Archive of SID

Journal of Structural and Construction Engineering, 8(1), 2021, pp. 82-96

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Evaluation of silica-fume effect on the mechanical properties of concrete with fine recycled aggregates

Seyed Fathollah Sajedi[1*], Reza Afshar[2]

1- Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Today, it is quite clear that the speed of development of infrastructure in developing countries has led to much damage to the environment. Concrete is one of the products that plays an important role in the use of non-renewable resources. Today, the vision of sustainable development in the manufacturing industry is growing and increasing, and concrete is at the forefront of this as one of the most widely used construction products. The present study investigates the effect of the use of silica-fume (SF) pozzolan powder on the mechanical properties of recycled concrete made from fine recycled aggregates. Recycled concretes consists of different levels of replacement of fine recycled concrete with natural fines. In order to improve the quality of recycled concrete, Pozzolan was introduced at various levels with cement. To determine and compare the mechanical properties of concrete, 12 mixing designs were made and compressive strength tests at 7, 28 and 91 days, tensile strength, and ultrasound velocity at 28 days of age were performed. The results showed that, generally speaking, in the 28-day period, the use of SF can cause 25% recycled concretes to achieve a desirable 40 MPa strength. The use of 10% SF replacement rate, especially in concrete containing 25% recycled aggregates, made the mechanical properties of recyclable concretes significantly closer to conventional concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 November 2018
Revise Date: 26 February 2019
Accept Date: 02 March 2019

Keywords:
Recycled concrete
Mechanical properties
Silica-fume pozzolan powder
Fine recycled aggregates

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.155730.1705

*Corresponding author: Seyed Fathollah Sajedi
Email address: sajedi@iauahvaz.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

ارزیابی تاثیر میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن‌های با سنگدانه‌های ریز بازیافتی

سید فتح اله ساجدی[۱]، رضا افشار[۲]

۱- دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی تاثیر استفاده از پوزولان پودر میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی ساخته شده از سنگدانه‌های ریز بازیافتی بتنی پرداخته است. بتن‌های بازیافتی، متشکل از سطوح مختلف جایگزینی ریزدانه‌های بازیافتی بتنی همراه با ریزدانه‌های طبیعی هستند. جهت بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی، پوزولان معرفی شده در سطوح مختلفی با سیمان جایگزین شد. جهت تعیین و مقایسه خواص مکانیکی بتن‌ها، ۱۲ طرح اختلاط ساخته شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، مقاومت کششی دونیم شدن و سرعت امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه انجام شدند. نتایج نشان دادند که به طور کلی در بازه ۲۸ روزه، استفاده از میکروسیلیس می‌تواند باعث شود تا بتن‌های ٪۲۵ بازیافتی به مقاومت مطلوب ۴۰ مگاپاسکالی دست یابند. استفاده از سطح جایگزینی ۱۰ درصدی میکروسیلیس به ویژه در بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی باعث گردید تا خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی به میزان چشم‌گیری به بتن‌های معمولی نزدیک گردد

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، خواص مکانیکی، پوزولان، میکروسیلیس، سنگدانه‌های ریز بازیافتی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2019.155730.1705	doi:
۱۳۹۷/۰۸/۱۹	۱۳۹۷/۱۲/۰۷	۱۳۹۷/۱۲/۱۱	۱۳۹۷/۱۲/۱۱	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.155730.1705	

*نویسنده مسئول: سید فتح اله ساجدی

پست الکترونیکی: sajedi@iauahvaz.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

امروزه بر کسی پوشیده نیست که سرعت توسعه زیرساخت‌های عمرانی در کشورهای در حال توسعه منجر به وارد آمدن آسیب-های فراوانی به محیط زیست شده است. بتن یکی از محصولاتی است که نقش زیادی در مصرف منابع تجدیدناپذیر دارد. امروزه نگاه مبتنی بر توسعه پایدار در صنعت ساخت در حال رشد و فزونی است و بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین محصولات ساختمانی در صدر این نگاه قرار گرفته است. سرانه تولید نخاله‌های ساختمان در کشورهای توسعه یافته‌ای مانند اعضای اتحادیه اروپا نزدیک به ۲ تن در سال رسیده است [۱]، لذا بسیاری از این کشورها یکی از مبانی حرکت در مسیر توسعه پایدار را در استفاده مجدد از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی تعریف کرده‌اند. گرچه برخی از آیین‌نامه‌ها در به‌کارگیری از سنگدانه‌های بازیافتی به‌ویژه در مصارف سازه‌ای به‌دلیل ناشناخته بودن برخی رفتارهای درازمدت آن‌ها، جانب احتیاط را برگزیده‌اند [۲،۳] و یا برخی آیین‌نامه‌ها مانند استانداردهای انگلستان و آلمان مصرف آن‌ها را محدود نموده‌اند [۴،۵] ولی هم‌چنان جوامع مهندسی در تلاشند تا زمینه‌های استفاده از این بتن‌ها را برای مصارف عمومی مهیا سازند.

یکی از اساسی‌ترین مشکلات این دسته از بتن‌ها کاهش چشم‌گیر خواص مکانیکی آن‌ها در جایگزینی‌های بالاتر از ٪۳۰ می‌باشد [۶،۷] در حالی که برخی از محققان توانسته‌اند با استفاده از مواد افزودنی مانند میکروسیلیس [۸]، خاکستر بادی [۹] و زئولیت طبیعی [۱۰]، در جایگزینی‌های بالاتر از ٪۳۰ به بتن بازیافتی با خواص مکانیکی مطلوب نیز دست یابند. اگرچه مطالعات متعددی در زمینه استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی صورت گرفته است [۱۱،۱۲] ولی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در قالب ریزدانه بسیار محدود می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین دلایل این امر افزایش میزان آبخواهی بتن با کاهش اندازه سنگدانه بازیافتی می‌باشد [۱۳].

این تحقیق در راستای شناسایی بیش‌تر بتن‌های بازیافتی ساخته شده با ریزدانه‌های بازیافتی بتنی انجام گردیده و طی آن ریزدانه‌های بازیافت شده بتنی در سطوح مختلفی با ماسه طبیعی جایگزین شده‌اند. جهت بهبود سطح کیفی بتن‌های بازیافتی از میکروسیلیس در سطوح ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ استفاده گردید. برای تعیین خواص مکانیکی هر یک از بتن‌ها، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ ، ۲۸ و ۹۱ روزه، مقاومت کششی دونیم‌شدن و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه انجام و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۴ سطح جایگزینی سنگدانه‌های ریز بازیافتی شامل ٪۰، ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ نسبت به وزن سنگدانه‌های ریز طبیعی مورد استفاده قرارگرفته است. پوزولان جایگزین شده با سیمان شامل پودر میکروسیلیس در سه سطح ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ نسبت به وزن سیمان مصرفی می‌باشد. طرح اختلاط مورد استفاده مطابق مبانی طرح مخلوط ملی بتن ایران و براساس مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به مقدار ۴۰ مگاپاسکال ارائه گردید. پس از ساخت، تمامی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاه قرار داده شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت اقدام به باز نمودن قالب‌ها شده و تا سررسیدهای تعیین شده، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 [۱۴] در حوضچه آب با دمای ۲ ˚C ±۲۱ عمل‌آوری شدند. برای تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، در مجموع ۱۰۸ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر و برای تعیین مقاومت کششی دونیم‌شدن در مجموع از ۳۶ نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری استفاده گردید. قبل از شکستن نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه، ابتدا از هر طرح اختلاط ۳ نمونه جهت تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت نیز به‌کار گرفته شدند.

