



مشخصات مکانیکی بتن حاوی سنگدانه ریزدانه آسفالت بازیافتی و دوده سیلیسی

مرضیه سلطانی^{۱*}، مهدی آرزومندی^۲، مجتبی حاج مهدی^۳ و محمدعلی یعقوبی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیر انتفاعی شهاب دانش

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیر انتفاعی شهاب دانش

^۳ کارشناسی ارشد صنایع، مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت دانش بنیان نانو بتن امین

^۴ کارشناس ارشد سازه، مدیر کنترل کیفیت شرکت دانش بنیان نانو بتن امین

Arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

چکیده: استفاده از بتن معمولی با توجه به آلودگی های ناشی از تولید سیمان مشکلات زیست محیطی فراوانی را به دنبال دارد. از طرفی آسفالت ضایعاتی ناشی از تخریب راه ها، بخش بزرگی از مواد زائد و نخاله ها را تشکیل می دهد. این مقاله نتایج آزمایش های تجربی، در مورد تاثیر جایگزینی جایگزینی آسفالت بازیافتی (Recycled Asphalt Pavement) با سنگدانه (ریز دانه) و سیمان با دوده سیلیسی را مورد بررسی قرار می دهد. هدف از این مطالعه بررسی تاثیر سطوح جایگزینی آسفالت بازیافتی و دوده سیلیسی بر مقاومت بتن می باشد. این آزمایش بر روی مخلوط بتنی با مقاومت فشاری مشخصه 40 مگاپاسکال انجام شده است. درصد جایگزینی آسفالت بازیافتی با سنگدانه 10 و 15 درصد و درصد جایگزینی دوده سیلیسی با سیمان در این تحقیق 6 درصد می باشد. نتایج این آزمایش نشان می دهد که افزودن دوده سیلیسی به بتن باعث بهبود خواص مقاومتی بتن می شود و در مقابل استفاده از آسفالت بازیافتی باعث کاهش مقاومت بتن شده، و استفاده توأم این دو ماده باعث بهبود خواص مکانیکی بتن سه جزئی حاوی میکروسیلیس و سنگدانه آسفالت بازیافتی نسبت به بتن شاهد می شود.

کلمات کلیدی: سنگدانه بازیافتی آسفالت، دوده سیلیسی، بتن معمولی، بتن بازیافتی

Mechanical Properties of Concrete with Recycled Asphalt Pavement and Silica Fume

M. Soltani, M. Arezoumandi, M. Haj.Mahdi and M.A. Yaghoubi

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 10% and 15% Recycled Asphalt Pavement (RAP) fine aggregate as well as 6% silica fume. This experimental program consisted of six mix designs. The hardened properties of concrete were compared with the provisions of the international design codes (U.S., Australia, Canada, Europe, and Japan) and previous researchers' suggested equations as well as a database of conventional concrete. Results of this study show that the RAP mixes test results fall within the 95% confidence interval of a nonlinear regression curve fit of the conventional concrete splitting tensile test database. Furthermore, application of the RAP in mix designs, decreases the compressive strengths around 25% and splitting tensile strength up to 30%. To overcome inferior hardened properties of RAP mixes, silica fume (6%) has been added to the RAP mixes. Results of the mixes including both RAP and silica fume show comparable hardened properties (both compressive and splitting tensile strength) with conventional concrete.

Keywords: Recycled asphalt pavement, Conventional concrete, Hardened properties, Experimental study.

۱- مقدمه

امروزه بتن برای انواع پروژه های عمرانی قابل انطباق است، از پیاده روها تا ساختمان های بلند، جاده ها، پل ها، مخزن های تامین آب و حتی راه آهن، می توانند ساختاری از بتن داشته باشند. بنابراین بتن در ترویج توسعه اجتماعی بدون تردید، همچنان نقش مهمی را ایفا می نماید. با این حال لازم به ذکر است که صنعت بتن مقدار زیادی از سنگ های طبیعی که باعث تخریب محیط زیست می شود را مصرف می کند. بنابراین نیاز فوری به پیدا کردن و عرضه جایگزین مناسب برای سنگدانه های طبیعی وجود دارد [۱]. طبق گفته سانی و همکارانش، یک مثال شناخته شده از عرضه ی جایگزین این مصالح، استفاده از زباله های ساختمانی برای تولید مصالح بازیافتی است [۲].

کنترل مسائل زیست محیطی یک مشکل فزاینده در صنعت ساخت و ساز است. منابع طبیعی در عملیات روزمره به شکل فراوانی مصرف می شوند، و مقدار زیادی زباله را تولید می نمایند. بنابراین فعالیت های ساخت و ساز اثرات زیست محیطی قابل توجهی را بر چرخه محیط زیست اعمال می کنند. از طرفی مدیریت زباله در صنعت ساخت و ساز با موفقیت انجام نشده است و همین مسئله مواد زائد حاصل از ساخت و ساز را به یک تهدید بزرگ برای محیط زیست تبدیل کرده است. بنابراین تصور می شود برای بهبود این چالش، استفاده مجدد و بازیافت مواد ساخت و ساز، ابزاری موثر برای کاهش اثرات دفن زباله و بهبود مدیریت زباله خواهد بود [۳-۴].

از طرفی استفاده از این مواد زائد، میزان مصرف سیمان، هزینه دفع زباله ها، خطر آلودگی محیط زیست و انتشار گاز CO₂ را کاهش داده و باعث صرفه جویی در فضای دفن زباله می شود [۵]. البته برای مواد زائد بازیافتی، بررسی خواص مقاومتی بتن، نسبت جذب آب مواد بازیافتی، مدول الاستیسیته بتن، اطلاعات مهمی در مورد درک رفتار مواد بازیافتی و قابلیت اطمینان این محصول به عنوان ماده جایگزین است، که باید مورد بررسی قرار گیرد [۶].

خرده های آسفالت بازیافتی که پسماند حاصل از بازسازی و تراش رویه های آسفالتی هستند، بخش بزرگی از مصالح دور ریز را تشکیل می دهند. به طور کلی در بسیاری از کشورهای جهان سالانه صدها تن از این مواد دور ریز تولید می شود که در بیشتر موارد از آنها استفاده مجدد می شود [۷]. همچنین تحقیقات مختلفی در زمینه تاثیر استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط های بتن معمولی انجام شده است. چندین سال است که در برخی از کشورهای صنعتی از ضایعات ساختمانی و راهسازی به ویژه آسفالت به عنوان بخشی از سنگدانه های بتن و آسفالت جدید استفاده می شود. به طور مثال در کشورهای آلمان، هلند، بلژیک و نروژ تحقیقات زیادی برای بررسی امکان استفاده از این مصالح در ساختمان و راه صورت پذیرفته است [۸-۹]. نتایج پژوهش ها و آزمایشات انجام شده نشان می دهد که مقاومت بتن ساخته شده با Recycled Asphalt Pavement (RAP) بستگی به استحکام آسفالت (آسفالت، ریزدانه، درشت دانه) دارد، و ممکن است مقاومت فشاری بالاتر از 25 MPa تولید نماید [۱۰-۱۱]. با این حال هانگ و همکارانش گزارش دادند که مقاومت بتن با آسفالت بازیافتی به طور سیستماتیک کاهش می یابد، صرف نظر از اینکه آیا RAP درشت دانه است یا ریزدانه. و این کاهش مقاومت احتمالاً نتیجه ی پیوند ضعیف بین آسفالت و ملات سیمان است [۲]. آپورا با جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی در بتن به این نتیجه رسید که استفاده از سنگدانه بازیافتی با درصدهای جایگزینی پایین در بتن امکان پذیر است. او با جایگزینی ۲۰٪ سنگدانه بازیافتی تنها ۱۴٪ کاهش مقاومت را مشاهده کرد. اما با جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی شاهد کاهش ۱۶٪ مقاومت فشاری، ۲۴٪ مقاومت کششی و ۳۴٪ مقاومت خمشی بود. طبق همین نتایج بیان نمود که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی میزان مقاومت در سنین بالا کاهش می یابد [۵].

