

## مشخصات مکانیکی بتن حاوی سنگدانه درشت دانه بتن بازیافتی و میکروسیلیس

محمد رضا آقا باقری<sup>۱</sup>، مهدی آرزومندی<sup>۲</sup>، امیر حسین عموحسینی<sup>۱</sup>، مجتبی کریمائی طبرستانی<sup>۳\*</sup>، هادی علیزاده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهبا دانش، قم، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهبا دانش، قم، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۴- مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهبا دانش، قم، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر توسعه فناوری بتن این امکان را فراهم نموده تا بتوان بتن‌های توانمندی تولید نمود که کارایی و مقاومت آن فراتر از بتن معمولی باشد. امروزه استفاده از مواد بازیافتی و پوزولان‌ها در راستای کاهش هزینه‌های جاری و همچنین کاهش مشکلات زیست محیطی به یکی از مباحث مورد علاقه اکثر محققین تبدیل شده است. در این پژوهش امکان استفاده از میکروسیلیس و همچنین بتن بازیافتی به عنوان سنگدانه بازیافتی در بتن مطالعه شده است. برای این منظور از ۶ طرح اختلاط استفاده گردید و نقش جایگزینی درصد‌های مختلف سنگدانه بازیافتی درشت دانه (۲۰ و ۵۰ درصد) در بتن همراه با ۶ درصد میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری و کششی بتن برای نمونه‌های بتن ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، بتن حاوی سنگدانه درشت دانه بتن بازیافتی و میکروسیلیس مقاومت فشاری و کششی بهتری نسبت به بتن شاهد نشان دادند. به عنوان نمونه مقاومت فشاری بتن حاوی ۶ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی در سن ۵۶ روز در مقایسه با بتن مرجع ۱۴ درصد افزایش می‌یابد در حالیکه با افزایش درصد سنگدانه بتن بازیافتی به میزان ۵۰ درصد، این پارامتر به میزان ۴ درصد افزایش می‌یابد که این موضوع تاثیر معکوس افزایش میزان سنگدانه بتن بازیافتی بر مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. در نهایت نتایج حاصل از آزمایشات تحقیق حاضر با روابط آیین‌نامه ای و تجربی مختلف و همچنین داده‌های آزمایشگاهی محققین قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: بتن، سنگدانه بازیافتی، بتن بازیافتی، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، کاهش مشکلات زیست محیطی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.119220.1466	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.119220.1466	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۳	۱۳۹۶/۱۱/۲۶
مجتبی کریمائی طبرستانی			*نویسنده مسئول:		
Karimaei@srutu.edu			پست الکترونیکی:		

# Mechanical Properties of Concrete with Silica Fume and Coarse Recycled Aggregate Concrete

Aghabagheri, M.<sup>1</sup>, Arezoumandi, M.<sup>2</sup>, Amoohosseini, A.<sup>1</sup>, Karimaei Tabarestani, M.<sup>3\*</sup> and Alizadeh, H.<sup>4</sup>

1- M. Sc. Student of Shahab danesh University, Qom, Iran.

2- Assistant Professor of civil engineering, Shahab danesh University, Qom, Iran.

3- Assistant Professor of civil engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

4- Instructor of civil engineering, Shahab danesh University, Qom, Iran.

## ABSTRACT

Recently, there has been an increasing trend toward the use of sustainable materials. Sustainability helps the environment by reducing the consumption of non-renewable natural resources. Concrete – the second most consumed material in the world after water – uses a significant amount of non-renewable resources. As a result, an experimental investigation was conducted to study the hardened properties of concrete constructed with 20% and 50% recycled concrete aggregate (RCA) (coarse) as well as 6% silica fume. This experimental program consisted of six mix designs. Experimental results showed that the compressive and tensile strength of concrete improve by using recycled concrete aggregate (RCA) (coarse) and silica fume in the mix design. For example, the compressive strength of concrete containing 6% silica fume and 20% recycled concrete aggregate at age of 56 days was 14% greater than reference concrete mix, while with increasing percentage of recovered concrete aggregate by 50%, this parameter increased by only 4% which shows the inverse effect of increasing the amount of recovered concrete aggregate on compressive strength. The hardened properties of concrete were compared with the provisions of the international design codes (U.S., Australia, Canada, Europe, and Japan) as well as a database of conventional concrete. Results showed that the RCA has superior hardened properties compared with the reference concrete mix.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 February 2018

**Revise Date:** 04 July 2018

**Accept Date:** 07 August 2018

## Keywords:

Recycled Concrete Aggregate  
Conventional Concrete  
Hardened Properties  
Experimental Study  
Decreasing environmental  
hazards

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.119220.1466

\*Corresponding author: Mojtaba Karimaei Tabarestani

Email address: Karimaei@srttu.edu

## ۱- مقدمه

بتن امروزه یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی جهان است. بررسی آمار و ارقام استفاده از این مصالح ساختمانی در دنیا نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۶ بیش از ۳۰ میلیارد تن از آن تولید و در سازه‌های مختلف به کار گرفته شده در حالی که در سال ۱۹۵۰ تنها دو میلیارد تن بتن در دنیا استفاده شده است. [۱] به دلیل همین گستردگی مصرف، بسیاری از کارشناسان و محققان به دنبال این هستند که علاوه بر افزایش مقاومت، دوام و کارایی آن، شرایطی را فراهم کنند تا این مصالح ساختمانی به نوعی حافظ محیط زیست نیز باشد که یکی از راهکارها در این بخش جایگزینی و افزودن مواد پوزولانی (درصدی خاکستر بادی یا میکروسیلیس به جای سیمان) و همچنین استفاده از مصالح ساختمانی ضایعاتی حاصل از تخریب ساختمان‌های فرسوده است.

