مجلهٔ تحقیقات بتن
زمستان۸۹، سال سوم، شمارهٔ۲
ص۴۷-۳۹
تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲ ۵
تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۳۰

بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی

کیاچهر بهفرنیا
استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان
kia@cc.iut.ac.ir
محسن حسن‌زاده
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد
محسن اعتمادی
استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان
همایون بزرگپور
کارشناس آزمایشگاه بتن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

چکیده

یکی از بحرانی‌ترین مسائل دنیا دفع مواد ضایعاتی است. لاستیک ضایعاتی یکی از مواد است که به علت تجزیه‌ناپذیری مورد توجه می‌باشد. همچنین هر ساله در ایران بیش از ۱۰ میلیون تایر فرسوده از دایرهٔ مصرف خارج می‌شود. بازیافت تایرهای فرسوده جهت استفاده در بتن، راهکار مناسبی برای نیل به دو هدف دفع مواد زاید و دستیابی به خواص مثبت در بتن می‌باشد. به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، یک سری مطالعات آزمایشگاهی انجام پذیرفت. در این تحقیقات، لاستیک تایر کامیون بدون سیم مش ۲۰-۱۵ (اندازهٔ ذرات mm ۱/۰۱-۱/۳۲) جایگزین ۱۲درصد و ۱۸ درصد زیردانه در طرح اختلاط بتن گردید و بدین ترتیب ۳ گروه بتن و در مجموع ۱۸ نمونه ساخته شدند. طرح اختلاط بتن براساس BS انجام شد و نسبت آب به سیمان در طرح‌های ثابت برابر ۰/٥٤ در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه و درصد جذب آب نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین وزن مخصوص خشک و اشباع نمونه‌ها نیز تعیین گردیدند. براساس نتایج به دست آمده، وجود ذرات لاستیک در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری، افزایش درصد جذب آب اما کاهش وزن مخصوص بتن می‌گردد. در این مقاله بر اساس نتایج به دست آمده، نمودارهای مربوطه ترسیم و حالت بهینه نیز تعیین گردیده است.

واژه‌های کلیدی: **بتن، ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، خصوصیات مکانیکی.**

۱- مقدمه

در اغلب کشورهای جهان هر ساله مقادیر بسیار زیادی تایر فرسوده دور انداخته می‌شوند. به طور مثال هر ساله در ایران بیش از ۱۰ میلیون تایر فرسوده از دایره مصرف خارج می‌شود. عمدتاً ارزان‌ترین و ساده‌ترین راه تجزیه و متلاشی کردن تایرهای ضایعاتی، سوزاندن آنها است. بدین سبب آلودگی و دود زیادی که بدین طریق ایجاد می‌شود غیرقابل قبول بوده و قانون برخی از کشورها سوزاندن آنها را ممنوع کرده‌اند. با این وجود راه حل معمول دیگر، انبار کردن آن‌ها در زمین‌های بایر می‌باشد که آن هم غیرمستقیم مشکلاتی مثل خطر آتش‌سوزی داشته و محل سکونت حشرات و حیوانات خواهد شد [۱]. بنابراین بازیافت تایرهای فرسوده جهت استفاده در بتن، راهکار مناسبی برای نیل به دو هدف دفع مواد زاید و دستیابی به خواص مثبت در بتن می‌باشد. همچنین با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مسکن و به تبع آن مصالح ساختمانی، بازیافت تایرهای فرسوده جهت استفاده در بتن و مصالح ساختمانی گامی مؤثر در این راستا می باشد. در شکل ۱-الف انبوه تایرهای فرسوده رها شده در محیط و شکل ۱-ب بازیافت آنها را نشان می‌دهد.

براساس پژوهش‌های انجام شده توسط برخی از محققان، استفاده از لاستیک در بتن باعث بهبود بسیاری از خصوصیات بتن از قبیل افزایش مقاومت در برابر صوت، حرارت، نفوذ یون کلر، بارهای ضربه‌ای، سیکل ذوب و یخ، لغزش، سایش و ترک‌خوردگی می‌گردد. همچنین این‌گونه بتن‌ها سبک‌تر، انعطاف پذیرتر و قابلیت جذب انرژی آنها بالاتر است. در شکل ۲ برخی از کاربردهای لاستیک تایر بازیافتی نشان داده شده است.

