

مشخصات مکانیکی بتن حاوی لاستیک بازیافتی و دوده سیلیس

مسعود سعادت خوش^۱، محمد صادق دهقان نیستانی^۲، فرزین بهلولی^۲، مهدی آرزومندی^۳،

مجتبی کریمائی طبرستانی^{۴*}

- ۱- کارشناس ارشد زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش
- ۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش
- ۳- دکترای سازه، پژوهشگر دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایالتی تگزاس
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

karimaei@sru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۵

چکیده

در چند دهه اخیر برای رفع و کاهش نواقص بتن و رسیدن به بتن با دوام، از پوزولان‌هایی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی استفاده شده است. از طرفی یکی از بحرانی‌ترین مسائل دنیا دفع مواد ضایعاتی است. رشد جهانی صنعت اتومبیل به عنوان وسیله اصلی حمل و نقل باعث رشد چشمگیر تولید لاستیک (تایر) شده است و به تبع آن شاهد انباشته‌های بزرگی از لاستیک‌های فرسوده هستیم که دفع آنها به عنوان یک نوع زباله جامد می‌تواند منجر به مشکلات زیست محیطی زیادی شود. بنابراین استفاده بهینه از این ضایعات به یک ضرورت برای کاهش آلودگی زیست محیطی تبدیل شده است. در این پژوهش برای رفع و کاهش معایب و استفاده بهینه از مزایای این عناصر در بتن، تأثیر هم‌زمان دوده سیلیسی و پودر لاستیک ریزدانه و درشت‌دانه ضایعاتی بر خواص مکانیکی بتن بررسی شده است. با بررسی پژوهش‌های گذشته و مطالعات صورت گرفته در این پژوهش ۱۰ طرح اختلاط مختلف با جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد ریزدانه و درشت‌دانه لاستیک بازیافتی جایگزین سنگدانه و ۶ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان در بتن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که کمبود مقاومت حاصل از جایگزینی لاستیک بازیافتی تا حدودی با دوده سیلیس قابل جبران است به طوری که در بین نمونه‌های ساخته شده ۲۸ روزه، استفاده از ۱۰ درصد لاستیک بازیافتی جایگزین در بخش درشت‌دانه همراه با ۶ درصد دوده سیلیس و در نمونه حاوی ۱۰ درصد لاستیک بازیافتی جایگزین در بخش ریزدانه همراه با ۶ درصد دوده سیلیس کمترین کاهش مقاومت فشاری و کششی نسبت به بتن معمولی مشاهده شد. در نهایت مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا نشان داد که دقت روابط آیین‌نامه‌های موجود برای بتن با لاستیک بازیافتی پیروی از درصد لاستیک مصرفی در بتن است.

واژگان کلیدی: بتن، لاستیک بازیافتی، دوده سیلیسی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی

۱- مقدمه

تغییرات حجمی بتن ناشی از گرمایی و ایجاد ترک دارد. یکی

از زمینه‌های مهم پژوهش و توسعه در زمینه بتن، دستیابی به

بتن با دوام و مقاومت مکانیکی مناسب است. رسیدن به این

بتن پرمصرف‌ترین ماده پس از آب، در مهندسی عمران است.

اما این ماده مصنوعی ساخت دست بشر نواقصی مانند تخلخل،

۲- مروری بر مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران در گذشته

مظلوم (۲۰۰۴) در پژوهش‌های خود نشان داد که با استفاده از دوده سیلیس در بتن برای دستیابی به اسلامپ مناسب باید درصدی فوق روان‌کننده به بتن اضافه شود. وی همچنین در نتایج پژوهش‌های خود تاکید نمود که پس از سن ۹۰ روز با استفاده از دوده سیلیس شاهد افزایش مقاومت در بتن نخواهیم بود [4]. مهمت گسگلو (۲۰۰۷) مطالعه‌ای روی افزایش مقاومت در بتن معمولی و بتن‌های حاوی لاستیک بازیافتی به همراه دوده سیلیس یا بدون آن انجام دادند. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش شامل دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۶، جایگزینی لاستیک‌های بازیافتی به میزان ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد درشت‌دانه و جایگزینی دوده سیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی به جای سیمان در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۵۶ و ۹۰ آزمایش شدند. نتایج نشان داد که استفاده از دوده سیلیس در افزایش مقاومت بتن بسیار موثر است [5]. الموتاییری نایف (۲۰۱۰) مقاله‌ای تحت عنوان اثر افزودن دوده سیلیس بر مقاومت فشاری بتن به همراه لاستیک بازیافتی در دمای بالا را ارائه نمودند [6]. در این پژوهش استفاده از لاستیک بازیافتی ریز و درشت‌دانه با درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان با درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۵۵ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مقاله جایگزین کردن ۵ درصد حجمی لاستیک و ۵ درصد دوده سیلیس در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن را بهبود بخشیده است. در حالی که جایگزینی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد لاستیک از کل واحد، مقاومت فشاری ضعیف‌تر از ۵ درصد را به همراه دارد. بر این اساس، پژوهشگر پیشنهاد کرده است که درصد جایگزینی لاستیک ریزدانه و درشت‌دانه بیشتر از ۵ درصد نشود زیرا که مقاومت فشاری به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. لئو جووان و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهش‌های خود نشان دادند استفاده از ذرات لاستیک در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود و این