۳- مواد و مصالح

مواد سیمانی

مواد سیمانی استفاده شده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند نوع ۲ و پودر میکروسیلیس می‌باشند. ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی در جدول ۱ ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی استفاده شده در تحقیق (٪)

ترکیبات	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
سیمان	۲۱/۲۸	۳/۷	۶/۱	۶۴/۳۴	۲/۱	۲/۱۳	۲/۲
میکروسیلیس	۹۴/۷۳	۰/۸۷	۱/۲۳	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۱	-

سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های به‌کار رفته شامل ریزدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و درشت‌دانه طبیعی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر می‌باشند. جهت بررسی تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از ریزدانه بازیافتی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شده است. سنگدانه‌های بازیافتی شامل ترکیب قطعات شمع‌های بتنی و ساختمان‌های بتنی تخریب شده در سطح شهر اهواز می‌باشند. تصویر ۱ نشان دهنده بخشی از دپوی مصالح بازیافتی استفاده شده در تحقیق و فرآیند جداسازی و دانه‌بندی آن‌ها می‌باشد.

تصویر ۱: دپوی سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شده در تحقیق و جداسازی آن‌ها

آب و مواد افزودنی

آب مصرفی در تحقیق، آب شرب اهواز بوده و جهت دست‌یابی به کارایی مطلوب از فوق‌روان‌کننده پایه پلی‌کربکسیلات با چگالی ۱/۱±۰/۰۲ g/cm^3 استفاده شده است. درصد بهینه کاربرد فوق‌روان‌کننده مربوطه، معادل ٪۱ وزنی مصالح سیمانی بوده است.

۴- طرح‌های اختلاط

در این مطالعه دو دسته از بتن‌های معمولی و بازیافتی به ترتیب تحت عناوین اختصاری CC و RC مورد استفاده قرارگرفته است. بتن‌های معمولی از سنگدانه‌های ریز و درشت کاملا طبیعی ساخته شدند، در حالی که در بتن‌های بازیافتی سنگدانه‌های ریز بازیافتی در سطوح ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ با ریزدانه‌های طبیعی جایگزین گردیدند. جهت بهبود کیفیت بتن‌های ساخته شده، از پودر میکروسیلیس (SF) استفاده شد. تمام بتن‌های حاوی میکروسیلیس در سه سطح جایگزینی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ وزنی سیمان ساخته شدند. در تمام طرح‌های اختلاط ارائه شده نسبت آب به سیمان معادل ۰/۳۶ و مجموع مواد سیمانی مصرفی معادل ۴۲۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده است. فرآیند اختلاط مصالح در مخلوط‌کن آزمایشگاهی ۱۵۰ لیتری و براساس فرآیند اختلاط سه مرحله‌ای ارائه شده توسط ساجدی و جلیلی‌فر [۱۰] انجام شده که قرابت زیادی با فرآیند دو مرحله‌ای تعریف شده توسط تام و همکاران [۱۵] دارد. جزئیات کامل طرح‌های اختلاط تحقیق در جدول ۲ و برخی از نمونه‌های ساخته شده و شرایط عمل‌آوری آن‌ها در تصویر ۲ ارائه شده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID

تصویر ۲: برخی از نمونه‌های ساخته شده و شرایط عمل‌آوری و نگه‌داری آن‌ها

جدول ۲: جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در تحقیق

طرح مخلوط	مواد سیمانی (kg)	سیمان (kg)	پوزولان (kg)	آب (lit)	فوق روان کننده (lit)	شن (kg)	ماسه طبیعی (kg)	ماسه بازیافتی (kg)
CC		۴۲۰	۰				۸۸۸	۰
RC25		۴۲۰	۰				۶۶۶	۲۲۲
RC50		۴۲۰	۰				۴۴۴	۴۴۴
RC100		۴۲۰	۰				۰	۸۸۸
CC-SF5		۳۹۹	۲۱				۸۸۸	۰
RC25-SF5		۳۹۹	۲۱				۶۶۶	۲۲۲
RC50-SF5		۳۹۹	۲۱				۴۴۴	۴۴۴
RC100-SF5		۳۹۹	۲۱				۰	۸۸۸
CC-SF10		۳۷۸	۴۲				۸۸۸	۰
RC25-SF10		۳۷۸	۴۲				۶۶۶	۲۲۲
RC50-SF10	۴۲۰	۳۷۸	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۸۱۵	۴۴۴	۴۴۴
RC100-SF10		۳۷۸	۴۲				۰	۸۸۸
CC-SF15		۳۵۷	۶۳				۸۸۸	۰
RC25-SF15		۳۵۷	۶۳				۶۶۶	۲۲۲
RC50-SF15		۳۵۷	۶۳				۴۴۴	۴۴۴
RC100-SF15		۳۵۷	۶۳				۰	۸۸۸

۵- نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- مقاومت فشاری بتن دارای ۲۵% ریزدانه بازیافتی

تصویر ۳ نشان می‌دهد که آزمایش لازم جهت تعیین مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده براساس استاندارد ASTM C109 [۱۶] انجام شده است. هر مقدار مقاومت بیانگر متوسط مقاومت ۳ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری می‌باشد. جدول ۳ و نمودار ۱ نشان‌دهنده

www.SID.ir

Archive of SID

مقاومت‌های فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه بتن معمولی و بتن ٪۲۵ بازیافتی می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود جایگزینی ٪۲۵ از ریزدانه بازیافتی باعث شده تا در بازه ۷ روزه، مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی تا ٪۵ کاهش بیابد؛ در حالی که پس از ۲۸ روز مقاومت بتن ٪۲۵ بازیافتی بدون میکروسیلیس به ۳۴/۶ مگاپاسکال و پس از ۹۱ روز به ۳۶/۵ مگاپاسکال رسیده است که در مقایسه با بتن معمولی و در همین بازه‌های زمانی به ترتیب با ٪۲۲ و ٪۳۰ کاهش روبرو شده‌اند. در همین سطح جایگزینی و در صورت استفاده از ٪۵ میکروسیلیس مقاومت‌های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب ۳۳/۱، ۳۵ و ۳۸/۵ مگاپاسکال شده‌اند که این مساله نشان می‌دهد که استفاده از ٪۵ میکروسیلیس در بتن بازیافتی ساخته شده از ۲۵ درصد ریزدانه بازیافتی تاثیر چشم‌گیری در مقاومت فشاری نسبت به بتن بازیافتی بدون میکروسیلیس ندارد. دلیل این ادعا عدم تغییر مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روزه و افزایش ٪۵ در مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه نسبت به بتن مشابه بدون میکروسیلیس در همین مدت زمان می‌باشد. همان‌گونه که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود در میان بتن‌های بازیافتی نتایج کسب شده متعلق به بتن‌های دارای ٪۱۰ میکروسیلیس نسبت به سایر بتن‌ها از مقدار بیش‌تری برخوردار می‌باشند. به نحوی که در بازه ۷ روزه بتن ۲۵ درصد بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با تمام بتن‌های بازیافتی و حتی بتن معمولی از مقاومت فشاری بیش‌تری برخوردار شده است.