تابش و همکارانش چندین اثر ترکیب بازیافتی را بر روی مقاومت های بتن های حاوی RAP مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که مقاومت کششی بتن های

انجام آزمایش هایی بر روی بتن های حاوی 5، 10 و 15 درصد دوده سیلیسی به این نتیجه دست یافتند که 15% دوده سیلیسی، درصد بهینه جایگزینی با سیمان است. طبق بررسی های آنها در بتن های حاوی 5، 10 و 15 درصد دوده سیلیسی به ترتیب 12، 27 و 34 درصد افزایش مقاومت فشاری، 12، 13 و 16 درصد افزایش مقاومت کششی و در مقاومت خمشی به ترتیب 6، 13 و 16 درصد افزایش مقاومت رخ داده است [4]. از طرفی، ایکسیسی با بررسی پژوهش های انجام شده در زمینه تاثیر دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری، به این نتیجه رسید که افزودن 5 تا 15 درصد دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان در بتن، باعث افزایش 20 تا 100 درصد مقاومت بتن در سنین بالا می گردد. طبق پژوهش های او درصد بهینه استفاده از دوده سیلیسی بازه بین 5 تا 15 بود [6]. این محققین با بررسی درصدهای مختلف جایگزینی دوده سیلیسی با سیمان به این نتیجه رسیدند که این ماده، در مهندسی مدرن بتن، کارایی بسیار فراوانی دارد. و استفاده از آن به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در حفظ آثار زیست محیطی موثر است [4].

مقاومت بتن به طور عمومی مهمترین عامل نشان دهنده ی کیفیت آن است. این موضوع به این دلیل است که میزان مقاومت به طور مستقیم به کیفیت خمیر سیمان سخت شده مربوط می شود و هنگام ترکیب با ملات بتن، خواص مکانیکی آن را افزایش دهد. افزودن دوده سیلیسی، دارای اثرات مثبت بر خواص مقاومت بتن، در تمامی سنین است، و نمونه های دارای دوده سیلیسی دارای بالاترین تقاضای آب در مقایسه با بتن معمولی هستند [4]. اگر چه مقاومت به طور مستقیم نشان دهنده ی میزان دوام بتن یا ایستادگی آن در برابر تغییر شکل نیست، اما به شدت به نسبت آب به سیمان بستگی دارد [19].

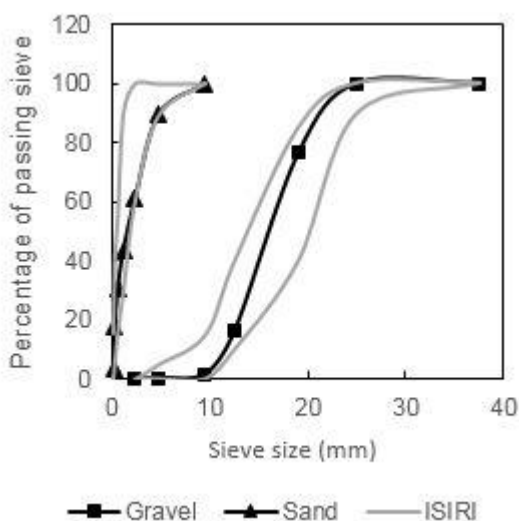
از دهه ۱۹۵۰ استفاده از دوده سیلیسی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان مورد استفاده قرار گرفت است. و اثرات پوزولانی و پرکنندگی آن بر خواص بتن، به طور گسترده شناخته شده است. دوده سیلیسی با پر کردن حفره های موجود در خمیر بتن تازه، باعث

ساخته شده با بتن های بازیافتی پایین تر از بتن های ساخته شده با دانه های طبیعی است. همچنین یافته ها نشان داد که کاهش مقاومت در بتن کم مقاومت بیشتر از بتن با مقاومت متوسط است [7].

دوده سیلیسی یک محصول جانبی از سیلیکون و فری سیلیکون صنعتی است. در دمای 2000 درجه سانتی گراد، بخار اکسید سیلیسیم تولید می شود و در ناحیه کم دما ذرات کوچک متشکل از سیلیس غیر کرسطالی اکسید می شود. دوده سیلیسی یک ماده بسیار نرم و بصورت ذره های ریز می باشد و از مواد غیر بلوری با قطر حدود 0.1 تا 0.2 میکرون و دارای جرم مخصوص 2.2 گرم بر سانتی مترمکعب و سطح مخصوص تقریبی 20 مترمربع در گرم و چگالی ظاهری 200 کیلوگرم بر مترمکعب می باشد [12-13-14].

دوده سیلیسی یکی از فعال ترین پوزولان ها است، که به واسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده بسیار موثری در بتن است. رفتار پوزولانی دوده سیلیسی در بتن مهم ترین خاصیتی است که باعث می شود بتن سخت شده دارای خواص قابل ملاحظه ای گردد. دوده سیلیسی تا حدود زیادی باعث تقویت مقاومت بتن می شود و معمولاً با نسبت 5 تا 10 درصد وزن سیمان در بتن جایگزین سیمان می شود [15-16]. اما رافیا با انجام آزمایش هایی بر روی بتن های حاوی 10، 15 و 20 درصد دوده سیلیسی جایگزین سیمان، به این نتیجه رسید که 15% جایگزینی دوده سیلیسی با سیمان بیشترین مقاومت و 20% دوده سیلیسی کمترین مقاومت را کسب نموده است. و طبق آزمایش های او درصد بهینه جایگزینی دوده سیلیسی 15% است و با افزایش از این مقدار مقاومت کاهش می یابد. در بتن های حاوی 15 و 20 درصد دوده سیلیسی به ترتیب 22% و 4%-، بیشترین افزایش و کاهش مقاومت فشاری را کسب نمودند [17]. همچنین کرتی با انجام آزمایش هایی بر روی بتن های حاوی 10، 15، 20 و 25 درصد به ترتیب 29، 40، 59 و 44 درصد افزایش مقاومت فشاری را مشاهده نمود و درصد بهینه جایگزینی دوده سیلیسی را 20% اعلام نمود [18]. علاوه بر این پاتیل و همکارانش نیز با