۲- مروری بر مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران

Labrincha و همکاران در سال ۲۰۰۳ مقاله‌ای با عنوان خواص مکانیکی و صوتی ذرات لاستیک در بتن ارایه نمودند. در این مقاله بهترین نتایج برحسب مقاومت خمشی و جذب صوت با جایگزینی ۲۰٪ وزنی سیمان با ذرات ریز لاستیک (۱/۵ mm-۰/۵) به دست آمده است. همچنین نتیجه گرفته‌اند که بتن حاوی فقط لاستیک بهتر از بتن حاوی لیکا و لاستیک می‌باشد [۲].

Smadi و همکاران در سال ۲۰۰۴ مقاله‌ای با عنوان خواص ملات حاوی خاکستر لاستیک تایر ارایه نمودند. در این مقاله خاکستر لاستیک تایر با درصدهای ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ وزنی جایگزین ماسه شده است. براساس نتایج به دست آمده در این مقاله افزایش مقدار خاکستر لاستیک تایر در مخلوط باعث کاهش درصد هوا، افزایش زمان گیرش، افزایش مقاومت فشاری و خمشی گردیده و همچنین برای درصدهای ۵٪ و ۱۰٪ خاکستر لاستیک تایر، مقاومت در برابر آسیب ذوب و یخ و نفوذ یون کلر بیشتر شده است [۳].

Barluengab و همکاران در سال ۲۰۰۴ مقاله‌ای با عنوان عملکرد در برابر حریق بتن مقاومت بالای حاوی لاستیک بازیافتی ارایه نمودند. آنها نتیجه گرفته‌اند که حجم کم لاستیک در مخلوط، خطر پوسته شدن ناگهانی بتن با مقاومت بالا را در

شکل ۱- الف: انبوه تایرهای فرسوده شکل ۱ – ب: بازیافت تایرهای فرسوده

شکل ۲- برخی از کاربردهای لاستیک تایر ضایعاتی

دماهای زیاد کاهش می‌دهد زیرا بخار آب از طریق مجراهایی که در اثر سوختن ذرات پلیمری ایجاد می‌شود از بتن خارج می‌گردد. همچین افزایش درصد لاستیک باعث کاهش عمق نفوذ دما در بتن می‌شود و استفاده تا ۳٪ ذرات لاستیک در بتن، مقاومت را چندان کاهش نمی‌دهد اگر چه باعث کاهش سختی می‌شود [۴].

Aydin و همکاران در سال ۲۰۰۵ مقاله‌ای با عنوان تعیین شرایط بهینه برای لاستیک تایر در بتن آسفالتی ارایه نمودند. شرایط بهینه در دانه‌بندی لاستیک تایر الک شمارهٔ ۴ و ۱۰٪ لاستیک تایر به دست آمده است [۵].

Chaikaew و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای با عنوان خواص بلوک‌های بتنی پیاده‌رو مخلوط با خرده لاستیک ارایه نمودند. بر اساس نتایج به دست آمده در این مقاله، بلوک‌های خرده لاستیکی نسبت به بلوک‌های معمولی، کم مقاومت تراما سبک‌تر، انعطاف‌پذیرتر و با قابلیت جذب انرژی بهتر و دارای مقاومت لغزش بیشتر و مقاومت سایش کمتر هستند [۱].

Sandrolini و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای با عنوان بازیافت لاستیک تایر ضایعاتی در بتن خود متراکم ارایه نمودند. در نتایج آنها آمده است که تکنولوژی خود متراکم به مراحل پیوند لاستیک کمک می‌کند [۶].

Micheal در سال ۲۰۰۷ مقاله‌ای با عنوان بهبود ترک خوردگی انقباض پلاستیک بتن با استفاده از خرده لاستیک ضایعاتی ارایه نمود. ایشان خرده لاستیک‌های حاصل از تایرهای فرسوده را با درصدهای

وزنی ۳٪، ۵٪ و ۷٪ جایگزین ماسه نمود و به این نتیجه رسید که به کار بردن خرده لاستیک در بتن باعث به تعویق افتادن زمان اولین ترک و کاهش درصد ناحیه ترک خورده و همچنین افزایش انعطاف‌پذیری بتن می‌گردد [۷].

Yuan و همکاران در سال ۲۰۰۸ مقاله‌ای با عنوان بررسی آزمایشگاهی خواص دینامیکی بتن حاوی لاستیک ارایه نمودند. در نتایج آنها آمده است که ضریب میرایی بتن حاوی لاستیک در مقایسه با بتن معمولی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۸].

