذب آب، مقاومت فشاری و دوام در برابر پوسته‌شدگی تغییر می‌کند. با افزایش این نسبت، درصد جذب آب طرح‌های بتنی افزایش می‌یابد. این پارامتر به عنوان یک فاکتور دوامی، برروی عملکرد دوامی طرح‌های بتن بازیافتی تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین مقاومت فشاری در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه برای طرح‌های بتنی با افزایش نسبت جایگزینی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در طرح‌های دارای شن RCA-2، مشاهده شد که طرح RCAC2-100 به ترتیب ۲۶، ۱۹ و ۱۲٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری نسبت به طرح‌های NC، RCAC2-30 و RCAC2-50 دارد
- نتایج آزمایش ارزیابی دوام نمونه‌های بتنی در برابر پوسته‌شدگی نشان داد که با افزایش نسبت جایگزینی، دوام بتن کاهش و حجم تخریبات سطوح افقی بتن افزایش می‌یابد. به‌طوری که در طرح RCAC1-50، فاکتور پوسته‌شدگی سطح حدوداً ۲/۷۱ برابر بزرگتر از طرح NC و ۱/۸۷ برابر بزرگتر از طرح RCAC1-30 بود. یکی از دلایل این موضوع، دوام کمتر شن‌های بازیافتی بتنی نسبت به شن طبیعی است. اگرچه کماکان بتن‌های بازیافتی از عملکرد قابل قبولی در برابر پوسته‌شدگی برخوردار بودند.
- در خصوص تأثیر بتن اولیه بر روی رفتار مهندسی طرح‌های بتنی ساخته شده با شن‌های بازیافتی نیز باید عنوان نمود که نوع بتن مادر تأثیر چندانی برروی رفتار مکانیکی و دوامی طرح‌های بتنی در این پژوهش نداشت.

مراجع

[1] Fisher C, Werge M (2009) EU as a recycling society. ETC/SCP working paper 2/2009, p 25, http://scp.eionet.europa.eu.int Accessed on May 2017.

[2] De Brito, J., & Saikia, N. (2012). Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. Springer Science & Business Media.

[3] Donalson, J., Curtis, R., & Najafi, F. T. (2011). Sustainable assessment of recycled concrete aggregate (RCA) used in highway construction. In *Proceedings of the 90th annual meeting of the transportation research board*.

[4] Otoko, G. R (2014). Review Of The Use Of Construction And Demolition Waste In Concrete. International Journal of Engineering and Technology Research Vol. 2, No. 4, pp. 1 – 8, ISSN: 2327 – 0349 (Online) Available online at www.ijeatr.org.

[5] Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, *2*(5), 1204-1225.

[6] Aghili lotf, M (2017). Evaluation of the mechanical and durability properties of recycled concrete aggregates and its use in concrete mixes. Master thesis, university of Tehran, Iran.

[7] BS 8500-1. (2015) Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206. Method of specifying and guidance for the specifier. https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocID=310373.

www.SID.ir

Archive of SID

[8] Gonzalez-Fonteboa B, Martinez-Abella F (2008) Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume: materials and mechanical properties. Build Environ 43(4):429–437.

[9] McGinnis, M. J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *154*, 258-269.

[10] Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., & Guo, J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *144*, 432-441.

[11] Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A., & Motamedi, M. (2017). Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates. *Construction and Building Materials*, *144*, 392-398.

[12] Sadati, S., & Khayat, K. H. (2016). Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, *126*, 691-700.

[13] Surya, M., VVL, K. R., & Lakshmy, P. (2013). Recycled aggregate concrete for transportation infrastructure. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *104*, 1158-1167.

[14] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S. and Degeimbre, R., (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, *23*(11), pp.3382-3387.

[15] Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Construction and Building Materials, 23(2), 1163-1167.

[16] DIN 4226-100, (2002). Aggregates for mortar and concrete. Part 100: Recycled aggregates.

[17] ASTM C 192. "*Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*". *West Conshohocken (PA): ASTM International* (2010).

[18] Ferreira, L. de Brito, J. and Barra, M. "Influence of pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on structural concretes mechanical and durability properties". Mag Concr Res 63(8):617–627 (2011).

[19] Casuccio, M. Torrijos, M. C. Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure mechanism of recycled aggregate concrete". *Constr Build Mater*, *22*(7), 1500-1506 (2008).

[20] Etxeberria, M. Vázquez, E. Marí, A. and Barra, M. "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". *Cement concrete Res*, *37*(5), 735-742 (2007).

[21] Poon, C. S. Shui, Z. H. and Lam, L. "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates". *Constr Build Mater*, *18*(6), 461-468 (2004).

[22] ASTM C 127. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual book of ASTM standards*.

[23] ASTM C 131/C 131 M. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

[24] CSA A23.2-24A. (2004). Test Method for the Resistance of Unconfined Coarse Aggregate to Freezing and Thawing. Canadian Standards Association.

[25] ASTM C 642. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete". Annual book of ASTM standards, 4 (2012).

[26] EN BS 12390-3. "Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens". *British Standard Institution, London* (2009).

[27] ASTM C 672. "*Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*". *Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia* (2014).

[28] **A23.1-09/A23.2-09. (2014). Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete.**

www.SID.ir