جدول ۳: خواص مکانیکی بتن‌های مرجع و بازیافتی استفاده شده در تحقیق

طرح مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			مقاومت کششی دونیم شدن (مگاپاسکال)	سرعت امواج فراصوت (کیلومتر بر ثانیه)
	۷روزه	۲۸روزه	۹۱روزه		
CC	۳۵/۱	۴۴/۲	۵۲/۲	۳/۹	۴/۴۵
RC25	۳۳/۴	۳۴/۶	۳۶/۵	۳/۱	۴/۳۰
RC50	۳۱/۹	۳۴/۵	۳۷/۸	۳/۱	۴/۴۱
RC100	۲۹/۵	۳۴/۲	۳۶/۰	۲/۹۶	۴/۲۸
CC-SF5	۳۷/۵	۵۰/۱	۵۲/۵	۴/۲	۴/۵۳
RC25-SF5	۳۳/۱	۳۵/۰	۳۸/۵	۳/۵	۴/۴
RC50-SF5	۳۳/۸	۳۶/۷	۳۹/۱	۳/۲	۴/۲۹
RC100-SF5	۲۸/۴	۳۷/۶	۴۱/۸	۳	۴/۳۲
CC-SF10	۴۴/۸	۵۷/۴	۶۰/۳	۴/۴	۴/۹۶
RC25-SF10	۳۷/۲	۴۳/۷	۴۶/۴	۲/۹۶	۴/۳۷
RC50-SF10	۳۳/۳	۴۰/۶	۴۳/۹	۳/۶۷	۴/۲۹
RC100-SF10	۳۳/۹	۳۷/۱	۳۸/۳	۳/۹۵	۴/۱۹
CC-SF15	۳۸/۲	۴۷/۲	۴۹/۶	۳/۴۴	۴/۴۸
RC25-SF15	۲۹/۳	۳۱/۰	۳۳/۱	۳/۳۹	۴/۳۵
RC50-SF15	۳۰/۲	۳۳/۰	۳۵/۸	۳/۲	۴/۵۷
RC100-SF15	۲۸/۳	۳۱/۰	۳۹/۲	۳/۷۴	۴/۳۵

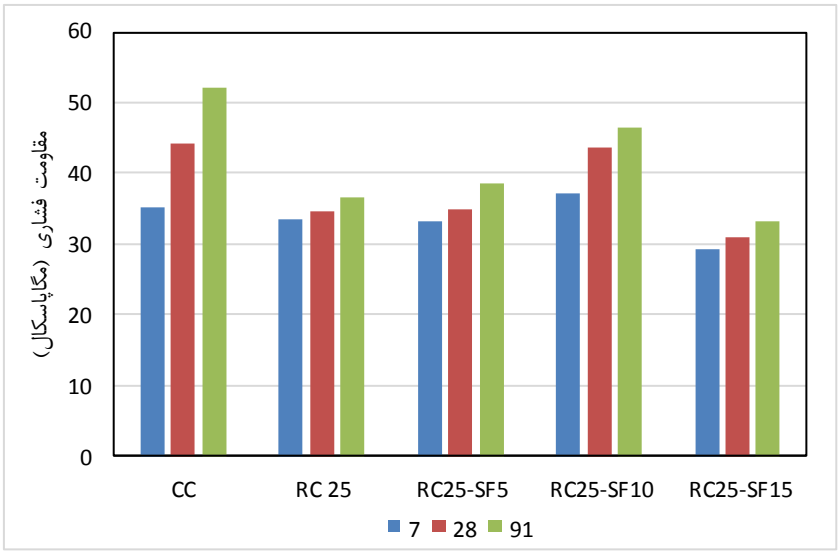
www.SID.ir

Archive of SID

تصویر ۳: نمایی از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن و تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت

در مقایسه با بتن معمولی، رشد ٪۶ در مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، اختلاف ۰/۵ مگاپاسکالی با مقاومت در سن ۲۸ روزه و افت ٪۱۱ مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه نشان می‌دهد که تاثیر مثبت و مناسب میکروسیلیس در بهبود مقاومت فشاری بتن بازیافتی در همان زمان آغازین هیدراتاسیون روی داده است و با گذشت زمان از تاثیر مطلوب این پوزولان کاسته شده است. همین بتن در بازه‌های زمانی ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه در مقایسه با بتن بازیافتی بدون پوزولان به ترتیب با ۱۱، ۲۶ و ۲۷ درصد رشد به مقاومت‌های ۳۷/۲، ۴۳/۷ و ۴۶/۴ مگاپاسکال رسیده است که این میزان از رشد نشانگر تاثیر مطلوب استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن بازیافتی در مقایسه با حالتی است که این بتن بدون میکروسیلیس ساخته شده است.

تاثیر کاهنده سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس در بتن ٪۲۵ بازیافتی جایی ملاحظه می‌شود که در این سطح از جایگزینی در بازه زمانی ۷ روزه، مقاومت فشاری در مقایسه با بتن معمولی ٪۱۷ و در مقایسه با بتن بازیافتی بدون میکروسیلیس، با ٪۵ و با ٪۱۰ میکروسیلیس به ترتیب ۱۲، ۱۱ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. این سطح از کاهش در سایر بازه‌های زمانی ۲۸ و ۹۱ روزه نیز برای این نوع بتن تکرار شده است؛ به نحوی که پس از گذشت ۹۱ روز، مقاومت فشاری این بتن فاصله محسوسی نسبت به مقاومت مطلوب طراحی از خود نشان داده است.



نمودار ۱: تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های دارای ٪۲۵ ریزدانه بازیافتی

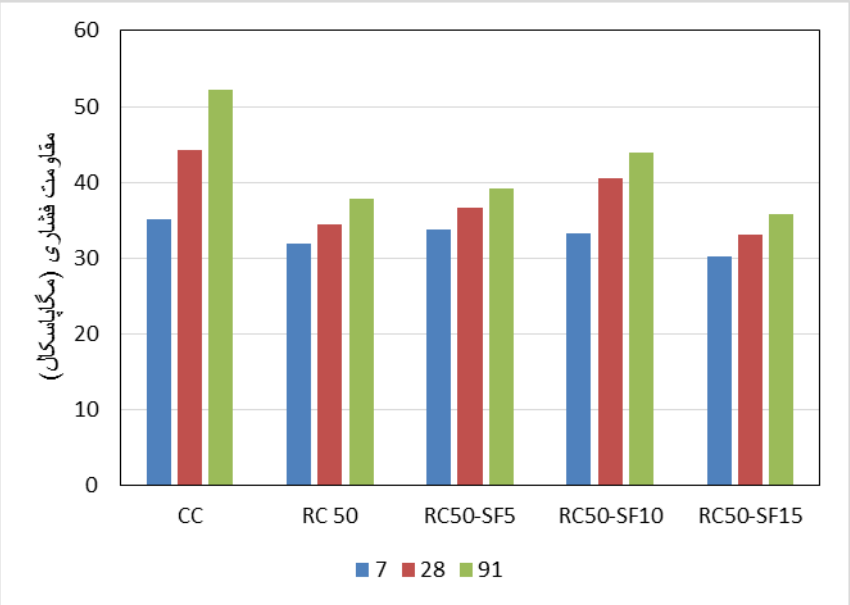
www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲- مقاومت فشاری بتن دارای ٪۵۰ ریزدانه بازیافتی