قبل از شروع آزمایشات سیمان تهیه و به صورت یکجا در محل آزمایشات، دپو شده است. افزودنی معدنی: دوده سیلیسی در این آزمایش به عنوان افزودنی معدنی درصدی جایگزین سیمان شده است. دوده سیلیسی استفاده شده در این آزمایش تولید کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران براساس ASTM C1240-11 [24]، بوده که قبل از آزمایش تهیه و در مجاورت محل آزمایشات با اتخاذ تدابیر ویژه نگهداری شده است. سنگدانه طبیعی: سنگدانه طبیعی مورد استفاده در این آزمایش در فاز درشت‌دانه، شن با دانه بندی 4.75 الی 19 میلیمتر از نوع شکسته کوهی معدن ونارچ است. بزرگ‌ترین بعد شن استفاده شده 19 میلیمتر و چگالی آن 2700 کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین فاز ریزدانه سنگدانه استفاده شده، ماسه شسته رودخانه‌ای از معدن همایی شهر قم با دانه بندی 0.15 تا 4.75 میلیمتر بوده است. بزرگ‌ترین بعد ماسه استفاده شده 4.75 میلیمتر و چگالی آن 2467 کیلوگرم بر متر مکعب است. دانه بندی سنگدانه طبیعی استفاده شده براساس استاندارد ASTM C29-11 [25] است، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی در جدول 2 آمده است. و نمودار دانه ریز دانه و درشت دانه در شکل 1 ارائه شده است.



شکل 1. نمودار دانه بندی ریزدانه و درشت دانه

Fig. 1. Aggregate gradation chart

افزایش تراکم بتن می شود [20]، که نه تنها مقاومت بتن را افزایش می دهد، بلکه با ایجاد قالب متراکم تر و پر کردن حفره های کوچک از ورود مواد مضر به داخل بتن جلوگیری می نماید [4].

علاوه بر این برخی محققین مانند دونستر، این مسئله را پذیرفتند که استفاده از دوده سیلیسی در بتن علاوه بر بهبود خواص مکانیکی آن برای پایداری مسائل زیست محیطی نیز تاثیر به سزایی دارد [21].

۲- برنامه آزمایش

این پروژه آزمایشگاهی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول مصالح آزمایش اعم از سنگدانه طبیعی، سنگدانه آسفالت بازیافتی، سیمان و دوده سیلیسی انتخاب و مشخصات آنها اعم از مشخصات فیزیکی و شیمیایی مشخص شد. در مرحله دوم نیز 6 طرح اختلاط با عناوین زیر آماده سازی شد:

1. نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی و فاقد دوده سیلیسی CC
 2. نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی CC-S
 3. نمونه با 10 درصد جایگزینی ریزدانه آسفالت بازیافتی فاقد دوده سیلیسی M10
 4. نمونه با 10 درصد جایگزینی ریزدانه آسفالت بازیافتی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی M10S
 5. نمونه با 15 درصد جایگزینی ریزدانه آسفالت بازیافتی فاقد دوده سیلیسی M15
 6. نمونه با 15 درصد جایگزینی آسفالت بازیافتی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی M15S
- برای هر طرح اختلاط 18 نمونه استوانه‌ای به ابعاد 100*200 میلیمتر براساس استاندارد ACI 211.1-91 [22]، تولید و بر همین مبنا مشخصات مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفت.

۳- ۱- مصالح آزمایش

سیمان: سیمانی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته سیمان پرتلند معمولی تیپ 2 دلیجان براساس استاندارد ASTM C150-11 [23]، بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول 1 داده شده است.

البرزشیمی خاتم بوده که براساس کارآیی مد نظر بتن مورد استفاده قرار گرفته است.

آب: آب مورد استفاده در این آزمایش نیز آب لوله کشی شهری (شهر قم) بوده است.

۲-۲ طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های بتن مورد آزمایش در این تحقیق مطابق آئین‌نامه ACI 211.1-91 [۲۲] بوده است. جدول 3 جزئیات طرح‌های اختلاط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه افزودن دوده سیلیسی موجب کاهش کارآیی بتن می‌شود برای جبران این مشکل و نزدیک شدن اسلامپ بتن‌های حاوی دوده سیلیسی به اسلامپ بتن‌های دیگر از ابرروان‌کننده استفاده شده است.

۲-۳ ساخت مخلوط‌ها

نحوه ساخت مخلوط‌ها بدین صورت است که مصالح مصرفی برای ساخت مخلوط نمونه‌ها بطور کامل و دقیق وزن می‌شوند. سپس شن و ماسه خشک و سنگ دانه‌های بازیافتی درون میکسر ریخته شده و مخلوط می‌شوند. در این هنگام مقداری از آب طرح اختلاط به اندازه‌ای که دانه‌های مخلوط به حالت مرطوب برسند به آن اضافه می‌شود و به مدت 30 ثانیه مخلوط می‌شوند. سپس سیمان به مخلوط اضافه شده، و دوده سیلیسی به صورت پودر خشک، پس آن افزوده می‌شود. و در ضمن بهم خوردن مخلوط، مابقی آب به آن اضافه شده. و دو دقیقه عملیات اختلاط انجام می‌شود. علت این امر پخش همگن مواد فوق در داخل مخلوط است، و سپس ابر روان‌کننده به آن افزوده شده و دو دقیقه دیگر میکسر کار می‌کند.

۲-۴ مشخصات مکانیکی

مشخصات مکانیکی بتن‌های CC-S، M10، M10S، M15، M15S براساس آئین‌نامه ASTM C39-11 [۲۶] برای مقاومت فشاری و ASTM C496-11 [۲۷] برای مقاومت کششی مورد محاسبه قرار گرفته است.

جدول 1. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی

Table 1. Physical and chemical properties of cement and silica fume.

Chemical (%) and physical compounds	Cement	Silica fume
SiO ₂	20.7	93.6
Al ₂ O ₃	4.7	1.3
Fe ₂ O ₃	4.1	0.9
CaO	63.8	0.5
SO ₃	2.3	0.1
MgO	1.3	1
Na ₂ O ₃	0.4	0.3
K ₂ O	0.6	1
LOi	2.2	-
(kg/m ³) Specific Weight	3100	2200
Blaine (cm ² /g)	3080	-

سنگدانه آسفالت بازیافتی: سنگدانه بازیافتی تهیه شده، از ضایعات آسفالت شهر قم (عمر ۲۰ ساله) و سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی بدون فرآوری مورد استفاده قرار گرفتند. دانه‌بندی سنگدانه بازیافتی استفاده شده به طور کامل

منطبق بر دانه‌بندی و مشخصات سنگدانه طبیعی (فاز ریزدانه) است. مشخصات سنگدانه بازیافتی در جدول 2 آمده است.

جدول 2. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

Table 2. Physical properties of aggregates.