خاکستر بادی به عنوان یک ماده پوزولانی مکمل مواد سیمانی در تولیداتی همچون بتن به کار گرفته می‌شود. زمانی که یک ماده مکمل مواد سیمانی به صورت یک ترکیب با سیمان پرتلند به کار گرفته می‌شود در نهایت در بتن سخت شده مشخصات متفاوتی را برای بتن ایجاد می‌کند. آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-14) استفاده از حداکثر ۲۵ درصد خاکستر بادی در بتن‌های سازه‌ای را مجاز می‌داند. [۲] البته در کشور ما به دلیل اینکه این محصول به طور بومی تولید نشده و وارداتی است، قیمت تمام شده زیادی نسبت به سیمان داشته و به همین خاطر استفاده از آن بسیار ناچیز است. یکی از پوزولان‌هایی که در ایران به آسانی قابل دسترسی است میکروسیلیس می‌باشد. میکروسیلیس یک محصول فرعی بسیار ریز از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس می‌باشد [۳] و برای استفاده به عنوان یک ماده سیمانی در بتن بسیار مناسب است و با استاندارد ASTM C1240-11 مطابقت دارد. [۴]

افزایش مقاومت به مرور زمان بر اساس تداوم آبیگری سیمان و کاهش درصد تخلخل و فضای خالی بین مواد متشکله در مرحله ایجاد چسبندگی از مزایای این ماده می‌باشد و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت فشاری، الکتریکی، خمشی و کششی بتن، افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش، کاهش قابل توجه نفوذپذیری، جلوگیری از نفوذ یون کلر، سولفات‌ها و سایر مواد شیمیایی مخرب به داخل بتن می‌گردد. میکروسیلیس معمولاً با نسبت ۵ تا ۱۰ درصد وزن سیمان در بتن جایگزین سیمان می‌شود. [۵ تا ۱۳]

با توجه به اینکه خاکستر بادی در کشور ما به طور عمده تولید نشده و محصولی وارداتی است به همین خاطر دسترسی به میکروسیلیس با توجه به تولید در دو کارخانه ازنا و سمنان سهل‌تر بوده و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. از طرف دیگر میلیون‌ها تن ضایعات ساختمانی روزانه در سرتاسر دنیا تولید و در محیط زیست رها می‌شود که هم منظر زیستی را تخریب کرده و هم موجب افزایش برداشت از منابع طبیعی می‌شود و با توجه به محدودیت منابع طبیعی یکی از راهکارها استفاده از ضایعات ساختمانی خصوصاً بتن بازیافتی به عنوان سنگدانه در امور ساختمانی است. استفاده از بتن بازیافتی دو مزیت دارد؛ اول اینکه استفاده از منابع طبیعی و هزینه‌های جانبی برای برداشت و حمل و نقل آن‌ها را کاهش می‌دهد و دوم اینکه دفع زباله‌های غیر ضروری از مواد با ارزش را کاهش می‌دهد.

چاندر (۲۰۰۴) [۱۴] در تحقیقاتی که بر روی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف سنگدانه بتن بازیافتی درشت‌دانه انجام داده، تاکید کرده است که مقاومت فشاری بتن حاصل در محدوده قابل قبول خواهد بود. بتن‌هایی که حاوی سنگدانه بتن بازیافتی هستند به نسبت بتن‌های حاوی سنگدانه معمولی برای دستیابی به کارایی مناسب، نیازمند آب بیشتری بوده و به همین خاطر کیفیت آن‌ها پایین‌تر آمده و به دنبال آن مقاومت کاهش می‌یابد. بررسی‌های این تحقیق نشان داد که اگر در نسبت آب به سیمان ثابت، مقدار سنگدانه بتن بازیافتی افزایش یابد مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن کاهش می‌یابد به طوری که اگر در بتنی به طور کامل از سنگدانه بتن بازیافتی درشت‌دانه استفاده شود، مقاومت فشاری آن نسبت به بتن معمولی بین ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بتن‌های با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال که سنگدانه درشت‌دانه بتن بازیافتی در آن‌ها استفاده شده است مقاومت فشاری و کششی قابل مقایسه‌ای با بتن معمولی دارند.

افزودن درصدی میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان در بتنی که حاوی سنگدانه بتن بازیافتی درشت‌دانه است می‌تواند مشخصات مکانیکی بتن را بهبود بخشد. مظلوم (۲۰۰۴) [۱۵] در تحقیقات خود نشان داد که با استفاده از میکروسیلیس در بتن برای

دستیابی به اسلامپ مناسب باید درصدی فوق روان کننده به بتن اضافه شود. وی همچنین در نتایج تحقیقات خود تاکید نمود که پس از سن ۹۰ روز با استفاده از میکروسیلیس شاهد افزایش مقاومت در بتن نخواهیم بود. مانیش ساینی (۲۰۱۶) [۱۶] در تحقیقات خود نشان داد که استفاده از سنگدانه بتن بازیافتی در بتن موجب کاهش مقاومت فشاری و همچنین افزایش سرعت کاهش مقاومت می شود. وی همچنین نشان داده که در صورت افزودن میکروسیلیس به این بتن ها در مقایسه با بتن معمولی، کاهش مقاومت فشاری، کمتر شده و در مجموع افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده است. وی همچنین آزمایشاتی نیز بر روی مقاومت کششی این بتن ها انجام داد که نتایج این آزمایشات نشان داد اگر چه مقاومت کششی بتن های حاوی سنگدانه بتن بازیافتی کاهش پیدا می کند اما این کاهش به نسبت مقاومت فشاری کمتر است به طوری که در صورت جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی به جای سنگدانه معمولی بدون افزودن میکروسیلیس حدود ۱۲ درصد مقاومت کششی کاهش یافته است. با افزودن ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس در ترکیبات بتن حاوی سنگدانه بتن بازیافتی، این محقق نتایج مشابه و حتی بهتر در مقاومت کششی به دست آورد. رامالینگا چاری (۲۰۱۷) [۱۷] هم در آزمایشاتی که بر روی بتن های حاوی سنگدانه بتن بازیافتی انجام داد، نتیجه گرفت که با افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان در این بتن ها مقاومت فشاری در حدود ۱۵ درصد افزایش می یابد. همچنین مقاومت کششی این بتن نیز بیش از ۴۳ درصد افزایش یافته است.