مهم بدون استفاده از مواد افزودنی امکان‌پذیر نیست. در چند دهه اخیر برای رفع و یا کاهش نواقص بتن و رسیدن به بتن مطلوب از مواد افزودنی و پوزولان‌هایی مانند دوده سیلیسی استفاده شده است. استفاده از این مواد پوزولانی فواید دیگری مانند کاهش مصرف انرژی، حفاظت از محیط زیست و مسائل اقتصادی دیگری را نیز به همراه دارد. در این بین دوده سیلیسی که یک محصول فرعی از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]. از این ماده می‌توان با استناد به استاندارد ASTM C1240-11 در بتن استفاده کرد [2]. از طرفی برای رفع و یا کاهش معایب و نیز استفاده بهینه از مزایای استفاده از دوده سیلیسی در بتن، به تازگی استفاده توأم دوده سیلیسی در بتن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

یکی از بحرانی‌ترین مسائل دنیا، دفع مواد ضایعاتی است. گسترش صنعت خودروسازی سبب شده است تا وجود لاستیک‌های فرسوده به عنوان یکی از آلوده‌کننده‌های زیست محیطی در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار بگیرد. رشد جهانی صنعت اتومبیل و افزایش استفاده از اتومبیل به عنوان وسیله اصلی حمل و نقل باعث رشد چشمگیر تولید لاستیک (تایر) شده است و به تبع آن شاهد انباشته‌های بزرگی از لاستیک‌های فرسوده هستیم که امکان دفع مستقیم آنها به عنوان یک نوع زباله جامد در محیط زیست وجود ندارد زیرا لاستیک با سرعت بسیار کمی تجزیه می‌شود و آلودگی‌های بسیار زیادی مانند رشد حشرات را تولید می‌کند. آمارها نشان می‌دهد که هر ساله در ایران بیش از ۱۰ میلیون لاستیک فرسوده (حدود ۱۵۰ هزار تن) از دایره مصرف خارج می‌شود [3].

بر این اساس در این پژوهش خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) بتن‌های حاوی دوده سیلیسی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و همچنین لاستیک بازیافتی ریز و درشت‌دانه به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها در بتن بررسی می‌شود.

چگالی ۲۴۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب است. دانه‌بندی سنگدانه طبیعی استفاده شده براساس استاندارد [9] ASTM C29-11 است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی در جدول (۲) آمده است.

ذرات لاستیک بازیافتی مصرفی در این پژوهش حاصل از خرد شدن ضایعات لاستیک‌های تایر اتومبیل است که قبل از استفاده، با هیدروکسید سدیم و آب کاملاً شسته و تمیز شده و پس از خشک شدن در کیسه‌های بزرگ در کارگاه ساخت بتن بدور از گرد و غبار نگهداری شده است. همچنین چگالی پودر لاستیک به روش بالن ۱/۱۵۳ گرم بر میلی‌لیتر بدست آمده است و اندازه ذرات آن مابین ۱ تا ۷ میلی‌متر است. در این پژوهش برای تمیز شدن و بدست آوردن نتایج بهتر پودر لاستیک‌ها در محلول آب و سود سوزآور به مدت ۲۴ ساعت نگه داشته شد و بعد از شستشو با آب و خشک شدن کامل، استفاده شد. سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH، ماده‌ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۱۳۹۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۲۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

ابر روان‌کننده استفاده شده در آزمایش‌های این پژوهش از نوع پلی کربوکسیلات است که براساس کارآیی مد نظر بتن استفاده شده است. آب استفاده شده در این آزمایش‌ها نیز آب لوله‌کشی شهر قم بوده است.

۳-۲- نسبت‌های مخلوط

تعیین نسبت‌های مختلف بتن آزمایش شده در این پژوهش مطابق آئین‌نامه 91-211.1 ACI [10] است. جدول (۳) جزئیات نسبت‌های مخلوط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد. لاستیک بازیافتی به عنوان جایگزین وزنی ریزدانه و درشت‌دانه طبیعی و پوزولان دوده سیلیس برای جایگزین وزنی با سیمان در این نسبت‌های مخلوط در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه افزودن دوده سیلیس موجب کاهش کارآیی بتن می‌شود برای جبران این مشکل و نزدیک شدن اسلامپ بتن‌های حاوی دوده سیلیس به اسلامپ بتن‌های دیگر از ابرروان‌کننده استفاده شد.

کاهش با جایگزینی درصد‌های بیشتر از ذرات لاستیک در مخلوط‌های بتن افزایش پیدا می‌کند [7].

۳- برنامه آزمایش‌ها

برای این پژوهش آزمایشگاهی ۱۰ نسبت مخلوط مختلف با عناوین زیر ساخته شده است.