در جدول ۳ و نمودار ۲، مشخصات بتن‌های بازیافتی دارای ٪۵۰ جایگزینی ریزدانه بازیافتی ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بتن ٪۵۰ بازیافتی در بازه زمانی ۷ روزه در مقایسه با بتن معمولی با ٪۹ کاهش مقاومت روبرو شده است. این بتن در بازه زمانی ۲۸ روزه در مقایسه با بتن معمولی نیز ٪۲۲ و در بازه زمانی ۹۱ روزه ٪۲۸ افت مقاومت نشان داده است. همان‌طور که از نمودار نیز مشخص است، استفاده از ٪۵ میکروسیلیس در بتن ٪۵۰ بازیافتی منجر به رشد مقاومت در تمامی بازه‌های زمانی ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه در مقایسه با بتن ٪۵۰ بازیافتی بدون پوزولان شده است. استفاده از ٪۵ میکروسیلیس باعث شده تا مقاومت‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه در مقایسه با بتن ٪۵۰ بازیافتی بدون پوزولان به ترتیب با ۶، ۶ و ۳ درصد رشد مواجه شوند؛ این در حالی است که هم‌چنان مقاومت‌های کسب شده در مقایسه با مقاومت بتن معمولی افت محسوسی را نشان می‌دهند. مطابق نمودار ۲ بیش‌ترین میزان کسب مقاومت در بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی در میان بتن‌های دارای ٪۱۰ میکروسیلیس مشاهده می‌شود. استفاده از این میزان میکروسیلیس نشان می‌دهد که در مقایسه با بتن ٪۵۰ بازیافتی بدون پوزولان، مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب با ۴، ۱۸ و ۱۶ درصد رشد مواجه شده با این حال مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه کسب شده در این سطح مصرف میکروسیلیس از مقاومت بتن معمولی به ترتیب ۶، ۱۰ و ۲۲ درصد کمتر می‌باشند. لذا می‌توان دریافت که حتی استفاده از سطح بهینه مصرف میکروسیلیس نیز قادر نیست بتن های ٪۵۰ بازیافتی را به مقاومت بتن معمولی برساند. تاثیر مثبت میکروسیلیس را در کسب مقاومت اولیه زیاد در بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی می‌توان در جایی مشاهده کرد که پس از اختلاف ٪۶ در مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه با ٪۱۰ اختلاف نسبت به بتن معمولی و در سن ۹۱ روزه این اختلاف به ٪۲۲ رسیده است.

طبق نمودار ۲ مشهود است که کم‌ترین میزان مقاومت‌های کسب شده متعلق به بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس می‌باشد. تاثیر نامطلوب جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس باعث شده تا مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به مقادیری معادل ۳۰/۲، ۳۳ و ۳۵/۸ مگاپاسکال برسد که این مقادیر نشانگر به ترتیب ۵، ۴ و ۵ درصد کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با بتن ٪۵۰ بازیافتی بدون پوزولان می‌باشد. تاثیر نامناسب این سطح از میکروسیلیس باعث شده است تا مقاومت فشاری این بتن‌ها در مقایسه با بتن معمولی در سن ۷ روزه با ٪۱۴ کاهش روبرو شده در حالی که در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه این سطح از کاهش مقاومت به مقادیر چشم‌گیر ۲۵ و ۳۱ درصد رسیده است.



نمودار ۲: تغییرات مقاومت فشاری بتن های دارای ٪۵۰ ریزدانه بازیافتی

www.SID.ir

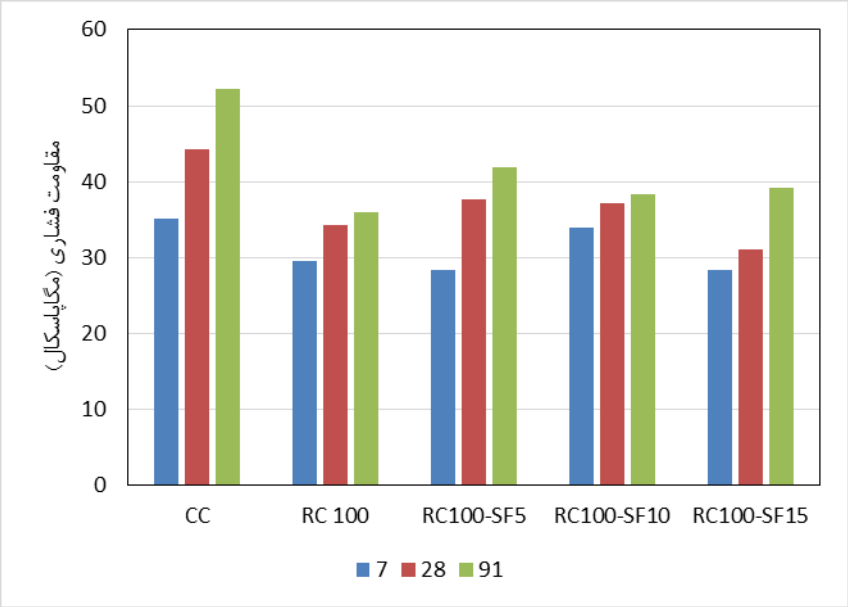
Archive of SID

۵-۳- مقاومت فشاری بتن دارای ٪۱۰۰ ریزدانه بازیافتی

نمودار ۳ بیانگر مقادیر مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های تماماً بازیافتی می‌باشد. طبق نمودار دیده می‌شود که فاصله مقاومت‌های کسب شده بتن‌های بازیافتی با بتن معمولی بسیار زیاد می‌باشد. بتن تماماً بازیافتی بدون میکروسیلیس در سن ۷ روزه به مقاومت ۲۹/۵ مگاپاسکال رسیده در حالی که این بتن در سن ۲۸ روزه با ٪۱۶ رشد به مقاومت ۳۴/۲ مگاپاسکال دست یافته است. این بتن در سن ۹۱ روز توانسته با کسب ٪۲۲ رشد به مقاومت ۳۶ مگاپاسکال برسد. با این حال مشهود است که متوسط افت مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه برای این بتن در مقایسه با بتن معمولی معادل ٪۲۳ می‌باشد. استفاده از ٪۵ میکروسیلیس در بتن تماماً بازیافتی نشان می‌دهد که در سن ۷ روزه مقاومت فشاری در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون میکروسیلیس با اندکی کاهش به مقاومت ۲۸/۴ مگاپاسکال رسیده در حالی که در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری به عدد ۳۷/۶ مگاپاسکال رسیده که این بیانگر ٪۳۲ رشد مقاومت می‌باشد.