در تحقیق حاضر، با توجه به در دسترس بودن میکروسیلیس در کشور ایران و همچنین آمار بالای ضایعات ساختمانی بلااستفاده و اثر نامطلوب آن ها در تخریب محیط زیست، تلاش شده ترکیبی از بتن بازیافتی به عنوان سنگدانه درشت دانه و میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان در تولید بتن به کار گرفته شود و نتایج براساس استانداردهای روز دنیا و همچنین داده های آزمایشگاهی محققین مختلف مقایسه شده و مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

## ۲- برنامه آزمایشات

این تحقیق آزمایشگاهی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول مصالح آزمایش اعم از سنگدانه طبیعی، سنگدانه بتن بازیافتی، سیمان و میکروسیلیس انتخاب و مشخصات آن ها اعم از مشخصات فیزیکی و شیمیایی مشخص شد. در مرحله دوم نیز ۶ طرح اختلاط با عناوین زیر آماده سازی شد:

۱. نمونه شاهد با سنگدانه های طبیعی و فاقد میکروسیلیس NC

۲. نمونه شاهد با سنگدانه های طبیعی همراه با ۶ درصد میکروسیلیس SF

۳. نمونه با ۲۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی درشت دانه فاقد میکروسیلیس RC20

۴. نمونه با ۲۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی درشت دانه همراه با ۶ درصد میکروسیلیس RC20s

۵. نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی درشت دانه فاقد میکروسیلیس RC50s

۶. نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی درشت دانه همراه با ۶ درصد میکروسیلیس RC50s

برای هر طرح اختلاط ۲۲ نمونه استوانه ای به ابعاد  $100 \times 200$  میلی متر براساس استاندارد ACI 211.1-91 [۱۸] تولید و بر همین مبنا مشخصات مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفت.

### ۲-۱- مصالح آزمایش

سیمان: سیمان استفاده شده در این آزمایشات، از نوع پرتلند معمولی تیپ ۲ دلیجان طبق استاندارد ASTM C150-11 [۱۹] بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از شروع آزمایشات، سیمان تهیه و به صورت یکجا در محل آزمایشات، دپو شده است.

**افزودنی معدنی:** میکروسیلیس در این آزمایشات به عنوان افزودنی معدنی جایگزین درصدی از سیمان شده است. این میکروسیلیس در کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران براساس استاندارد ASTM C1240-11 [۴] تولید شده است که قبل از آزمایش تهیه و در مجاورت محل آزمایشات با اتخاذ تدابیر ویژه نگهداری شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی محصول در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و میکروسیلیس

ترکیبات شیمیایی (%) و فیزیکی	سیمان	میکروسیلیس
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۷	۹۳/۶
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۷	۱/۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۱	۰/۹
CaO	۶۳/۸	۰/۵
SO <sub>3</sub>	۲/۳	۰/۱
MgO	۱/۳	۱
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۴	۰/۳
K <sub>2</sub> O	۰/۶	۱
LOi	۲/۲	-
وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	۳۱۰۰	۲۲۰۰
بلین (cm <sup>2</sup> /g)	۳۰۸۰	-

**سنگدانه طبیعی:** سنگدانه طبیعی مورد استفاده در این آزمایش در فاز درشت‌دانه، شن با دانه بندی ۴/۷۵ الی ۱۹ میلیمتر از نوع شکسته کوهی معدن ونارچ قم است. بزرگ‌ترین بعد شن استفاده شده ۱۹ میلیمتر و چگالی آن ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین فاز ریزدانه سنگدانه استفاده شده، ماسه شسته رودخانه‌ای از معدن همایی شهر قم با دانه بندی ۰/۱۵ تا ۴/۷۵ میلیمتر بوده است. به این ترتیب بزرگ‌ترین بعد ماسه استفاده شده ۴/۷۵ میلیمتر و چگالی آن ۲۴۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب است. دانه بندی سنگدانه طبیعی استفاده شده براساس استاندارد ASTM C29-11 [۲۰] است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی در جدول ۲ آمده است.

**مصالح بازیافتی درشت‌دانه:** این مصالح تهیه شده از ضایعات آزمایشگاه‌های بتن شهر قم است که به صورت دستی شکسته شده است. دانه‌بندی این مصالح بازیافتی به طور کامل منطبق بر دانه‌بندی و مشخصات سنگدانه طبیعی (فاز درشت‌دانه) است. در جدول ۲ مشخصات مصالح بازیافتی ارائه شده است.

**ابر روان‌کننده:** ابر روان کننده استفاده شده در آزمایشات تحقیق حاضر از نوع پلی کربوکسیلات ساخت شرکت توسعه پایدار سلمان می‌باشد که براساس کارایی مد نظر بتن مورد استفاده قرار گرفته است.

**آب:** آب مورد استفاده در این آزمایشات نیز آب لوله کشی شهر قم بوده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه	درصد جذب آب	چگالی اشباع با سطح خشک (kg/m <sup>3</sup> )	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
ماسه طبیعی	۲/۱۹	۲۴۶۷	۴/۷۵
شن طبیعی	۰/۷	۲۷۰۰	۱۹
شن بازیافتی	۴/۷	۲۵۰۶	۱۹

## ۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های بتن مورد آزمایش در این تحقیق مطابق آئین‌نامه ACI 211.1-91 [۱۸] بوده است. جدول ۳ جزئیات طرح‌های اختلاط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه افزودن میکروسیلیس موجب کاهش کارایی بتن می‌شود برای جبران این مشکل و نزدیک شدن اسلامپ بتن‌های حاوی میکروسیلیس به اسلامپ بتن‌های دیگر از ابر روان‌کننده استفاده شده است.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن در تحقیق حاضر

