

# ارزیابی اثر استفاده از محصولات بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده بر خواص مکانیکی روسازی بتنی

علی زارعی<sup>۱</sup>، ابوالفضل حسنی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی ارشد عمران، گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس
۲. استاد دانشکده عمران، گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس

hassani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۷/۲/۰۷

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۷/۲۰

## چکیده

با توجه به اینکه امروزه استفاده از وسایل نقلیه رو به گسترش است، روزانه تعداد تایرهای زیادی تولید می‌شود، همچنین از طرف دیگر تعداد تایرهای فرسوده روبه افزایش رفته و با توجه به اینکه در محیط قابل تجزیه نیست و بازیافت آن‌ها صرفه اقتصادی ندارد، در نقاط مختلفی از زمین به صورت پراکنده و یا توده‌ای مشاهده می‌شوند که مسئله باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی فراوانی از جمله خطر بالقوه آتش‌سوزی، محلی برای تجمع و پرورش حشرات و موجودات جونده همچون موش‌ها می‌شود، یکی از راهکارهایی که برای دفع تایرهای فرسوده در نظر گرفته شده است، سوزاندن آن است، که سوزاندن باعث تولید گازهای سمی و آلودگی هوا می‌شود، همچنین پودر سیاه‌رنگ حاصل از سوختن تایرها باعث آلودگی آب‌های سطحی و خاک‌ها می‌شود، در برخی موارد از تایرهای فرسوده برای تولید کربن سیاه استفاده می‌شود، که کربن تولید شده در این روش نسبت به کربن تولید شده از نفت خام دارای کیفیت پایین‌تر و هزینه بالاتری است، پس باید به دنبال یافتن راهکارهایی برای استفاده از مواد بازیافتی حاصل از تایرها بود، از طرف دیگر با توجه به اینکه استفاده از سازه‌های بتنی، از جمله روسازی‌های بتنی روبه افزایش است و این‌گونه روسازی در بسیاری از روسازی‌های جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد و با ذکر این نکته که منابع اولیه ساخت بتن از جمله شن و ماسه، محدود و دارای نقش اساسی در پایداری محیط زیست است، نیاز به استفاده از مواد جایگزین این منابع در روسازی‌های بتنی روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌شود، از این‌رو در این پژوهش برای حل مشکلات ذکر شده، از ترکیب خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده در روسازی بتنی استفاده شده است، لازم به ذکر است که ترکیب خرده‌لاستیک متشکل از خرده‌لاستیک با سه دانه‌بندی مختلف و پودرلاستیک است که از یک کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده تهیه شده است، که در ادامه خواص مکانیکی بتن ساخته شده در اثر جایگزینی این مواد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش از ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک، به‌عنوان جایگزین ریزدانه در روسازی بتنی استفاده شده است، همچنین در یک حالت دیگر نیم درصد الیاف فلزی حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده به این نمونه‌ها افزوده شد و نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این است که مقاومت فشاری نمونه‌های با جایگزینی خرده‌لاستیک به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۱/۶، ۹/۳۶، ۹/۴۹ و ۱/۶۳ درصدی و نمونه‌های با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی خرده‌لاستیک و ۰/۵٪ الیاف فلزی، به ترتیب دارای کاهش ۳/۰۳، ۲/۱۱، ۷/۳۳ و ۵/۴۱ درصدی و ۳/۴۴ درصدی بوده است، بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد بتن حاوی خرده‌لاستیک و الیاف فلزی، از لحاظ مقاومت فشاری نسبت به نمونه حاوی خرده‌لاستیک به‌تنهایی بهتر بوده و کاهش مقاومت کمتری خواهد داشت و همچنین با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک در

بتن، مقاومت کششی غیرمستقیم آن دارای ۷/۵، ۱۵/۳، ۲۱/۴ و ۳۱/۲ درصدی خواهد بود و با افزودن ۰/۵٪ الیاف فلزی به بتن با جایگزینی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک، مقاومت کششی غیرمستقیم به ترتیب به میزان ۶۷/۸، ۴۶/۷، ۳۲/۴، ۱۷/۸ و ۳/۵ درصد افزایش می‌یابد و این نتیجه حاصل می‌شود که مقاومت کششی بتن، در اثر افزودن الیاف فلزی افزایش و در اثر افزایش میزان جایگزینی خرده‌لاستیک، کاهش خواهد یافت.