Maximum diameter of mm) aggregate (Saturated density with dry surface) (kg/m ³)	Water absorption percentage	Type of aggregate
4.75	2467	2.19	Natural sand
19	2700	0.7	Natural gravel
4.75	2278	3.62	Recycled sand

ابر روان‌کننده: ابر روان‌کننده استفاده شده در این آزمایش از نوع پلی‌کربوکسیلات ساخت شرکت

نمونه‌های مورد آزمایش از نوع استوانه‌ای با ابعاد 100*200 میلیمتر بوده و در دمای 25 درجه سانتیگراد عملیات ساخت انجام شده است. قالب‌های بتن‌های ساخته شده پس از 24 ساعت باز شده و بلافاصله نمونه‌ها در حوضچه آب با دمای 23 درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده است.

سن بتن‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی 7، 28 و 56 روز بوده 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 شده است.

۲-۵ نتایج آزمایشات و تحلیل

۲-۵-۱ مقاومت فشاری

همانطور که نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد با افزایش جایگزینی سنگدانه بازیافتی در سنین 7 و 56 روز، مقاومت نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند، اما طرح M10 که حاوی 10% سنگدانه آسفالت بازیافتی می‌باشد، مقاومت مطلوبی را کسب نموده است. که حاکی از پتانسیل خوب این ماده جایگزینی در جهت استفاده آن در فرآورده‌های بتنی می‌باشد. همچنین شکل 3 نتایج حاصل از افزودن 6 درصد دوده سیلیسی را هم نشان می‌دهد که موجب بهبود مقاومت نمونه‌های حاوی آسفالتی شده است. افزودن این ماده پوزولانی موجب رشد مقاومت تمام طرح‌ها نسبت به نمونه بدون دوده

سیلیسی آن شده است که این رویداد استفاده از سنگدانه بازیافتی را توجیه اقتصادی و برای بخش سازه ای کاربردی ترمی نماید.

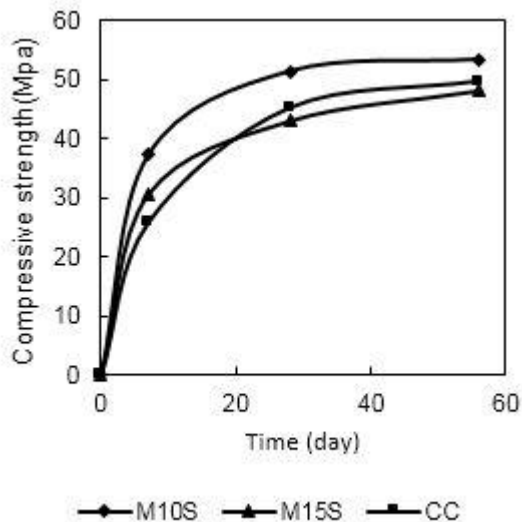
بتن حاوی سنگدانه آسفالت بازیافتی در مقایسه با بتن شاهد به طور کلی با افزایش سن در 56 روزه، حدود 23 درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است. همچنین بتن CC-S که حاوی 6 درصد دوده سیلیسی است در مقایسه با بتن شاهد در سنین 7، 28 و 56 روز به ترتیب 58، 20 و 16 درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. بتن M10S نیز که حاوی ترکیب 6 درصد دوده سیلیسی و 10 درصد سنگدانه آسفالت بازیافتی است، در مقایسه با بتن شاهد در سنین 7، 28 و 56 روز، به ترتیب با افزایش مقاومت فشاری 44، 14 و 7 درصد مواجه شده است و بتن M15S که حاوی ترکیب 6 درصد دوده سیلیسی و 15 درصد سنگدانه آسفالت بازیافتی است، در مقایسه با بتن شاهد در سن 7 روز، با افزایش 19 درصدی مقاومت فشاری و در سنین 28 و 56 روز به ترتیب با 5 و 3 درصد کاهش مقاومت فشاری مواجه شده است. همچنین در مقایسه بتن M10S با CC-S مشاهده شده که به ترتیب در سنین 7، 28 و 56 روزه کاهش مقاومت 9، 7 و 7 درصد اتفاق افتاده است و در مقایسه بتن M15S با CC-S هم به ترتیب در سنین 7، 28 و 56 روز کاهش مقاومت 25، 21 و 16 درصد مشاهده شده است.

جدول 3. طرح اختلاط

Table 3. Mix proportions

Specific Weight (Kg/m ³)	Slump (mm)	Recycled sand (kg/m ³)	Natural gravel (kg/m ³)	(kg/m ³) Natural sand	Super-lubrican(kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sample
2356	91	0	690	1036	0	0	205	425	CC
2347	95	0	687	1027	0.8	26	209	400	CC-S
2339	80	100	684	915	0	0	215	425	M10
2330	100	100	679	914	0.9	26	213	400	M10S
2331	65	149	681	860	0	0	216	425	M15
2322	110	148	677	855	0.9	26	216	400	M15S

در سنین 28 و 56 روز به مقاومت کمتری دست یافته است (5 و 3 درصد کاهش مقاومت به ترتیب در سنین 28 و 56 روز).

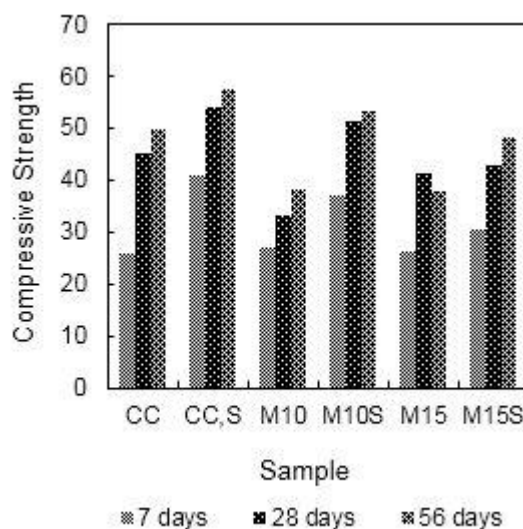


شکل 3. مقاومت فشاری طرح‌های حاوی دوده سیلیسی
Fig. 3. Compressive strength of samples (with silica fume)

به طور کلی دوده سیلیسی 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 دوده سیلیسی 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. [۲۸]

در شکل 4 نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن حاوی سنگدانه بازیافتی آسفالت بدون دوده سیلیسی با بتن شاهد (CC) مورد بررسی قرار گرفته است، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزودن RAP به بتن موجب کاهش مقاومت آن می‌شود. بتن M10 در سنین 28 و 56 روز به ترتیب دارای 26 و 23 درصد کاهش مقاومت نسبت به بتن شاهد است.

مقاومت فشاری بتن‌های دارای دوده سیلیسی در شکل 3 آورده شده است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی 6 درصد دوده سیلیسی، پس از قریب به دو ماه عمل‌آوری توانسته است مقاومتی تقریباً معادل بتن شاهد و حتی بهتر از آن را کسب نماید.

