Archive of SID

مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هجدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۷

بررسی همبستگی بین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده با سنگدانه بازیافتی بتنی

میلاد عقیلی لطف[۱]، امیرمحمد رمضانیان پور[۲*]

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

ramezanian@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲٤] تاریخ پذیرش: [۹۷/۳/۱]

چکیده

در سالیان اخیر ایده بازیافت نخاله‌های بتنی و استفاده مجدد از آن به عنوان مصالح سنگدانه‌ای (سنگدانه بازیافتی بتنی) در تولید بتن گسترش فراونی یافته است. در این بین یکی از موارد مهم در زمینه کاربرد سازه‌ای بتن‌های بازیافتی، امکان استفاده از روابط همبستگی بین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی مانند روابط بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی برای بتن‌های بازیافتی است. از آنجایی که ساختار بتن بازیافتی تفاوت زیادی با ساختار بتن معمولی دارد، پس کاربرد روابط متداول برای بتن معمولی که در استانداردهای طراحی سازه‌های بتن مسلح منتشر شده است، برای بتن بازیافتی باید بررسی شود، که در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است. برای این منظور ۱۸ طرح اختلاط با درنظرگیری کاربرد دو نوع مختلف شن بازیافتی بتنی، کاربرد با هم شن و ماسه بازیافتی بتنی و همچنین کاربرد مواد جایگزین سیمان طراحی و ساخته شد. در ادامه، نتایج این پژوهش با روابط منتشر شده توسط سایر پژوهشگران در این زمینه و همچنین روابط معمول برای بتن‌های فاقد سنگدانه بازیافتی بتنی نیز مقایسه شد. نتایج نشان داد که روابط به‌دست آمده در این پژوهش با روابط مشابه برای بتن‌های معمولی تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. به صورتی که هر دو رابطه بین مقاومت فشاری با مقاومت کششی یا مقاومت خمشی، تخمین به مراتب بیشتری نسبت به رابطه ACI 318 و سایر روابط همبستگی موجود ارائه می‌دهند. علت این تفاوت را می‌توان پراکندگی بازه تغییر کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی بتنی دانست.

واژگان کلیدی: سنگدانه بازیافتی بتنی، همبستگی، پوزولان، بتن بازیافتی، مقاومت مکانیکی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بتن به عنوان اساسی‌ترین محصول ساختمانی، نقشی کلیدی و غیر قابل انکاری در توسعه شهرنشینی کنونی داشته است. طبق گزارش‌های منتشر شده توسط میر[۱]، سالانه بیش‌از ۱۰ میلیارد تن بتن در جهان تولید و مصرف می‌شود که برای تولید این مقدار بتن در سال، به ترتیب حدوداً ۰/۹، ۵ و ۰/٦ میلیارد تن سیمان پرتلند، سنگدانه و آب آشامیدنی مورد نیاز است [1]. ویژگی‌های ساختاری از قبیل مقاومت مکانیکی، دوام، توان مالی و فراوانی منابع طبیعی، این محصول را به عنوان اولین انتخاب در فرآیند ساخت و ساز تبدیل نموده است. اگرچه معضلات

1 Meyer

www.SID.ir

Archive of SID

زیست‌محیطی و اقتصادی متعددی به‌دنبال تولید و مصرف بی‌رویه این محصول پدید آمده است. تخریب بی‌رویه معادن طبیعی، تغییر زیست‌بوم‌های اطراف معادن تولید شن و ماسه، آلودگی هوا و همچنین مسائل مربوط به حمل و نقل مصالح سنگدانه‌ای از محدوده‌های خارج از شهر به داخل شهر، از جمله‌ی این مسائل هستند [2-3]. بحرانی شدن این مسائل از آنجا نشأت می‌گیرد که هر ساخت و ساز جدیدی، تخریب جدیدی نیز به دنبال دارد. بر مبنای آمارهای موجود، در سال ۲۰۰۸ ساخت و ساز (۸۵۹ میلیون تن زباله یا ٪۳۲/۹ کل زباله تولیدی) و معدن‌کاوی (۷۲۷ میلیون تن زباله یا ٪۲۷/۸ کل زباله تولیدی) بزرگترین صنایع اقتصادی بودند که مجموعاً بیش‌از ٪۶۰ کل زباله تولیدی اتحادیه اروپا را به خود اختصاص داده و می‌دهند؛ که در این بین حدود ٪۹۷ از مجموع زباله‌های ساخت و ساز و معدن‌کاوی را زباله‌های طبیعی، معدنی و یا خاک (نخاله‌های ساختمانی ناشی از ساخت سازه جدید یا تخریب سازه قدیمی) تشکیل می‌دادند [4]. در حال حاضر نیز مقدار زباله تولیدی در هر سال در اتحادیه اروپا نزدیک به ۳ میلیارد تن تخمین زده می‌شود که چیزی حدود ٪۳۱ آن را زباله‌های ناشی از ساخت و تخریب[1] (C&D) تشکیل می‌دهند [5]. افزایش نرخ تخریب سازه‌های قدیمی معضلات جدیدی همچون کمبود مراکز دفن را به دنبال داشته است. یکی از پیشنهادات نوین در خصوص حل بخشی از معضلات فوق، بازیافت نخاله‌های بتنی و استفاده مجدد از آن به عنوان مصالح سنگدانه‌ای (سنگدانه بازیافتی بتنی[2]) در تولید بتن است [2 و 5]. سنگدانه بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت مکانیکی و دوام کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارد [4 و 6]؛ این موضوع باعث شده است که بتن ساخته‌شده با سنگدانه بازیافتی بتنی (بتن بازیافتی) عملکرد مکانیکی و دوامی ضعیف‌تری نسبت به بتن معمولی داشته باشد [2، 4-6]. از سوی دیگر باتوجه به گستردگی کاربرد بتن بازیافتی در کاربردهای سازه‌ای، استفاده از روابط موجود بین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی بتن‌های فاقد سنگدانه بازیافتی بتنی برای بتن‌های بازیافتی دارای خطای قابل ملاحظه‌ای است [7- 8]. پس در این پژوهش با رویکرد بستر سازی مناسب کاربرد بتن‌های بازیافتی در کاربردهای مختلف سازه‌ای در ایران، روابط موجود برای تخمین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی تحقیق و بررسی شده است. برای این منظور ۱۸ طرح اختلاط در دو گروه در نظر گرفته‌شد. در طراحی این طرح‌های اختلاط، دو نوع شن بازیافتی ویک نوع ماسه بازیافتی استفاده شد. در گروه اول کاربرد هم زمان شن و ماسه بازیافتی و در گروه دوم امکان‌سنجی کاربرد مواد جایگزین سیمان[3] (میکروسیلیس و زئولیت) با هدف بهبود عملکرد بتن‌های ساخته‌شده با شن بازیافتی در نظر گرفته شد. آزمایش‌های تعیین درصد جذب آب، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نیز برای تعیین خواص مهندسی نمونه‌های بتنی درنظر گرفته شدند. سپس همبستگی بین نتایج درصد جذب آب و چگالی، درصد جذب آب و مقاومت فشاری، چگالی و مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت فشاری و همچنین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری تعیین و با نتایج سایر پژوهشگران [7- 8] و استانداردهای موجود برای بتن معمولی [9] مقایسه شدند. نتایج این پژوهش می‌تواند مقدمه مناسبی برای تدوین اولین آیین‌نامه کاربرد بتن‌های بازیافتی برای کاربردهای سازه‌ای در ایران باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

در این پژوهش یک نوع شن طبیعی شکسته (NCA[4]) و یک نوع ماسه طبیعی رودخانه‌ای (NFA[5]) مورد استفاده قرار گرفتند. سنگدانه‌های مذکور از معدن صحراشن واقع در جاده مخصوص کرج تهیه شدند.