Mavridou و همکاران در سال ۲۰۰۹ مقاله‌ای با عنوان بهبود مقاومت در برابر نفوذیون کلراید برای بتن حاوی لاستیک حاصل از تایرهای فرسوده اتومبیل‌ها ارایه نمودند.آنها دریافتند که افزایش درصد خرده لاستیک از ۲/۵ تا ۱۵ درصد باعث کاهش نفوذ یون کلراید از ۱۴/۲۲ تا ۳۵/۸۵ درصد می‌گردد. همچنین درصد لاستیک ۱۲/۵ درصد را به عنوان درصد بهینه برای مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید معرفی نموده‌اند [۹].

Sukontasukkul در سال ۲۰۰۹ مقاله‌ای با عنوان استفاده از خرده لاستیک برای بهبود خواص حرارتی و صوتی پانل‌های بتنی پیش ساخته ارایه نمود. وی دریافت که با به کاربردن خرده لاستیک در پانل‌های بتنی پیش ساخته هر دو الزام استاندارد صنعتی تایلند (TIS)، وزن مخصوص کمتر از $2000\ {kg}/{m^3}$ و ضریب هدایت گرمایی k کمتر از مقادیر مجاز $0.303-0.476\ {w}/{mk}$ برآورده می‌شود [۱۰].

۳- اشکال مختلف لاستیک تایر ضایعاتی مورد استفاده در بتن

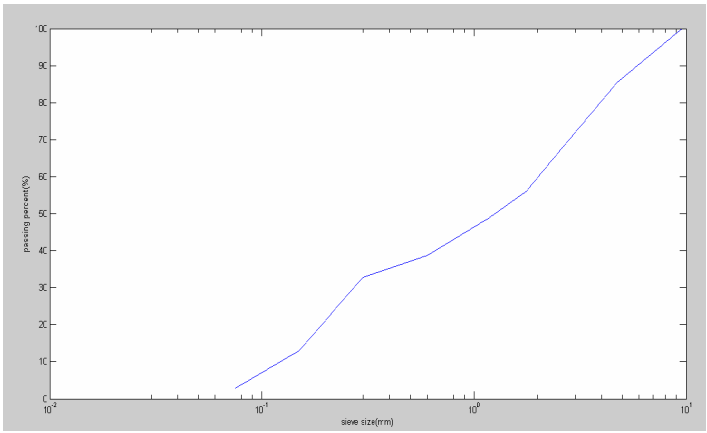
تایرها از نظر نوع به دو دسته کلی تایرهای سواری و کامیون طبقه‌بندی می‌شوند. درصد مواد تشکیل دهنده این دو دسته مخصوصا درصد لاستیک طبیعی و مصنوعی در آن‌ها متفاوت است (جدول۱).

جدول ۱- مقدار لاستیک طبیعی و مصنوعی در تایرها (٪)

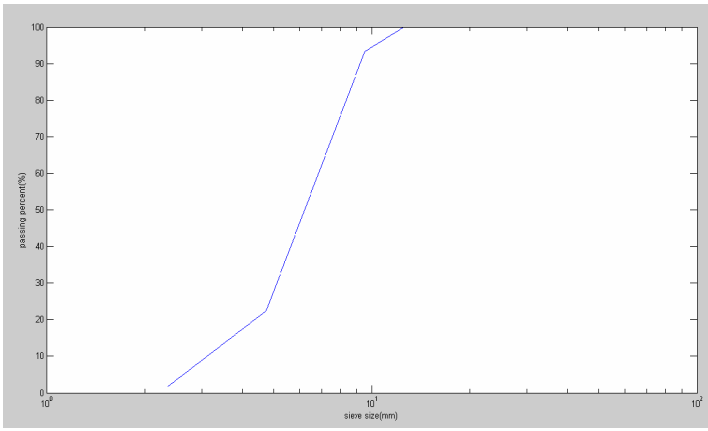
نوع تایر / نوع لاستیک	تایر سواری	تایر کامیون
لاستیک طبیعی	۱۴٪	۲۷٪
لاستیک مصنوعی	۲۷٪	۱۴٪