- (۱) نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی و بدون دوده سیلیس (Control)
- (۲) نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی همراه با ۶ درصد دوده سیلیس (S6)
- (۳) نمونه با ۱۰ درصد جایگزینی لاستیک بازیافتی درشت‌دانه بدون دوده سیلیس (C10)
- (۴) نمونه با ۱۰ درصد جایگزینی لاستیک بازیافتی درشت‌دانه همراه با ۶ درصد دوده سیلیس (C10S6)
- (۵) نمونه با ۱۵ درصد جایگزینی لاستیک بازیافتی درشت‌دانه بدون دوده سیلیس (C15)
- (۶) نمونه با ۱۵ درصد جایگزینی لاستیک بازیافتی درشت‌دانه همراه با ۶ درصد دوده سیلیس (C15S6)
- (۷) نمونه با ۱۰ درصد جایگزینی وزنی لاستیک بازیافتی ریزدانه بدون دوده سیلیس (F10)
- (۸) نمونه با ۱۰ درصد جایگزینی وزنی لاستیک بازیافتی ریزدانه همراه با ۶ درصد وزنی دوده سیلیس (F10S6)
- (۹) نمونه با ۱۵ درصد جایگزینی وزنی لاستیک بازیافتی ریزدانه بدون دوده سیلیس (F15)
- (۱۰) نمونه با ۱۵ درصد جایگزینی وزنی لاستیک بازیافتی ریزدانه همراه با ۶ درصد وزنی دوده سیلیس (F15S6)

۳-۱- مصالح مصرفی

سیمانی که در این آزمایش‌ها استفاده شد از نوع پرتلند معمولی تیپ ۲ دلیجان براساس استاندارد ASTM C150-11 [8] بود که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین دوده سیلیس استفاده شده از کارخانه ازنا بوده که براساس ASTM C1240-11 [2] تولید شده است (جدول ۱).
شن استفاده شده در این آزمایش با بیشترین اندازه ۱۹ میلی‌متر و چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از نوع شکسته کوهی است. همچنین ماسه مصرفی از رودخانه قمرود و

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

Chemical composition and Physical properties (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O ₃	K ₂ O	LOi	Density (kg/m ³)	Blaine (cm ² /g)
Micro silica	93.6	1.3	0.9	0.5	0.1	1	0.3	1	-	200	-
Cement	20.7	4.7	4.1	63.8	2.3	1.3	0.4	0.6	2.2	3100	3080

Table 1. Physical and chemical properties of Cement and Micro silica

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

Type of aggregate	Natural Sand	Natural gravel
Water absorption (%)	2.19	0.7
Saturated density with dry surface (kg/m ³)	2467	2700
Maximum size (mm)	4.75	19

Table 2. Physical properties of aggregate

جدول ۳. نسبت‌های مخلوط بتن

No.	Mix.	Cement (Kg/m ³)	W/C	Super plasticizer (%)	Gravel (Kg/m ³)	Sand (Kg/m ³)	Coarse crumb recycled tier (Kg/m ³)	Micro silica (Kg/m ³)	Slump (mm)	Concrete density (Kg/m ³)
1	Control	425	0.45	0	690	1036	0	0	91	2356
2	S6	400	0.45	0.8	687	1027	0	25	95	2347
3	C10	425	0.45	0	589	980	66	0	105	2368
4	C10S6	400	0.45	0.8	586	981	66	25	125	2360
5	C15	425	0.45	0	543	961	97	0	100	2228
6	C15S6	400	0.45	0.8	540	956	96	25	120	2219
7	F10	425	0.45	0	640	954	96	0	120	2229
8	F10S6	400	0.45	0.8	636	951	96	25	140	2221
9	F15	425	0.45	0	924	617	141	0	110	2172
10	F15S6	400	0.45	0.8	919	614	140	25	130	2164

Table 3. Concrete mix design

و برای هر آزمایش سه نمونه در نظر گرفته شد و میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی مد نظر قرار گرفت.

۴-۱- مقاومت فشاری

شکل (۱)، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مورد بررسی در این پژوهش را برای سنین مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مربوط به این شکل، مقاومت فشاری بتن‌های دارای لاستیک بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع در تمامی سنین کاهش دارد. البته با افزایش سن، مقدار این کاهش مقاومت تا حدودی جبران می‌شود. شکل (۲) مقایسه مقاومت فشاری طرح‌های دارای دوده سیلیس را با نمونه شاهد بتن معمولی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است بتن S6 که حاوی ۶ درصد دوده سیلیس است در

۴- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌های مربوط به بتن‌های جدول (۳)، از استاندارد ASTM C39-11 [11] برای مقاومت فشاری و از استاندارد ASTM C496-11 [12] برای مقاومت کششی استفاده شد. نمونه‌های آزمایش شده از نوع استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بودند و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد ساخته شدند. قالب‌های بتن‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت باز شده و بلافاصله نمونه‌ها در حوضچه آب با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. سن نمونه‌های بتن برای آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی ۷، ۲۸ و ۵۶ روز انتخاب شده است. در هر سن

عمل‌آوری توانسته است از کاهش مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی تا حدی جلوگیری کند.