به منظور تهیه و تولید سنگدانه بازیافتی بتنی در این پژوهش ۲ نوع شن بازیافتی با بتن اولیه متفاوت درنظر گرفته شد. شن‌های بازیافتی CRCA-1[6] و CRCA-2[7] به‌ترتیب از

1 Construction & demolition wastes
2 Recycled concrete aggregate

3 Supplementary cementitious materials
4 Natural coarse aggregate
5 Natural fine aggregate
6 Coarse recycled concrete aggregate-1

www.SID.ir

Archive of SID

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 بود. 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. سپس با استفاده از الک معیار ٤/٧٥ mm سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به شن و ماسه تقسیم‌بندی شدند. در انتها نیز مصالح عبوری از الک معیار ٤/٧٥ mm برای هر دو نوع شن بازیافتی بایکدیگر ترکیب شده و ماسه بازیافتی (FRCA) را شکل دادند. در جدول (۱) مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش گزارش شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فنی سنگدانه‌های مصرفی

Property	NFA	FRCA	NCA	CRCA-1	CRCA-2
Water absorption (%)	3.41	10.3	2.7	8.7	7.45
Specific weight (kg/m^3)	2.51	2.27	2.62	2.3	2.35
Los Angeles value (%)	-	-	15.9	29.3	27.7

Table 1. Physical and mechanical properties of aggregates

همان‌گونه که مشاهده می‌شود سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی درصد جذب آب بیشتری دارند. همچنین نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس نشان می‌دهد که شن‌های بازیافتی بتنی نسبت به شن طبیعی به مراتب کیفیت و مقاومت مکانیکی کمتری دارند. در شکل (۱) نیز دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است.

در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ ۲ مورد استفاده قرار گرفت. این سیمان از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. به منظور بهبود در خواص مهندسی بتن‌های بازیافتی نیز میکروسیلیس به میزان ۸٪ و زئولیت به میزان ۱۵٪ با سیمان پرتلند جایگزین شدند. زئولیت مصرفی از کارخانه تولید فرا افزونه واقع در سمنان و میکرورسیلیس نیز از کارخانه تولید میکروسیلیس ازنا واقع در لرستان تهیه شد. جدول (۲) نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی آورده شده است.

شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

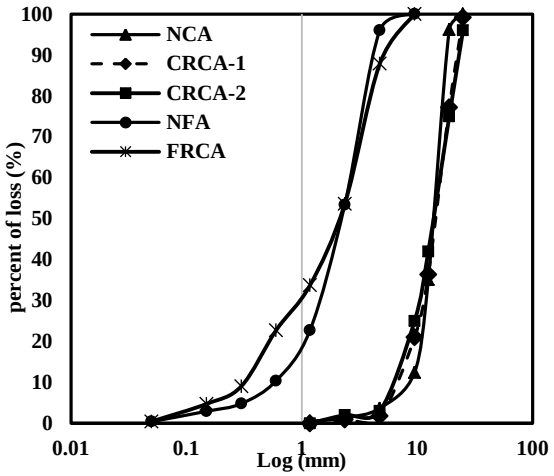

Fig. 1. Grading distribution of aggregates

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش آنالیز شیمیایی سیمان، زئولیت و میکروسیلیس

Components	Cement	Silica fume	Zeolite
SiO_2 (%)	27.30	86.18	64.90
Al_2O_3 (%)	4.60	1.44	12.30
Fe_2O_3 (%)	2.70	0.20	0.36
CaO (%)	46.70	3.06	2.10
MgO (%)	3.50	1.32	0.90
SO_3 (%)	2.04	0.337	0.19
Na_2O (%)	0.34	-	-
K_2O (%)	0.52	-	-
Equivalent alkali (%)	0.68	-	-
LOI (%)	4.84	1.15	4.18

Table 2. Characteristics of Portland cement, zeolite and silica fume

۲-۲- طرح‌های اختلاط

در این پژوهش در مجموع دو گروه طرح اختلاط در نظر گرفته شد؛ در گروه اول شن بازیافتی CRCA-1 و ماسه بازیافتی استفاده شد. در این گروه کاربرد هم زمان شن و ماسه بازیافتی بتنی در ساخت بتن بازیافتی با طراحی ٦ طرح اختلاط [بدون درنظر گرفتن طرح شاهد] بررسی و تحقیق شد. برای این منظور شن طبیعی در نسبت‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ با شن بازیافتی بتنی جایگزین شد (به ترتیب طرح‌های RCAC1-30 و RCAC1-50).

1 Coarse recycled concrete aggregate-2

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط بتن‌های بازیافتی

Mixture no.	Cement (kg/m^3)	Silica fume (kg/m^3)	Zeolite (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	W/C	NFA (kg/m^3)	NCA (kg/m^3)	FRCA (kg/m^3)	CRCA (kg/m^3)	Superplasticizer (gr/m^3)	Slump (cm)
NC	350	-	-	175	0.5	980	-	800	-	950	8
First Group											
RCAC1-30	350	-	-	175	0.5	980	-	560	240	1250	7.5
RCAC1-50	350	-	-	175	0.5	980	-	400	400	1180	8
RC1&FAC-30&20	350	-	-	175	0.5	784	196	560	240	1240	7.5
RC1&FAC-50&20	350	-	-	175	0.5	784	196	400	400	1210	8
RC1&FAC-30&40	350	-	-	175	0.5	588	392	560	240	1260	8
RC1&FAC-50&40	350	-	-	175	0.5	588	392	400	400	1275	8.5
Second Group											
RCAC2-30	350	-	-	175	0.5	980	-	560	240	1240	8.5
RCAC2-50	350	-	-	175	0.5	980	-	400	400	1200	7.5
RCAC2-100	350	-	-	175	0.5	980	-	-	800	1230	8
SFNC2	322	28	-	175	0.5	980	-	800	-	1444	7.5
SFRCAC2-30	322	28	-	175	0.5	980	-	560	240	1451	8
SFRCAC2-50	322	28	-	175	0.5	980	-	400	400	1492	9
SFRCAC2-100	322	28	-	175	0.5	980	-	-	800	1474	8
ZNC2	297.5	-	52.5	175	0.5	980	-	800	-	1526	7
ZRCAC2-30	297.5	-	52.5	175	0.5	980	-	560	240	1498	7.5
ZRCAC2-50	297.5	-	52.5	175	0.5	980	-	400	400	1571	7.5
ZRCAC2-100	297.5	-	52.5	175	0.5	980	-	-	800	1556	8

Table 3. Details of mixture proportions

سپس در طرح‌های دارای ۳۰٪ و ۵۰٪ شن بازیافتی بتنی،۲۰٪ و ٤۰٪ از ماسه طبیعی نیز با ماسه بازیافتی جایگزین شد (طرح‌های دارای ۲۰٪ ماسه بازیافتی بتنی به ترتیب با کدهای RC1&FAC-30&20 و RC1&FAC-50&20 مشخص شده‌اند. همچنین طرح‌های دارای ٤۰٪ ماسه بازیافتی بتنی نیز به ترتیب با کدهای RC1&FAC-30&40 و RC1&FAC-50&40 مشخص شده‌اند). در گروه دوم نیز به‌منظور بررسی اثر پوزولان‌های انتخابی در بهبود عملکرد بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی بتنی، ۸٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ زئولیت در دو مجموعه طرح اختلاط مجزا جایگزین سیمان پرتلند شدند. لازم به ذکر است که در این گروه سنگدانه بازیافتی CRCA-2 مورد استفاده قرار گرفت و مجموعاً ۱۱ طرح اختلاط [بدون درنظر گرفتن طرح شاهد] طراحی شد. در جدول (۳) مشخصات طرح‌های بتنی ساخته‌شده برای این دو گروه ارائه شده است.

برای طرح‌های مزبور، مقاومت فشاری هدف ٤۰ MPa در سن ۲۸ روزه تعریف شد. برای این منظور چندین طرح با نسبت‌های آب به سیمان ۰/٤۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵ با عیارهای سیمان ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ Kg/m^3 ساخته شد. نهایتاً نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ با عیار سیمان ۳۵۰ Kg/m^3 برای ساخت نمونه‌های بتنی انتخاب شد. برای تأمین روانی ۱۰± ۸۰ mm، یک نوع فوق روان‌کننده برپایه پلی کربوکسیلیک اتر[1]، در مقادیر مختلف مورد استفاده قرار گرفت. اختلاط بتن به‌دلیل درصد جذب آب بالای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با اصلاح روش طرح مخلوط ASTM C 192 [10] و به صورت پیش اشباع‌سازی صورت گرفت. در پژوهشی که روی ناحیه انتقال[2] در بتن‌های ساخته‌شده با سنگدانه بازیافتی صورت گرفته است، مشاهده شده است که استفاده از سنگدانه بازیافتی بتنی اشباع با سطح خشک می‌تواند منجر به ضعف عملکردی در ناحیه انتقال شود [11]. از سوی دیگر کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی کاملاً خشک نیز به دلیل جذب سریع آب آزاد در بتن، منجربه افت شدید کارایی می‌شود [4, 12]. به همین دلیل در این پژوهش سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با درصد رطوبت ۸۰ الی ۹۰٪ استفاده شدند. به همین منظور، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ٦ ساعت قبل از اختلاط با استفاده از آب مورد نیاز برای اختلاط، اشباع شده و سپس در حین

1 Polycarboxylic ether
2 Interfacial transition zone

www.SID.ir

Archive of SID

اختلاط، آب باقی‌مانده به اجزای اختلاط اضافه شد. ۲٤ ساعت بعد از 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.

