نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ویژه ۴، سال ۱۳۹۷، صفحه ۱۰۹ تا ۱۲۶

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی و مقایسه تاثیر زئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر رفتار مکانیکی بتن‌های بازیافتی

سید فتح اله ساجدی[1*]، حسن جلیلی‌فر[2]

۱-دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲-دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی مقایسه‌ای تاثیر استفاده از پوزولان‌های زئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر مشخصات مکانیکی بتن‌های بازیافتی پرداخته است. بتن‌های بازیافتی، متشکل از سطوح مختلف جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی با درشت‌دانه طبیعی هستند. جهت بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی، پوزولان‌های معرفی شده در سطوح مختلفی با سیمان جایگزین شدند. جهت تعیین و مقایسه مشخصات مکانیکی بتن‌ها، ۲۴ طرح اختلاط ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سن ۲۸ روزه، ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه 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 ۱۰۰٪ بازیافتی به مقاومت مطلوب ۴۰ مگاپاسکالی دست یابند؛ در حالی که استفاده از زئولیت طبیعی نمی‌تواند منجر به کسب مقاومت هدف طراحی گردد. استفاده از سطح جایگزینی ۱۰ درصدی میکروسیلیس به ویژه در بتن‌های حاوی ۲۵٪ مصالح بازیافتی باعث گردید تا رفتار مکانیکی بتن‌های بازیافتی به میزان چشم‌گیری به بتن‌های معمولی نزدیک گردد؛ هر چند که سطح جایگزینی ۱۰٪ زئولیت نیز در تامین برخی از خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی مطلوب بوده ولی خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی این پوزولان به میزان زیادی از بازیافتی حاوی میکروسیلیس ضعیف‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، خواص مکانیکی، میکروسیلیس، زئولیت طبیعی، پوزولان

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2017.88276.1224
۱۳۹۶/۰۳/۱۴	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۸/۱۴	۱۳۹۶/۰۸/۱۴	۱۳۹۷/۱۲/۲۸	doi: 10.22065/JSCE.2017.88276.1224

*نویسنده مسئول: سیدفتح اله ساجدی

پست الکترونیکی: sajedi@iauahvaz.ac.ir

Study and Comparison of the Effect of Natural Zeolite and Silica Fume on Mechanical Properties of Recycled Aggregates Concretes

Fathollah Sajedi[1*], Hasan Jalilifar[2]

1-Associate Professor, Faculty of Engineering,Civil Engineering Department, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz,Iran

2-PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz,Iran

ABSTRACT

The present study was conducted to compare the effect of natural zeolite (Z) and silica fume (SF) pozzolans on the mechanical properties of recycled aggregates concrete (RAC's). The RCA's made with using different levels of recycled coarse aggregates instead of natural coarse aggregates. To improve quality of RCA's, the introduced pozzolans were replaced with different levels of ordinary Portland cement (OPC). To determine and compare the mechanical properties of concretes, 24 mix designs were made and different tests done as compressive strength at the ages 7, 28 and 91 days, and the tests as splite cylinder tests (SPT), modulus of elasticity and ultra-pulse velocity (UPV) at the age of 28- day. The obtained results generally showed that in duration of 28 days, the usage of silica fume could results in about 40 MPa compressive strength for RCA's with 100% of recycled coarse aggregates; meanwhile using natural zeolite was not able to give target strength of design. Using 10% of silica fume instead of OPC in RCA's specially RCA's having 25% of recycled aggregates caused in the mechanical properties of RCA's be rarely like those natural aggregate concretes. Although, using 10% of zeolite in concrete could improve some mechanical properties, but the concretes containing silica fume gave superior mechanical properties than those of zeolite.

ARTICLE INFO

Received: 04/06/2017
Revised: 24/10/2017
Accepted: 05/11/2017

Keywords:
Recycled aggregates, concrete (RAC), Mechanical properties, Silica fume (SF), Natural zeolite (Z), Pozzolan

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.88276.1224

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

۱- مقدمه

امروزه بر کسی پوشیده نیست که سرعت توسعه و پیشرفت‌های صنعتی بشر در سطح جهانی، تاثیرات مخرب زیادی بر روی محیط زیست داشته و تا حد مخاطره‌آمیزی تعادل و پایداری محیط زیست را تحت تاثیر قرار داده است. بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی تجدیدناپذیر جهت گسترش زیرساخت‌های لازم جهت توسعه‌های صنعتی، منجر به مصرف میلیون‌ها تن از منابع طبیعی شده است. از سوی دیگر تخریب ساختمان‌های قدیمی و غیرمنطبق با نیازهای بشر مدرن منجر به تولید زباله‌های ساختمانی و صنعتی بسیار زیادی گردیده است. امروزه حجم بسیار زیاد زباله‌های ناشی از ساخت و سازها تبدیل به یک مشکل بزرگ برای جوامع شده است. میزان تولید زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی در کشور آمریکا به حدود ۱۴۰ میلیون تن در سال رسیده [۱] و اتحادیه اروپا میزان تولید زباله‌های ساختمانی را در هر سال برابر ۹۷۰ میلیون تن، معادل ۲ تن به ازای هر شهروند اعلام کرده است [۲].

استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در صنعت ساخت، می‌تواند اثرات به‌سزایی در دست‌یابی به یک توسعه پایدار در این صنعت داشته باشد. استفاده از این سنگدانه‌ها به‌جای دپو کردن آن‌ها در محل دفن زباله‌ها، می‌تواند در کنار اثرات مثبت زیست‌محیطی، در بر دارنده منافع اقتصادی زیادی نیز گردد. لذا کشورهای توسعه یافته و نیز شیوه‌نامه‌های اجرایی صادره از اتحادیه اروپا [۳] با شدت و سرعت زیادی در حال مرتفع نمودن موانع موجود بر سر راه این مهم می‌باشند. برآوردها گویای آن است که تا سال ۲۰۲۰ ساختمان‌های تازه‌ساز حداقل از ٪۵ از مصالح بازیافتی ساخته شوند.

بسیاری از محققان و استانداردهای موجود کنونی در چگونگی استفاده از مصالح بازیافتی و نیز میزان مصرف آن‌ها با یکدیگر اتفاق نظر ندارند. برخی از آیین‌نامه‌ها مانند آیین‌نامه بتن کشورهای ژاپن و آلمان [۴,۵] به دلیل رفتار ناشناخته این سنگدانه‌ها با احتیاط بیش‌تری نسبت به سایر آیین‌نامه‌ها صحبت کرده‌اند و آیین‌نامه کشور برزیل نیز استفاده از این سنگدانه‌ها را مجاز نمی‌داند [۶]. آیین‌نامه کشور انگلستان نیز در این زمینه حداکثر سقف جایگزینی ٪۲۰ را به عنوان یک محدودیت برای استفاده از این سنگدانه‌ها معرفی کرده است [۷]. این در حالی است که نه در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) [۸] و نه در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران سخنی در این رابطه به میان نیامده است. با این حال در کنار تمام این محدودیت‌های اعلام شده، محققان مختلفی در گوشه و کنار جهان و بعضاً در ایران به نتایجی متفاوت از مندرجات موجود در آیین‌نامه‌ها دست یافته‌اند.