۴-۲- مقاومت کششی

در شکل (۴)، نتایج آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496-11 [12] روی سه نمونه مختلف در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش سن بتن، نمونه S6 در مقایسه با نمونه شاهد رشد مقاومت کششی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. بطوری که در سن ۲۸ روز اختلاف مقاومت کششی بین دو نمونه به بیش از ۵۸ درصد رسیده است. در فاز درشت‌دانه بازیافتی همراه با دوده سیلیس بتن C10S6 نیز که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۰ درصد مصالح بازیافتی درشت‌دانه لاستیکی است، در مقایسه با بتن مرجع مقاومت کششی مشابهی داشته است و بتن C15S6 که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۵ درصد مصالح درشت‌دانه لاستیکی است، در مقایسه با بتن مرجع ۲۸ روز ۱۰ درصد کاهش مقاومت کششی داشته است. همچنین در فاز ریزدانه نمونه F10S6 و F15S6 در سن ۲۸ روز به ترتیب ۳ و ۳۰ درصد کاهش مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی داشته است. شکل (۶)، نتایج مقاومت کششی طرح‌های بازیافتی بدون دوده سیلیس را نشان می‌دهد. در فاز درشت‌دانه بازیافتی نمونه بتن C10 در سن ۲۸ روز ۳ درصد کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد و نمونه C15 در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۲۸ روز ۱۳ درصد کاهش مقاومت داشته است. همچنین در فاز ریزدانه بتن‌های F10 و F15 در سن ۲۸ روز نسبت به بتن مرجع به ترتیب ۲۳ و ۳۸ درصد کاهش داشته است. در نهایت بررسی مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی لاستیک نسبت به نمونه‌های بدون لاستیک، شیوه شکست بهتری دارند همچنین با افزودن درصد لاستیک در بتن گسیختگی آرامتری را شاهد هستیم و بتن بعد از رسیدن به بار نهایی و ترک خوردگی، گسیخته نشده و با تحمل بارهای کمتر به باربری ادامه می‌دهد که این رفتار نشان دهنده قابلیت جذب انرژی و انعطاف‌پذیری بالای بتن حاوی لاستیک تحت فشار نسبت به نمونه‌های شاهد است.

مقایسه با بتن معمولی در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب ۵، ۲۶ و ۲۴ درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. در بخش درشت‌دانه بازیافتی همراه با دوده سیلیس بتن C10S6 نیز که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۰ درصد مصالح بازیافتی درشت‌دانه لاستیکی است، در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب ۸، ۱۷ و ۳۰ درصد کاهش مقاومت داشته است و بتن C15S6 که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۵ درصد مصالح درشت‌دانه لاستیک بازیافتی است، در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب حدود ۴۰، ۳۲ و ۳۱ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است.

همچنین بتن F10S6 نیز که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۰ درصد پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی است، در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب ۴۰، ۳۲ و ۳۸ درصد کاهش مقاومت داشته است و بتن F15S6 که حاوی ترکیب ۶ درصد دوده سیلیس و ۱۵ درصد پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی است، در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب حدود ۶۱، ۵۰ و ۵۰ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است.

مقاومت فشاری مقایسه نمونه‌های بدون دوده سیلیس شکل (۳)، را با نمونه مرجع بتن معمولی را نشان می‌دهد. در فاز درشت‌دانه بازیافتی بتن C10 که حاوی ۱۰ درصد مصالح بازیافتی درشت‌دانه لاستیکی است در مقایسه با بتن مرجع به طور کلی در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب دارای کاهش مقاومت فشاری ۳۸، ۳۳ و ۳۷ درصدی بوده و بتن C15 که حاوی ۱۵ درصد مصالح بازیافتی درشت‌دانه لاستیکی است در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب حدود ۴۶، ۴۵ و ۴۱ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است. در فاز ریزدانه بازیافتی بتن F10 که حاوی ۱۰ درصد پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی هست در مقایسه با بتن مرجع به طور کلی در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ به ترتیب دارای کاهش مقاومت فشاری ۵۰، ۴۲ و ۴۳ درصدی می‌باشد. همچنین بتن F15 که حاوی ۱۵ درصد پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی است در مقایسه با بتن مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب حدود ۶۳، ۵۴ و ۵۴ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است. همچنین از مقایسه شکل‌های (۲ و ۳) می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط‌های بتن حاوی ۶ درصد دوده سیلیس، پس از قریب به دو ماه