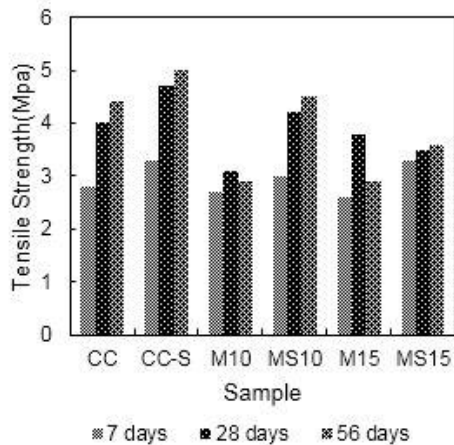


شکل 2. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط
Fig. 2. Compressive strength of different mixtures

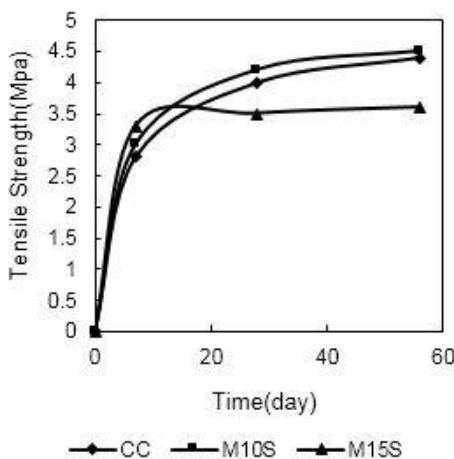
دلیل کاهش مقاومت سنین کم بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان را می‌توان به جایگزینی سیمان با مواد پوزولانی نسبت داد که در مقایسه با سیمان پرتلند از واکنش هیدراسیون کندتری برخوردار است، ولی در سنین بالاتر، به دلیل تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ناشی از واکنش پوزولانی، مقاومت فشاری بتن را تا بیشتر از بتن شاهد افزایش داده است.

در شکل 3، نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی 6% دوده سیلیسی با مخلوط بتن شاهد (CC)، مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل مشخص است بتن M10S نسبت به بتن شاهد (CC) مقاومت فشاری خیلی بهتری را کسب کرده است (44، 14 و 7 درصد افزایش مقاومت به ترتیب در سنین 7، 28 و 56 روز)، اما بتن M15S نسبت به بتن شاهد

سنین 28 و 56 روز در حدود 26 درصد کاهش مقاومت نسبت به بتن CC-S مشاهده می شود.

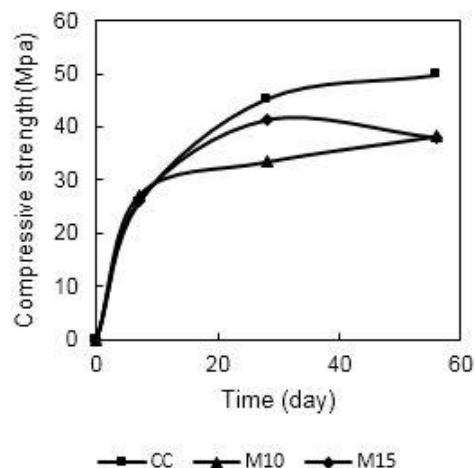


شکل 5. مقاومت کششی طرح های اختلاط
 Fig. 5. Splitting tensile strength of different mixtures



شکل 6. مقاومت کششی طرح های حاوی دوده سیلیسی
 Fig. 6. Splitting tensile strength of samples (with silica fume).

شکل 6 نتایج مقاومت کششی بتن سه جزئی حاوی 6% دوده سیلیسی، با بتن شاهد (CC) مورد بررسی قرار گرفته است. و با توجه به شکل نمودار می توان به این نکته اشاره کرد که افزودن 6% دوده سیلیسی به بتن حاوی RAP مقاومت بتن را تا حد زیادی افزایش می دهد به طوریکه می توان به بتنی با مقاومت بتن شاهد و یا حتی بهتر از آن دست یافت. در بتن M10S نسبت به بتن شاهد بطور میانگین 5% افزایش مقاومت مشاهده میشود. اما بتن M15S در سن 7 روز نسبت به بتن شاهد دارای 18% افزایش مقاومت و در سنین 28



شکل 4. مقاومت فشاری طرح های بدون دوده سیلیسی
 Fig. 4. Compressive strength of samples (without silica fume)

و بتن M15 دارای 9 و 24 درصد کاهش مقاومت، به ترتیب در سنین 28 و 56 روز می باشد. اما نکته قابل توجه در این نتایج این است که بتن M15 در سن 28 روز، 23% افزایش مقاومت نسبت به بتن M10، را کسب نموده است و مقاومت بهتری را کسب نموده.

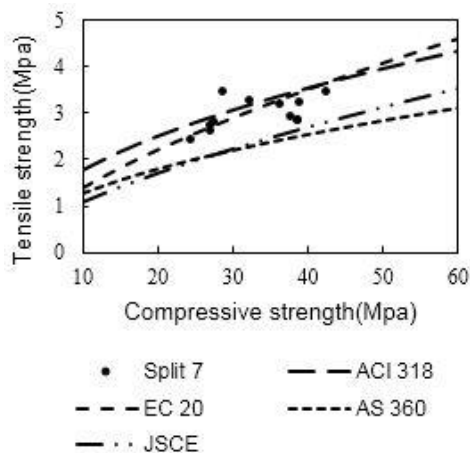
۲-۵-۲ مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی براساس استاندارد ASTM C496-11 [۲۹] بر روی سه نمونه مختلف در سنین 7، 28 و 56 روز در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس این نتایج بتن حاوی دوده سیلیسی CC-S در مقایسه با CC با افزایش سن شاهد رشد مقاومت بیشتری بوده است بطوری که در سن 56 روز اختلاف مقاومت کششی به 14 درصد رسیده است. همچنین شکل 6 نتایج حاصل از افزودن 6 درصد دوده سیلیسی را هم نشان می دهد که موجب بهبود مقاومت نمونه های حاوی آسفالتی شده است. اما بتن های M10 و M15 در مقایسه با CC در سن 56 روز، به ترتیب 32 و 16 درصد مقاومت کمتری دارند. بتن M10S نیز در مقایسه با CC-S دارای مقاومت کششی کمتری است. اختلاف مقاومت کششی این بتن با CC-S در سنین 28 و 56 روز، حدود 10 درصد است. همچنین M15S در مقایسه با CC-S مقاومت کششی کمتری دارد. و در

می شود که تنها نتایج حاصل از آئین نامه استرالیا و ژاپن برای 100 درصد داده های آزمایشات انجام شده محافظه کارانه است و بعد از آن آئین نامه اروپا برای نمونه های سن 28 روزه، حدود 83 درصد داده های آزمایشگاهی محافظه کارانه می باشد.