شماره	نام طرح	سیمان (Kg.m <sup>3</sup> )	آب (Kg.m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (Kg.m <sup>3</sup> )	ابر روان کننده (Kg.m <sup>3</sup> )	ماسه طبیعی (Kg.m <sup>3</sup> )	شن (Kg.m <sup>3</sup> )	شن بازیافتی (Kg.m <sup>3</sup> )	اسلامپ (mm)	وزن مخصوص بتن تازه (Kg.m <sup>3</sup> )
۱	NC	۴۲۵	۲۰۵	۰	۰	۱۰۳۶	۶۹۰	۰	۹۱	۲۳۵۶
۲	SF	۴۰۰	۲۰۹	۲۶	۰/۸	۱۰۲۷	۶۸۷	۰	۹۵	۲۳۴۷
۳	RC20	۴۲۵	۲۲۳	۰	۰	۱۰۱۶	۵۴۸	۱۳۳	۱۲۲	۲۳۴۵
۴	RC20s	۴۰۰	۲۲۳	۲۶	۰/۹	۱۰۱۱	۵۴۵	۱۳۲	۱۲۸	۲۳۳۶
۵	RC50	۴۲۵	۲۲۴	۰	۰	۱۰۱۲	۳۳۹	۳۲۹	۸۰	۲۳۲۹
۶	RC50s	۴۰۰	۲۲۱	۲۶	۰/۹	۱۰۱۰	۳۳۷	۳۲۷	۱۱۵	۲۳۲۹

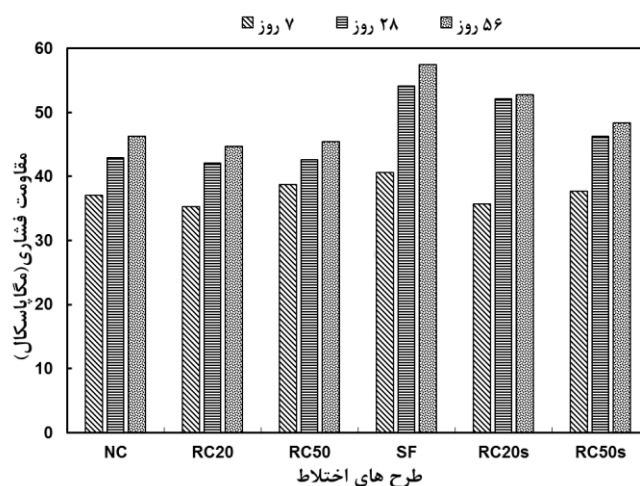
### ۳- تحلیل نتایج آزمایشات

جهت تعیین مشخصات مکانیکی بتن‌های جدول ۲، شامل مقاومت فشاری از آئین‌نامه ASTM C39-11 [۲۱] و مقاومت کششی از آئین‌نامه ASTM C496-11 [۲۲] استفاده شده است. نمونه‌های مورد آزمایش از نوع استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بوده و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد عملیات ساخت انجام شده است. قالب‌های بتن‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت باز شده و بلافاصله نمونه‌ها در حوضچه آب با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده است. سن بتن‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی ۷، ۲۸ و ۵۶ روز انتخاب شده است. در هر سن و برای هر آزمایش سه نمونه در نظر گرفته شد و میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی مد نظر قرار گرفته شد.

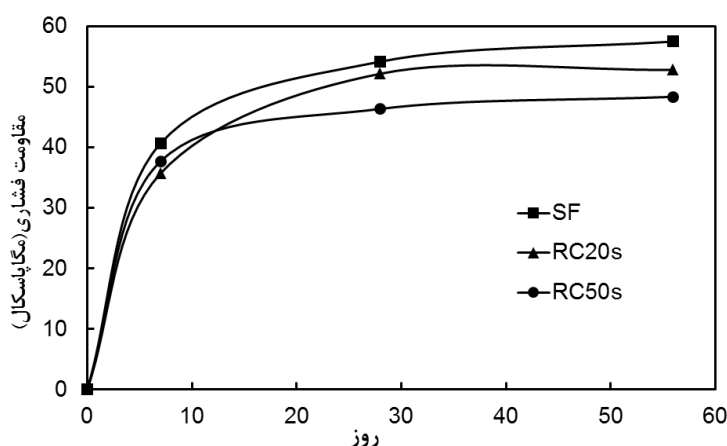
#### ۳-۱- مقاومت فشاری

همانگونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری بتن‌های دارای سنگدانه بتن بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع در تمامی سنین کاهش دارد. البته با افزایش سن، مقدار این کاهش مقاومت، کمتر می‌شود. بتن RC20 که حاوی ۲۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی می‌باشد در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز، به ترتیب دارای کاهش مقاومت فشاری ۴، ۱ و ۴ درصد، بتن RC50 که حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی می‌باشد در مقایسه با بتن مرجع به طور کلی با افزایش سن حدود ۲ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است. همچنین بتن SF که حاوی ۶ درصد میکروسیلیس است در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب ۱۰، ۲۶ و ۲۴ درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. بتن RC20s نیز که حاوی ترکیب ۶ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی است، در مقایسه با بتن مرجع در سن ۷ روز دارای کاهش مقاومت فشاری ۴ درصدی بوده در حالیکه در سنین ۲۸ و ۵۶ روز با افزایش مقاومت فشاری به میزان ۲۱ و ۱۴ درصد مواجه شده است و بتن RC50s که حاوی ترکیب ۶ درصد میکروسیلیس و ۵۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی است، در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب ۲، ۸ و ۴ درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. همچنین در مقایسه بتن RC20s با SF مشاهده شده که به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز کاهش مقاومت ۱۲، ۴ و ۸ درصد اتفاق افتاده است و در مقایسه بتن RC50s با SF هم به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز کاهش مقاومت ۷، ۱۴ و ۱۶ درصد مشاهده شده است. مقاومت فشاری بتن‌های دارای میکروسیلیس در شکل ۲ نشان داده شده است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی ۶ درصد میکروسیلیس، پس از قریب به دو ماه عمل‌آوری توانسته است مقاومتی تقریباً معادل بتن مرجع و حتی بهتر از آن را کسب نماید. لیکن بتن دو جزئی بدون میکروسیلیس افت مقاومتی در حدود ۴ درصد داشته است. دلیل کاهش مقاومت سنین کم بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان را می‌توان به جایگزینی سیمان با مواد پوزولانی نسبت داد که در مقایسه با سیمان پرتلند از واکنش هیدراسیون کندتری برخوردار است، ولی در سنین بالاتر، به دلیل تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ناشی از واکنش پوزولانی، مقاومت فشاری بتن را تا بیشتر از بتن مرجع افزایش داده است.