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

برای ارزیابی عملکرد نمونه‌های بتنی آزمایش‌های مختلفی روی بتن تازه و سخت‌شده انجام شد. آزمایش تعیین درصد جذب آب و چگالی مطابق با استاندارد ASTM C 642 [13] روی سه نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ cm در سن ٥٦ روزه انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN BS 12390-3 [14] روی ۳ نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ cm در سن‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. آزمایش مقاومت کششی نیز مطابق با روش دو نیم‌شدن (برزیلی) و با استفاده از استاندارد ASTM C 496 [15] روی ۳ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ cm در سن ۲۸ روزه انجام شد. مقاومت خمشی نیز مطابق با استاندارد ASTM C 293 [16] به‌صورت ۳ نقطه‌ای روی ۲ نمونه ۱۵×۱۵×٦۰ cm و در سن ۲۸ روزه تعیین شد.

۳- نتایج و بررسی

۳-۱- نتایج آزمایش‌های چگالی و جذب آب

میانگین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های چگالی و جذب آب در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است. نتایج طرح مخلوط‌های گروه اول نشان می‌دهد که مجموعاً با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی (شن + ماسه) درصد جذب آب افزایش می‌یابد. کاربرد ۳۰ و ۵۰٪ شن بازیافتی بتنی RCAC-1 به ترتیب موجب افزایش ۱۰ و ۱۸٪ در درصد جذب آب شده است. اما با بررسی دقیق‌تر نتایج مشاهده می‌شود که تأثیر ماسه بازیافتی روی روند افزایش درصد جذب آب بتن بازیافتی به مراتب بسیار بیشتر از شن بازیافتی است. به‌طوری که در طرح RC1&FAC-30&40 مقدار جذب آب ٤٤٪ نسبت به طرح NC و ۳۱٪ نسبت به طرح RCAC1-30 افزایش داشته است. در طرح RC1&FAC-50&40 نیز درصد جذب آب ۵۳٪ نسبت به طرح NC و ۳۰٪ نسبت به طرح RCAC1-50 افزایش داشته است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان در درصد جذب آب بالاتر ماسه بازیافتی (۱۰/۳٪) نسبت به شن بازیافتی (۸/۷٪) جستجو کرد. در خصوص نتایج چگالی نیز باید متذکر شد که چگالی بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن شاهد کمتر است، اما در بین خود بتن‌های بازیافتی نظم مشخصی مشاهده نمی‌شود. در این بین طرح RC1&FAC-50&40 کمترین چگالی را در گروه اول دارد، به‌طوری که چگالی این طرح حدوداً ٤٪ نسبت به طرح RCAC1-50 و حدوداً ۹٪ نسبت به طرح NC کمتر است. دلایل اصلی کمتر بودن چگالی بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن معمولی، تخلخل ملات سیمانی در سنگدانه‌های بازیافتی است که منجربه کاهش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی و در نتیجه کاهش چگالی بتن بازیافتی می‌شود.

نتایج گروه دوم نیز نشان می‌دهد که به صورت کلی با کاربرد مواد جایگزین سیمان (۸٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ زئولیت) درصد جذب آب بتن‌های بازیافتی افزایش می‌یابد (به غیر از طرح RCAC2-30) اما در خصوص چگالی رفتار منظمی مشاهده نمی‌شود. به‌عبارت دیگر کاربرد میکروسیلیس و زئولیت در بتن‌های بازیافتی منجربه افزایش درصد جذب آب شده است و این مقدار افزایش در بتن‌های بازیافتی دارای ۱۵٪ زئولیت کاملاً محسوس است. به‌طوری‌که طرح ZRCAC2-100 حدوداً ۱/۳۸ برابر درصد جذب آب بزرگتری نسبت به طرح شاهد دارد.

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه در شکل (٤) آورده شده است. نتایج طرح‌های گروه اول نشان داد که با افزایش کلی نسبت جایگزینی سنگدانه طبیعی (شن+ماسه) با سنگدانه بازیافتی، مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه کاهش می‌یابد. مانند نتایج درصد جذب آب، مشاهده می‌شود که ماسه بازیافتی تأثیر بسیار بیشتری روی کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به شن بازیافتی دارد، به‌طوری‌که در نسبت‌های جایگزینی ۳۰٪ و

www.SID.ir

Archive of SID

۵۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی (طرح‌های RCAC1-30 و RCAC1-50) مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۱۱٪ و ۱۵٪ نسبت به طرح شاهد کاهش داشته است. اما در طرح RC1&FAC-30&40 این کاهش نسبت به طرح RCAC1-30 برابر ۲۱٪ و نسبت به طرح NC برابر۲۹٪ است. همچنین در طرح RC1&FAC-50&40 مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به طرح RCAC1-50 به میزان ۲۳٪ و نسبت به طرح NC به مقدار ۳۵٪ کاهش داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که تا نسبت جایگزینی ۲۰٪ ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی بتنی، با افزایش نسبت جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی تا ۵۰٪ تغییرات معناداری در مقاومت فشاری مشاهده نمی‌شود. این درحالی رخ می‌دهد که در طرح RC1&FAC-50&20 نسبت به طرح RC1&FAC-30&20 مجموعاً ۹٪ سنگدانه بازیافتی (شن + ماسه) بیشتری مصرف شده است.

نتایج گروه دوم نیز نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان پرتلند با میکروسیلیس یا زئولیت منجربه بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه شده است، به‌طوری که در نسبت جایگزینی ۳۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بتنی عملاً مقاومت فشاری ۲۸ روزه یکسانی نسبت به طرح شاهد کسب شد (مقاومت ۲۸ روزه طرح NC ۴۰/۱ MPa، SFRCAC2-30 ۴۱/۲ MPa و طرح ZRCAC2-30 ۳۹/۵ MPa). این موضوع نشان می‌دهد که با کاربرد ۸٪ میکروسیلیس و یا ۱۵٪ زئولیت در بتن ساخته‌شده با ۳۰٪ شن بازیافتی می‌توان اثر منفی استفاده از شن بازیافتی را بر مقاومت فشاری جبران کرد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که استفاده از میکروسیلیس و زئولیت در طرح NC مقاومت فشاری ۲۸ روزه را به ترتیب به میزان ۱۳٪ و ۹٪ افزایش داده است؛ این درحالی است که مقادیر فوق برای طرح RCAC2-100 به ترتیب ۱۴٪ و ۱۱٪ بوده است.