**واژگان کلیدی:** تایرهای فرسوده، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، روسازی بتنی، بازیافت

## ۱- مقدمه

روسازی‌های بتنی به عنوان روسازی بسیاری از راه‌ها، در این پژوهش از فرآورده‌های حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده، به صورت خرده‌لاستیک، پودرلاستیک و الیاف فلزی، در روسازی‌های بتنی، برای بررسی خواص مکانیکی آن، استفاده شده است.

پژوهش‌ها روی بتن حاوی خرده‌لاستیک از سال ۱۹۹۰ آغاز شده است [5]. در این پژوهش‌ها از خرده‌لاستیک، پودرلاستیک، تکه‌های لاستیک و یا ترکیبی از این‌ها در بتن استفاده شده است و پارامترهای مقاومتی و دوام بتن اندازه‌گیری شده است، در این پژوهش‌ها از این مواد به جای سیمان، درشت‌دانه، ریزدانه و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده شده است. بتن‌های مورد استفاده در این پژوهش‌ها دارای انواع مختلفی از جمله بتن معمولی، بتن متخلخل، بتن با مقاومت بالا و ... بوده است.

به‌طور کلی تایرها به دودسته کلی تایرهای معمولی و تایرهای استایرن بوتادین تقسیم‌بندی می‌شود که تایرهای استایرن بوتادین در مقایسه با تایرهای معمولی دارای مقاومت سایشی بالاتری استند که در نتیجه آن عمر این‌گونه تایرها بیشتر از تایرهای معمولی است و از سال ۲۰۱۲ بیش از ۵۰ درصد تایرها از انواع مختلف تایرهای استایرن بوتادین است. نسبت استایرن به بوتادین خواص پلیمری تایر را تعیین می‌کند، به‌صورتی که هر چه مقدار استایرن در مقایسه با بوتادین افزایش داده شود، تایر سخت‌تر می‌شود که در نتیجه آن مقدار خوردگی تایر در گذر زمان کاهش می‌یابد [5].

در برخی از پژوهش‌ها اثر نسبت آب به سیمان در مقاومت سایشی روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین در برخی دیگر از پژوهش‌ها از یک یا دو پوشش روی خرده‌لاستیک استفاده شده است، که از جمله این

امروزه با پیشرفت جوامع بشری و استفاده بیشتر از وسایل نقلیه، حجم وسیعی از تایرهای فرسوده در سال از گردونه مصرف خارج می‌شوند، که دفن بهداشتی آن‌ها از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است. به علت تعداد بالای این تایرها، دفن آن‌ها در محل‌های مناسب به دلیل محدودیت فضا، امکان‌پذیر و اقتصادی نیست، که این امر، خود باعث انباشته شدن غیرقانونی این تایرها در فضاهای روباز یا سوزاندن آن‌ها شده است. از جمله خطرات زیست‌محیطی مربوط به انباشتن این لاستیک‌ها در فضای باز، می‌توان به: خطر آتش‌سوزی [1]، تجمع موجوداتی همچون موش و پشه، آلودگی هوا، آب‌ها و محیط‌زیست اشاره نمود [2]، همچنین شکل و جنس خاص تایرها، موجب باقی ماندن آب بارندگی به مدت طولانی در آن‌ها می‌شود که آن‌ها را تبدیل به محیط مناسبی برای پرورش پشه و آفت‌های گوناگون می‌گرداند [3]. همچنین سوزاندن این تایرها باعث تولید یک پودر سیاه‌رنگ می‌شود که به‌نوبه خود می‌تواند باعث آلودگی هوا، محیط‌زیست و آب‌ها شود [3] و چون در تولید تایر از ترکیبات استایرن و بوتادین، که خود یک ترکیب ۴ کربنی بسیار سرطان‌زا است، استفاده شده است، دود حاصل از سوزاندن آن‌ها، حاوی مقادیر بسیار زیادی از ترکیبات بنزن و استایرن و گازهایی همچون:  $CO_2$ ,  $HCl$ ,  $SO$ ,  $NO_2$  است [4].