جدول 4. روابط آیین نامه ای مختلف برای محاسبه مقاومت کششی
Table 4. Provision of splitting tensile strength in different codes

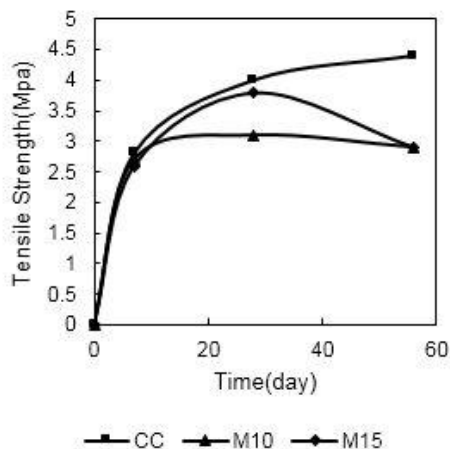
Equation number	Equation	Regulations	No
(1)	$f_{ct} = 0.56 (f'_c)^{0.5}$	[۳۰](ACI 318)	1
(2)	$f_{ct} = 0.3 (f'_c)^{2/3}$	[۳۱](EC20)	2
(3)	$f_{ct} = 0.4 (f'_c)^{0.5}$	[۳۲](AS360)	3
(4)	$f_{ct} = 0.23 (f'_c)^{2/3}$	[۳۳](JSCE)	4



شکل 8. مقایسه نتایج 7 روزه با آئین نامه های معتبر
Fig. 8. Comparison of 7-day test results with codes' provisions

۲-۲-۵-۲ 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 می گیرد. در جدول 5 معادلات تجربی مختلف مورد استفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، در شکل های 11 و 12 و 13 به ترتیب مقاومت کششی بتن های آزمایشات تحقیق حاضر در سنین 7، 28 و 56

و 56 روز به ترتیب، 13 و 18 درصد کاهش مقاومت مشاهده می شود.



شکل 7. مقاومت کششی طرح های بدون دوده سیلیسی
Fig. 7. Splitting Tensile strength of samples (without silica fume)

شکل 7 نتایج مقاومت کششی مخلوط های بتن M10 و M15 که به ترتیب دارای 10 و 15 درصد RAP می باشند را با بتن شاهد (CC) بررسی می نماید. همانطور که از شکل پیداست، بتن با سنگدانه بازیافتی آسفالت، نسبت به بتن معمولی CC دارای 20 درصد کاهش مقاومت کششی می باشد. و بتن M15، 13 درصد کاهش مقاومت را نسبت به بتن شاهد CC دارد. اما نکته قابل توجه در نمودار این است که بتن M15 در سن 28 روزه، به مقادیری نزدیک به مقاومت بتن شاهد (CC) دست یافته است.

۲-۲-۵-۲ 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 4 آئین 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 7، 28 و 56 روزه در شکل های 8، 9 و 10 نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها مشخص

محافظة کارانه است. و سن 56 روز، رابطه Carino برای 100 درصد داده ها محافظه کارانه است.

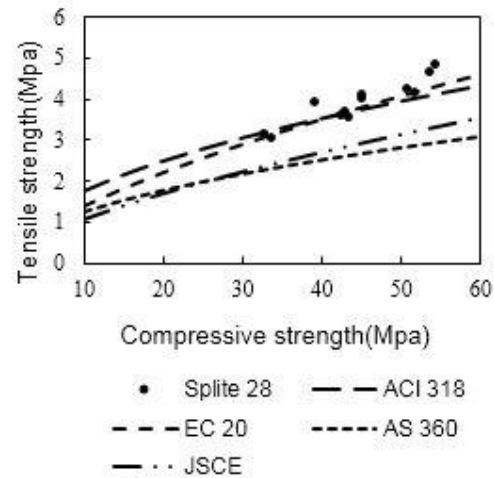
جدول 5. روابط تجربی مختلف برای محاسبه مقاومت کششی
Table 5. previous researchers' equations for Splitting tensile strength

Equation number	Equation	Scholar	No
(5)	$f_{ct} = 0.185(f_c')^{0.735}$	[۳۴]CARNEIRO	1
(6)	$f_{ct} = 0.65(f_c')^{0.5}$	[۲۵]DINAKAR	2
(7)	$f_{ct} = 0.313(f_c')^{0.667}$	[۲۶]GARDNER	3
(8)	$f_{ct} = 0.272(f_c')^{0.71}$	[۳۷]CARINO	4
(9)	$f_{ct} = 0.46(f_c')^{0.55}$	[۳۸]AHMAD	5
(10)	$f_{ct} = 0.206(f_c')^{0.69}$	[۳۹]OLOKUN	6
(11)	$f_{ct} = 0.55(f_c')^{0.5}$	[۴۰]HUESTE	7
(12)	$f_{ct} = 0.209(f_c')^{0.73}$	[۴۱]AKAZAWA	8

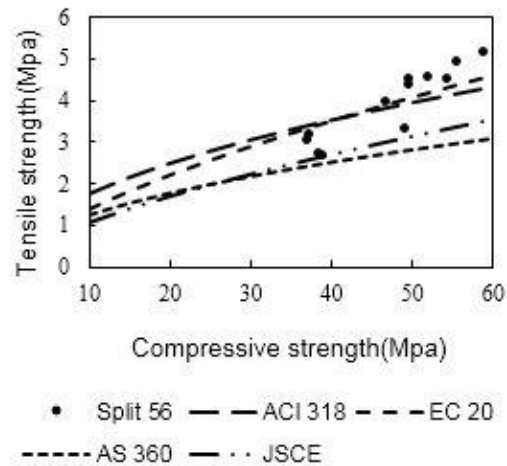
۲-۵-۳ مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین

اشکال 14 و 15، نتایج حاصل از آزمایش‌های این تحقیق را بانک داده‌های مقاومت کششی (انبوه نتایج حاصل از مطالعات گذشته بتن معمولی) [۴۲]، مقایسه می‌کند. خط بهینه (Best Fit) و محدوده 95 درصد بانک داده‌ها با استفاده از تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) برای این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab17 [۴۳]، ترسیم شده است.

روز با روابط پیشنهادی از سوی برخی از محققان (جدول 5) مورد مقایسه قرار گرفته است.

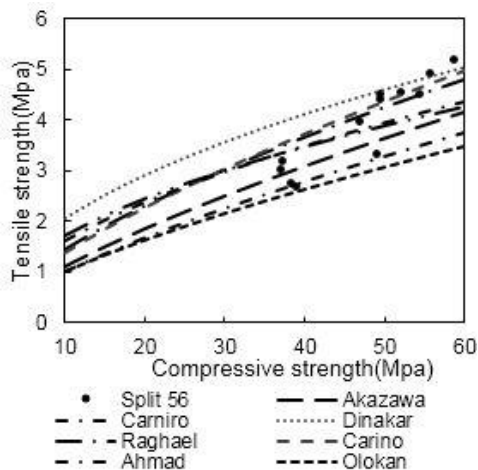


شکل 9. مقایسه نتایج 28 روزه با آئین نامه‌های معتبر
Fig. 9. Comparison of 28-day test results with codes' provisions

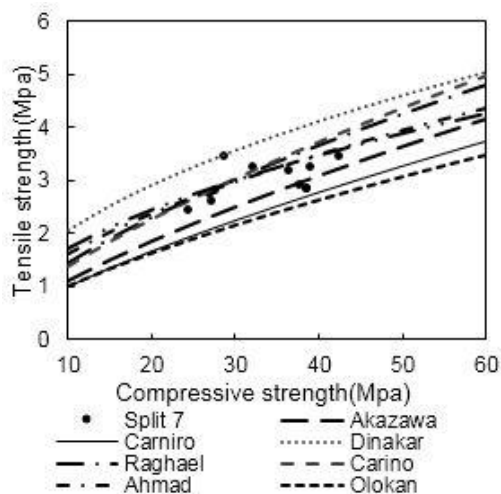


شکل 10. مقایسه نتایج 56 روزه با آئین نامه‌های معتبر
Fig. 10. Comparison of 56-day test results with codes' provisions