اکثر قریب به اتفاق مطالعات انجام شده، بر روی ویژگی‌هایی مانند افزایش میزان تخلخل، افزایش میزان جذب آب و کاهش وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی اتفاق نظر دارند [۹]. در زمینه رفتارهایی مانند کاهش ضریب ارتجاعی، افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، افزایش جذب آب و کاهش مقاومت در برابر یخزدگی و ذوب‌شدن بتن‌های بازیافتی مطالعات متعددی نیز انجام شده و همگی به وحدت نظر یکسانی در این زمینه دست یافته‌اند [۱۲-۱۰]. در زمینه برخی از خواص مکانیکی مانند مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی، محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته‌اند. اگر چه اکثر محققان بر این نظر متفقند که جایگزینی‌های کم در بازه ٪۲۰ تا ٪۳۰ از سنگدانه‌های درشت بازیافتی نمی‌تواند تاثیرات محسوسی بر رفتار مکانیکی بتن‌ها از خود به جای بگذارد [۱۳,۱۴] و جایگزینی‌های بیش‌تر با کاهش مقاومت‌های مکانیکی روبرو خواهد شد [۱۵,۱۶]. مطالعات انجام شده توسط کو و پون[1] نشان داد که در صورت استفاده از مواد جایگزین سیمانی مانند خاکستر بادی، جایگزینی سنگدانه‌ها تا سقف ٪۵۰ نیز می‌تواند منجر به ساخت بتن بازیافتی با کیفیت مطلوب نیز گردد [۹]. کونین و کوادیو[2] نیز در مطالعات خود نشان دادند که امکان دست‌یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی‌های ٪۶۰ مصالح بازیافتی نیز وجود دارد [۱۷] و مانزی و همکاران[3] نیز دست‌یابی به مقاومت‌های مورد نیاز طراحی را در جایگزینی‌های تا سقف ٪۸۰ امری ممکن دانسته‌اند [۱۸].

محققان عوامل مختلفی مانند سطح جایگزینی مصالح بازیافتی [۱۹]، میزان رطوبت موجود در سنگدانه‌ها [۲۰]، کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی [۲۱]، نسبت آب به سیمان [۲۲] و تاثیر مواد افزودنی شیمیایی [۲۳] را در تعیین میزان خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی مورد مطالعه قرار دادند. در این میان برخی از محققان نیز تلاش کردند تا با استفاده از به‌کارگیری مواد افزودنی مانند میکروسیلیس

[1] Kou and Poon
[2] Konin and Kouadio
[3] Manzi et al

و خاکستر بادی برخی از نقاط ضعف بتن‌های بازیافتی را اصلاح نمایند [۲۴,۲۵]. از آنجایی که امروزه نیاز به تبیین یک رویکرد جدید در استفاده از مصالح بازیافتی در ایران احساس شده و از سویی دیگر، تغییر ایجاد شده در نگرش محققان در استفاده از مواد جایگزین سیمان باعث شده تا علاقه بیش‌تری در به‌کارگیری این مواد ایجاد شود، این مقاله تلاش می‌کند تا تاثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت طبیعی در سطوح مختلف جایگزینی در بتن‌های بازیافتی حاوی سنگدانه‌های درشت بازیافتی را مورد مطالعه قرار دهد. بتن‌های بازیافتی در ۴ سطح ٪۰، ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ از مصالح درشت‌دانه بازیافتی تهیه شدند و برای تعیین خواص مکانیکی هر یک از آن‌ها، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱روزه، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی دو نیم‌شدن و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه انجام و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۴ سطح جایگزینی سنگدانه‌های درشت بازیافتی شامل ٪۰، ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ نسبت به وزن سنگدانه‌های درشت طبیعی مورد استفاده قرارگرفته است. پوزولان‌های جایگزین شده با سیمان شامل میکروسیلیس در سه سطح ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ و زئولیت طبیعی در سه سطح ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ نسبت به وزن سیمان مصرفی می‌باشند. طرح اختلاط مرجع مورد استفاده مطابق مبانی طرح مخلوط ملی بتن ایران و براساس مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به مقدار ۴۰ مگاپاسکال ارائه شده است. 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 [۲۶] در حوضچه آب با دمای $^{\circ}C$ ۲± ۲۵ عمل‌آوری شدند. برای تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، در مجموع ۲۱۶ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، برای تعیین ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه در مجموع ۷۲ نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری و برای تعیین مقاومت کششی دو نیم‌شدن مجموعا از ۷۲ نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری استفاده شده است. قبل از شکستن نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه ابتدا از هر طرح اختلاط ۳ نمونه نیز 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، پودر میکروسیلیس و زئولیت طبیعی می‌باشند. مشخصات شیمیایی هر یک از این مواد سیمانی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی (٪)

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
زئولیت طبیعی	۶۸	۱/۵	۱۱/۵	۲/۵	-	-	۱۲/۲
میکروسیلیس	۹۴/۷۳	۰/۸۷	۱/۲۳	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۱	-

سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های به‌کار رفته شامل ریزدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر و درشت‌دانه طبیعی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر می‌باشند. جهت بررسی تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از درشت‌دانه‌های بازیافتی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. سنگدانه‌های بازیافتی شامل ترکیب قطعات شمع‌های بتنی و ساختمان‌های بتنی تخریب شده در شهر اهواز می‌باشند.

آب و مواد افزودنی

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

۴- طرح اختلاط

در این مطالعه دو دسته از بتن‌های معمولی و بازیافتی به ترتیب تحت علائم اختصاری CC و RC مورد استفاده قرارگرفته است. بتن‌های معمولی از سنگدانه‌های درشت و ریزکاملا طبیعی ساخته شدند. در حالی که در بتن‌های بازیافتی سنگدانه‌های درشت بازیافتی در سطوح ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ با درشت‌دانه‌های طبیعی جایگزین شدند. جهت بهبود کیفیت بتن‌های ساخته شده، از میکروسیلیس (SF) و زئولیت طبیعی (Z) استفاده گردید. تمام بتن‌های حاوی میکروسیلیس در سه سطح جایگزینی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ وزنی سیمان و بتن‌های حاوی زئولیت در سه سطح ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ 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 تعریف شده در ادامه، صورت پذیرفته است:

- در مرحله اول تمام سنگدانه‌های درشت‌دانه به همراه ثلث آب و نصف مواد پوزولانی به مدت ۱ دقیقه در مخلوط‌کن مخلوط شدند. هدف اصلی از انجام این کار براساس ایده نشات گرفته شده از روش تام و همکاران[4] تحت عنوان روش دو مرحله‌ای[5][۲۷] بوده و جهت حصول اطمینان از نفوذ کامل دوغاب مواد پوزولانی در حفرات موجود در سطح سنگدانه‌های بازیافتی و ایجاد یک لایه از مواد سیمانی چسبنده روی سطح سنگدانه‌ها برای بهبود اتصال سطح ملات‌های قدیم و جدید می- باشد (شکل ۱).
- در مرحله دوم نصف ماسه، نصف سیمان و ثلث آب مصرفی به مخلوط قبلی اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه مصالح با یکدیگر مخلوط شدند.
- در مرحله سوم مصالح باقی‌مانده شامل نصف ماسه، نصف مواد پوزولانی، نصف سیمان و ثلث آب به مخلوط اضافه شدند و به مدت ۶ دقیقه اختلاط ادامه یافت. سایر موارد و اطلاعات لازم در خصوص جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول شماره ۲ ارائه شده‌اند.
-

شکل۱ : سنگدانه‌های بازیافتی غوطه‌ور شده در دوغاب پوزولان

[4] Tam et al
[5] Two Stage Mixing Approach (TSMA)

جدول ۲ : جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در تحقیق

طرح مخلوط	مواد سیمانی (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	پوزولان (کیلوگرم)	آب (لیتر)	فوق روان کننده (لیتر)	ماسه (کیلوگرم)	شن طبیعی (کیلوگرم)	شن بازیافتی (کیلوگرم)
CC-SF۵		۳۹۹	۲۱				۸۱۵	۰
RC۲۵-SF۵		۳۹۹	۲۱				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-SF۵		۳۹۹	۲۱				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰۰-SF۵		۳۹۹	۲۱				۰	۸۱۵
CC-SF۱۰		۳۷۸	۴۲				۸۱۵	۰
RC۲۵-SF۱۰		۳۷۸	۴۲				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-SF۱۰		۳۷۸	۴۲				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰۰-SF۱۰		۳۷۸	۴۲				۰	۸۱۵
CC-SF۱۵		۳۵۷	۶۳				۸۱۵	۰
RC۲۵-SF۱۵		۳۵۷	۶۳				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-SF۱۵		۳۵۷	۶۳				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰۰-SF۱۵		۳۵۷	۶۳				۰	۸۱۵
CC-Z۱۰	۴۲۰	۳۷۸	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۸۱۵	۰
RC۲۵-Z۱۰		۳۷۸	۴۲				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-Z۱۰		۳۷۸	۴۲				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰۰-Z۱۰		۳۷۸	۴۲				۰	۸۱۵
CC-Z۲۰		۳۳۶	۸۴				۸۱۵	۰
RC۲۵-Z۲۰		۳۳۶	۸۴				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-Z۲۰		۳۳۶	۸۴				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰-Z۲۰		۳۳۶	۸۴				۰	۸۱۵
CC-Z۳۰		۲۹۴	۱۲۶				۸۱۵	۰
RC۲۵-Z۳۰		۲۹۴	۱۲۶				۵۷۰	۲۴۵
RC۵۰-Z۳۰		۲۹۴	۱۲۶				۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC۱۰۰-Z۳۰		۲۹۴	۱۲۶				۰	۸۱۵