طبق نتایج حاصله می‌توان دریافت که بیش‌ترین میزان رشد مقاومت در بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس در سن ۷ تا ۲۸ روزه متعلق به بتن تماماً بازیافتی با ٪۵ میکروسیلیس می‌باشد. این بتن در بازه زمانی ۲۸ تا ۹۱ روزه نیز با رشد مقاومت ٪۱۱ مواجه شده و به مقاومت ۴۱/۸ مگاپاسکال رسیده است که در میان بتن‌های تماماً بازیافتی بیش‌ترین میزان مقاومت کسب شده می‌باشد. در بتن‌های تماماً بازیافتی دارای ٪۱۰ میکروسیلیس اگر چه مقاومت در سن ۷ روزه نسبت به بتن حاوی ٪۵ میکروسیلیس با رشد نسبتاً زیادی مواجه شده، ولی در سن ۲۸ روزه این رشد ادامه نیافته و مقاومت ۲۸ روزه این بتن در مقایسه با بتن حاوی ٪۵ میکروسیلیس تغییر محسوسی نداشته و به ۳۷/۱ مگاپاسکال رسیده است. میزان تغییرات مقاومت در بازه ۲۸ روزه تا ۹۱ روزه در این بتن محسوس نبوده و صرفاً در این بازه زمانی ۱/۲ مگاپاسکال به مقاومت فشاری افزوده شده است.

میزان کاهش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه در سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس نیز همانند سایر سطوح بتن‌های بازیافتی مشاهده می‌شود. به نحوی که کم‌ترین میزان مقاومت فشاری در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی میکروسیلیس در سنین ۷ و ۲۸ روزه متعلق به سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس در بتن تماماً بازیافتی می‌باشد.



نمودار ۳: تغییرات مقاومت فشاری بتن های دارای ٪۱۰۰ ریزدانه بازیافتی

۵-۴- مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سن ۲۸ روزه

آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بتن‌ها براساس استاندارد ASTM C496 [۱۷] انجام شدند. هر مقدار بیانگر متوسط مقاومت سه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری می‌باشد. جدول ۳ و نمودار ۴ بیانگر مقاومت کششی دونیم

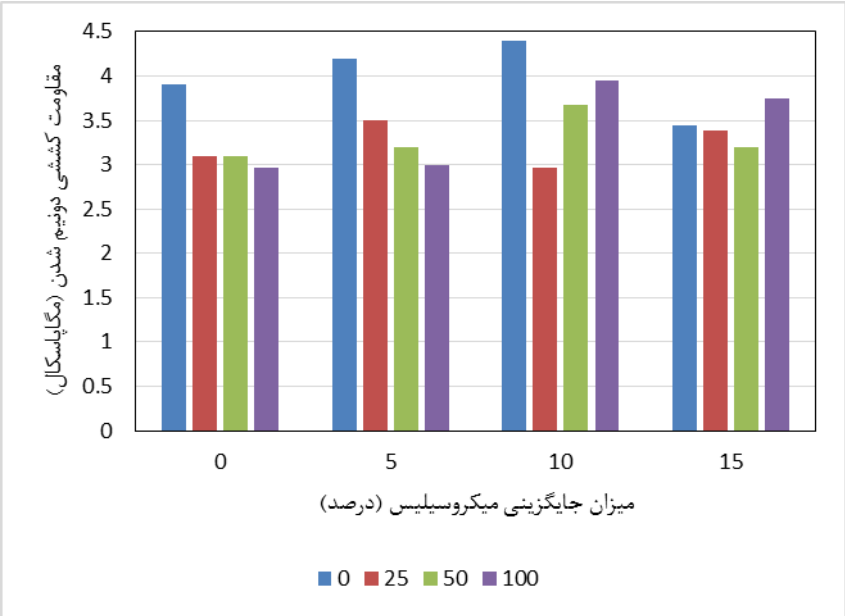
www.SID.ir

Archive of SID

شدن بتن‌های بازیافتی می‌باشند. دیده می‌شود که بتن معمولی بدون پوزولان مقاومت کششی ۳/۹ مگاپاسکال را کسب کرده در حالی که جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس در این بتن باعث شده تا مقاومت به ترتیب به ۴/۲، ۴/۴ و ۳/۴۴ مگاپاسکال برسد. مشهود است که استفاده از ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس در بتن‌های معمولی باعث شده تا مقاومت کششی دونیم‌شدن با ۸ و ۱۳ درصد رشد مواجه گردد، در حالی که استفاده از ٪۱۵ میکروسیلیس منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن به میزان ٪۱۲ شده است.

در بتن‌های دارای ٪۲۵ جایگزینی ریزدانه بازیافتی رفتار متفاوتی روی داده، به نحوی که بتن ٪۲۵ بازیافتی بدون پوزولان مقاومت کششی دونیم‌شدن ۳/۱ مگاپاسکال را کسب کرده، در حالی که پس از رشد ٪۱۳ مقاومت در بتن حاوی ٪۵ میکروسیلیس، مقاومت کششی دونیم‌شدن در بتن حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس با کاهش چشمگیری مواجه شده است. اگر چه پس از آن در سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس مقاومت کششی دونیم‌شدن مجدداً رو به افزایش نهاده ولی نتوانسته به مقاومتی فراتر از مقاومت بتن ۲۵ درصد بازیافتی دارای ٪۵ میکروسیلیس برسد. در بتن‌های دارای ٪۵۰ مصالح بازیافتی مقاومت بتن بدون میکروسیلیس به ۳/۱ مگاپاسکال رسیده در حالی که جایگزینی‌های ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس باعث رشد ۳ و ۱۸ درصدی مقاومت کششی دونیم‌شدن شده است. قبلاً ملاحظه شد که استفاده از سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس در این بتن باعث شده تا مقاومت کششی دونیم‌شدن با کاهش روبرو گردد. البته افت مقاومت کششی دو نیم‌شدن در این بتن محسوس نبوده و باعث شده تا مقاومت بتن ٪۵۰ بازیافتی حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس از مقاومت بتن ٪۵۰ بازیافتی بدون پوزولان بیش‌تر باشد.

مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های بدون میکروسیلیس با جایگزینی کامل ریزدانه بازیافتی معادل ۲/۹۶ مگاپاسکال شده، در حالی که همانند رفتار بتن ٪۵۰ بازیافتی به‌کارگیری سطوح ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس باعث رشد مقاومت و سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس منجر به افت مقاومت کششی دونیم‌شدن شده است. میزان تغییرات مقاومت در بتن‌های حاوی ٪۵ میکروسیلیس در بتن‌های تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن مشابه بدون پوزولان تقریباً نامحسوس بوده در حالی که در بتن حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس این رشد به سقف ٪۳۳ رسیده است. پس از آن در جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس مقاومت کششی دونیم‌شدن رو به کاهش نهاده ولی همچنان مقدار کسب شده از مقدار مقاومت بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان بیش‌تر می‌باشد.