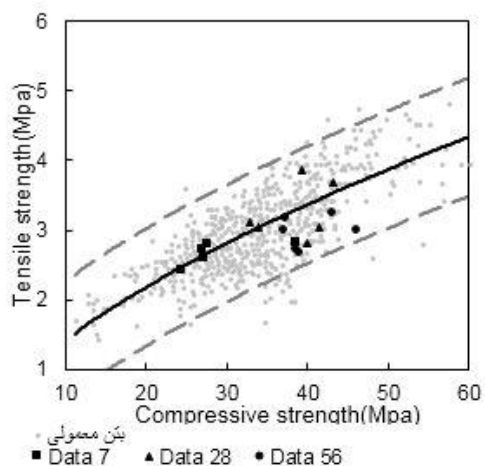
همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده در این تحقیق در سن 7 روز در محدوده اعداد به دست آمده از روابط پیشنهاد شده از محققان مختلف قرار دارد و هر چه سن بتن افزایش پیدا می‌کند فاصله داده‌های آزمایشگاهی از نتایج روابط پیشنهادی بیشتر شده و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. فقط رابطه Carino و Carniro در سن 7 و 28 روز، برای 100 درصد داده‌ها



شکل 13. مقایسه نتایج 56 روزه با روابط پیشنهادی اشخاص
Fig. 13. Comparison of 56-day test results with previous researchers' equations

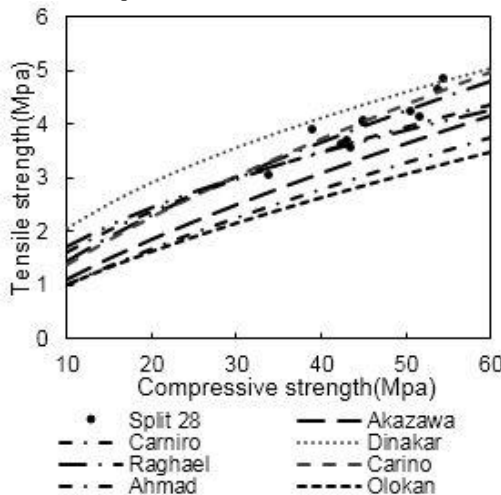


شکل 11. مقایسه نتایج 7 روزه با روابط پیشنهادی اشخاص
Fig. 11. Comparison of 7-day test results with previous researchers' equations

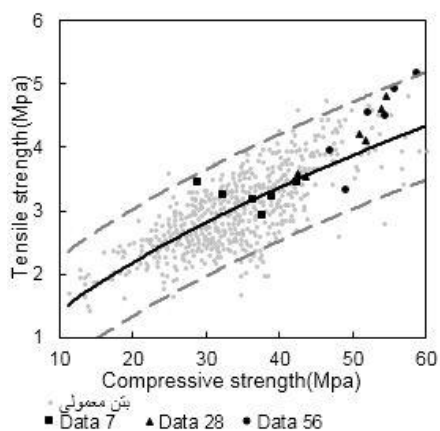


شکل 14. مقایسه نتایج طرح‌های بدون دوده سیلیسی با خط
بهینه نتایج مقالات مختلف [۴۲]

Fig. 14. Comparison of test results of samples (without silica fume) with the best fit



شکل 12. مقایسه نتایج 28 روزه با روابط پیشنهادی اشخاص
Fig. 12. Comparison of 28-day test results with previous researchers' equations



شکل 15. مقایسه نتایج طرح‌های با دوده سیلیسی با خط
بهینه نتایج مقالات مختلف [۴۲]

Fig. 15. Comparison of test results of samples (with silica fume) with the best fit

نتایج مقاومت کششی بتن‌های فاقد دوده سیلیسی در محدوده 95 درصد و اطراف خط بهینه قرار دارد ولی تعداد محدودی از نتایج حاصل از بتن‌های حاوی دوده سیلیسی بالاتر از کران محدوده 95 درصد قرار دارد. این بدان معناست که مقاومت کششی بتن‌های حاوی دوده سیلیسی (حتی با سنگدانه بازیافتی) بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.

درصد و در بتن حاوی 15% RAP به میزان 30% افزایش مقاومت حاصل می شود.

5- بر اساس این تحقیق، بازیافت آسفالت زائد به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه امکان پذیر است. و استفاده از آن در بتن می تواند باعث کاهش مصالح مصرفی از بخش سنگدانه طبیعی شود، اما نمی تواند توجیهی برای اقتصادی تر شدن بتن باشد. زیرا استفاده از این مواد بازیافتی باعث کاهش مقاومت کششی و فشاری بتن شده که به طبع آن، برای جبران این کاهش مجبور به استفاده از موادی افزودنی همانند دوده سیلیسی هستیم. و همین مسئله تولید این بتن سه جزئی را نسبت به بتن معمولی گرانتر، اما از لحاظ زیست محیطی بتن مناسب تری را نسبت به بتن معمولی تولید می نماید.

۴- تقدیر و تشکر

در پایان لازم می دانم که نهایت سپاس و قدردانی را، از مدیریت و پرسنل محترم مجموعه ی شرکت دانش بنیان نانو بتن امین و کارشناسان این مجموعه به عمل آورم. که در تمامی مدت انجام این پژوهش نهایت همکاری را ما داشته اند و بستر انجام تحقیقات در زمینه مربوطه را فراهم نمودند.

مراجع

- [1] Fidelis O. Okafor "Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete," Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 17, pp 47-58. 2010.
- [2] Savas, Erdema, Marva Angela Blanksonb, "Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate" Journal of Hazardous Materials, 264, pp 403-410. 2014.
- [3] Vivian W.Y. Tam, Duang thidar Kotrayothar, Jianzhuang Xiao. "Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete," Construction and Building Materials, 100(15), pp 262-272. 2015.
- [4] PatilHiteshkumar Santosh. Prof (Dr) A. K. Dwivedi. Prof (Dr) A. M. Chatterjee. "Optimize

۳- نتیجه گیری

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

1- بر اساس آزمایش های انجام شده می توان به این نکته اشاره کرد که نمونه های حاوی دوده سیلیسی نسبت، به نمونه های فاقد دوده سیلیسی از نظر مقاومت مکانیکی به طور میانگین 31% در مقاومت فشاری و 17% در مقاومت کششی برتری دارند.

2- مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی آسفالت، کمتر از بتن معمولی است. در نمونه های حاوی 10% RAP فاقد دوده سیلیسی نسبت به بتن شاهد (CC)، در مقاومت فشاری 25% و در مقاومت کششی 29% کاهش مشاهده می شود. و در نمونه های حاوی 15% RAP در مقاومت فشاری و کششی به ترتیب کاهش 29% و 20% را نسبت به بتن شاهد (CC) می توان مشاهده کرد.