درشت‌دانه الیاف ریزدانه پودر

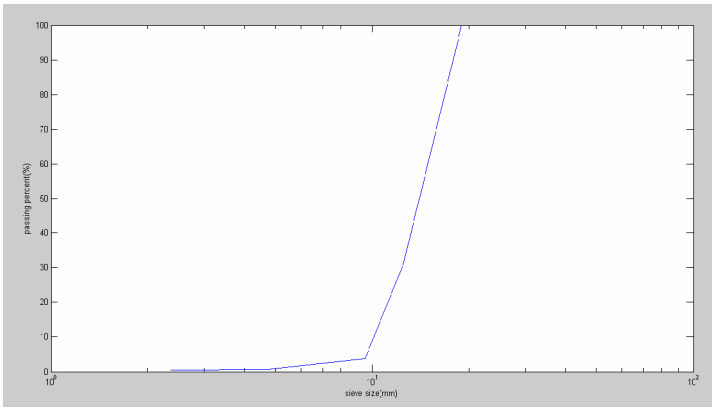
شکل ۳- اشکال مختلف لاستیک تایر ضایعاتی مورد استفاده در بتن



الف- منحنی دانه‌بندی ریزدانه



ب- منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه ۱



ج- منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه ۲

شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها

تایرهای ضایعاتی مطابق شکل ۳ در چهار شکل می‌توانند در بتن استفاده شوند:

۱. ذرات لاستیک درشت‌دانه: برای جایگزینی به جای شن به کار می‌رود و اندازه ذرات آن ۹/۵ تا ۷۵ میلیمتر می‌باشد.

۲. لاستیک به شکل الیاف: برای جایگزینی به جای شن به کار می‌رود به طوری که عرض و ضخامت آن حدود ۵ میلیمتر و طول آن می‌تواند بین ۲۵ تا ۷۵ میلیمتر باشد.

۳. لاستیک ریزدانه: برای جایگزینی به جای ماسه به کار می‌رود و دانه‌بندی آن ۰/۴۲۵ تا ۴/۷۵ میلیمتر می‌باشد.

۴. پودر لاستیک: برای جایگزینی به جای سیمان به کار می‌رود و دانه‌بندی آن ۰/۰۷۵ تا ۰/۴۷۵ میلیمتر می‌باشد.

٤- برنامه آزمایشگاهی

مصالح مصرفی برای ساخت نمونه‌های بتنی در این تحقیق شامل درشت‌دانه، ریزدانه، سیمان، ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، آب و روان‌کننده می‌باشند. سنگدانه‌های ریز و درشت از نوع تجاری براساس آیین‌نامهٔ ASTM C33-78 استفاده شدند. درشت‌دانه‌ها از نوع سنگدانه‌های شکستهٔ نامنظم با حداکثر اندازه ذرات ۱۹/۰۵ میلیمتر از معدن اسپادان اصفهان و ریزدانه‌ها از نوع مخلوط طبیعی و شکسته با چگالی ویژه ۲/۵۶ و مدول نرمی ۳/۶ از معدن آسمان اصفهان تهیه شدند. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل۱ نشان داده شده‌اند.

نمونه‌ها با استفاده از سیمان پرتلند تیپ I کارخانه سیمان اصفهان ساخته شدند که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. عیار سیمان ۳۶۱/۷ کیلوگرم بر متر مکعب در طرح اختلاط بتن به دست آمده است.

نسبت آب به سیمان ثابت برابر ۰/۵۴ و آب مصرفی از نوع آشامیدنی به کار رفت. در مخلوط‌ها از روان‌کنندهٔ آراکس ۴۳۰ اف مطابق با استاندارد ASTM C494 Type A به میزان ۰/۵ درصد وزنی سیمان استفاده شد. مشخصات روان‌کننده مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

ذرات لاستیک تایر ضایعاتی جایگزین ۱۲٪ و ۱۸٪ وزن ریزدانه گردید و به همین میزان از مقدار ریزدانه کسر گردید.

طرح اختلاط بتن براساس BS طراحی و در جدول ۳ ارائه شده است.

بدین ترتیب ۳ گروه بتن، از هر گروه ۶ نمونه، در مجموع ۱۸ نمونه مکعبی ۱۰× ۱۰×۱۰ سانتیمتر جهت تعیین مقاومت فشاری ۳ روزه، درصد جذب آب و وزن مخصوص ساخته شدند. قالب‌ها و برخی نمونه‌های ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

انتخاب قالب ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر و بزرگترین قطر سنگدانه برابر ۱۹/۰۵ میلیمتر برای برآورده شدن الزام زیر می‌باشد:

درشت‌ترین دانهٔ مصالح درشت‌دانه نباید از $\frac{1}{5}$ کوچک‌ترین بعد داخلی قالب بتن، $\frac{3}{4}$، فاصلهٔ بین میلگردها در بتن مسلح و از $\frac{1}{3}$ ضخامت دال تجاوز نماید [۱۱].