به طور کلی میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراسیون سیمان ترکیب شده و سیلیکات کلسیم هیدراته می‌سازد. این ترکیب، عامل اصلی افزایش مقاومت و کاهش تخلخل ذرات تشکیل دهنده بتن می‌باشد. کریستال‌های بزرگ هیدروکسید کلسیم در فصل مشترک سنگدانه و خمیر، مانع افزایش مقاومت می‌شود که میکروسیلیس تحت واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم آن را به اجزاء مقاومی به نام سیلیکات کلسیم هیدراته تبدیل می‌کند و بدین ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. [۲۳]



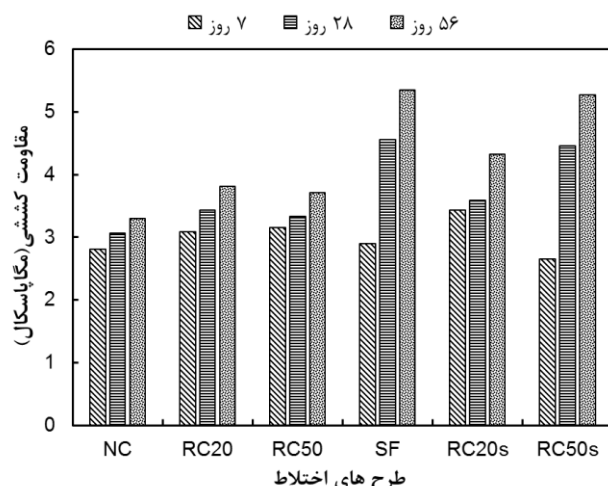
شکل ۱: مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط مختلف در تحقیق حاضر



شکل ۲: مقاومت فشاری طرح‌های دارای میکروسیلیس

### ۲-۳- مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی براساس استاندارد ASTM C496-11 [۲۲] بر روی سه نمونه مختلف در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس این نتایج بتن SF در مقایسه با NC با افزایش سن شاهد رشد مقاومت بیشتری بوده است بطوری که در سن ۵۶ روز اختلاف مقاومت کششی به بیش از ۵۰ درصد رسیده است. همچنین بتن‌های RC20 و RC50 در مقایسه با NC تا ۱۶ درصد مقاومت بیشتری دارند. بتن RC20s نیز در مقایسه با SF دارای مقاومت کششی کمتری است. اختلاف مقاومت کششی این بتن با SF با افزایش سن دچار تغییراتی شده است به طوری که در سن ۵۶ روز این اختلاف به حدود ۱۷ درصد رسیده است. همچنین RC50s در مقایسه با SF مقاومت کششی مشابهی دارد.



شکل ۳: مقاومت کششی طرح های اختلاط

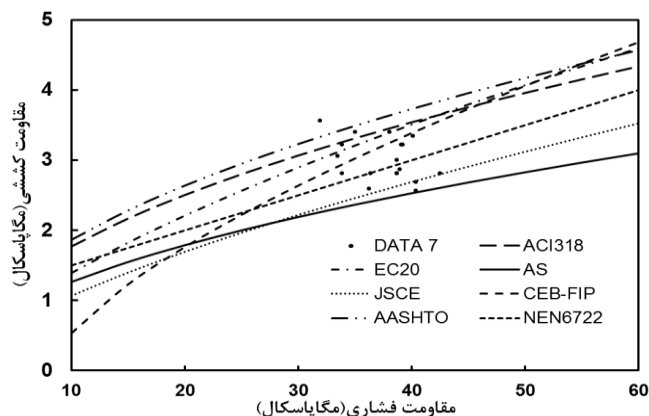
## ۳-۲-۱- مقایسه با روابط آیین نامه های معتبر

در ادامه نتایج حاصل از آزمایشات تحقیق حاضر با مقادیر محاسبه شده مقاومت کششی حاصل از آیین نامه های مختلف مورد مقایسه قرار می گیرد. در جدول ۴ آیین نامه های مورد بررسی به همراه روابط مورد استفاده در این آیین نامه ها جهت تعیین مقاومت کششی ارائه شده است. در این جدول  $f'_c$  مقاومت فشاری و  $f_{ct}$  مقاومت کششی بتن می باشد. در نهایت نتایج حاصل از مقایسه انجام شده به ترتیب برای نمونه های بتن ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه در شکل های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها مشخص می شود که تنها نتایج حاصل از آیین نامه استرالیا برای ۱۰۰ درصد داده های آزمایشات انجام شده محافظه کارانه است و بعد از آن آیین نامه ژاپن برای حدود ۹۵ درصد داده های آزمایشگاهی محافظه کارانه می باشد. همچنین بیش از ۷۵ درصد داده های آزمایشات برای آیین نامه فرانسه، حدود ۵۴ درصد داده ها برای آیین نامه فدراسیون بین المللی بتن سازه ای و ۲۴ درصد داده ها برای آیین نامه آشتو محافظه کارانه است.