۵- نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- مقاومت فشاری در سن ۷ روزه

بررسی تاثیر میکروسیلیس

آزمایش لازم جهت تعیین مقاومت فشاری در سن ۷ روزه بتن‌های ساخته شده براساس استاندارد ASTM C109 [۲۸] انجام شده است. هر عدد بیانگر متوسط مقاومت ۳ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری می باشد. نتایج مربوطه در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده‌اند. مقاومت فشاری در سن ۷ روزه برای بتن‌های معمولی حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس به ترتیب معادل۳۷/۵، ۴۴/۸ و ۳۸/۲

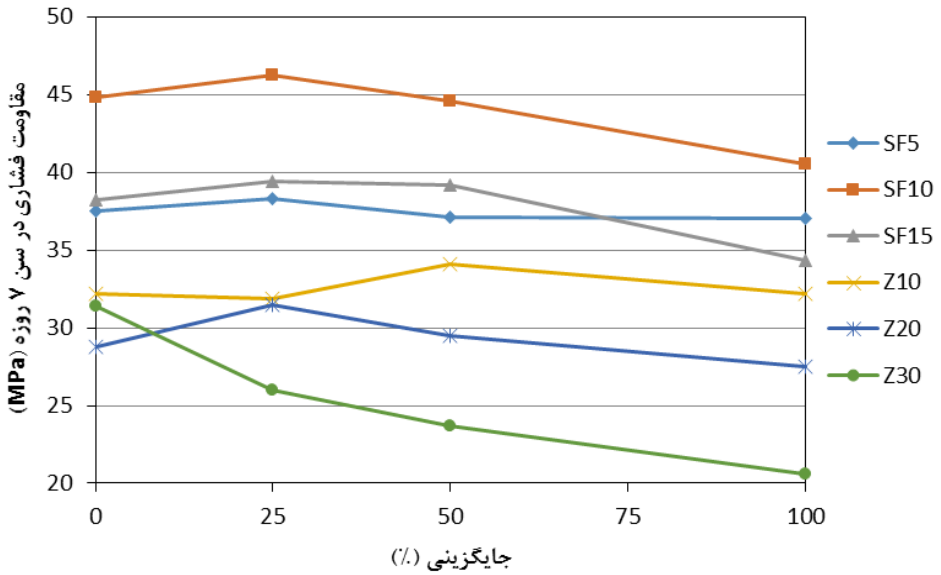
مگاپاسکال می‌باشند. همان‌گونه که از جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود، در بتن‌های معمولی حاوی میکروسیلیس، سطح جایگزینی ٪۱۰ دارای بیش‌ترین میزان مقاومت فشاری در سن ۷ روزه می‌باشد.

جدول ۳ : خواص مکانیکی بتن‌های معمولی و بازیافتی

طرح مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			مقاومت کششی دو نیم شدن (مگاپاسکال)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)	سرعت امواج فراصوت (کیلومتر بر ثانیه)
	۷روزه	۲۸روزه	۹۱روزه			
CC-SF۵	۳۷/۵	۵۰/۱	۵۲/۵	۴/۲	۴۲/۸	۴/۵۳
RC۲۵-SF۵	۳۸/۳	۴۳/۴	۴۸/۶	۳/۵	۳۹/۷	۴/۴۱
RC۵۰-SF۵	۳۷/۱	۴۲/۸	۴۵/۹	۳/۲	۳۲/۹	۴/۴
RC۱۰۰-SF۵	۳۷	۳۹/۹	۴۴/۱	۲/۹۶	۲۸/۱	۴/۳۶
CC-SF۱۰	۴۴/۸	۵۷/۴	۶۰/۳	۴/۴	۴۴/۳	۴/۹۶
RC۲۵-SF۱۰	۴۶/۲	۵۳/۸	۵۷/۶	۵/۵	۴۱/۶	۴/۶۹
RC۵۰-SF۱۰	۴۴/۶	۵۲	۵۵/۱	۵/۴	۳۶/۲	۴/۶۷
RC۱۰۰-SF۱۰	۴۰/۵	۵۱/۷	۵۶/۴	۳/۶	۳۰/۱	۴/۴۵
CC-SF۱۵	۳۸/۲	۴۷/۲	۴۹/۶	۳/۴۴	۴۱/۶	۴/۴۸
RC۲۵-SF۱۵	۳۹/۴	۴۵/۴	۴۷/۱	۳/۳۹	۳۶/۹	۴/۴۳
RC۵۰-SF۱۵	۳۹/۲	۴۱	۴۳/۸	۳/۰۷	۳۲/۴	۴/۳۱
RC۱۰۰-SF۱۵	۳۴/۳	۴۰/۷	۴۳/۴	۲/۹۹	۲۸/۳	۴/۲۳
CC-Z۱۰	۳۲/۲	۳۷/۴	۳۹/۳	۳/۴	۴۱/۱	۴/۷
RC۲۵-Z۱۰	۳۱/۹	۳۹/۶	۴۱/۹	۳/۴	۳۶/۹	۴/۴۷
RC۵۰-Z۱۰	۳۴/۱	۳۸/۷	۳۹/۸	۳	۳۲/۴	۴/۴۳
RC۱۰۰-Z۱۰	۳۲/۲	۳۶/۳	۳۹/۸	۲/۷	۲۸/۳	۴/۲۴
CC-Z۲۰	۲۸/۸	۳۴/۸	۳۶/۷	۳/۲	۳۹/۷	۴/۴۷
RC۲۵-Z۲۰	۳۱/۵	۳۷/۲	۳۹/٤	۲/۷	۳۵/۲	٤/٤۵
RC۵۰-Z۲۰	۲۹/۵	۳۱/۳	۳۳/۵	۲/٦	۳۲/۹	٤/۳
RC۱۰-Z۲۰	۲۷/۵	۳۲/٤	۳۳/۲	۲/۵	۲۳/۸	٤/۰۷
CC-Z۳۰	۳۱/٤	۳۷/٤	۳۹/۲	۲/۵	۳٦/۱	٤٤/٤
RC۲۵-Z۳۰	۲٦	۳۱/۳	۳٤/۸	۲/۷	۳۳/۹	٤/۳٤
RC۵۰-Z۳۰	۲۳/۷	۲۹/۲	۳۱/۲	۲/٤	۲۹/٤	٤/۲
RC۱۰۰-Z۳۰	۲۰/٦	۲۳/۷	۲۵/٤	۲/۳	۲۳/۹	۳/۸۸

به همین ترتیب در بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس نیز سطح جایگزینی ٪۱۰ با کسب مقاومت در سن ۷ روزه بسیار بالاتری نسبت به سایر سطوح ٪۵ و ٪۱۵ روبرو شده است. گرچه شیب نمودار در بتن بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس نزولی بوده و با افزایش مقادیر سنگدانه بازیافتی از ٪۲۵ تا ٪۱۰۰، مقاومت فشاری از ۴۶/۲ به ۴۰/۵ مگاپاسکال کاهش پیدا نمود، ولی حتی در بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری در سن ۷ روزه از بیش‌ترین مقادیر مقاومت سایر بتن‌های بازیافتی نیز بیش‌تر می‌باشد. در بازه ۷ روزه، تاثیر قابل توجه استفاده از میکروسیلیس در پرکردن حفرات موجود در سنگدانه‌های بازیافتی باعث شده

تا تمامی بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی از مقاومت فشاری بیش‌تری نسبت به بتن‌های معمولی برخوردار گردند. همانند بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، در بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس نیز افزایش سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. البته باید توجه داشت که اختلاف مقاومت در بتن‌های حاوی ٪۵۰ مصالح بازیافتی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن‌های معمولی، چندان محسوس نبوده ولی کاهش مقاومت در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی در مقایسه با بتن‌های معمولی بیش‌تر به چشم می‌آید. در مجموع متوسط مقاومت فشاری کسب شده بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، حدود ٪۱۶ از متوسط مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس بیش‌تر می‌باشد.