در هر مورد سه نمونهٔ مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین دو مقدار نزدیک به هم انتخاب گردید. آزمایش مقاومت فشاری توسط جک دیجیتال ELE با ظرفیت ۳۰۰۰ KN مطابق با BS 1881:Part 116 انجام گرفت. در شکل ۳، نمونه بتن در آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است. آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها مطابق با ASTM C125 انجام گرفت. بدین ترتیب نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در اون با دمای بالای ۱۱۰ ± ۵ درجه سانتیگراد خشک شدند و پس از سرد شدن به مدت ۴ ±۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه داخل آب قرار گرفتند (شکل ۴). نهایتاً با فرمول $\left[(S-A)/A\right]\times 100$ درصد جذب آب نمونه‌ها محاسبه گردیدند.

٥- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۳ روزه، درصد جذب آب و وزن مخصوص خشک و اشباع گروه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده‌اند.

وجود ذرات لاستیک در بتن باعث کاهش تا حدود ۱۳۳ درصد مقاومت فشاری ۳ روزه گروه‌های حاوی ذرات لاستیک نسبت به گروه شاهد می‌گردد.

علت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی لاستیک نسبت به نمونه‌های بدون لاستیک (شاهد) به تفاوت خواص ذرات لاستیک و سنگدانه‌ها بر می‌گردد. این عوامل عبارت‌اند از:

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ I

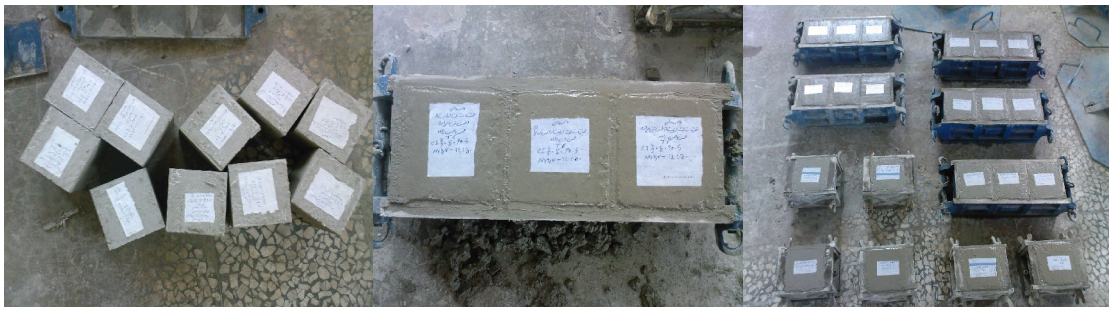
Loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Insol
1.24 +/-0.1	21.68 +/-0.4	5.9 +/-0.3	3.2 +/-0.3	63.5 +/-0.5	1.8 +/-0.2	1.7 +/-0.3	0.2 +/-0.1	0.7 +/-0.2	0.5 +/-0.1

جدول ۲- مشخصات روان‌کنندهٔ آراکس ۴۳۰ اف

حالت فیزیکی	رنگ	PH	یون کلر	وزن مخصوص	شرایط نگهداری	مدت نگهداری
مایع	شفاف مایل به زرد	۸/۵-۹/۵	فاقد یون کلر	$1/165 \frac{gr}{cm^3}$	محفوظ از یخبندان و تابش نور خورشید	یک سال در ظرف در بسته

جدول ۳- طرح اختلاط بتن براساس BS (واحد: $\frac{kg}{m^3}$)