شکل ۱. مقاومت فشاری نسبت‌های مخلوط مختلف

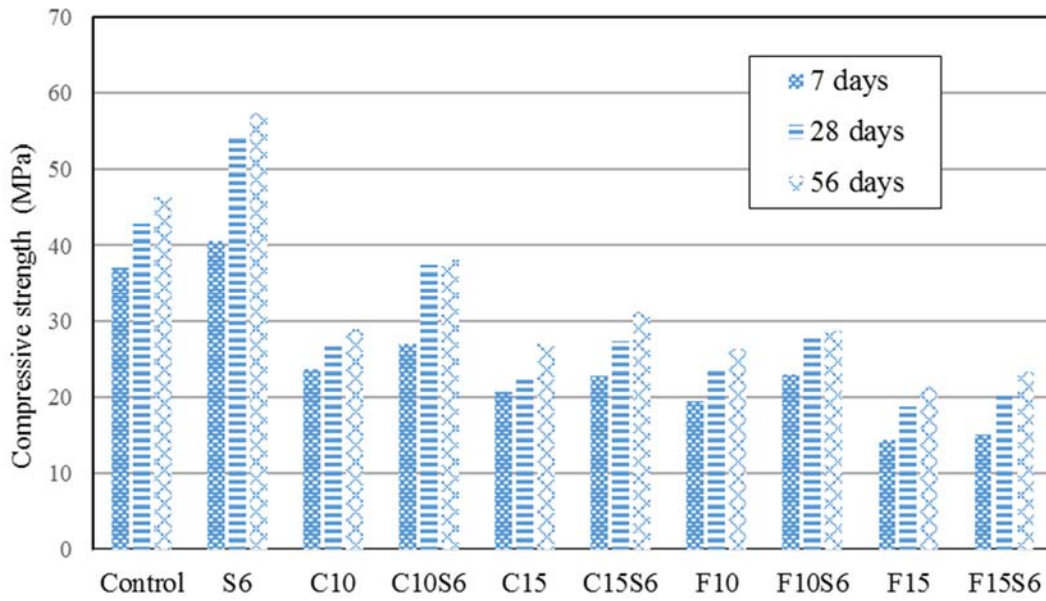


Fig.1. Compressive strength of different concrete mixture

شکل ۳. مقاومت فشاری طرح‌های بدون دوده سیلیس

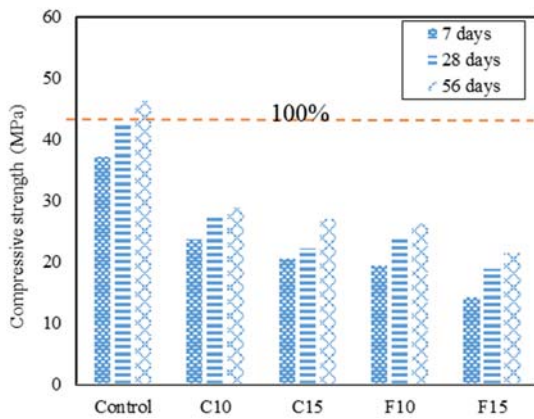


Fig.3. Compressive strength of different concrete mix without Micro silica

شکل ۲. مقاومت فشاری طرح‌های دارای دوده سیلیس

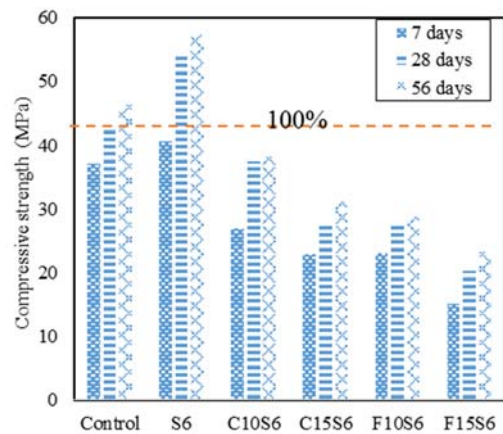


Fig.2. Compressive strength of different concrete mix with Micro silica

شکل ۴. مقاومت کششی نسبت‌های مخلوط مختلف

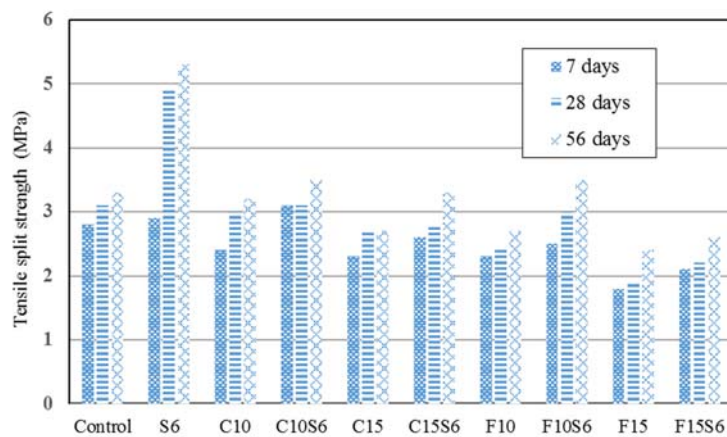


Fig.4. Tensile strength of different concrete mixture

۴-۲-۱- مقایسه با روابط آیین‌نامه‌های معتبر

در ادامه، نتایج حاصل از آزمایش‌های این پژوهش با مقادیر محاسبه شده مقاومت کششی حاصل از آیین‌نامه‌های مختلف مقایسه می‌شود. در جدول (۴)، آیین‌نامه‌های بررسی شده به همراه روابط مورد استفاده در این آیین‌نامه‌ها برای تعیین مقاومت کششی ارائه شده است. در این جدول f_c مقاومت فشاری و f_{ct} مقاومت کششی بتن هستند. در نهایت نتایج حاصل از مقایسه انجام شده برای نمونه‌های بتن ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود که تنها نتایج حاصل از آیین‌نامه استرالیا و ژاپن برای ۱۰۰ درصد داده‌های آزمایش‌های انجام شده محافظه کارانه است و بعد از آن آیین‌نامه فدراسیون بین‌المللی بتن سازه‌ای برای حدود ۹۸ درصد داده‌های آزمایشگاهی محافظه کارانه می‌باشد. همچنین بیش از ۱۵ درصد داده‌های آزمایش‌ها برای آیین‌نامه اروپا، حدود ۶۵ درصد داده‌ها برای آیین‌نامه آمریکا و ۸۰ درصد داده‌ها برای آیین‌نامه آشتو غیرمحافظه کارانه است.