شکل ۲- نتایج حاصل از انجام آزمایش چگالی بر حسب تن بر متر مکعب

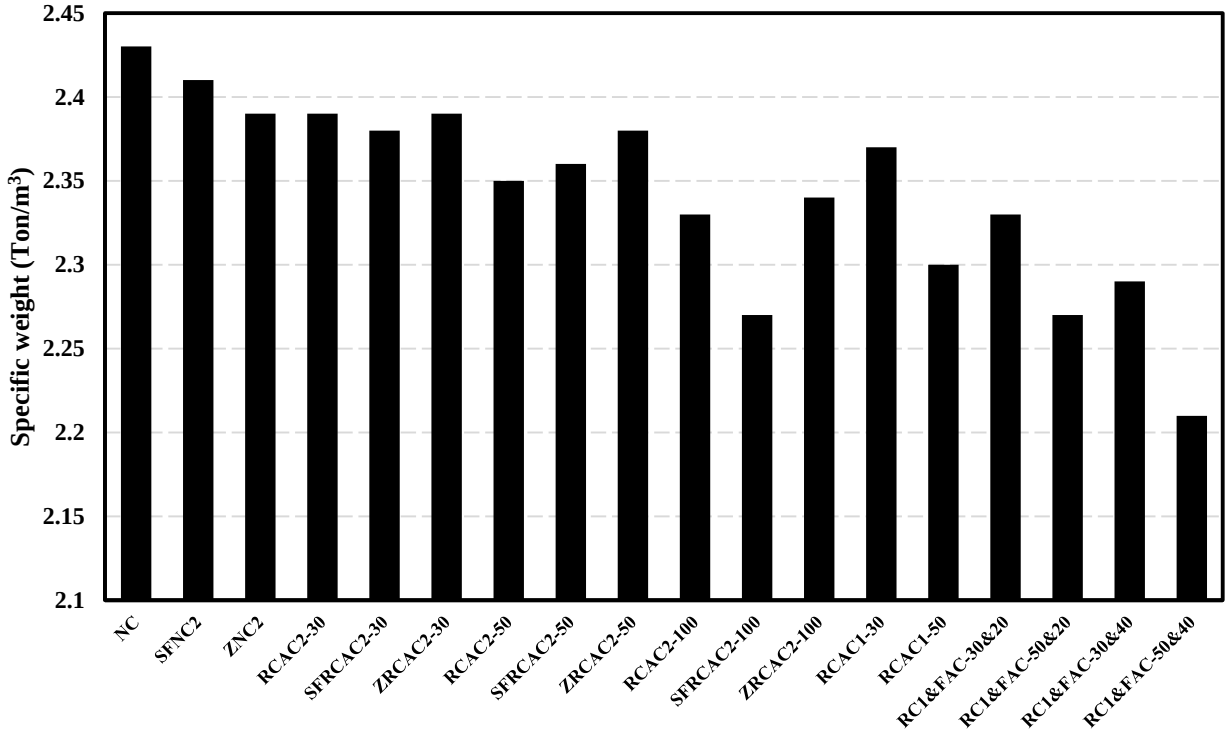

Fig. 2. The results of Specific weight (Ton/m^3)

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۳. نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین درصد جذب آب (٪)

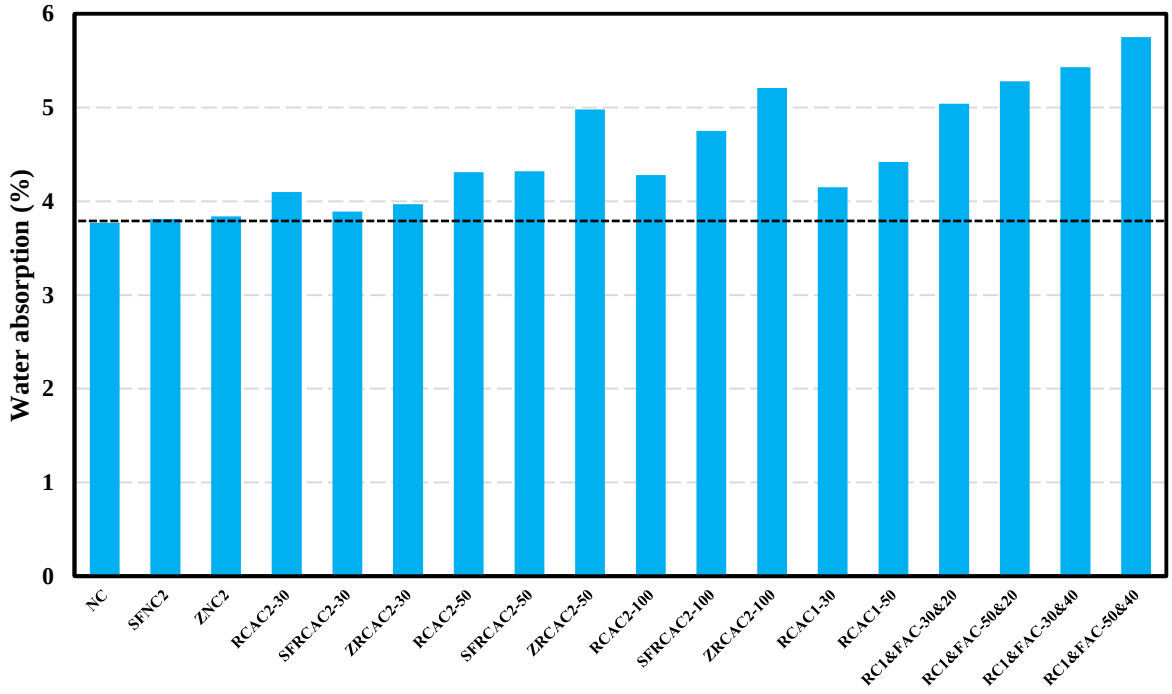

Fig. 3. The results of Water absorption coefficient (%)

شکل ٤. نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سن های ۷ و ۲۸ روزه (MPa)

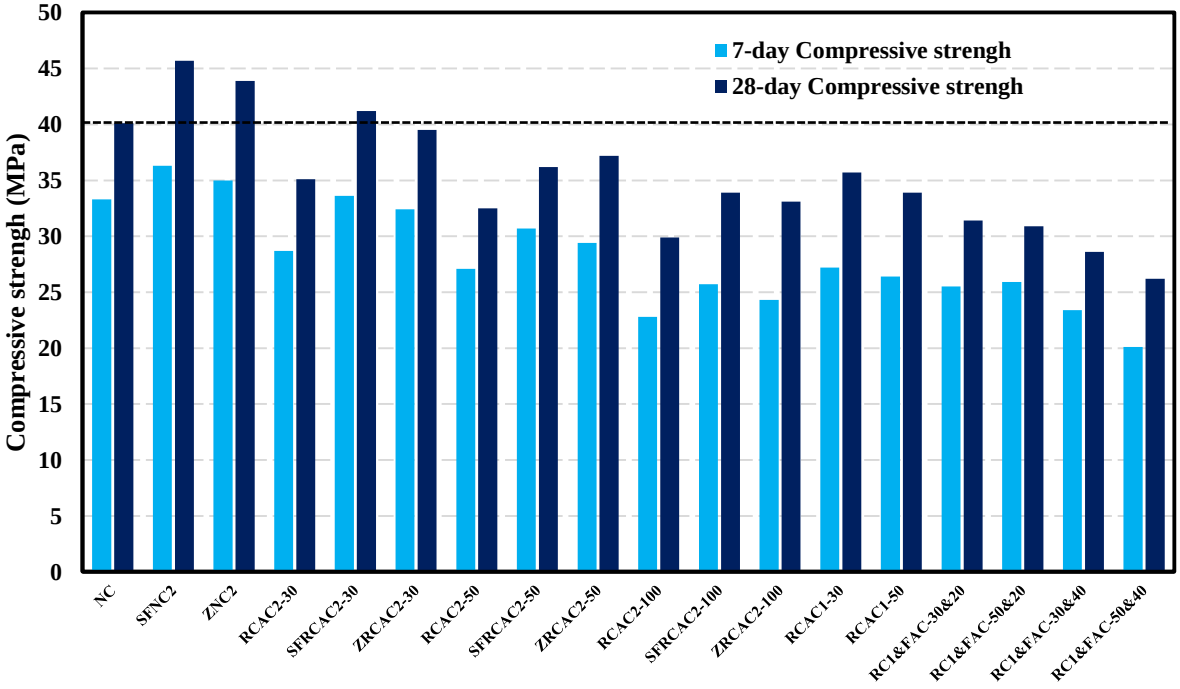

Fig. 4. Results of compressive strength at 7 and 28 day ages (MPa)

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

میانگین نتایج حاصل از مقاومت کششی ۲۸ روزه در شکل (۵) آورده شده است. نتایج گروه اول نشان می‌دهد که با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه بازیافتی بتنی، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در نسبت‌های جایگزینی ۳۰٪ و ۵۰٪ شن طبیعی

www.SID.ir

Archive of SID

با شن بازیافتی بتنی، مقاومت کششی ۱۵٪ و ۲۰٪ نسبت به طرح شاهد (NC) کاهش یافته است. اما باید قید نمود که ماسه بازیافتی بتنی نسبت به شن بازیافتی بتنی مقاومت کششی را بیشتر کاهش می‌دهد، به‌طوری که در طرح RC1&FAC-50&40 مقاومت کششی حدوداً ۱۶٪ نسبت به طرح RC1&FAC-50&20، حدوداً ۲۵٪ نسبت به طرح RCAC1-50 و ٤۰٪ نیز نسبت به طرح NC کاهش داشته است. از سوی دیگر با مقایسه طرح‌های RCAC1-30 و RCAC1-50 باید بیان کرد که طرح RCAC1-30 به میزان ٦٪ مقاومت کششی بیشتری نسبت به طرح RCAC1-50 دارد.