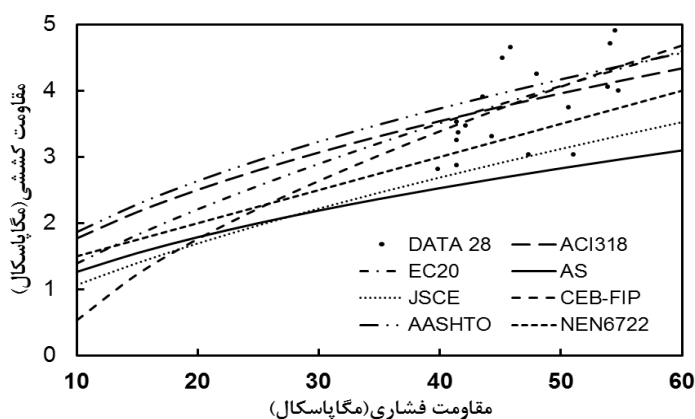
جدول ۴: روابط آیین نامه ای مختلف برای محاسبه مقاومت کششی

شماره رابطه	رابطه	آیین نامه	شماره
(۱)	$f_{ct} = 0.56 (f'_c)^{0.5}$	آمریکا (ACI363) [۲۴]	۱
(۲)	$f_{ct} = 0.3 (f'_c)^{2/3}$	اروپا (EC2) [۲۵]	۲
(۳)	$f_{ct} = 0.4 (f'_c)^{0.5}$	استرالیا (AS360) [۲۶]	۳
(۴)	$f_{ct} = 0.23 (f'_c)^{2/3}$	ژاپن (JSCE) [۲۷]	۴
(۵)	$f_{ct} = 1.56 \left( \frac{f'_c - 8}{10} \right)^{2/3}$	فدراسیون بین المللی بتن سازه ای (CEB-FIP) [۲۸]	۵
(۶)	$f_{ct} = 0.59 (f'_c)^{0.5}$	آشتو (AASHTO) [۲۹]	۶
(۷)	$f_{ct} = 1 + 0.05 f'_c$	فرانسه (NEN6722) [۳۰]	۷

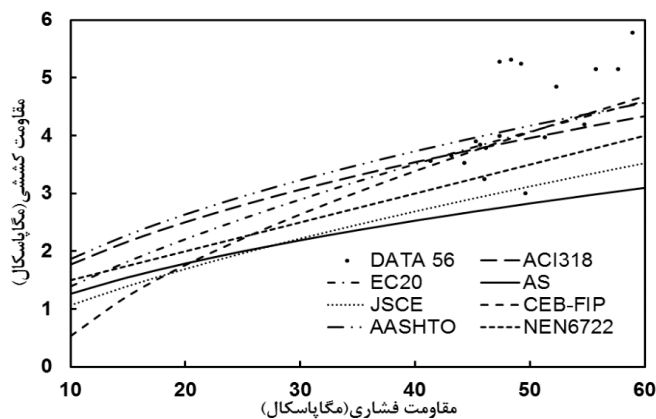




شکل ۴: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۷ روزه با آئین‌نامه‌های معتبر



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه با آئین‌نامه‌های معتبر



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۵۶ روزه با آئین‌نامه‌های معتبر

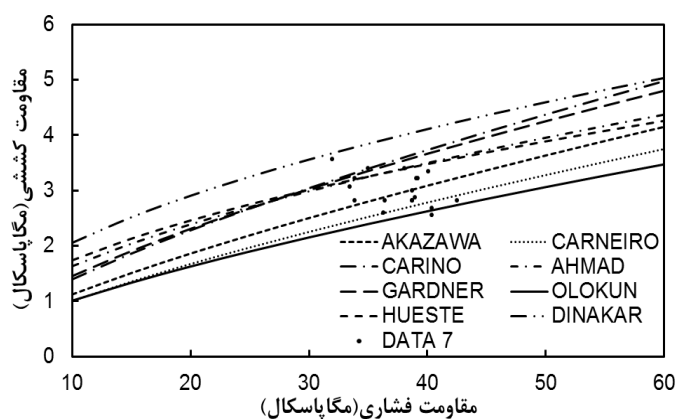
### ۲-۲-۳- مقایسه با روابط تجربی معتبر

در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات تحقیق حاضر با مقادیر محاسبه شده مقاومت کششی حاصل از معادلات تجربی مختلف مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در جدول ۶ معادلات تجربی مختلف مورد استفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، در شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ به ترتیب مقاومت کششی بتن‌های آزمایشات تحقیق حاضر در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز با روابط پیشنهادی از سوی

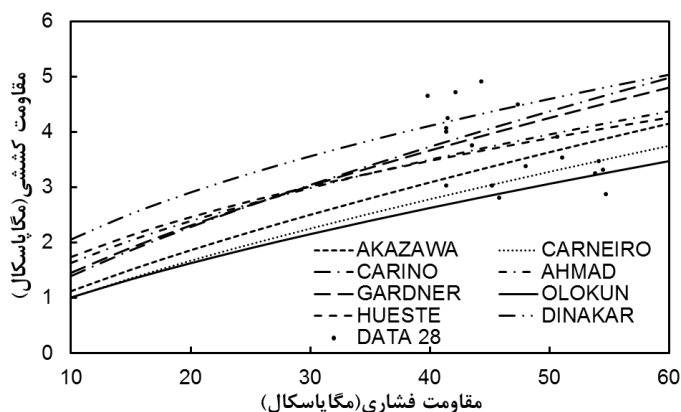
برخی از محققان (جدول ۵) مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده در این تحقیق در سن ۷ روز در محدوده اعداد به دست آمده از روابط پیشنهاد شده از محققان مختلف قرار دارد و هر چه سن بتن افزایش پیدا می‌کند فاصله داده‌های آزمایشگاهی از نتایج روابط پیشنهادی بیشتر شده و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. فقط رابطه OLOKUN در سن ۵۶ روز برای ۱۰۰ درصد داده‌ها محافظه کارانه است.