شکل ۵. مقاومت کششی طرح‌های دارای دوده سیلیس

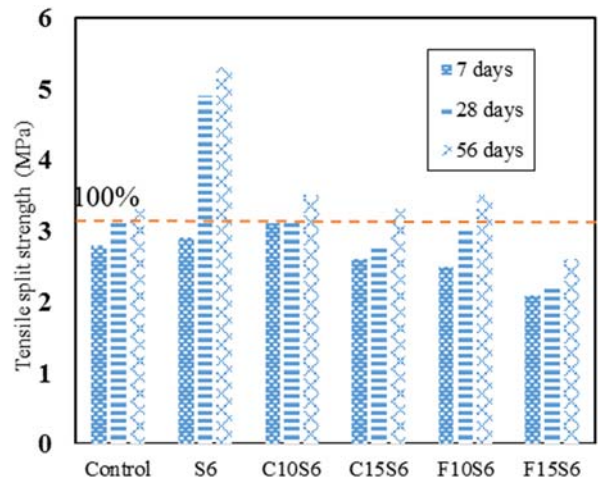


Fig.5. Tensile strength of different concrete mix with Micro silica

شکل ۶. مقاومت کششی طرح‌های بدون دوده سیلیس

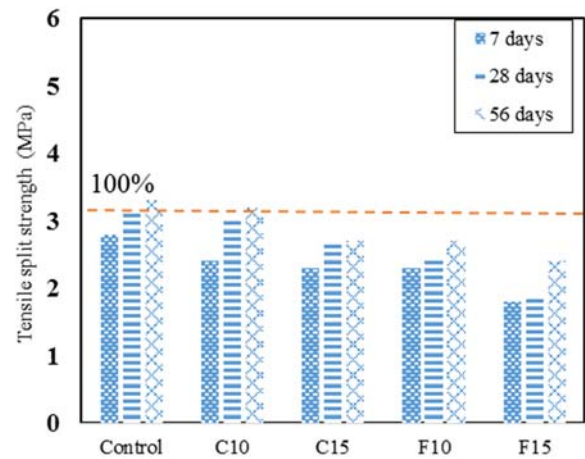


Fig.6. Tensile strength of different concrete mix without Micro silica

جدول ۴. روابط آیین‌نامه‌های مختلف برای محاسبه مقاومت کششی

Equation number	Equation	Code	Number
(1)	$f_{ct} = 0.56 (f_c')^{0.5}$	(ACI363) USA [13]	1
(2)	$f_{ct} = 0.3 (f_c')^{0.5}$	(EC2) Europe [14]	2
(3)	$f_{ct} = 0.4 (f_c')^{0.5}$	(AS360) Australia [15]	3
(4)	$f_{ct} = 0.23 (f_c')^{0.5}$	(JSCE) Japan [16]	4
(5)	$f_{ct} = 1.56 \left(\frac{f_c - 8}{10} \right)$	International Federation of structural concrete (CEB-FIP) [17]	5
(6)	$f_{ct} = 0.59 (f_c')^{0.5}$	AASHTO [18]	6

Table 4. Different equations for calculation of tensile strength from international codes

شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های مختلف با آئین‌نامه‌های بین‌المللی

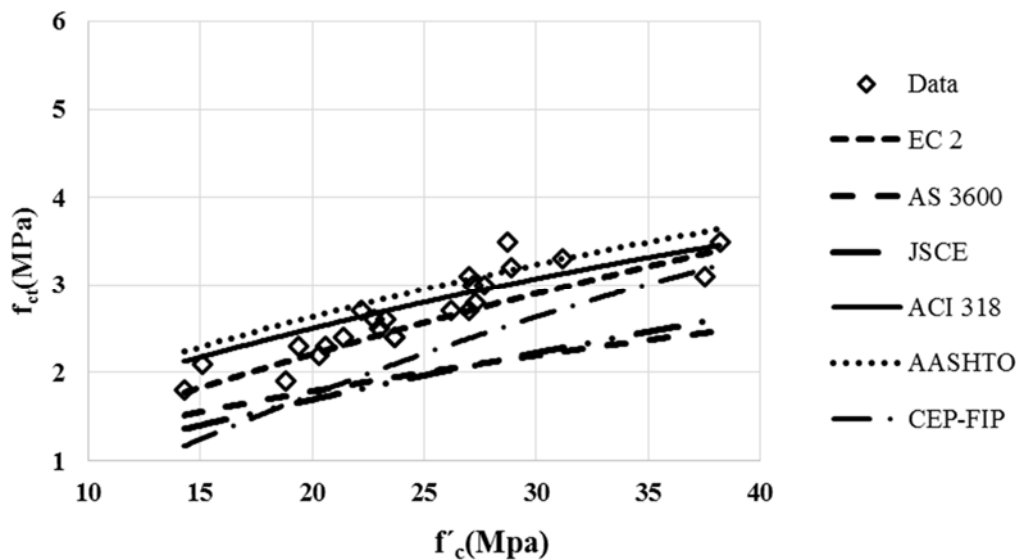


Fig.7. Comparison of experimental data for tensile strength with international codes

تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) و با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17.1.0 [20] روی این داده‌ها منحنی‌های کران پایین و بالای ۹۵ درصد ترسیم شده است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که ۱۰۰٪ داده‌های مقاومت کششی بتن بازیافتی، در این محدوده ۹۵٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارند.