شکل ۲ : مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نمونه‌ها

بررسی تاثیر زئولیت طبیعی

همان‌گونه که در جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود بتن‌های معمولی حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی نیز به ترتیب مقاومتی معادل ۳۲/۲، ۲۸/۸ و ۳۱/۴ مگاپاسکال را کسب نمودند. در بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی، بجز سطح جایگزینی ٪۱۰، در سایر درصدهای جایگزینی زئولیت، با افزایش سطح جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت در سن ۷ روزه با کاهش روبرو شده است. نکته مشهود در نمودار شماره ۱ آن است که در بتن بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی، پس از جایگزینی ٪۲۵مصالح بازیافتی، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه افزایش یافته و از ۳۱/۹ به ۳۴/۱ مگاپاسکال رسیده و در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه افت کرده و به ۳۲/۲ مگاپاسکال (معادل مقاومت بتن معمولی) رسیده است. این امر نشان از تاثیر مطلوب ٪۱۰ جایگزینی زئولیت طبیعی در کاهش اثرات نامطلوب سطح جایگزینی بالای مصالح بازیافتی دارد. در بتن‌های حاوی ٪۲۰ زئولیت نیز در بازه ۷ روزه رفتار مطلوبی مشاهده می‌شود؛ جایی که در جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که در سطوح جایگزینی ٪۱۰ و ٪۲۰ زئولیت، اگر چه در جایگزینی ٪۵۰ مصالح بازیافتی، مقاومت فشاری رو به کاهش می‌نهد، ولی هم‌چنان از مقاومت فشاری بتن معمولی بیش‌تر می‌باشد.

در رابطه با تاثیر درصدهای مختلف زئولیت طبیعی نیز نتایج نشان داد که با افزایش سطح جایگزینی زئولیت طبیعی از ٪۱۰ به ٪۲۰ و ٪۳۰ متوسط مقاومت فشاری با ٪۱۰ و ٪۲۸ کاهش روبرو گردید. آنچه که در نتایج حاصله کاملاً مشهود می‌باشد، اختلاف محسوس مقاومت‌های کسب شده بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس از بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی می‌باشد، به نحوی که

بیش‌ترین مقاومت کسب‌شده در سن ۷ روزه برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی که متعلق به بتن حاوی ٪۱۰ زئولیت بوده از کم‌ترین مقاومت کسب‌شده در سن ۷ روزه بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس،کم‌تر است. وقوع این پدیده در بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس نشان‌دهنده تاثیر چشم‌گیر میکروسیلیس در مقایسه با زئولیت طبیعی در بتن‌ها می‌باشد.

۵-۲- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه

بررسی تاثیر میکروسیلیس

از جدول شماره ۳ و شکل ۳ مشخص است که در میان بتن‌های حاوی میکروسیلیس، بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس روی می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن‌های حاوی ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس به ترتیب معادل ۵۳/۸، ۵۲ و ۵۱/۷ مگاپاسکال می می‌باشند. پس از آن نیز بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس از متوسط مقاومت فشاری تقریباً یکسانی (۴۲ مگاپاسکال) برخوردار شدند. این نتایج را می‌توان در نمودار شماره ۲ ملاحظه نمود، جایی که نمودار مربوط به بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس فاصله بسیار زیادی از نمودارهای بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس داشته، در حالی که نمودارهای بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس رفتاری کاملاً مشابه به هم و با مقادیر نزدیک به یکدیگر از خود نشان می‌دهند. کاهش مقاومت فشاری پس از سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس نشان می‌دهد که سطح جایگزینی بهینه میکروسیلیس در بتن‌های بازیافتی معادل ٪۱۰ خواهد بود.

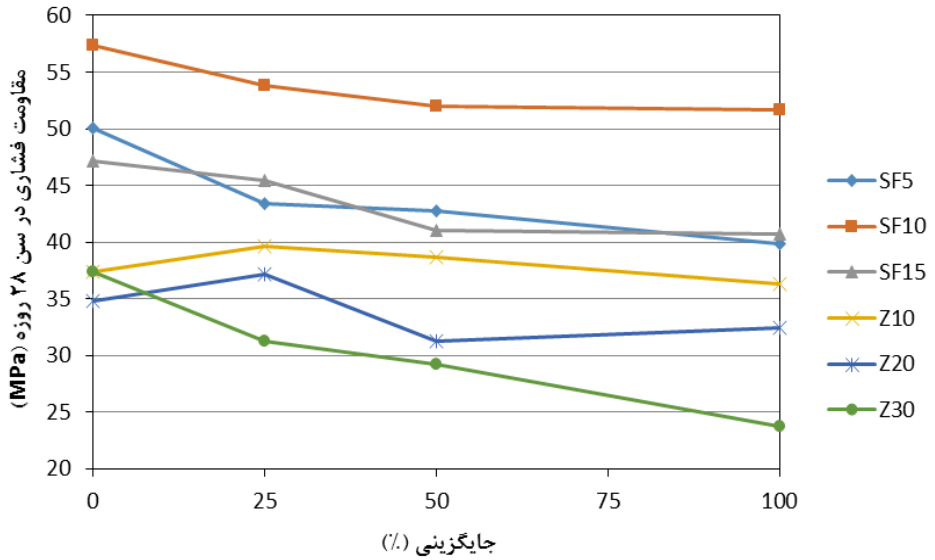
آن‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود در تمامی بتن‌های حاوی میکروسیلیس، با افزایش مقادیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری افت می‌کند. باید توجه داشت که گرچه افت مقاومت فشاری در سطح جایگزینی ٪۵۰ مصالح بازیافتی نسبت به سطح جایگزینی ٪۲۵ اندکی محسوس است، ولی مقاومت فشاری کسب‌شده در بتن‌های حاوی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی اختلاف چندانی با بتن‌های حاوی ٪۵۰ جایگزینی نشان نمی‌دهد. این مساله نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۸ روزه، در صورت استفاده از پوزولان میکروسیلیس می‌توان تاثیر نامناسب افت مقاومت فشاری ناشی از افزایش سنگدانه‌ها را به میزان زیادی کاهش داد.

طبق آن‌چه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، متوسط رشد مقاومت‌های کسب شده در این بازه زمانی برای بتن‌های بازیافتی در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس بیش‌تر از سایر بتن‌ها و معادل ٪۲۰ می‌باشد. در حالی که بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس در این بازه زمانی با ٪۱۲ و ٪۱۳ رشد مقاومتی روبه‌رو شدند. در بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس بیش‌ترین میزان افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برای بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی روی داده است، جایی که رشد ٪۲۸ مقاومت در این بازه زمانی باعث شده تا مقاومت فشاری در سن ۷ روزه از ۴۰/۵به ۵۱/۷ مگاپاسکال برسد. این مساله می‌تواند گویای آن باشد که در مقایسه با سطوح جایگزینی ٪۵۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس، سطح جایگزینی ٪۱۰ از این پوزولان قادر است به نحو مطلوب‌تری منافذ موجود در سنگدانه‌های بازیافتی را پر کرده و در تامین یک بتن متراکم، موثرتر واقع گردد.