نمودار ۴: تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس جایگزین

طبق نمودار ۴ مشاهده می‌شود که در بتن‌های معمولی بدون میکروسیلیس مقاومت کششی دونیم‌شدن ۳/۹ مگاپاسکال شده، در حالی که جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد میکروسیلیس منجر به افت ٪۲۱ مقاومت گردیده و جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی منجر به

www.SID.ir

Archive of SID

کسب مقاومت ۲/۹۶ مگاپاسکال (معادل ٪۲۴ افت) می‌گردید. مشابه با این رفتار در بتن‌های حاوی ۵ درصد میکروسیلیس مشاهده شده است. بتن بدون جایگزینی به مقاومت ۴/۲ مگاپاسکال رسیده در حالی که جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد از ریزدانه بازیافتی در بتن‌های حاوی ٪۵ میکروسیلیس منجر به افت مقاومت به میزان ۱۷، ۲۴ و ۲۹ درصد شده است. طبق نمودار ۴ مشاهده می‌شود که رفتار متفاوتی نسبت به سایر سطوح جایگزینی میکروسیلیس در بتن‌های حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس مشاهده شده است. اگر چه که میزان مقاومت کششی دونیم‌شدن در بتن معمولی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس ایجاد شده، ولی جایگزینی ٪۲۵ مصالح ریزدانه بازیافتی منجر به افت ٪۳۳ در مقاومت کششی دونیم‌شدن شده است. پس از آن علی‌رغم افزایش مقادیر مصالح بازیافتی، مقاومت رو به افزایش نهاده و در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی مقاومت به مقادیر ۳/۶۷ و ۳/۹۵ مگاپاسکال رسیده است. با این حال باید توجه داشت که همچنان مقاومت‌های کسب شده از مقاومت بتن معمولی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس کم‌تر می‌باشد. در سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس نیز مقاومت بتن معمولی ۳/۴۴ مگاپاسکال بوده که این میزان تفاوت محسوسی نسبت به بتن با جایگزینی ٪۲۵ نداشته در حالی که به میزان ٪۷ از مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن ٪۵۰ بازیافتی بیش‌تر می‌باشد. بروز تغییرات در رفتار بتن تماماً بازیافتی همانند سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، در سطح جایگزینی ٪۱۵ نیز مشاهده شد، جایی که بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس نیز در مقایسه با بتن‌های ۲۵ و ۵۰ درصد بازیافتی با رشد چشم‌گیری مواجه شده و به مقاومت ۳/۷۴ مگاپاسکال رسیده که این میزان از مقاومت بتن معمولی مشابه نیز بیش‌تر است.

۵-۵- سرعت امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

آزمایش‌های تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت براساس استاندارد ASTM C597 [۱۸] انجام شدند. هر مقدار بیانگر متوسط سرعت سه نمونه استوانه‌ای استاندارد می‌باشد. در نمودار ۵ نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت ارائه شده‌اند. وایتهورس [۱۹] برای تعیین کیفیت بتن‌های ساخته شده اقدام به معرفی حدود و دسته‌بندی خاصی نموده که خلاصه آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. بنا بر دسته-بندی ارائه شده، در بتن‌های بدون پوزولان، بتن معمولی در مرز مشترک میان سطح کیفی عالی و خوب قرار گرفته، در حالی که جایگزینی-های ۲۵ تا ۱۰۰ درصدی مصالح بازیافتی باعث کاهش جزئی کیفیت بتن‌ها شده است. اگر چه باید به این نکته نیز توجه داشت که حتی در صورت عدم استفاده از میکروسیلیس، بتن‌های تماماً بازیافتی نیز در محدوده سطح کیفی خوب قرارگرفته‌اند.

جدول ۴: سطح کیفی بتن بر اساس سرعت انتشار امواج فراصوت ارائه شده توسط وایتهورس[۱۹] [1]

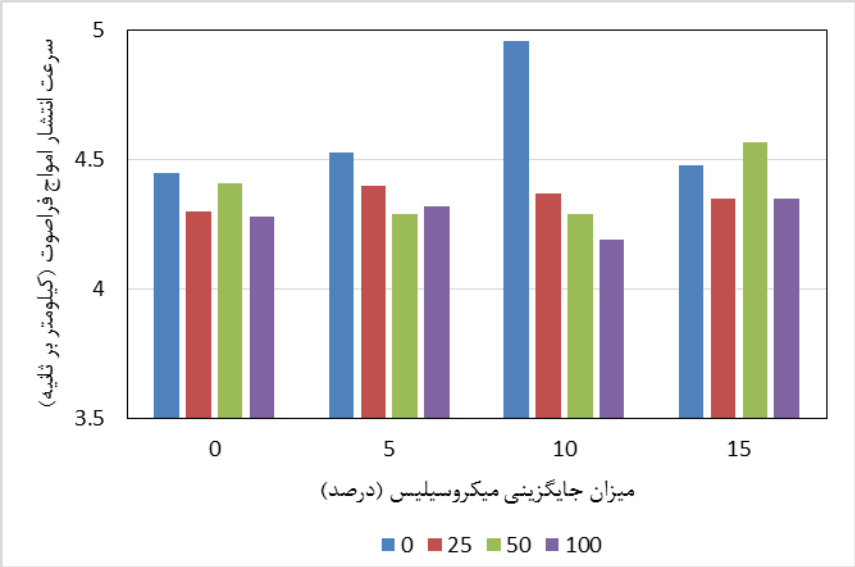
سطح کیفی	عالی	خوب	مشکوک	ضعیف	خیلی ضعیف
سرعت انتشار موج (کیلومتر بر ثانیه)	>۴/۵	۳/۵-۴/۵	۳– ۳/۵	۲-۳	۲>

در بتن‌های حاوی ۵ درصد میکروسیلیس نتایج کسب شده نشان از بهبود جزئی کیفیت بتن‌ها نسبت به بتن‌های مشابه بدون پوزولان دارد. در این حالت نیز تمامی بتن‌های بازیافتی در محدوده سطح کیفی خوب قرار گرفته‌اند. در بتن‌های معمولی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس سرعت انتشار امواج فراصوت از مرز خوب عبور کرده و سطح کیفی بتن وارد محدوده عالی شده است. تاثیر به‌سزای استفاده از میکروسیلیس در بهبود کیفیت بتن و متراکم‌تر کردن آن در بتن‌های معمولی دارای ٪۱۰ میکروسیلیس مشاهده می‌شود؛ جایی که سرعت انتشار امواج فراصوت با ٪۱۱ رشد نسبت به بتن معمولی بدون پوزولان به سطح کیفی عالی رسیده است. البته مشهود است که بتن‌های بازیافتی حاوی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی در سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس اندکی با افت کیفیت روبرو شدند، و در مقایسه با بتن‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس نتایج ضعیف‌تری را کسب نمودند. باید توجه داشت که براساس دسته‌بندی معرفی شده در جدول ۴ نتایج حاصله برای بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس همچنان در سطح کیفی خوب قرار دارند.