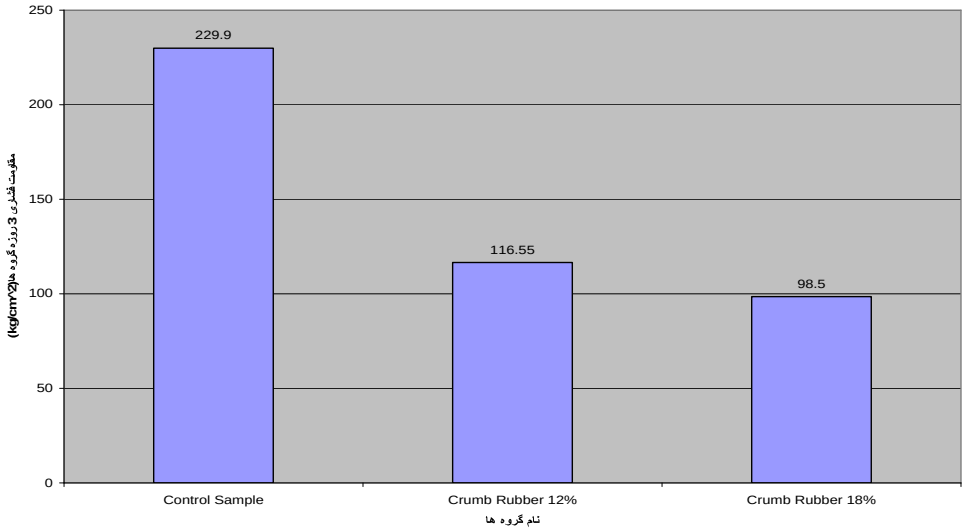
سیمان	آب	ریزدانه	درشت‌دانه۱	درشت‌دانه ۲	روان کننده
۳۶۱/۷	۱۹۱/۴	۸۴۹/۳	۳۳۳	۵۸۶/۴	۱/۸



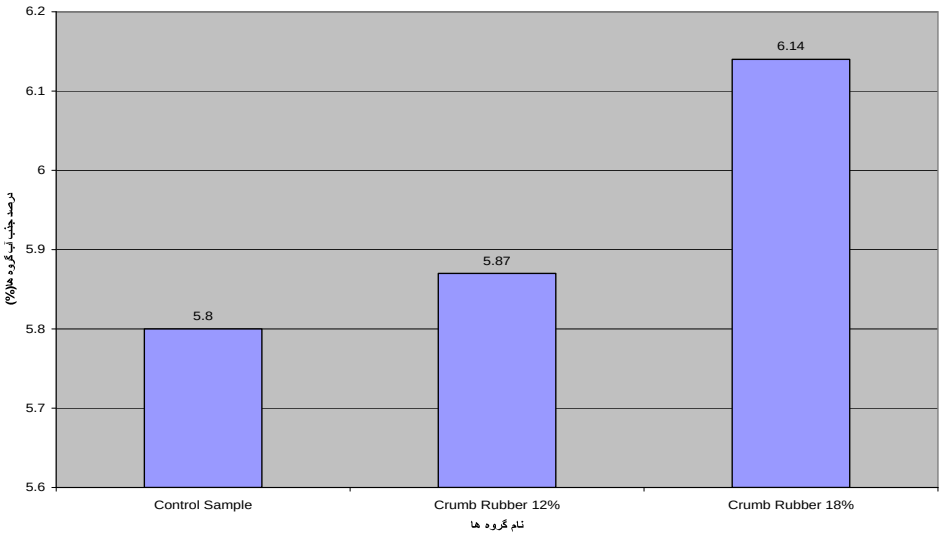
شکل ۲- قالب‌های مورد استفاده و نمونه‌های ساخته شده

شکل ۳- آزمایش مقاومت فشاری بتن

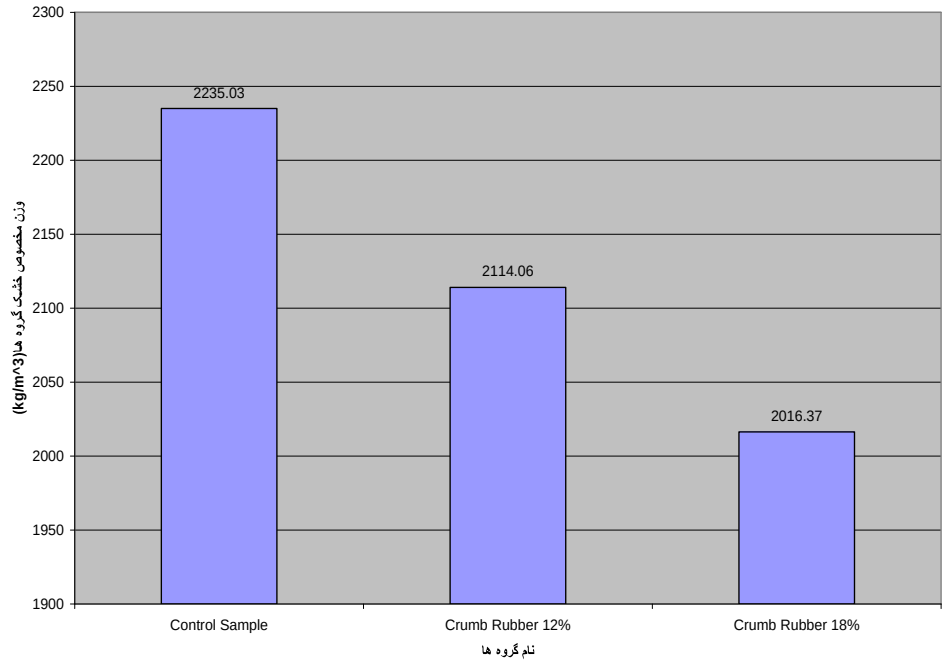
شکل ۴- آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها



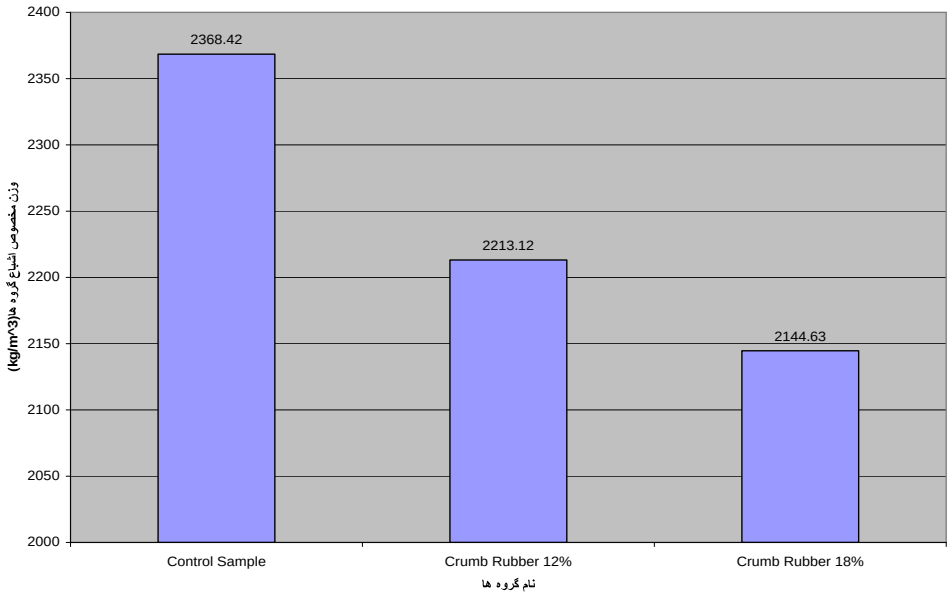
شکل ۵-نمودارمقاومت فشاری ۳ روزه گروه‌ها



شکل ۶- نمودار درصد جذب آب گروه‌ها



شکل ۷- نمودار وزن مخصوص خشک گروه‌ها



شکل ۸- نمودار وزن مخصوص اشباع گروه‌ها

♦ با توجه به این که لاستیک نرم‌تر از سنگدانه‌ها می‌باشد، بنابراین ترک در حین بارگذاری بر روی نمونه‌های حاوی لاستیک به سرعت در اطراف ذرات لاستیک ایجاد شده و در سرتاسر بتن گسترش می‌یابد.

♦ در اثر عدم پیوند مناسب بین ذرات لاستیک و خمیر سیمان، تنش‌های اعمال شده به نمونه به طور یکنواخت توزیع نمی‌شوند و به همین دلیل ترک‌ها ایجاد شده و گسترش می‌یابند.

♦ در حین ارتعاش قالب‌ها، ذرات لاستیک به علت سبک بودن به طرف سطح نمونه حرکت می‌کنند و این باعث غیریکنواختی مخلوط و منجر به کاهش مقاومت می‌گردد.

نمونه‌های حاوی ذرات لاستیک تایر نسبت به نمونه‌های بدون ذرات لاستیک تایر، نحوهٔ شکست بهتر و گسیختگی آرام‌تری دارند که نشان دهندهٔ طاقت زیاد بتن حاوی ذرات لاستیک تایر می‌باشد.