نتایج گروه دوم نیز نشان داد که جایگزینی قسمتی از سیمان پرتلند با مواد جایگزین سیمان تاحدودی مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد (به غیر از طرح ZNC2). مقاومت کششی ۲۸ روزه با جایگزینی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بتنی (CRCA-2) به ترتیب ۱۱٪، ۱۷٪ و ٤۵٪ نسبت به طرح شاهد کاهش یافت. در خصوص کاربرد زئولیت باید عنوان نمود که زئولیت در نسبت‌های جایگزینی بالاتر تأثیر بیشتری در بهبود مقاومت کششی می‌گذارد، به‌طوری‌که در نسبت جایگزینی ۰٪، حدوداً ۳٪ مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به طرح شاهد کاهش یافته است، اما در نسبت جایگزینی ۱۰۰٪ حدوداً ۳٤٪ مقاومت کششی ۲۸ روزه افزایش یافته است. این پدیده را می‌توان به بهبود در ناحیه انتقال با کاربرد زئولیت نسبت داد. هرچه کیفیت ناحیه انتقال بیشتر شود، مقاومت مکانیکی بتن بازیافتی نیز بیشتر می‌شود. از طرفی کاربرد ۸٪ میکروسیلیس به‌طور متوسط مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه را به‌ترتیب به مقدار ۲/۷٪ و ۳/۲٪ نسبت به کاربرد ۱۵٪ زئولیت بیشتر افزایش داده است.

با مقایسه طرح‌های NC، SFRCAC2-30 و ZRCAC2-30 می‌توان مشاهده کرد که در سن ۲۸ روزه طرح‌های SFRCAC2-30 و ZRCAC2-30 به ترتیب ۱۱٪ و ۹٪ مقاومت کششی کمتری نسبت به طرح NC دارند. با مقایسه نتایج مشابه برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌توان بیان کرد که درصورتی که فقط عملکرد مکانیکی از سازه بتنی مد نظر باشد، با درنظرگیری ملاحظاتی (ضریب اطمینان) می‌توان طرح SFRCAC2-30 یا ZRCAC2-30 را جایگزین طرح شاهد (NC) نمود.

۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نتایج حاصل از مقاومت خمشی ۲۸ روزه در شکل (٦) نشان داده شده است. نتایج گروه اول نشان می‌دهد که مانند سایر نتایج مقاومت مکانیکی، در این آزمایش نیز با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه بازیافتی بتنی، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین مقاومت خمشی طرح‌های RC1&FAC-30&20 و RC1&FAC-30&40 وجود ندارد. به عبارت دیگر در نسبت جایگزینی ۳۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی، جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی تا ٤۰٪ تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت خمشی نخواهد داشت. همچنین در نسبت جایگزینی ۵۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بتنی، مقاومت خمشی حدوداً ٤٪ با افزایش نسبت جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی بتنی از ۲۰٪ به ٤۰٪ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که در کاربردهای عملی و با اعمال ضریب اطمینان قابل قبول، استفاده از ٤۰٪ ماسه بازیافتی بجای ۲۰٪ ماسه بازیافتی تأثیر چندانی در مقاومت خمشی ایجاد نخواهد کرد. نتایج گروه دوم نیز نشان می‌دهد که کاربرد ۸٪ میکروسیلیس و یا ۱۵٪ زئولیت باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت خمشی شده است، به‌طوری که مقاومت خمشی طرح شاهد NC حدود ٤۳ و ۲۵٪ به ترتیب به ازای جایگزینی سیمان پرتلند با میکروسیلیس و زئولیت افزایش یافته است. این مقادیر برای بتن ساخته‌شده با ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی نسبت به طرح NC به ترتیب ۳۰٪ و ۱٤٪ است. به عبارت دیگر جایگزینی ۸٪ از سیمان پرتلند با میکروسیلیس و یا جایگزینی ۱۵٪ از سیمان پرتلند با زئولیت در طرح دارای ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، نه‌تنها کلیه آثار منفی کاربرد سنگدانه بازیافتی در بتن را برطرف نموده، بلکه نسبت به طرح شاهد بهبود قابل ملاحظه‌ای نیز در این پارامتر مقاومتی ایجاد کرده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۵. نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه (MPa)

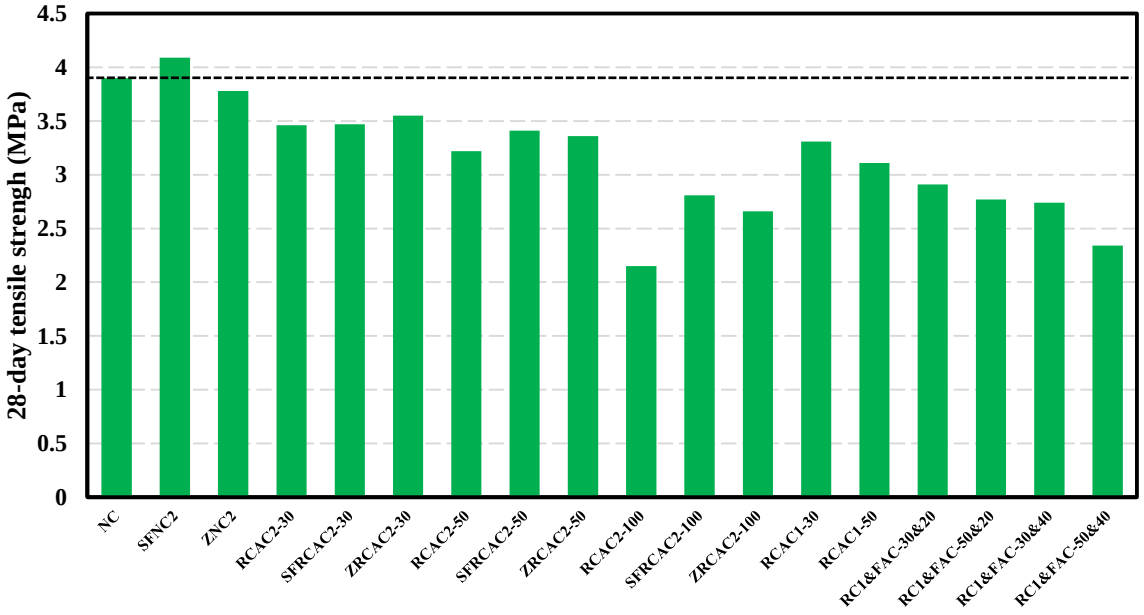

Fig. 5. Results of tensile strength at 28 day age (MPa)

شکل ٦. نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه (MPa)

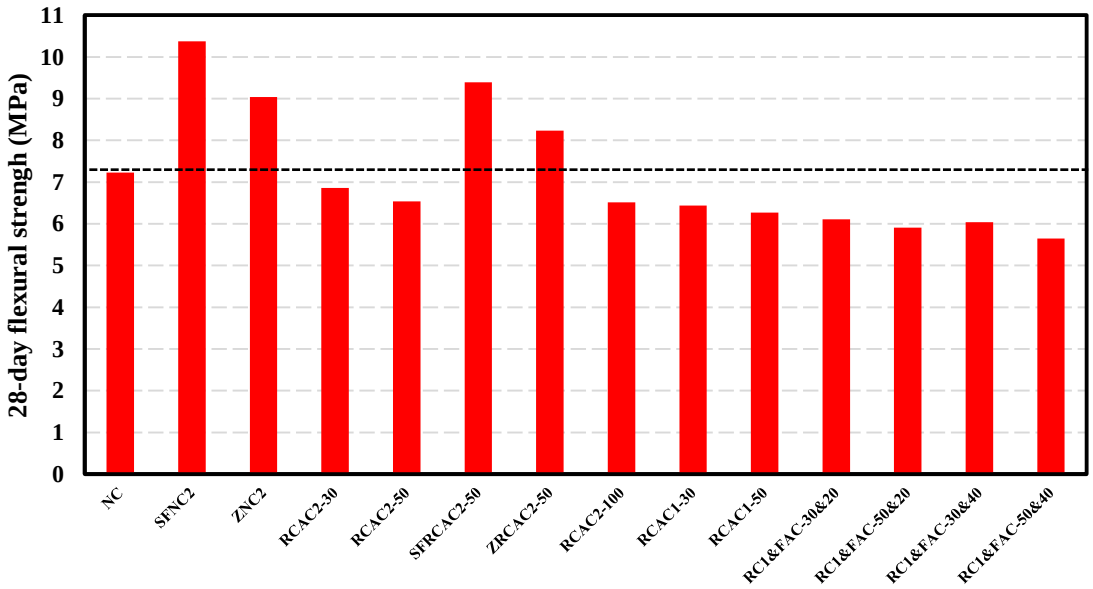

Fig. 6. Results of flexural strength at 28 day age (MPa)