3- بر اساس این تحقیق، بازیافت آسفالت زائد به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه امکان پذیر است. بتن با 10 و 15 درصد جایگزینی سنگدانه آسفالت بازیافتی همراه با 6 درصد میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی مقاومت فشاری و کششی برابر و حتی بیشتر به دست آورده است. در مخلوط های سه جزئی، در بتن های حاوی 10% RAP و 6% دوده سیلیسی، نسبت به بتن شاهد (CC)، در مقاومت فشاری و کششی به ترتیب 22% و 5% افزایش مقاومت مشاهده می شود. و در بتن سه جزئی حاوی 15% RAP و 6% دوده سیلیسی نسبت به بتن شاهد (CC)، در مقاومت فشاری 4% افزایش و در مقاومت کششی 4% کاهش مقاومت مشاهده می شود.

4- با افزودن دوده سیلیسی به بتن بازیافتی حاوی RAP می توان به میزان قابل توجهی، مقدار مقاومت را بهبود بخشید، در بتن حاوی 10% RAP به میزان 40

- [15] Babu, K.G. and Prakash, P.V.S., "Efficiency of silica fume in concrete, cement and concrete research," 25(6), 1273-1283. **1995**.
- [16] Selleyold, E.J. and rediy, F.F., "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. **1983**.
- [17] RafiaFirdous, Usman Ilyas, AffifaAkram, and Maryam Adnan, "Evaluation of mechanical properties of concrete containing silica fume from a local source in pakistan" A. Physical and Computational Sciences 54 (2): 119–125. **2017**.
- [18] Kirti Kanta Sahoo Pradip Sarkar Robin Davis, "Mechanical properties of silica fume concrete designed as per construction practice", Proceedings of the Institution of Civil Engineers Paper 1600085. **2017**.
- [19] A. A. Ramezani pour, "Effect of curing on the compressive strength, resistance to Chloride-Ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume," Cement & Concrete Composites 17, 125-133, **1995**.
- [20] Mehmet Gesoglu, ErhanGüneyisi, Diler Sabah Asaad, Guler Fakhraddin Muhyaddin, "Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica", Construction and Building Materials, 102(1), pp 706-713. **2016**.
- [21] A, Dunster, "Silica Fume in Concrete," HIS BRE Press, Garston, UK, 5(9), pp 2060-2071. **2009**.
- [22] ACI Committee 211, "Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash", ACI226.4R, ACI Materials Journal. **1991**.
- [23] ASTM C150-11, "Standard Specification for Portland Cement", **2011**.
- [24] ASTM C1240-11, "Standard Specification for Use of Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout", **2011**.
- [25] ASTM C29-11, "Standard specification for bulk density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate", **2011**.
- Properties of Concrete with Silica Fume," ISSN 2371-8722 Vol 2, pp 1-4. **2017**.
- [5] Apurva A. Fursule, Prof.V.S. Shingade, "Experimental study of mechanical properties of concrete using recycled aggregate with nano silica," International Research Journal of Engineering and technology, 4(8), pp 950-953. **2017**.
- [6] Xixi He, Qing Wang, "Mechanical properties of hardened silica fume concrete" Advanced Materials Research Vols 1008-1009 pp 1357-1362. **2014**.
- [7] Nabil Hossiney, Mang Tia, and Michael J. Bergin, "Concrete containing RAP for use in concrete pavement," Pavement Res Technol, 3(5), pp 251-258. **2010**.
- [8] Ibrahim,A .Mohmoud, E. Khodair, Y. and Patibandla, V., "Fresh mechanical, and durability characteristics of self-consolidating concrete incorporating recycled asphalt pavements" J.Master. Civ. Eng. 26(4), pp 668-675. **2014**.
- [9] Baoshan Hung, Xiangshu, Guogiang li, "Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements," Cement and concrete research, 35 (10), pp 2008-2013. **2005**.
- [10] Amir Tabakovic, Amanda Gibney, Ciaran McNally, Michael D. Gilchrist, "The Influence of Recycled Asphalt Pavement on the Fatigue Performance of Asphalt Concrete Base Courses," Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (6), pp 643-650. **2010**.
- [11] . Julian Mills-Beale , Zhanping You, "The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates," Construction and Building Materials, 24, pp 230–235. **2010**.
- [12] Rafat Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties" Resources, Conservation and Recycling, 55 (11), pp 923-932. **2011**.
- [13] S. Bhanjaa , B. Senguptab, "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete" Cement and Concrete Research, 35 (4), pp 743-747. **2005**.
- [14] P. Fidjestol, M. Dasto, "The history of silica fume in concrete from novelty to key ingredient in high performance concrete" Elkem Materials, Norway, ibracon.org.br. **2008**.

- [40] Hueste MBD, Chomprea P, Trejo D, Cline DBH, Keating PB. "Mechanical properties of high-strength concrete for prestressed members." *ACI Struct J.*, 101(4), pp 457–65. **2004**.
- [41] Akazawa T. "Tension test method for concrete. *Int Assoc of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.*" Bull. no. 16; **1953**.
- [42] Takafumi Noguchi, "Database for Mechanical Properties of Concrete", <http://bme.t.u.tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>, **2007**.
- [43] "Minitab 17 Statistical Software [Computer software]", Incorporation, Minitab.
- [26] ASTM C39-11, "Standard specification for compressive strength of cylindrical concrete specimens", **2011**.
- [27] ASTM C496-11, "Standard specification for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", **2011**.
- [28] Ramezani-pour, Ali, Akbar, "High strength concrete," International Symposium on Silica fume Application in Concrete, Tehran, **1376** (In Persian).
- [29] ASTM C496-11, (2011), "Standard Speci.
- [30] ACI 318 Committee 363, "State of the art report on high-strength concrete", ACI363-R, Farmington Hills (Michigan), American Concrete Institute, **1992**.
- [31] BS EN 206-1, "Concrete, specification, performance, production and conformity", **2001**.
- [32] AS 3600-2009, "Concrete structures, standard by Standards Australia", **2009**.
- [33] JSCE Guidelines for Concrete, "Standard Specifications for concrete structures", No 16, Japan Society of Civil Engineers, **2007**.
- [34] Carneiro FLLB, Barcellos A. "Concrete tensile strength". Bull. no. 13, International Associate of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures; **1953**.
- [35] Dinakar P, Babu KG, Santhanam M. "Mechanical properties of high-volume fly ash self-compacting concrete mixtures". *Struct Concr* 9(2), pp 109–16. **2008**.
- [36] Raphael JM. "Tensile strength of concrete". *ACI J.*, 81(2), pp 158–65. **1984**.
- [37] Carino NJ, Lew HS. "Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete." *ACI J*, 88(2), pp 214–9. **1982**.
- [38] Ahmad SH, Shah SP. "Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete." *PCI J*, 30(6), pp 92–119. **1985**.
- [39] Olokun F. "Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: an evaluation of existing relations for normal weight concrete." *ACI Mater J.*, 88(3), pp 302–9. **1991**.