جدول ۴: روابط تجربی مختلف برای محاسبه مقاومت کششی

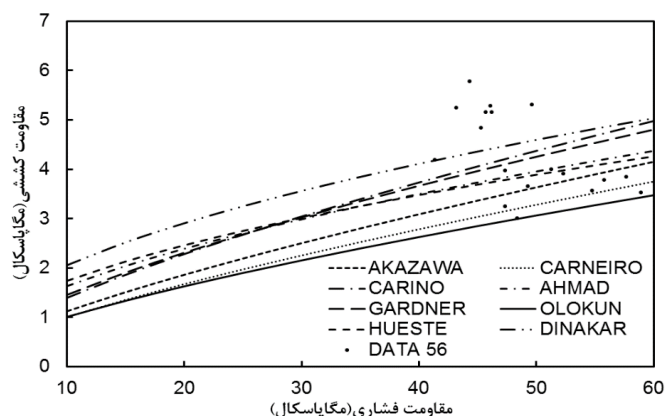
شماره رابطه	رابطه	محقق	شماره
(۸)	$f_{ct} = 0.209 (f'_c)^{0.73}$	[۳۱] AKAZAWA	۱
(۹)	$f_{ct} = 0.185 (f'_c)^{0.735}$	[۳۲] CARNEIRO	۲
(۱۰)	$f_{ct} = 0.206 (f'_c)^{0.69}$	[۳۳] OLOKUN	۳
(۱۱)	$f_{ct} = 0.272 (f'_c)^{0.71}$	[۳۴] CARINO	۴
(۱۲)	$f_{ct} = 0.313 (f'_c)^{0.667}$	[۳۵] GARDNER	۵
(۱۳)	$f_{ct} = 0.46 (f'_c)^{0.55}$	[۳۶] AHMAD	۶
(۱۴)	$f_{ct} = 0.55 (f'_c)^{0.5}$	[۳۷] HUESTE	۷
(۱۵)	$f_{ct} = 0.65 (f'_c)^{0.5}$	[۳۸] DINA KAR	۸



شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۷ روزه با روابط پیشنهادی محققین مختلف



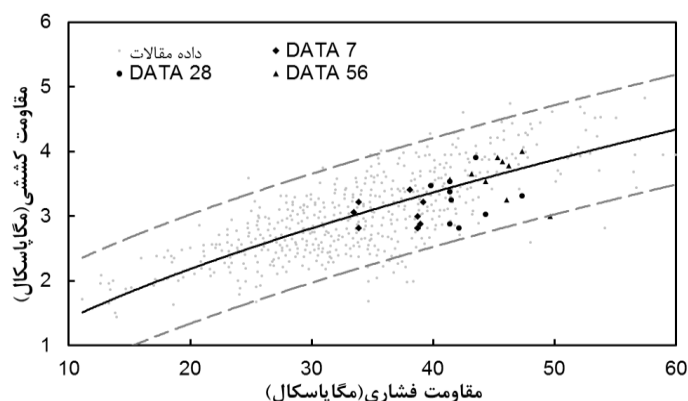
شکل ۸: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه با روابط پیشنهادی محققین مختلف



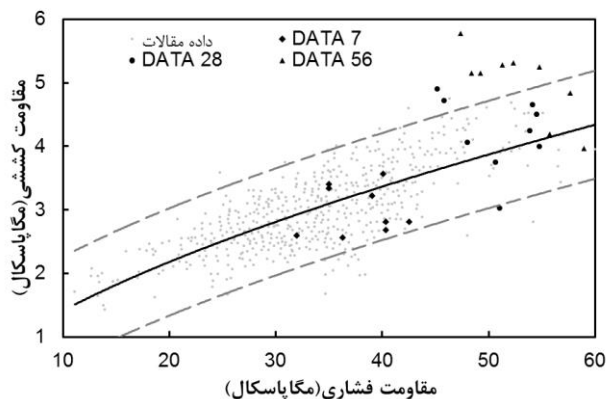
شکل ۹: مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های ۵۶ روزه با روابط پیشنهادی محققین مختلف

### ۳-۲-۳- مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نتایج حاصل از آزمایش‌های این تحقیق را بانک داده‌های مقاومت کششی (انبوه نتایج حاصل از مطالعات گذشته بتن معمولی) [۳۹] مقایسه می‌کند. خط بهینه (Best Fit) و محدوده ۹۵ درصد بانک داده‌ها با استفاده از تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) برای این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab17 [۴۰] ترسیم شده است. نتایج مقاومت کششی بتن‌های فاقد میکروسیلیس در محدوده ۹۵ درصد و اطراف خط بهینه قرار دارد ولی تعدادی از نتایج حاصل از بتن‌های حاوی میکروسیلیس بالاتر از کران محدوده ۹۵ درصد قرار دارد. این بدان معناست که مقاومت کششی بتن‌های حاوی میکروسیلیس (حتی با سنگدانه بازیافتی) بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج طرح‌های بدون میکروسیلیس با خط بهینه حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مختلف [۳۹]



شکل ۱۱: مقایسه نتایج طرح‌های با میکروسیلیس با خط بهینه حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مختلف [۳۹]

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده و مقایسه نتایج به دست آمده با آئین نامه‌های معتبر دنیا، همچنین بررسی نتایج تحقیقات مختلف انجام شده، نتایج زیر به دست آمد:

۱. افزودن میکروسیلیس به بتن به دلیل خواص پوزولانی موجب افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی تا بیش از ۲۵ درصد شده است. همچنین این ماده اثر چشمگیری بر مقاومت کششی داشته و مقاومت کششی را تا بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.
۲. جایگزینی سنگدانه بتن بازیافتی درشت دانه به بتن تا ۵۰ درصد اثر نامطلوب زیادی بر خواص مکانیکی بتن نداشته و کاهش کمتر از ۱۰ درصد مشاهده می‌شود.
۳. افزودن میکروسیلیس به بتن‌های دارای سنگدانه بتن بازیافتی موجب افزایش چشمگیر مقاومت این بتن‌ها در مقایسه با بتن معمولی شده و در مقایسه با بتن دارای میکروسیلیس نیز اختلاف مشخصات مکانیکی کمتر از ۲۰ درصد است.
۴. بتن با ۲۰ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بتن بازیافتی همراه با ۶ درصد میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی مقاومت فشاری و کششی برابر و حتی بیشتر به دست آورده است.
۵. با افزودن ۶ درصد میکروسیلیس به بتن‌های دارای تا ۵۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی می‌توان نگرانی‌های موجود در خصوص کاهش مشخصات مکانیکی را برطرف کرده و حتی نتایج بهتری نسبت به بتن معمولی کسب کرد.