بررسی تاثیر زئولیت

از مقایسه بتن‌های حاوی درصدهای مختلف زئولیت طبیعی می‌توان دریافت که بتن‌های حاوی ٪۱۰ زئولیت از بیش‌ترین میزان مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برخوردار می‌باشند. اختلاف ٪۱۳/۵ و ٪۳۶ متوسط مقاومت بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت نسبت به بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت نشان از تاثیر بسیار مناسب این سطح از جایگزینی در بتن بازیافتی دارد. همانند میکروسیلیس، در تمامی سطوح جایگزینی این پوزولان، مشاهده می‌شود که با افزایش سطح جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی از مقاومت فشاری کاسته می‌شود. اگر چه قبلاً در شناسایی رفتار میکروسیلیس عنوان شد که نمودارهای مربوط به بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ و ٪۱۵، رفتاری مشابه یکدیگر دارند، ولی در مقابل در بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی با افزایش سطح جایگزینی زئولیت، اختلاف میان نمودارها افزایش می‌یابد. از دیگر نکات پر اهمیت و متمایز کننده رفتار زئولیت طبیعی نسبت به میکروسیلیس، در تاثیر آن بر بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح

بازیافتی می‌باشد، جایی که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ و ٪۲۰ زئولیت طبیعی به‌ترتیب با افزایش مقاومت فشاری به مقدار ٪۶ و ٪۷ نسبت به بتن‌های معمولی مشابه خود رسیدند.



شکل ۳ : مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها

از مقایسه درصدهای رشد مقاومت در بازه ۲۸ روزه، می‌توان چنین استنباط کرد که گرچه میزان کسب مقاومت در بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۳۰ زئولیت طبیعی اندکی نسبت به سایر درصدهای استفاده از این پوزولان بیش‌تر است، ولی متوسط درصدهای رشد کسب‌شده این بتن‌ها به یکدیگر نزدیک می‌باشند. جهت مقایسه کلی میان تاثیر استفاده از میکروسیلیس و زئولیت طبیعی در بتن‌های بازیافتی، از شکل ۳ می‌توان چنین مشاهده کرد که بیش‌ترین مقاومت فشاری کسب‌شده در بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی معادل ۳۹/۶ مگاپاسکال و در بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی و ٪۱۰ زئولیت بوده در حالی که کم‌ترین مقاومت فشاری کسب شده در بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس معادل ۳۹/۹ مگاپاسکال و در بتن‌های حاوی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی و ٪۵ میکروسیلیس بوده است. لذا می‌توان چنین استنباط کرد که گرچه تاثیر به‌کارگیری زئولیت طبیعی می‌تواند در افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه موثر واقع گردد، ولی تاثیر استفاده از میکروسیلیس در مقاومت بتن‌های بازیافتی به نحوی است که کم‌ترین مقاومت فشاری کسب‌شده در بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس، هم‌چنان از بیش‌ترین مقاومت فشاری کسب شده بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی، بیش‌تر خواهد بود.

۵-۳- مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه

بررسی تاثیر میکروسیلیس

جدول ۳ و شکل ۴ بیانگر نتایج حاصل از مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه بتن‌های ساخته شده می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بتن‌های حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس به ترتیب به مقاومت های ۵۲/۵، ۶۰/۳ و ۴۹/۶ مگاپاسکال رسیدند. در بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس، بیش‌ترین مقاومت کسب‌شده متعلق به بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی می‌باشد. آن‌طور که در نمودار شماره ۳ مشهود است، مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی و ٪۱۰ میکروسیلیس به ترتیب به مقدار ٪۱۸/۵ و ٪۲۲ از مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس بیش‌تر است. مشابه همین رفتار برای بتن‌های حاوی ٪۵۰ و ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی نیز تکرار شده است. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که تاثیر مناسب جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در بازه ۹۱ روزه دقیقاً در ادامه همان رفتار مناسب رخ داده در بازه‌های ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد. تاثیر رفتار

مناسب ٪۱۰ جایگزینی میکروسیلیس در بازه ۹۱ روزه را می‌توان در میزان رشد مقاومت کسب‌شده در بازه ۷ تا ۹۱ روزه، در مقایسه میان سایر درصدهای میکروسیلیس بر بتن‌های بازیافتی مشاهده کرد، جایی که در این بازه زمانی بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس به ترتیب به طور میانگین به ٪۲۳، ٪۲۹ و ٪۲۰، رشد مقاومت رسیدند. این نتیجه نشان می‌دهد که بتن‌های بازیافتی حاوی٪۱۰ میکروسیلیس در یک بازه زمانی ۹۱ روزه به بیش‌ترین میزان رشد مقاومت فشاری رسیدند.

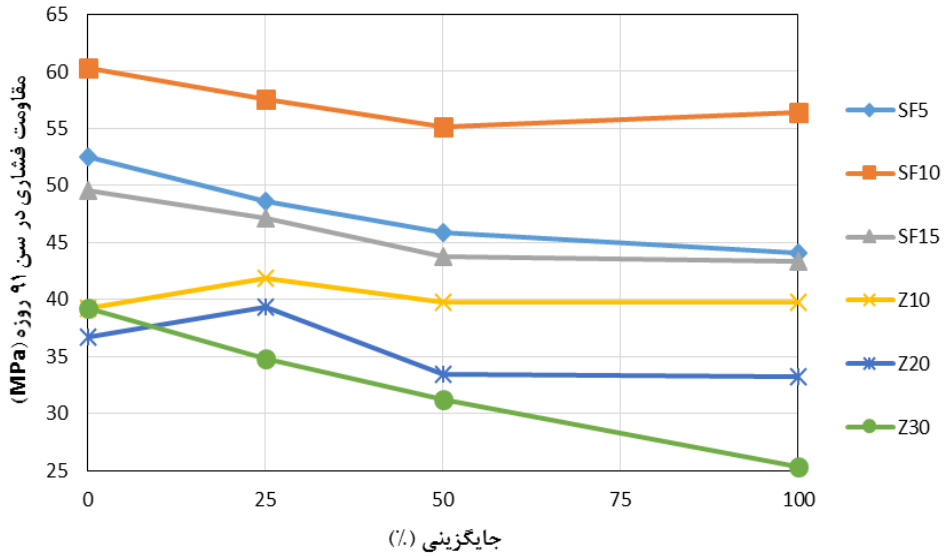
در رابطه با تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در این بازه زمانی نیز می‌توان مشاهده نمود که در ٪۵ جایگزینی میکروسیلیس میزان افت مقاومت فشاری بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی نسبت به بتن معمولی حداکثر ٪۱۶ بوده و در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس این میزان به ٪۶/۵ کاهش یافته است، در حالی که بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی و حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس در مقایسه با بتن معمولی با ٪۱۲/۵ کاهش مقاومت روبرو شدند. توجه به این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس باعث می‌شود تا افت مقاومت فشاری در بتن‌های تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس از نصف کم‌تر گردد. در زمینه درصد بهینه پیشنهادی برای جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی نیز می‌توان گفت که همانند رفتار ۲۸ روزه، در مقایسه با بتن معمولی، استفاده از سطح جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی تاثیر محسوسی در افت مقاومت فشاری نشان نمی‌دهد (٪۴/۵ تا ٪۷) در حالی که در ٪۵۰ جایگزینی مصالح بازیافتی، افت مقاومت نسبت به بتن معمولی افزایش یافته و به بازه ٪۸/۶ تا ٪۱۲/۵ می‌رسد. این میزان از افت مقاومت برای بتن‌های حاوی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی بین ٪۶/۵ تا ٪۱۶ خواهد بود.

بررسی تاثیر زئولیت

نتایج نشان داد که بتن‌های معمولی حاوی زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن‌های معمولی حاوی میکروسیلیس مقاومت کم‌تری را کسب کردند. بتن‌های معمولی حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت در بازه زمانی ۹۱ روزه به مقاومت‌های فشاری ۳۹/۳، ۳۶/۷ و ۳۹/۲ مگاپاسکال رسیدند. همانند بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس، در این بتن ها نیز بیش‌ترین مقاومت فشاری کسب‌شده برای بتن-های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی روی داده، جایی که مقاومت فشاری ۴۱/۹، ۳۹/۴ و ۳۴/۸ مگاپاسکال به ترتیب برای بتن‌های حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی حاصل شده است. همانند بازه ۲۸ روزه، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ٪۱۰ زئولیت رفتار بهتری نسبت به سایر سطوح جایگزینی از خود نشان می‌دهند، به نحوی که در جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، متوسط افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن‌های مشابه حاوی ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی معادل ٪۶ و ٪۱۷ ثبت شده است. مشابه همین رفتار برای بتن‌های حاوی ٪۵۰ و ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی تکرار شده است. لذا می‌توان عنوان کرد که برای بتن‌های حاوی زئولیت، سطح جایگزینی ٪۱۰ می‌تواند تاثیر محسوسی بر رفتار مقاومتی این بتن‌ها در یک بازه ۹۱ روزه داشته باشد.