[1] Whitehurst

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۵: تغییرات سرعت انتشار امواج فراصوت در بتن‌های حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس جایگزین

طبق نمودار ۵ ملاحظه می‌شود که سطح کیفی بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس در محدوده مرز خوب و عالی قرار گرفته که این امر نشانگر ایجاد فضای نسبتاً متراکم در بتن‌های معمولی و بازیافتی مذکور می‌باشد. در نمودار ۵ نیز مشاهده می‌شود که حتی در سطح جایگزینی ٪۵۰ مصالح بازیافتی کیفیت بتن بهبود یافته و قادر است وارد محدوده سطح کیفی عالی شود. از مجموع نتایج حاصله و نیز مشاهده کلی نمودار می‌توان چنین استنباط کرد که جایگزینی مصالح بازیافتی تاثیر محسوسی در کاهش کیفیت بتن ایجاد نکرده، ولی استفاده از میکروسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی منجر به متراکم تر شدن حجم بتن‌های بازیافتی شده و باعث گردیده تا در سطوح مختلف جایگزینی این ماده پوزولانی، کیفیت بتن‌های بازیافتی ارتقاء یابد به نحوی که در برخی موارد بتن بازیافتی به سطح کیفی عالی نیز برسد.

۶- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، مطالعات در زمینه شناخت خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی ریزدانه‌های بتنی محدود می‌باشد؛ لذا در مقایسه با سایر انواع سنگدانه‌های بازیافتی، مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین مشکل‌تر می‌باشد. یانگ و همکاران (۲۰۰۸) و نیز خطیب (۲۰۰۵) در مطالعات خود نشان دادند که جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی منجر به افت حداکثر ٪۳۵ مقاومت فشاری خواهد شد[۲۱-۲۰]. این در حالی است که نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی بازیافتی باعث شده تا مقاومت فشاری ۲۸ روزه به طور متوسط تا ٪۲۲ نسبت به بتن معمولی کاهش یافته و به مقاومت ۳۴/۲ مگاپاسکال برسد. با این حال برخی دیگر از محققان نشان دادند که امکان دست‌یابی به مقاومت فشاری معادل با بتن معمولی در جایگزینی کامل ریزدانه‌های بنی بازیافتی وجود دارد [۲۴-۲۲]. در زمینه مصرف میکروسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی بهبود دهنده خواص مکانیکی بتن بازیافتی نتایج نشان داد که در جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی بازیافتی، استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس می‌تواند منجر به بهبود مقاومت فشاری تا سقف ٪۸ نسبت به بتن مشابه بدون پوزولان شده و مقاومت فشاری این بتن به ۳۷/۱ مگاپاسکال نیز برسد. این نتایج همسو با نتایج کسب شده توسط کو و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشند. آن‌ها نشان دادند که مصرف ٪۱۰ میکروسیلیس می‌تواند تا ٪۱۰ منجر به رشد مقاومت فشاری نسبت به بتن بازیافتی بدون پوزولان شود، با این حال آن‌ها بیان کردند که مصرف ماده پوزولانی میکروسیلیس قادر نخواهد بود تا سازوکار افت مقاومت ناشی از افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی ریزدانه را بکاهد [۲۵] که در این پژوهش نمی‌توان به شکل قطعی این نتیجه را استخراج نمود؛ چرا که در سطح جایگزینی ٪۵ میکروسیلیس با افزایش میزان جایگزینی ریزدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری نیز افزوده شده است، در حالی که در سایر سطوح جایگزینی میکروسیلیس، نتایج کسب شده همانند نتایج آن‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

بوده است. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی ٪۵۰ از ریزدانه‌های بازیافتی بدون حضور میکروسیلیس در مدت ۲۸ روزه منجر به کاهش ٪۲۲ مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی خواهد شد؛ با این حال در بتن دارای ٪۵۰ ریزدانه‌های بازیافتی و حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، مقاومت فشاری به مقاومت فشاری هدف طراحی رسیده و معادل ۴۰/۶ مگاپاسکال شده است. احمد (۲۰۰۵) نیز در بررسی تغییرات رفتار بتن دارای ٪۵۰ ریزدانه‌های بازیافتی بیان داشته که تا سقف جایگزینی ٪۵۰ از ریزدانه‌های بتنی بازیافتی، امکان دست‌یابی به بتن با عملکرد مشابه با بتن معمولی امکان‌پذیر است [۲۶].

در خصوص مقاومت کششی دونیم‌شدن نیز نتایج این تحقیق نشان داد که در جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی بازیافتی، مقاومت کششی دونیم‌شدن در مقایسه با بتن معمولی تا ٪۲۴ کاهش پیدا می‌کند. مشابه این مقدار را سلیمان (۲۰۰۵) در جایگزینی ٪۷۰ از ریزدانه‌های بتنی بازیافتی مشاهده کرده است [۲۷]، در حالی که اونجلیستا و دی‌بریتو در جایگزینی ٪۱۰۰ از ریزدانه‌های بتنی بازیافتی، افت مقاومت کششی دونیم‌شدن ٪۳۰ را ثبت کرده‌اند [۲۴]. در این تحقیق آزمایشگاهی مشاهده شد که مصرف ٪۱۰ میکروسیلیس منجر به رشد ٪۳۳ مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن تماما بازیافتی نسبت به بتن مشابه بدون پوزولان می‌شود و حتی این نتیجه نشان داد که دست‌یابی به مقاومت کششی دونیم‌شدن بیش‌تر از بتن معمولی نیز امکان‌پذیر می‌باشد. سیلوا (۲۰۱۵) علت وقوع چنین پدیده‌ای را در بتن‌های بازیافتی حاوی ریزدانه‌های بتنی، افزایش میزان سطوح ریز و خشن ریزدانه‌های بازیافتی معرفی کرده است، ولی با این حال در مطالعات آماری انجام شده توسط او، امکان وقوع افت ٪۴۰ مقاومت کششی دونیم‌شدن در جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی بازیافتی نیز امری منطقی اعلام شده است [۲۸]. دهیر و پاینه (۲۰۰۷) در مطالعات خود نشان دادند که افزایش میزان ریزدانه‌های بازیافتی بتنی منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن خواهد شد [۲۹]، در حالی که نتایج کسب شده در این پژوهش، نشان دادند که گرچه وقوع این امر در بتن‌های بدون پوزولان و یا در برخی از سطوح خاص پوزولان (مثلا ٪۵) ممکن روی دهد ولی الزاما از آن نمی‌توان به عنوان یک اصل یاد کرد، زیرا که در سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، نتایجی کاملا متفاوت رخ داده که لازم است تحقیقات بیش‌تری در زمینه تغییرات ریزساختار تشکیل شده، انجام گردد.