## سیاسگزار

در اینجا لازم می‌دانیم مراتب تقدیر و تشکر خود را از تلاش‌ها و مساعدت‌های مجموعه شرکت دانش بنیان نانو بتن امین و کارشناسان این مجموعه (مهندس یعقوبی و حاج مهدی) که با حمایت‌های مادی و معنوی بستر انجام تحقیقات و پژوهش در این زمینه را فراهم کردند، ابراز داریم.

## مراجع

- [1] World Business Council for Sustainable Development, (2009), *Journal of The cement sustainability initiative*.
- [2] ACI Committee 318-14, (2014), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- [3] Siddique, R. and Iqbal Khan, M., (2011), *Supplementary Cementing Materials, Engineering Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [4] ASTM C1240 -11, (2011), *Standard Specification for Use of Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout*.
- [5] Babu, K.G. and Prakash, P.V.S., (1995), Efficiency of silica fume in concrete, *Cement and concrete Research*, 25(6), 1273-1283.
- [6] Sellevold, E.J. and Redjy, F.F., (1983), *Condensed silica fume (microsilica) in concrete: water demand and strength development*, , ACI SP-79, pp. 677-694, In: Malhotra, V.M. (ed.) *The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*.
- [7] Rao, G.A., (2003), Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars, *Cement and concrete Research*, 33(11), 1765-1770.
- [8] Wild, S., Sabir, B. B., and Khatib, J. M., (1995), Factors influencing strength development of concrete containing silica fume, *Cement and concrete Research*, 25(7), 1567-1580.
- [9] Hooton, R. D., (1993), Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulphate attack freezing and thawing, and alkali-silica reactivity, *ACI Material Journal*, 90(2), 143-152.
- [10] Gonen, T. and Yazicioglu, S., (2007), The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete, *Journal of Building Environment*, 42: 3080-3085.
- [11] Igarashi, S. I., Kawamura, A., and Watanabe, M., (2005), Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages", *Cement and concrete Research*, 513-519.
- [12] Perraton, D., Aitcin; P.C. and Vezina, D., (1988), Permeability of silica fume concretes, *ACI Special Publications*, SP-108, 63-84.
- [13] Berke, N. S., (1989), Resistance of micro-silica concrete to steel corrosion, erosion and chemical attack, *ACI Special Publications*, SP 114, 861-886.

- [14] Chandra, S., (2004), Implications of using recycled construction and demolition waste as aggregate in concrete, *Session lead paper, International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling*, Kingston University, London.
- [15] Mazloom, M., Ramezani-pour, A. and Brooks, J.J., (2004), Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357.
- [16] Manish S. and Sanjay G., (2016), Strength and Permeability of Recycled Aggregate Concrete Containing Silica Fumes, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(10), 17675- 17682.
- [17] Ramalinga, C. P, Abhilash, N. and Harika, B., (2017), Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete with Silica Fume as Partial Replacement of Cement, *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 4(10), 1202-1210.
- [18] ACI Committee 211, (1991), *Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash*. ACI226.4R, ACI Materials Journal.
- [19] ASTM C150-11, (2011), *Standard Specification for Portland Cement*.
- [20] ASTM C29-11, (2011), *Standard Specification for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- [21] ASTM C39-11, (2011), *Standard Specification for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [22] ASTM C496-11, (2011), *Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [23] [۲۳] رمضانیان پور، ع. (۱۳۷۶)، بتن با مقاومت زیاد، سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، تهران.
- [24] ACI Committee 363, (1992), *State of the art report on high-strength concrete*, American Concrete Institute, ACI363-R, Farmington Hills (Michigan).
- [25] BS EN 206-1, (2001), *Concrete, Specification, performance, production and conformity*.
- [26] AS 3600-2009, (2009), *Concrete structures, standard by Standards Australia*.
- [27] JSCE Guidelines for Concrete, (2007), *Standard Specifications for concrete structures*, No 16, Japan Society of Civil Engineers.
- [28] CEB-FIP, (1990), *High-strength concrete state of the art report*, London, Thomas Telford.
- [29] AASHTO, (2006), *Interim bridge design specifications and commentary*, American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington (DC).
- [30] NEN 6722, (2000), *Regulations concrete*, Construction (VBU 1988), with correction sheet.
- [31] Akazawa, T. (1953), *Tension test method for concrete*, Bull. No. 16, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.
- [32] Carneiro FLLB and Barcellos A, (1953), *Concrete tensile strength*, Bull. No. 13, International Associate of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.
- [33] Olokun F, (1991), Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: an evaluation of existing relations for normal weight concrete, *ACI Material Journal*, 88(3), 302–309.
- [34] Carino, N. J and Lew, H. S, (1982), Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete, *ACI Material Journal*, 79(3), 214–219.
- [35] Gardner, N. J, (1990), Relationship of the punching shear capacity of reinforced concrete slabs with concrete strength, *ACI Structural Journal*, 87(1), 66–71.
- [36] Ahmad, S. H and Shah, S. P., (1985), Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete, *PCI Journal*, 30(6), 92–119.
- [37] Hueste M., Chompreda, P., Trejo, D., Cline, D. and Keating, P., (2004), Mechanical properties of high-strength concrete for prestressed members, *ACI Structural Journal*, 101(4), 457–65.
- [38] Dinakar, P., Babu, K., and Santhanam, M., Mechanical properties of high-volume fly ash self-compacting concrete mixtures, *Structural Concrete*, 9(2), 109–116.
- [39] Takafumi N., (2007), *Database for Mechanical Properties of Concrete*, <http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>.
- [40] Minitab, Incorporation, *Minitab 17 Statistical Software [Computer software]*.