۴-۲-۲- مقایسه مقاومت کششی با بانک داده‌های مطالعات گذشته

شکل (۸) نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی بتن با لاستیک بازیافتی را با انبوه داده‌های مطالعات گذشته بتن معمولی که در مرجع [19] ارائه شده است، مقایسه می‌کند. با

شکل ۸. مقایسه نتایج طرح‌ها با خط بهینه حاصل از انبوه داده‌های مطالعات گذشته بتن معمولی [۱۹]

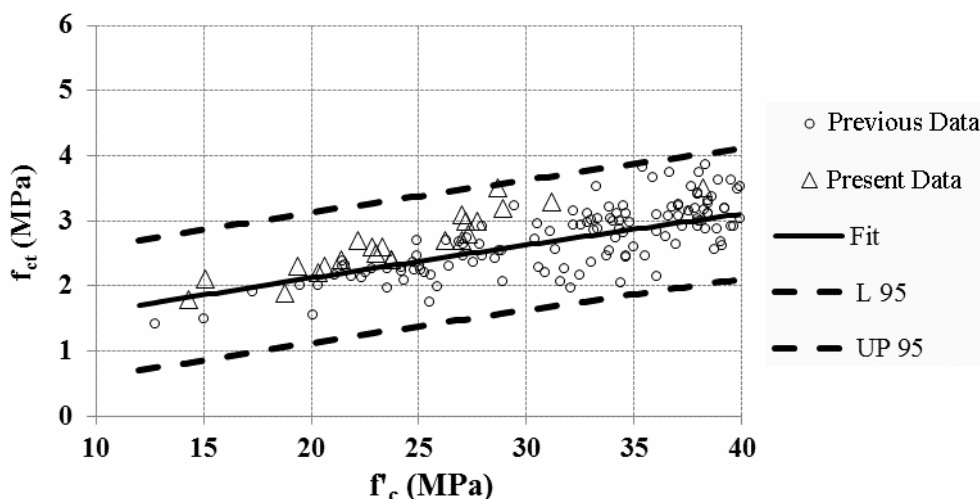


Fig. 8. Comparison of present experimental data for tensile strength with previous experimental data [19]

(۱) افزودن دوده سیلیس به بتن به دلیل خواص پوزولانی موجب افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی تا ۱۷ درصد شده است. همچنین این ماده اثر چشمگیری بر مقاومت کششی داشته و مقاومت کششی را تا بیش از ۲۳

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و مقایسه نتایج به دست آمده با آئین‌نامه‌های معتبر دنیا و همچنین بررسی نتایج پژوهش‌های مختلف انجام شده، نتایج زیر به طور خلاصه ارائه می‌شود.

حمایت‌های مادی و معنوی بستر انجام پژوهش‌های و پژوهش در این زمینه را فراهم کردند، ابراز داریم.

مراجع

- [1] Siddique, R. & Iqbal Khan, M. 2011. *Supplementary Cementing Materials, Engineering Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [2] ASTM C1240 -11. 2011. *Standard Specification for Use of Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout*.
- [3] Karbalaee, M. & Sohrabi, M. R. 2010. Study and Comparison of Compressive Strength of Concrete Containing Crumb Rubber and Rubber Powder with Nano Silica. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 43(2), 63-70. (In Persian).
- [4] Mazloom, M., Ramezani-pour, A. & Brooks, J. J. 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357.
- [5] Mehmet Gesog˘lu. 2007. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume, Springer, *Materials and Structures*, 40, 953-964.
- [6] Al-Mutairi N. 2010. Effect of microsilica addition on compressive strength of rubberized concrete at elevated temperatures, Springer, *Journal of Material Cycles Waste Management*, 12: 41-49.
- [7] Lijuan L., Shenghua, R. & Lan, Z. 2014. Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles, Elsevier, *Construction and Building Materials* 70, 291-308.
- [8] ASTM C150-11. 2011. *Standard Specification for Portland cement*.
- [9] ASTM C29-11. 2011. *Standard Specification for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- [10] ACI Committee 211. 1991. *Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash*. ACI226.4R, ACI Materials Journal.
- [11] ASTM C39-11. 2011. *Standard Specification for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [12] ASTM C496-11. 2011. *Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

درصد افزایش می‌دهد.

- (۲) جایگزینی مصالح درشت‌دانه لاستیک بازیافتی به بتن برای ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سنگدانه به ترتیب ۳۳ و ۴۵ درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی در سن ۲۸ روز را به دنبال داشته است. افزودن دوده سیلیس به این نمونه‌ها درصد کاهش را به ترتیب به ۸ و ۳۰ درصد رسانده است.
- (۳) جایگزینی پودر ریزدانه لاستیک بازیافتی با سنگدانه بتن برای درصدهای ۱۰ و ۱۵ به ترتیب ۴۲ و ۵۴ درصد کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی به همراه دارد؛ افزودن دوده سیلیس به این نمونه‌ها درصد کاهش را به حدود ۳۰ درصد رسانده است.
- (۴) مقاومت کششی بتن با جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی برای درصدهای جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب ۳ و ۱۳ درصد کاهش در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی را به همراه داشته است. افزودن دوده سیلیس به این نمونه‌ها درصد کاهش را به حدود ۱۰ درصد رسانده است.
- (۵) مقاومت کششی بتن با پودر ریزدانه لاستیک برای درصد-های جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب ۲۳ و ۳۸ درصد کاهش در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی را به همراه داشته است. همچنین افزودن ۶ درصد دوده سیلیسی به این نمونه‌ها به ترتیب ۳ و ۳۰ درصد کاهش داده است.
- (۶) روابط مقاومت کششی آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا و اشتو به ترتیب برای ۳۵، ۸۵ و ۲۰ درصد داده‌های بتن بازیافتی و آیین‌نامه ژاپن، استرالیا و CEB-FIP برای ۱۰۰ درصد داده‌ها محافظه کارانه هستند.
- (۷) بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که ۱۰۰٪ داده‌های مقاومت کششی بتن بازیافتی، در محدوده ۹۵٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