در خصوص نتایج کسب شده حاصل از انجام آزمایش تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت، به دست آمد که حتی بتن تماما بازیافتی بدون استفاده از میکروسیلیس در محدوده سطح کیفی خوب قرار می‌گیرد. در زمینه پر کردن منافذ و ایجاد یک حجم توپر، سطح جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس نشان داد که قادر است تا بتن ٪۵۰ بازیافتی را به مرز کیفی عالی هم برساند. دلیل این امر علاوه بر واکنش‌های شیمیایی ناشی از هیدراتاسیون و تولید ژل‌های سیلیکاتی، می‌تواند ناشی از افزایش مقدار ذرات ریز میکروسیلیس درون حجم ملات بتن و تامین فضای توپرتر باشد؛ هم‌چنین بانتیا و چان وقوع این پدیده را به فعالیت ذرات سیمانی هیدراته نشده در ریزدانه‌های بازیافتی مرتبط دانسته‌اند [۳۰]. خطیب (۲۰۰۵) نیز نشان داد که جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی در مدت ۷ روز باعث شده تا سرعت انتشار امواج فراصوت نسبت به بتن معمولی ٪۱۶ کم‌تر شود، در حالی که گذشت زمان باعث بهبود کیفیت بتن بازیافتی و کاهش این فاصله به ٪۸ شده است [۲۱]. نتایج این تحقیق نشان داد که در بازه ۲۸ روزه، جایگزینی کامل ریزدانه‌های بتنی بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی منجر به کاهش ٪۴ در سرعت انتشار امواج فراصوت می‌شود، در حالی که این نتیجه در بتن‌های حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس به ترتیب ٪۵، ٪۱۵ و ٪۳ می‌باشد.

۷- نتایج

در این تحقیق خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس بررسی و مورد مقایسه قرار گرفتند. به‌همین منظور، در مجموع تعداد ۱۹۲ نمونه مکعبی و استوانه‌ای استاندارد در قالب ۱۶ طرح اختلاط ساخته شدند و میزان مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، مقاومت کششی دو نیم‌شدن و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری و تکمیل گردیدند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- در بازه ۷ روزه، مصرف ٪۱۰ میکروسیلیس منجر به کسب مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سایر سطوح مصرف این پوزولان شده است. این بهبود مقاومت به نحوی است که بتن حاوی ٪۲۵ ریزدانه بازیافتی و ٪۱۰ میکروسیلیس با کسب مقاومت ۳۷/۲ مگاپاسکال

www.SID.ir

Archive of SID

رشد مقاومتی معادل ٪۶ نسبت به بتن معمولی داشته است و بتن‌های حاوی ٪۵۰ و ٪۱۰۰ ریزدانه بازیافتی نیز با کسب مقاومت‌های به‌ترتیب ۳۳/۳ و ۳۳/۹ مگاپاسکال با افت مقاومت فشاری ناچیزی نسبت به بتن معمولی روبرو شده‌اند.

- در بازه ۲۸ روزه، امکان دست‌یابی به مقاومت طراحی ۴۰ مگاپاسکال برای اکثر قریب به اتفاق بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس امکان‌پذیر شد.
- در بازه ۹۱ روزه، بیش‌ترین مقاومت فشاری کسب‌شده در بتن‌های بازیافتی متعلق به بتن با سطح جایگزینی ٪۲۵ از مصالح بازیافتی و حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس بود. سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس با بیش‌ترین میزان رشد مقاومتی روبرو شده و کم‌ترین میزان افت مقاومت فشاری ناشی از جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس رخ داد.
- جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس باعث نزدیکی مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن‌های بازیافتی به محدوده بتن‌های معمولی گردید. در همین سطح از به‌کارگیری این پوزولان نیز استفاده از ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی با افزایش چشم‌گیر مقاومت کششی دو نیم‌شدن روبرو شد که بیانگر مقاومتی حدود ٪۹ بیش‌تر از مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن معمولی بود.
- طبق جدول ۴، بتن ساخته شده از ٪۵۰ از مصالح بازیافتی و حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس می‌تواند در سطح کیفی "عالی" قرار گیرد. سایر بتن‌های بازیافتی در تمام سطوح جایگزینی مصالح بازیافتی و هر سطح از جایگزینی پوزولان در گروه بتن‌های "خوب" و در محدوده نزدیک به بتن‌های با سطح کیفی "عالی" قرار دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری‌های بی‌دریغ شرکت‌های "امیر سالار بتن" و "ایمن‌خاک جنوب" برای در اختیار قرار دادن مصالح، تجهیزات آزمایشگاهی و امکانات مورد نیاز تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] Sonigo, H., Hestin, M., Mimid, S. (2010). Management of Construction and Demolition Waste in Europe. In: Stakholders Workshop, Brussels.

[2] BCSJ. (1977). Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Japan: Building Contractors Society of Japan Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste.

[3] DIN 4226-100. (2000). Mineral aggregates for concrete and mortar-Part 100: Recycled aggregates. Germany.

[4] Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). (2004). NBR 15116: Recycled aggregates of solid residue of building constructions – requirements and methodologies.

[5] BS, 8500-2, (2006). Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part II: Specification for constituent materials and concrete. British Standard Institution.

[6] Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. Resources, Conservation and Recycling, 53 (1), 36-44.

[7] Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V. (2011). Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. Construction and Building Materials, 25 (1), 69-80.

[8] Jalilifar, H., Sajedi, F., Kazemi, S. (2016). Investigation on the Mechanical Properties of Fibre Reinforced Recycled Concrete. Civil Engineering Journal, 2 (1), 13-22.

[9] Kou, S. C., Poon, C. S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cement and Concrete Composites, 37, 12-19.

[10] Jalilifar, H., Sajedi, F. (2017). Investigation on Mechanical Properties of Recycled Concrete Containing Natural Zeolite. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), 4 (3), 77-81.

[11] Limbachiya, M., Meddah, M. S., Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. Construction and Building Materials, 27 (1), 439-449.

www.SID.ir

Archive of SID

[12] Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials, 26 (1), 565-573.

[13] De Juan, M. S., Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and building materials, 23 (2), 872-877.

[14] ASTM C192 / C192M-16a, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[15] Tam, V., Gao, X., Tam, C. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research, 35, 1195-1203.

[16] ASTM C109/C109M-07. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

[17] ASTM C496 / C496M-11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[18] ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[19] Whitehurst, E. (1951). Soniscope tests concrete structures, American Concrete Institution, 47, 443-444.

[20] Yang, K., Chung, H., Ashour, A. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties, ACI Materials Journal, 105 (3), 289-296.

[21] Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, Cement and Concrete Research, 35 (4), 763-769.

[22] Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J. (2012). The effect of super-plasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Construction and Building Materials, 28 (1), 722-729.

[23] Evangelista, L., de Brito, J. (2012). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 32 (1), 9-14.

[24] Evangelista, L., de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 29 (5), 397-401.

[25] Kou, S. C., Poon, C. S., Agrela, F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, Cement and Concrete Composites, 33 (8), 788- 795.

[26] Ahmed, S. F. (2005). Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash. Concrete 2011 Conference, Perth, WA, Australia.

[27] Solyman, M. (2005). Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures, Dissertation, Verlag nicht ermittelbar.

[28] Silva, R.V., (2015). Ph.D. Thesis: Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete, Lisbon: TECNICO LISBOA.

[29] Dhir, R. K., Paine, K. A., (2007). Performance related approach to the use of recycled aggregates, Waste and Resources Action Programme (WRAP) Aggregates Research Programme, Banbury, Oxon, UK, 77.

[30] Banthia, N., Chan, C., (2000). Use of recycled aggregate in plain and fibre-reinforced concrete, Concrete International 22(6):41-45.

www.SID.ir