تاثیر رفتار زئولیت طبیعی در بازه ۹۱ روزه را می‌توان در مقایسه میان درصد مقاومت کسب‌شده بتن‌های بازیافتی مشاهده نمود. نتایج نشان می‌دهد که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی به طور متوسط به رشد ٪۲۴ در بازه ۷ تا ۹۱ روزه رسیدند؛ در حالی که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۲۰ زئولیت طبیعی به طور میانگین ٪۲۰ رشد مقاومتی از خود نشان دادند. در مقابل گرچه بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۳۰ زئولیت طبیعی در این بازه زمانی توانسته‌اند تا ٪۳۰ رشد مقاومتی از خود نشان دهند، اما حداکثر مقاومت فشاری ۹۱ روزه کسب‌شده در بتن حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، معادل ۳۴/۸ مگاپاسکال بوده و حتی نتوانسته به مقاومت مطلوب طراحی (۴۰ مگاپاسکال) دست یابد.

در رابطه با تاثیر درصد جایگزینی زئولیت طبیعی بر مقاومت فشاری ۹۱ روزه، نیز می‌توان مشاهده کرد که در ٪۱۰ جایگزینی زئولیت طبیعی در بازه ٪۰ تا ٪۱۰۰ جایگزینی مصالح بازیافتی نه تنها افت مقاومتی روی نداده، بلکه مقاومت فشاری حدود ٪۱ نیز افزایش یافت. در حالی که در بتن‌های حاوی ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی، در بازه جایگزینی ٪۰ تا ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی، مقاومت فشاری به ترتیب با ٪۹/۵ و ٪۳۵ کاهش روبرو بوده است که این نتیجه می‌تواند گویای تاثیر بسیار مناسب سطح ٪۱۰ جایگزینی زئولیت طبیعی در مقایسه با سایر سطوح جایگزینی این پوزولان باشد.



شکل ۴: نمودار مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه نمونه‌ها

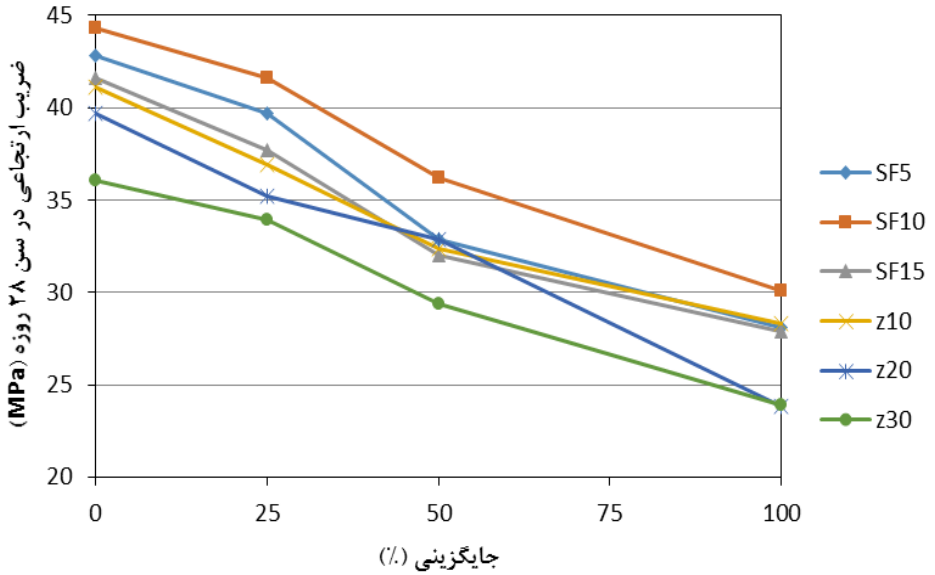
از مقایسه تاثیر استفاده از میکروسیلیس و زئولیت طبیعی بر مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه، می توان به اختلاف چشم-گیر مقاومت‌های کسب‌شده در این بازه زمانی برای این دو پوزولان اشاره کرد، جایی که مقاومت فشاری ۹۱ روزه بتن‌های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی و حاوی ٪۱۰میکروسیلیس بیش از ٪۳۷ از مقاومت فشاری بتن بازیافتی مشابه حاوی ٪۱۰ زئولیت بیش‌تر بوده است.

۵-۴- ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه

آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه بتن‌ها براساس استاندارد ASTM C469 [۲۹] انجام گردید. هر مقدار بیانگر متوسط ضریب سه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری می‌باشد. نتایج مندرج در جدول ۳ و شکل ۵ نشان می‌دهند که ضریب ارتجاعی در بتن‌های معمولی حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس برابر ۴۲/۸، ۴۴/۳ و ۴۱/۶ گیگاپاسکال شده است. طبق آنچه که از تمام نمودارها برمی‌آید، افزایش میزان مصالح بازیافتی باعث می‌شود تا ضریب ارتجاعی با شیب تندی کاهش نماید. شیب تند نمودارها نشان می‌دهد که شدت افت ضریب ارتجاعی در اثر افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی در مقایسه با شدت افت مقاومت فشاری به میزان بسیار زیادی بیش‌تر می‌باشد. افت ضریب ارتجاعی در بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۵ میکروسیلیس در بازه ٪۰ تا ٪۱۰۰ جایگزینی، تا سقف ٪۳۴ بوده در حالی که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس در اثر جایگزینی کامل مصالح بازیافتی تا ٪۳۲ با کاهش ضریب ارتجاعی روبرو شدند. از مقایسه نتایج می‌توان چنین عنوان کرد که افت ضریب ارتجاعی در سطح جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی نسبت به بتن معمولی چندان محسوس نبوده به نحوی که در همین سطح از جایگزینی، بتن‌های حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس به ترتیب با ٪۷، ٪۶ و ٪۱۱ کاهش ضریب ارتجاعی رو برو شدند.

در بتن‌های معمولی حاوی زئولیت نیز ضریب ارتجاعی برای سطوح جایگزینی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ به ترتیب ۴۱/۱، ۳۹/۷و ۳۶/۱ گیگاپاسکال به دست آمدند. با توجه به شیب نزولی نمودارهای مربوط به بتن‌های حاوی زئولیت نیز همانند بتن‌های حاوی میکروسیلیس نشان از کاهش ضریب ارتجاعی در اثر افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی دارد. افت ضریب ارتجاعی در اثر جایگزینی مصالح بازیافتی تا سقف ٪۱۰۰، در بتن‌های حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت به ترتیب ٪۳۱، ٪۴۰ و ٪۳۴ به دست آمده است. در تمامی بتن‌های بازیافتی، سطح جایگزینی ٪۲۵ نیز با کم‌ترین میزان افت ضریب ارتجاعی روبرو بوده به نحوی که به ترتیب ٪۱۰، ٪۱۱ و ٪۶ افت ضریب ارتجاعی در بتن‌های حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی نسبت به بتن معمولی مشاهده گردید، ولی مطابق با نمودار شماره ۴ به مرور با افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، ضریب ارتجاعی با شیب بیش‌تری افت کرده است.

در رابطه با مقایسه تاثیر سطوح بهینه پوزولان‌های مصرفی در ضریب ارتجاعی نیز همانند مقاومت فشاری، برای میکروسیلیس و زئولیت طبیعی می‌توان سطح جایگزینی ٪۱۰ را عنوان نمود. چرا که افت ضریب ارتجاعی ناشی از افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی در این سطح جایگزینی از پوزولان‌ها نسبت به سایر سطوح پوزولان‌های مصرفی، کم‌تر بوده است، به نحوی که برای بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، این میزان ٪۳۲ و برای بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی معادل ٪۳۱ ثبت گردیده است.