٤- تحلیل نتایج و بررسی همبستگی‌ها

در این قسمت همبستگی بین نتایج گرفته شده در این پژوهش بررسی و همچنین با روابط مشابه برای بتن‌های بازیافتی و معمولی مقایسه شده‌اند [7-9]. در بین روابط معروف همبستگی بین پارامترهای مختلف رفتاری بتن های بازیافتی، پژوهش‌های ژیائو و همکاران[1] [7] و کوو و پوون[2] [8] از جامعیت بیشتری برخوردار هستند. ژیائو و همکاران در پژوهش خود در گام اول نتایج بیش از ۱۲۰۰ تست مختلف روی نمونه‌های بتن بازیافتی در پژوهش‌های پیش از خود را بررسی کردند و در نهایت با انتخاب ۵۲۸ داده موجود به بررسی همبستگی‌های بین پارامترهای مختلف رفتاری بتن بازیافتی پرداختند.

1 Xiao et al

2 Kou and Poon

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. روابط همبستگی‌های بین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی

References	Correlation between				
	Specific weight & Water absorption (%)	Specific weight & 28-day compressive strength	Water absorption (%) & 28-day compressive strength	28-day compressive strength & 28-day tensile strength	28-day compressive strength & 28-day flexural strength
This Study	WA = -8.3115 (SW) + 24.03 R^2 = 0.56	$F'c = 0.0003\ (SW)^2 - 1.1146x + 1241.7$ R^2 = 0.70	$F'c = -5.1023\ (WA) + 57.456$ R^2 = 0.55	$F_{st} = 0.52\ (F'c)^{0.5}$ R^2 = 0.69	$F_f = 1.177\ (F'c)^{0.5}$ R^2= 0.51
ACI 318-2 [9]	-	-	-	$F_{st} = 0.49\ (F'c)^{0.5}$ R^2= 1.00	$F_f = 0.54\ (F'c)^{0.5}$ R^2= 1.00
Xiao et al [7]	-	$F'c = 0.069\ (SW) - 116.1$ R= 0.92	-	$F_{st} = 0.24\ (F'c)^{0.65}$ R= 0.87	$F_f = 0.75\ (F'c)^{0.5}$ R= 0.91
Kou and Poon [8]	-	-	-	$F_{st} = 0.0931\ (F'c)^{0.8842}$ R^2 = 0.8656	-

Table 4. The correlations between different physical and mechanical properties

داده‌های انتخاب شده دارای شرایط مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مکعبی) ۱۵ تا ۵۵ MPa، شرایط عمل آوری استاندارد، نسبت آب به سیمان ۰/۳ تا ۱/۲، مقدار سیمان ۹۰ تا ۵۵۰ Kg/m^3، شن‌های بازیافتی بتنی با درصد جایگزینی ۱۰٪ تا ۱۰۰٪، درصد ماسه بازیافتی و پوزولان ۰٪ و مقدار نخاله بنایی موجود در سنگدانه‌های بازیافتی بین ۰ تا ۵٪ بودند [7]. آن‌ها در پژوهش خود برای بررسی همبستگی بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، داده‌های ١٤ پژوهش مستقل و برای بررسی همبستگی بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری، داده‌های ١١ پژوهش مستقل را بررسی کردند. در جدول (٤) همبستگی‌های به‌دست آمده در پژوهش ژیائو و همکاران نشان داده شده است. در پژوهشی دیگر کوو و پوون [8] روی رفتار مکانیکی بلند مدت (تا ۵ سال) بتن ساخته شده با شن بازیافتی (در نسبت‌های جایگزینی ۲۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪) پژوهش‌هایی انجام دادند. آن‌ها با استناد به نتایج خود (بیش از ٦٠ داده مأخوذه در طول ۵ سال) همبستگی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی را بررسی کردند. رابطه این همبستگی در جدول (٤) نشان داده شده است.

در پایان نیز به منظور مقایسه روابط به دست آمده در این پژوهش با روابط موجود برای بتن‌های معمولی، روابط موجود در آیین‌نامه ACI 318-2 [9] برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی و همچنین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مورد استفاده قرار گرفتند. این روابط در جدول (٤) نشان داده شده است.

۴-۱- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های جذب آب و چگالی بتن بازیافتی

همبستگی بین نتایج درصد جذب آب و چگالی بتن‌های بازیافتی در شکل (۷) و جدول (٤) آورده‌شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت این دو مشخصه بایکدیگر ارتباط عکس دارند. به عبارت دیگر با افزایش درصد جذب آب بتن، چگالی کاهش می‌یابد. بهترین رابطه همبستگی بین این دو پارامتر به صورت خطی تعیین شد. اگرچه باتوجه به ضریب همبستگی ۰/٥٦ می‌توان بیان کرد که تعیین این مشخصه‌ها با استفاده از رابطه به‌دست آمده ممکن است به نتایج قابل قبولی ختم نشود.

۴-۲- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه و درصد جذب آب

در شکل (۸) و جدول (٤) همبستگی بین نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه و درصد جذب آب نشان داده‌شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مجموعاً با افزایش درصد جذب آب بتن‌های بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این همبستگی به صورت خطی دارای بهترین ضریب همبستگی بود. اگرچه با این وجود نیز رابطه مذکور همچنان از ضریب همبستگی بالایی برخوردار نیست و استفاده از آن ممکن است به نتایج قابل قبولی منجر نشود.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۳- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های چگالی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

در شکل (۹) نیز همبستگی بین نتایج آزمایش‌های چگالی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های بازیافتی نشان داده‌شده است. در این همبستگی همچنین رابطه به‌دست آمده در پژوهش ژیائو و همکاران [7] آورده‌شده است. ژیائو و همکاران توانستند بین چگالی بتن بازیافتی و مقاومت فشاری رابطه‌ای خطی برقرار کنند. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود رابطه به دست آمده در این پژوهش برخلاف همبستگی ژیائو و همکاران، رابطه‌ای درجه دوم است. همچنین کاملاً گویاست که رابطه این پژوهش نسبت به رابطه ژیائو و ژانگ تخمین کمتری برای مقاومت فشاری به ازای مقدار مشخصی چگالی ارائه می‌کند.

۴-۴- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

در شکل (۱۰) و جدول (٤) همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آورده شده است. در این شکل رابطه پژوهش ژیائو و همکاران [7]، رابطه پژوهش کوو و پوون [8] و رابطه استاندارد ACI 318 [9] نیز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود می‌توان دریافت که رابطه این پژوهش تخمین بزرگتری برای مقاومت کششی به ازای مقدار مشخصی مقاومت فشاری نسبت به رابطه ژیائو و همکاران، کوو و پوون و رابطه ACI 318 ارائه می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین دلایل تغییر در رفتار رابطه به‌دست آمده در پژوهش حاضر نسبت به رابطه ژیائو و همکاران را می‌توان مشارکت طرح‌هایی دانست که در آن‌ها از مواد جایگزین سیمان استفاده شده است و یا دارای درصد مشخصی ماسه بازیافتی هستند.