۶- سپاسگزاری

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

- [13] ACI Committee 363. 1992. State of the art report on high-strength concrete, American Concrete Institute, ACI363-R, Farmington Hills (Michigan).
- [14] BS EN 206-1. 2001. Concrete, Specification, performance, production and conformity.
- [15] AS 3600-2009. 2009. Concrete structures, standard by Standards Australia.
- [16] JSCE Guidelines for Concrete. 2007. Standard Specifications for concrete structures, No 16, Japan Society of Civil Engineers.
- [17] CEB-FIP. 1990. High-strength concrete state of the art report, London, Thomas Telford.
- [18] AASHTO. 2006. Interim bridge design specifications and commentary, American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington (DC).
- [19] Takafumi N. 2007. Database for Mechanical Properties of Concrete, <http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>.
- [20] Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab.

Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Tire and Silica Fume

Masoud Saadatkhoosh¹, Mohammad Sadegh Dehghan², Farzin Bohloli³, Mehdi Arezoumandi⁴,
Mojtaba Karimaei Tabarestani^{5*}

1. M.Sc. of Earthquake, Department of Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.
2. M.Sc. of Structure, Department of Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.
3. M.Sc. of Structure, Department of Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.
4. Ph.D. of Structure, Researcher in Civil Engineering department, Texas University, USA.
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

karimaei@sru.ac.ir

Abstract

One of the most critical issues in the world is the disposal of waste materials. The expansion of the automotive industry has led to the existence of used tires as one of the environmental pollutants in recent decades. The global growth of the automobile industry and the increase in the use of cars as the main means of transportation has led to production of large accumulations of used tires. These solid wastes decompose very slowly and produce many pollutants such as insect growth.

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. Efforts aimed at producing environmentally friendly concrete can play a major role in securing sustainable construction. Candidate technologies for sustainable concrete materials include the incorporation of supplementary cementitious materials (SCMs) such as, silica fume as a partial replacement for Portland cement; the incorporation of recycled materials in concrete production.

As a result, an experimental investigation was conducted to study the mechanical properties of concrete made with 10% and 15% recycled tire rubber (fine and coarse) as well as 6% silica fume. This experimental program consisted of ten mix designs. (1) Control samples with natural aggregates and without silica fume, (2) Samples with natural aggregates and 6% silica fume (S6), (3) Samples with 10% replacement of coarse-grained recycled tire rubber by weight without silica fume (C10), (4) Samples with 10% replacement of coarse-grained recycled tire rubber by weight and 6% silica fume (C10S6), (5) Samples with 15% replacement of coarse-grained recycled tire rubber by weight without silica fume (C15), (6) Samples with 15% replacement of coarse-grained recycled tire rubber by weight and 6% silica fume (C15S6), (7) Samples with 10% replacement of fine-grained recycled tires by weight without silica fume (F10), (8) Samples with 10% replacement of fine-grained recycled tier rubber by weight and 6% silica fume (F10S6), (9) Samples with 15% replacement of fine-grained recycled tier rubber by weight without silica fume (F15) and finally (10) Samples with 15% replacement of fine-grained recycled tier rubber by weight and 6% silica fume (F15S6).

According to the experiments carried out and the comparison of the obtained results with the important regulations as well as the available data from previous studies, the following results are achieved: (1) Adding silica fume to concrete due to its pozzolanic properties has increased the compressive strength compared to conventional concrete up to 17%. Furthermore, it has a significant effect on tensile strength and increases tensile strength by more than 23%. (2) Replacement of natural aggregate with coarse-grained recycled tire rubber for 10 and 15% by weight has resulted in a 33 and 45% reduction in compressive strength compared to conventional concrete after curing time of 28 days, respectively. Addition of silica fume to these samples reduced the reduction percentage to 8% and 30%, respectively. (3) Replacement of natural aggregate with fine-grained recycled tire rubber for 10 and 15 percent results in 42 and 54% reduction in compressive strength after curing time of 28 days compared to conventional concrete. The addition of silica fume to these samples

has reduced the reduction percentage to about 30%. (4) The tensile strength of concrete made with coarse-grained recycled tire rubber of 10 and 15% by weight, respectively, has decreased by 3 and 13% after curing time of 28 days compared to conventional concrete. Furthermore, adding 6% silica fume to these samples has reduced the reduction percentage to about 10%. (5) Tensile strength of concrete with fine-grained recycled tire rubber of 10 and 15% by weight, respectively, has decreased by 23 and 38% after curing time of 28 days compared to conventional concrete. Furthermore, adding 6% of silica fume to these samples reduced it by 3% and 30%, respectively. (6) Tensile strength relationships presented in US, European and AASHTO regulations were conservative for 35%, 85% and 20% of present data for concrete made with recycled tire rubber and for Japan, Australia and CEB-FIP regulations 100% of data were conservative. (7) Statistical studies show that 100% of the tensile strength data for concrete made with recycled tire is in the range of 95% of data for conventional concrete.

Keywords: Concrete, Recycled tire, Silica fume, Compressive strength, Tensile strength.