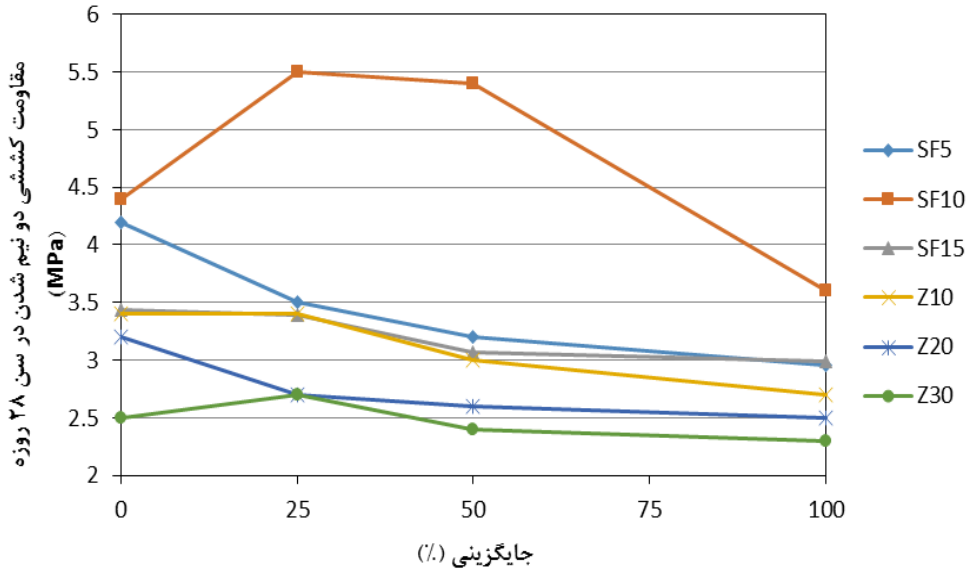
شکل ۵ : ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها

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

آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بتن ها براساس استاندارد ASTM C496 [۳۰] انجام شدند. هر مقدار بیانگر متوسط سه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متری می‌باشد. جدول ۳ و شکل ۶ بیانگر مقاومت کششی دو نیم‌شدن نمونه‌های ساخته شده می‌باشند. بجز نمودار مربوط به بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، سایر نمودارها رفتاری نسبتاً مشابه داشته و با افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی در آن‌ها از مقاومت کششی دونیم‌شدن کاسته شده است. در میان بتن‌های معمولی حاوی میکروسیلیس، مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۰ نزدیک به هم بوده در حالی که این مقدار برای بتن حاوی ٪۱۵ کاهش یافته است. در بتن-های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن بازیافتی حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی با ٪۲۵ رشد نسبت به بتن معمولی همراه بود و با رسیدن سطح جایگزینی مصالح بازیافتی به ٪۵۰، رشد مقاومت کششی دو نیم‌شدن در مقایسه با بتن معمولی به ٪۲۳ رسید. در جایگزینی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی، افت مقاومت چشم‌گیری در رفتار مقاومتی بتن بازیافتی ملاحظه شد، به نحوی که در مقایسه با بتن معمولی، مقاومت کششی دو نیم‌شدگی ٪۱۸ کاهش پیدا نمود. در ٪۵ و ٪۱۵ جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ به ترتیب ٪۳۰ و ٪۱۳ افت پیدا کرده است.

در بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی، مقاومت‌های کششی دو نیم‌شدن کسب شده بتن‌های معمولی در سطوح جایگزینی ٪۱۰، ٪۲۰و ٪۳۰ به ترتیب معادل ۳/۴، ۳/۲ و ۲/۵ مگاپاسکال شده است. توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که حداکثر مقاومت کششی کسب‌شده این بتن‌ها (۳/۴ مگاپاسکال، مربوط به بتن حاوی ٪۱۰ زئولیت) از مقاومت کششی کسب‌شده بتن‌های بازیافتی با ٪۲۵ مصالح بازیافتی و حاوی میکروسیلیس نیز کم‌تر است و حتی بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس نیز مقاومت کششی دو نیم‌شدن بیش-تری را نسبت به آن کسب کرده است. این امر بیانگر تاثیر بسیار مناسب‌تر میکروسیلیس در مقایسه با زئولیت طبیعی می‌باشد. در سطح

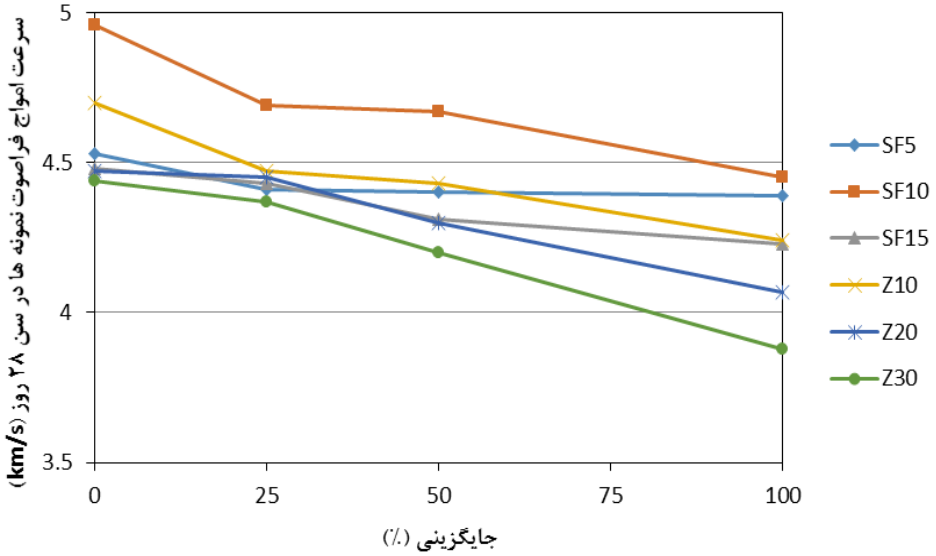
جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، استفاده از هر یک از سطوح جایگزینی زئولیت طبیعی تاثیر چندان محسوسی در کاهش مقاومت کششی دو نیم‌شدن در مقایسه با بتن معمولی نداشته و حتی در بتن‌های حاوی ٪۳۰ جایگزینی زئولیت، این مقاومت با رشد نسبتاً کمی نیز مواجه شد. در مجموع، همانند بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس، بتن‌های حاوی زئولیت نیز در سطوح جایگزینی بالاتر مصالح بازیافتی با کاهش مقاومت روبرو شدند. حداکثر میزان این افت مقاومت در بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی به ترتیب معادل ٪۲۱، ٪۲۲و ٪۸ به دست آمد.



شکل ۶ : مقاومت کششی دو نیم‌شدن نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

۵-۶- سرعت امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

آزمایش‌های تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت براساس استاندارد ASTM C597 [۳۱] انجام شدند. هر مقدار بیانگر متوسط سرعت سه نمونه مکعبی می‌باشد. جدول ۳ و شکل ۷ بیانگر نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین سرعت امواج فراصوت می‌باشند. شیب نزولی مشاهده شده در نمودار بیانگر رابطه معکوس درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های بتنی می‌باشد. در میان نمونه‌های بتنی، بیش‌ترین میزان سرعت امواج به‌دست آمده به ترتیب متعلق به بتن‌های حاوی ٪۱۰، ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس می‌باشند. در میان بتن‌های معمولی حاوی زئولیت طبیعی نیز بیش‌ترین سرعت‌های ثبت‌شده به ترتیب متعلق به بتن‌های حاوی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی هستند. تاثیر مطلوب سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با سایر سطوح جایگزینی پوزولان‌ها در پرکردن حفرات موجود و دست‌یابی به یک بتن چگال‌تر در بتن‌های بازیافتی را می‌توان در نشکل دید. این تاثیر مطلوب را در جدول ۳ نیز می‌توان ملاحظه کرد، به نحوی که بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس از سرعت انتشار امواج فراصوتی معادل ۴/۴۵ کیلومتر بر ثانیه برخوردار شده که این میزان در مقایسه با بتن‌های با ٪۲۵ مصالح بازیافتی و حاوی ٪۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس نیز بیش‌تر می‌باشد.