شکل ۷. همبستگی بین نتایج درصد جذب آب (WA%) و چگالی (SW) بتن‌های بازیافتی

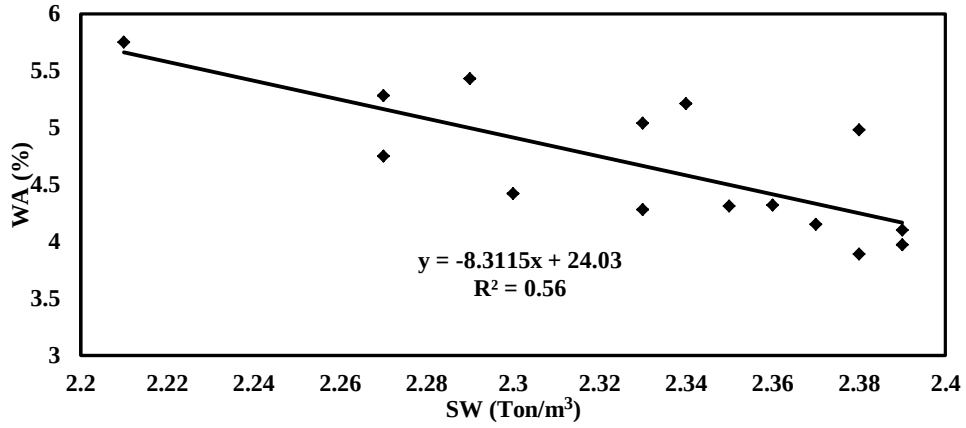

Fig. 7. The correlation between water absorption coefficient and specific weight

شکل ۸ همبستگی بین نتایج درصد جذب آب (WA%) و مقاومت فشاری (F'c) بتن‌های بازیافتی

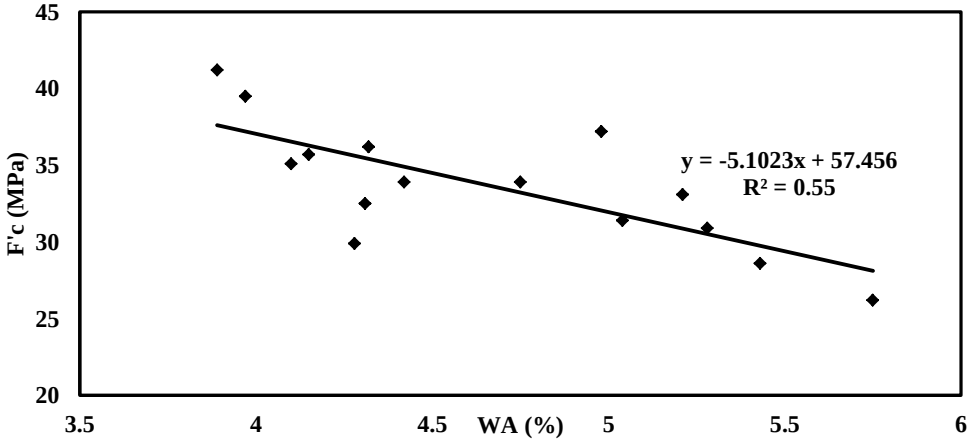

Fig. 8. The correlation between water absorption coefficient and 28-day compressive strength

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۹. همبستگی بین نتایج چگالی (SW) و مقاومت فشاری (F'c) بتن‌های بازیافتی

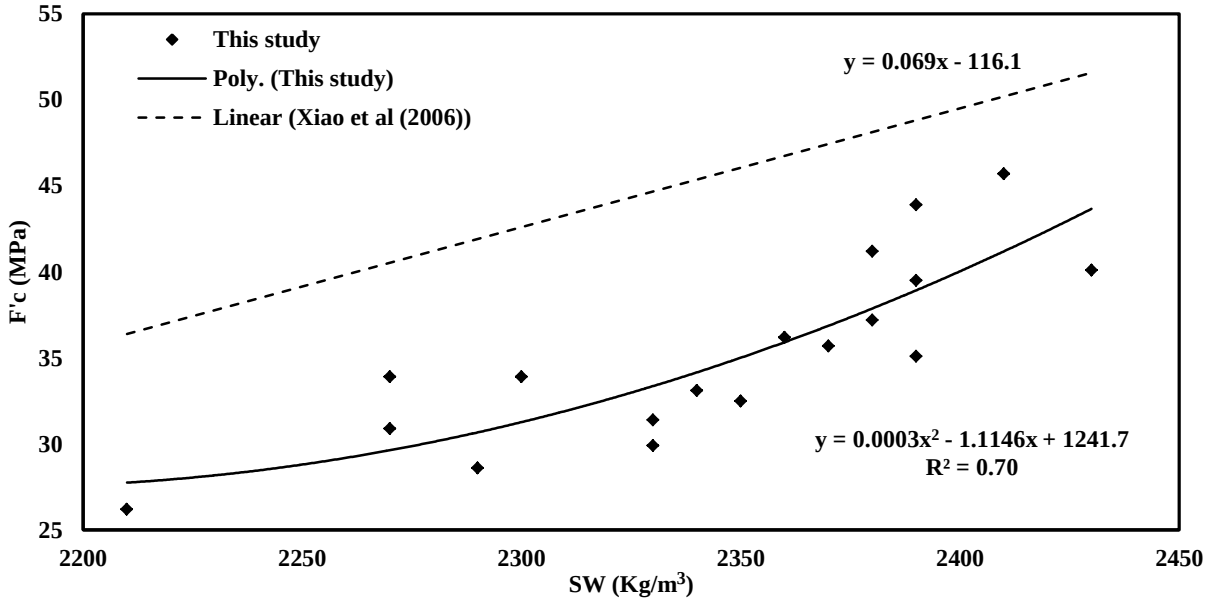

Fig. 9. The correlation between specific weight and 28-day compressive strength

شکل ۱۰. همبستگی بین نتایج مقاومت فشاری (F'_c) و مقاومت کششی (F_{st}) بتن‌های بازیافتی

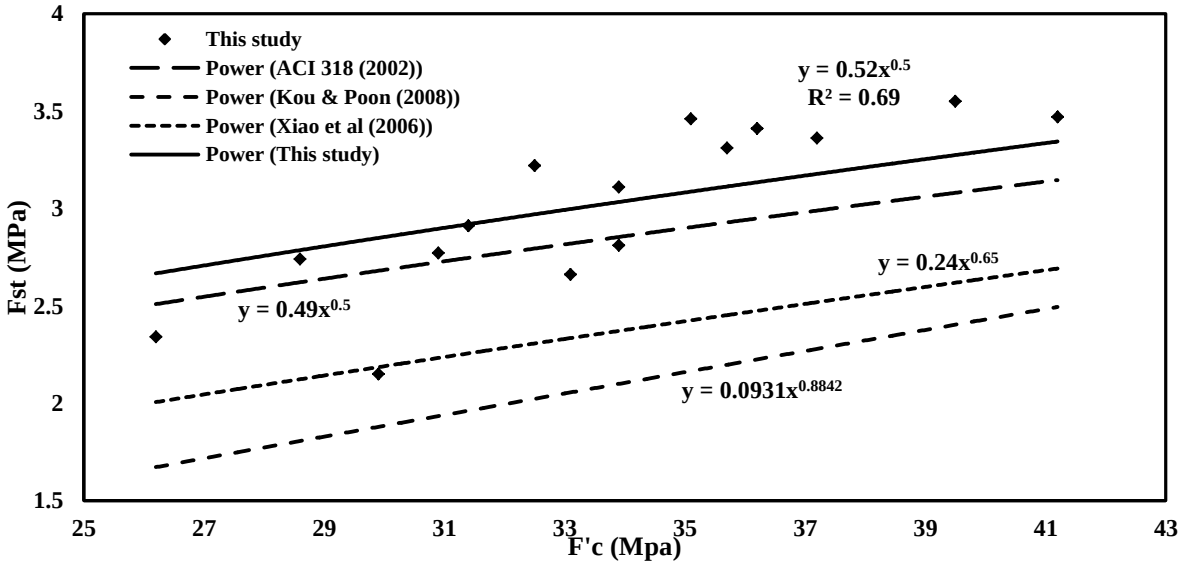

Fig. 10. The correlation between 28-day compressive strength and 28-day tensile

۴-۵- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

در شکل (۱۱) و جدول (٤) همبستگی بین نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داده شده است. در این شکل رابطه استاندارد ACI 318 [9] و رابطه ژیائو و همکاران [7] نیز نشان داده‌شده است. رابطه به دست آمده در این پژوهش تخمین بزرگتری نسبت به سایر روابط مذکور ارائه می‌دهد. اگرچه ضریب همبستگی این رابطه (R^2=0.51) عملاً بیان می‌کند که در صورت استفاده از رابطه موجود ممکن است نتایج قابل قبولی به‌دست نیاید.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۱. همبستگی بین نتایج مقاومت فشاری (F'_c) و مقاومت خمشی (F_f) بتن‌های بازیافتی