جایگزینی ذرات لاستیک در بتن به جای ریزدانه باعث افزایش جذب آب تا حدود ۵/۸ درصد می‌گردد. از نظر جذب آب بتن حاوی ۱۲ درصد ذرات لاستیک، بهتر از بتن حاوی ۱۸ درصد ذرات لاستیک می‌باشد.

جایگزینی بخشی از ریزدانه با ذرات لاستیک باعث کاهش وزن مخصوص تا حدود ۱۱ درصد می‌گردد که این به علت کمتر بودن چگالی ذرات لاستیک نسبت به ریزدانه می‌باشد.

٦- نتایج

در این تحقیق مقاومت فشاری ۳ روزه، درصد جذب آب و وزن مخصوص بتن حاوی ۱۲ و ۱۸ درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های بدون ذارت لاستیک تایر ضایعاتی به عنوان نمونه‌های شاهد نیز ساخته شدند. نسبت آب به سیمان ثابت برابر ۰/۵۴ و روان‌کنندهٔ ۰/۵ درصد وزن سیمان به کار رفت. براساس آزمایش‌های انجام شده، خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- افزودن ذرات لاستیک تایر ضایعاتی به بتن باعث کاهش تا حدود ۱۳۳ درصد مقاومت فشاری ۳ روزهٔ نمونه‌های حاوی ذرات لاستیک نسبت به نمونه‌های شاهد می‌گردد.
- افزودن ذرات لاستیک به بتن باعث افزایش جذب آب بتن تا حدود ۵/۸ درصد می‌گردد.
- جایگزین نمودن بخشی از ریزدانه با ذرات لاستیک باعث کاهش وزن مخصوص تا حدود ۱۱ درصد می‌گردد که این به علت کمتر بودن چگالی ذرات لاستیک نسبت به ریزدانه می‌باشد.
- نمونه‌های حاوی لاستیک نسبت به نمونه‌های بدون لاستیک، نحوهٔ شکست بهتری دارند که نشان دهنده چقرمگی زیاد بتن حاوی لاستیک می‌باشد.

۷- قدردانی

این تحقیق با حمایت آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد و آزمایشگاه مادر تخصصی فنی بتن و مکانیک خاک اصفهان انجام شده است. اینجانبان مؤلفین مقاله بر خود لازم می‌دانیم که از همکاری معاونت محترم پژوهشی دانشگاه، آقای دکتر ابراهیمی وآقایان دکتر سید امیر مهرداد محمد حجازی، دکتر محسن ایزدی نیا، دکتر مسعود میرمحمد صادقی، دکتر محمد مؤمنی، خانم دکتر سیده مهرناز قوامی، مهندس فرهاد عظیمی‌فر، مهندس علیرضا یزدانی، مهندس ابراهیم آیرون، مهندس سید میر مسعود فرمان آرا، مهندس سعید معظمی گودرزی، مهندس مهدی مختاری، مهندس محسن رهبری و خانم مهندس فهیمه حسن زاده تشکر و قدردانی نماییم.

۹- مراجع

[1].Sukontasukkul, Piti et al., "Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber", Elsevier, 20, pp 450-457. 2006.

[2].Sobral, M. et al., , “Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate”, Elsevier, 142, pp 427-433, 2003.

[3].Nabil,M. Al-Akhras et al., , "Properties of tire rubber ash mortar",Elsevier,26, pp 821-826. 2004.

[4].Hernandez, F. et al., , "Fire performance of recycled rubber-filled high- strength concrete", Pergamon, 34, pp 109-117. 2004.

[5].Tortum, Ahmet et al., "Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete", Elsevier, 40, pp 1492-1504. 2005.

[6].Bignozzi, M. C. et al.," Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete", Elsevier, 36, pp 735-739. 2006.

[7].Amany G. Botros, Micheal, , "Improving plastic shrinkage cracking of concrete using recycled waste rubber crumbs" , HBRC Journal , Vol. 3, No. 3. 2007.

[8].Zheng, L. et al., , "Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete", Elsevier, 22, pp 939-947. 2008.

[9].Oikonomou, N. et al. , , "Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires", cement & concrete composites. 2009.

[10].Sukontasukkul, Piti, , "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel", Elsevier, 23, pp 1084-1092. 2009.

[۱۱].طاحونی، شاپور، ،" طراحی ساختمان‌های بتن مسلح بر مبنای آیین نامهٔ بتن ایران (آبا)"، تهران، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.