شکل ۷ : سرعت انتشار امواج فراصوت نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

جدول ۴: تعیین سطح کیفی بتن براساس سرعت انتشار امواج فراصوت ارائه شده توسط وایتهورست[۶] [۳۲]

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>

طبق جدول ۴ ارائه شده توسط وایتهورست [۳۲] در میان بتن‌های حاوی میکروسیلیس، بتن‌های معمولی حاوی ٪۵ و ٪۱۰ و بتن‌های بازیافتی با مصالح بازیافتی ٪۲۵ و ٪۵۰ حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس در دسته بتن‌های با سطح کیفی "عالی" قرار می‌گیرند. این در حالی است که سایر بتن‌های معمولی و بازیافتی در گروه بتن‌های با سطح کیفی "خوب" قرار دارند. در میان بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز صرفاً بتن معمولی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی در دسته بتن‌های با سطح کیفی "عالی" قرار گرفته و سایر بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی این پوزولان نیز در گروه با سطح کیفی "خوب" قرار می‌گیرند. لذا از مجموع نتایج کسب‌شده می‌توان دریافت که استفاده از هر یک از این پوزولان‌ها می‌تواند در تعیین سطح کیفی بتن‌های بازیافتی موثر واقع گردد، به نحوی که باعث شود تا بتن‌های بازیافتی در بالاترین سطح جایگزینی مصالح بازیافتی نیز با سطح کیفی "خوب" قرار گیرند، اما طبق نتایج، تغییر در درصد جایگزینی هر یک از این پوزولان‌ها، تاثیر به‌سزایی در تغییرات سطح کیفی بتن نخواهد داشت.

۶- نتایج

در این تحقیق خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی و میکروسیلیس بررسی و مورد مقایسه قرار گرفتند. برای این بررسی، در مجموع تعداد ۳۶۰ نمونه استاندارد مکعبی و استوانه‌ای در قالب ۲۴ طرح اختلاط ساخته شدند و میزان مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی دو نیم‌شدن و سرعت انتشار امواج فراصوت تماماً در سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری و مورد بررسی واقع شدند. نتایج کلیدی حاصل از آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشند:

[6] whitehurst

- در بازه ۷ روزه، تاثیر استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با سایر سطوح جایگزینی به نحوی است که حتی بتن-های حاوی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی از مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی برخوردار شدند. در مقابل گرچه جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی در بتن‌های بازیافتی باعث شده تا بتن ٪۱۰۰ ساخته شده از مصالح بازیافتی رفتاری مشابه با بتن معمولی داشته باشد، ولی میزان تاثیر میکروسیلیس نسبت به زئولیت طبیعی به نحو چشم‌گیری، موثرتر می‌باشد.
- در بازه ۲۸ روزه، امکان دست‌یابی به مقاومت طراحی ۴۰ مگاپاسکال برای اکثر قریب به اتفاق بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس امکان‌پذیر شد، در حالی که اگر چه زئولیت طبیعی توانسته در بهبود کسب مقاومت بتن‌های بازیافتی موثر واقع شود ولی نتوانسته تا هیچ یک از این بتن ها به مقاومت مطلوب طراحی دست یابند.
- 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 می‌باشد. 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 داده است. در بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی صرفاً بتن با ٪۲۵ مصالح بازیافتی و ٪۱۰ زئولیت طبیعی به مقاومت هدف طراحی دست یافت. تاثیر جایگزینی ٪۱۰ زئولیت در بتن‌های بازیافتی به نحوی است که جایگزینی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی باعث کاهش محسوس مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی حاوی زئولیت نشد.
- با افزایش میزان مصالح بازیافتی، ضریب ارتجاعی به نحو چشم‌گیری افت نمود. در هر دو نوع پوزولان مصرفی در سطح جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی افت ضریب ارتجاعی چندان محسوس نبوده و سطح جایگزینی ٪۱۰ از این دو پوزولان با کم‌ترین میزان افت ضریب ارتجاعی ناشی از افزایش مصالح بازیافتی روبرو گردید.
- جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شده تا مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن‌های بازیافتی به نحو چشم‌گیری افزایش یابد، به‌علاوه بتن با ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی با افت زیاد مقاومت کششی دو نیم‌شدن روبرو شد. در مقایسه با میکروسیلیس، استفاده از زئولیت طبیعی تاثیر مطلوبی در کسب مقاومت کششی دو نیم‌شدن نداشته به نحوی که بیش‌ترین مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی و ٪۱۰ زئولیت طبیعی هم‌چنان از کم‌ترین مقاومت کششی حاصله متعلق به بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس کم‌تر است.
- هیچ یک از بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی در گروه بتن‌های با سطح کیفی "عالی" قرار نمی‌گیرند، در حالی که بتن‌های تا سقف ٪۵۰ از مصالح بازیافتی و حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، می‌توانند در سطح کیفی "عالی" قرار گیرند. سایر بتن‌های بازیافتی در تمام سطوح جایگزینی از مصالح بازیافتی و همین‌طور پوزولانی در گروه بتن‌های "خوب" قرار دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری‌های بی دریغ شرکت‌های "سالار بتن اهواز" و "ایمن خاک جنوب" به خاطر در اختیار قراردادن مصالح و تجهیزات آزمایشگاهی به محققین، کمال تشکر را دارند.

مراجع

[1] Yuan, H., Chini, A., Lu, Y., Shen, L.; (2012). A dynamic model for assessing the effects of managment strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management, 32, 521-531.*

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

[3] European Union, (2008). *EU DIRECTIVE 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of waste and repealing certain Directives.*

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

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

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

[7] British Standard (BS), (2006). *Concrete—Complementary British Standard to BS EN 206-1-Part 2: Specification for constituent materials and concrete*, Britain Kingdom.

[8] Iranian Management Organization, (2003). Iranian Concrete Code (ICC). 6 ed., 120,Tehran, Iran.

[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] Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A.; (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites.* 24, 269-279.

[11] Salem, R. M., Burdette, E. G., Jackson, N. M.; (2003). Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete, *ACI Materials Journal*, 100, 216-222.

[12] Zaharieva, F., Buyle-Bodin, F., Wirquin, E.; (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 1927-1932.

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

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

[15] 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, 565-573.

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

[17] Konin, A., Kouadio, D. M.; (2011). Influence of Cement Content on Recycled Aggregates Concrete Properties., *Modern Applied Science*, 5, 23-31.

[18] Manzi, S., Mazzotti, C., Bignozzi, M. C.; (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate," *Cement and Concrete Composites*, 37, 312-318.

[19] Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., Leelawat, T.; (1999). Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings.* 134, 257-274.

[20] Leite, M. B.; (2001). *Evaluation of the mechanical properties of concrete produced with recycled aggregates from construction and demolition wastes*, PhD Thesis, Brazil, Federal University of Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

[21] Khalaf, F. M.; (2006). Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18, 518-526.

[22] Rao, A., Jha, K. N., Misre, S.; (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resources, Conservation & Recycling*, 50, 71-78.

[23] Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J.; (2012). The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 34, 1044-1052.

[24] 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, 788-795.

[25] Jalilifar, H., Sajedi, F., Afshar, R.; (2016). Exprimental effect of using silica fume and fly ash on mechanical properties of recycled concretes," *International Journal of Engineering and Applied Sciences*

(IJEAS), 3, 67-71.

[26] ASTM C192 / C192M-16a.; (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,* ASTM International, West Conshohocken.

[27] 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.

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

[29] ASTM C469 / C469M-14.; (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression,* ASTM International,, West Conshohocken.

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

[31] ASTM C597-16.; (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete,* ASTM International, West Conshohocken.

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