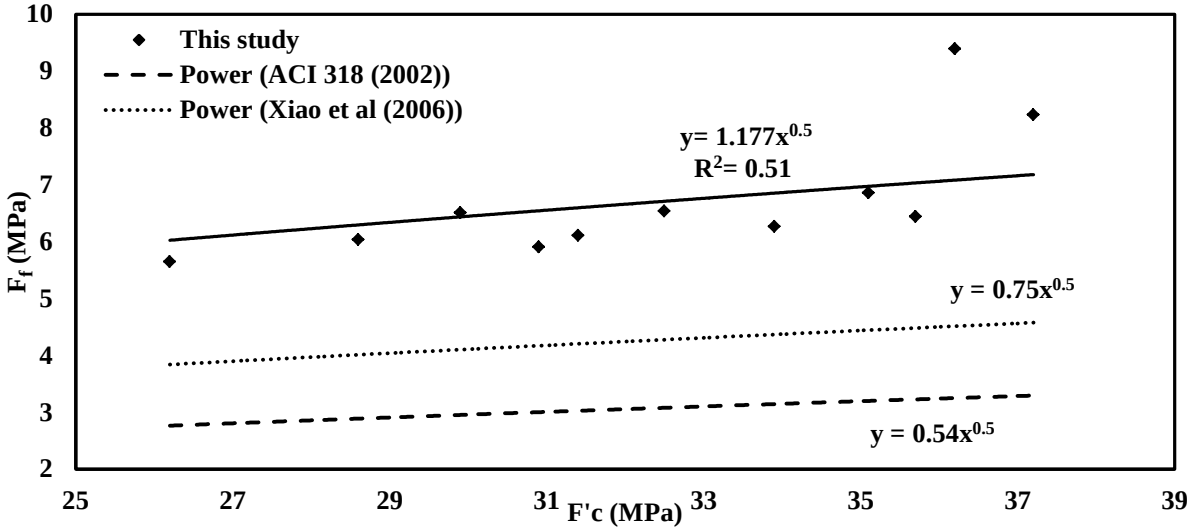

Fig. 11. The correlation between 28-day compressive strength and 28-day flexural strength

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله همبستگی بین پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده با سنگدانه بازیافتی بتنی تحقیق و بررسی شد. برپایه آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر ارائه می‌شود:

- جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی منجر به افت مقاومت‌های مکانیکی و همچنین افزایش درصد جذب آب بتن می‌شود. مجموعاً ماسه بازیافتی بتنی اثر منفی بیشتری روی رفتار مکانیکی بتن بازیافتی نسبت به شن بازیافتی بتنی دارد. در این بین کاربرد مواد جایگزین سیمان مانند ۸٪ میکروسیلیس و یا ۱۵٪ زئولیت تاحدودی رفتار مکانیکی بتن‌های بازیافتی را بهبود بخشید، به گونه‌ای که در نسبت جایگزینی ۳۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی که با ۸٪ میکروسیلیس یا ۱۵٪ زئولیت ساخته‌شده بودند، عملاً تفاوت قابل ملاحظه‌ای با طرح شاهد نداشتند.
- روابط به‌دست آمده در این پژوهش با روابط مشابه برای بتن‌های معمولی و بتن‌های بازیافتی تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشت. علت این تفاوت را می‌توان پراکندگی بازه تغییر کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و همچنین کاربرد ماسه بازیافتی و پوزولان در ترکیب طرح اختلاط‌های این پژوهش دانست. اگرچه برای همبستگی بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری می‌توان با تقریب قابل قبولی از رابطه ACI 318 استفاده نمود. هرچند رابطه ACI 318 تاحدودی تخمین کمتری را برای مقاومت کششی به ازای مقدار معینی مقاومت فشاری ارئه می‌دهد. در خصوص همبستگی بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری نیز باید عنوان نمود که رابطه به‌دست آمده در این پژوهش نسبت به روابط موجود قبلی برای بتن‌های بازیافتی و همچنین رابطه موجود برای بتن‌های معمولی، تخمین بسیار بزرگتری را برای مقاومت خمشی به ازای مقدار معینی مقاومت فشاری ارائه می‌کند. توصیه می‌شود از روابط ACI 318 برای تخمین رفتار مکانیکی بتن بازیافتی استفاده نشود و با انجام آزمایشات مکانیکی برای هر پروژه روابط مورد نظر استخراج شود.

٦- منابع References

[1] Meyer C (2009). The greening of the concrete industry. Cement Concr Compos 31(8):601–605

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

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

[4] Eurostat (2008) Waste statistics, European commission.http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics explained. Accessed 2017.

[5] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with

www.SID.ir

Archive of SID

contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, *23*(11), 3382-3387.
[6] Poon CS, Kou SC, Lam L (2007) Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. Mater Struct 40(9):981–986
[7] Xiao JZ, Li JB, Zhang C (2006) On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview. Mater Struct 39(6):655–664
[8] Kou S, Poon C (2008) Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. Mag Concr Res 61(1):57–64
[9] American Concrete Institute. ACI Committee 318. (2002). Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. ACI, Detroit, ACI 318-02/318R
[10] ASTM C 192. "*Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory". West Conshohocken (PA): ASTM International* (2010).
[11] Casuccio, M. Torrijos, M. C. Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure mechanism of recycled aggregate concrete". *Constr Build Mater*, *22*(7), 1500-1506 (2008).
[12] 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).
[13] ASTM C 642. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete". *ASTM International* (2012).
[14] EN BS 12390-3. "Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens". *British Standard Institution, London* (2009).
[15] ASTM C 496. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". *ASTM International* (2010).
[16] ASTM C 293. *"Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Centre-Point Loading". ASTM International, West Conshohocken* (2012).

www.SID.ir

Archive of SID

Investigation on the Correlations Between Different Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate

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

1. MSc. Graduated, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, P.O. Box: 11155-4563,
2. Assistant Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran,

Abstract

In the last few years, increase in construction rate has caused several new challenges, including waste storage problems, environmental pollution problems, excessive mining of natural resources, and shortage in sand and gravels sources. One way to address these problems and reduce the negative environmental impacts is reusing concrete waste as a new material in construction. Concrete waste could be crushed, graded, and used as aggregate, referred to as recycled concrete aggregate (RCA), in producing new concrete. There is a common agreement that recycled aggregate concrete (RAC) has inferior properties compared to natural aggregate. Nevertheless, structural usage of RAC has been growing in the last decade. However, due to different engineering properties of RCAs compared to natural aggregates (NA), it seems that the existing correlations between different mechanical properties for normal concrete cannot be used for RACs. This research focused on this topic with the aim of finding suitable correlations between different parameters such as water absorption coefficient, compressive strength, tensile strength, and flexural strength for RACs. In this research, two different types of coarse recycled concrete aggregates [CRCA-1 and CRCA-2] and one type of fine recycled concrete aggregate [FRCA] were considered. Also, for improving the mechanical properties of RACs, two types of supplementary cementitious materials (SCMs), namely 8% silica fume and 15% zeolite were used. A total of 18 concrete mixes were considered and various physical and mechanical tests were conducted on concrete samples made according to the designated mix designs. Concrete mixes were categorized in two different groups. In the first group, both FRCA and CRCA-1 were used. As for the second group, 11 mixes were considered in order to investigate the effect of SCMs on the mechanical properties of RACs. Correlations between results of water absorption coefficient, compressive strength, tensile strength, and flexural strength were investigated and compared to those for normal concretes. The results showed that substitution of NA with CRCA resulted in inferior mechanical properties of concrete. It is worth to note that FRCA had a more significant impact on the mechanical properties of concrete compared with CRCA-1. Also, utilization of 8% silica fume or 15% zeolite as a SCM had a positive effect on the mechanical properties of RACs, such that mixes containing 30% CRCA-2 and 8% silica fume or 15% zeolite had similar 28-day compressive strength to the reference mix. On the other hand, the results showed that existing correlations for normal concrete cannot be used for RACs due to different behavior of RACs compared to normal concrete. The correlation between 28-day tensile strength and 28-day compressive strength for RACs had a bigger coefficient (0.52) compared to normal concrete (0.49). As well correlation between 28-day flexural strength and 28-day compressive strength for RACs in the chosen range of compressive strength (22-43 MPa) overestimated the flexural strength compared to ACI 318's. On the basis of this research, using the equations proposed by ACI 318 for estimating the mechanical properties of RACs is not recommended, and leads to misleading results.

Keywords: Recycled concrete aggregate; SCMs; Correlation; Mechanical properties.

www.SID.ir