در مواردی از تایرهای ضایعاتی به عنوان سوخت استفاده می‌کنند که از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نبوده و همچنین کربن سیاه تولید شده به این روش نسبت به کربن سیاه تولید شده در پتروشیمی گران‌تر و باکیفیت پایین‌تر است [3].

با توجه به محدود بودن منابع طبیعی و لزوم حفظ و نگهداری محیط‌زیست و همچنین گسترش استفاده از

نسبت ظاهری ۸۰ باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به اندازه ۶/۳٪ و ۸۹/۹٪ خواهد شد.

بر اساس مطالعات تاپکو [9] روی مقاومت کششی نمونه-های حاوی خرده لاستیک، مقاومت بتن شاهد، ۳ مگا پاسکال گزارش شده است و با جایگزینی پودرلاستیک به میزان ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درصد حجمی ریزدانه‌ها، به ترتیب مقاومت‌های ۲/۱۷، ۱/۵۳ و ۱/۱۳ گزارش شدند.

بر اساس پژوهش سوتسوس و همکاران [10] با استفاده از ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم الیاف فلزی در هر مترمکعب بتن، ۴ و ۵ مگا پاسکال افزایش مقاومت فشاری را در بر خواهد داشت. بر اساس گزارش دوزگان و همکاران [7]، افزایش الیاف فلزی به میزان ۰/۵ درصد حجمی بتن، در بتن‌های با ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌های سبک، مقاومت فشاری را به ترتیب به میزان ۴ و ۹/۳ درصد افزایش خواهد داد، همچنین بر اساس پژوهش مداح و همکاران [11] افزودن الیاف فلزی با نسبت ظاهری ۳۰ و به میزان ۳ درصد حجمی بتن باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان ۵/۵ مگا پاسکال خواهد شد.

بر اساس پژوهش‌ها چو و همکاران [12]، که از دو نوع لاستیک، پودرلاستیکی که ۸۰ درصد از آن کمتر از ۲/۶ میلی‌متر بود و خرده‌لاستیک با اندازه ۴/۱۵ میلی‌متر در درصدهای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه در بتن استفاده کردند. نتایج نشان داد که جایگزینی این درصدهای خرده‌لاستیک به‌جای درشت‌دانه، به ترتیب موجب کاهش مقاومت فشاری به میزان ۲۲/۳، ۴۵/۸ و ۵۳/۳ درصد می‌شود. همچنین با جایگزینی همین درصدها از پودرلاستیک به جای درشت‌دانه، میزان کاهش مقاومت به ترتیب ۱۳/۷، ۳۳/۵ و ۴۹/۵ درصد خواهد بود.

در اوایل از الیاف فولادی صاف در روسازی‌های بتنی استفاده می‌شده است که مهم‌ترین مشکل این‌گونه بتن‌ها اسلامپ بالای آن‌ها و سختی اجرای آن‌ها در احجام بزرگ و پمپاژ کردن آن‌ها بوده است [13].

شایان ذکر است که در هیچ یک از پژوهش‌های صورت گرفته تا امروز اثر استفاده همزمان خرده‌لاستیک و الیاف فلزی حاصل از تایرهای فرسوده بر خواص مکانیکی روسازی‌های

پوشش‌ها می‌توان به پوشش‌های سیمان، سیلان یا استفاده هم‌زمان این دو اشاره کرد [2].

بر اساس مطالعات صورت گرفته، نسبت ظاهری الیاف یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های الیاف است که تأثیر بسیار زیادی در افزایش مقاومت بتن الیافی دارد، هنگامی که الیاف درون مخلوط زیر بار قرار می‌گیرند، به یکی از دو روش زیر عمل می‌کنند [6]

الف) اگر الیاف دارای طولی کمتر از طول بحرانی باشند، به دلیل از دست دادن خاصیت پیوستگی، از مخلوط جدا شده و بیرون کشیده می‌شوند، که این حالت در الیاف با مقاومت بالا نیز مشاهده می‌شود.

ب) چنانچه الیاف دارای طولی بزرگ‌تر از طول بحرانی باشند، الیاف به حد جاری شدن رسیده و گسیخته می‌شود، برای حالتی که طول الیاف برابر با طول بحرانی باشد، تنش کششی الیاف و مقاومت برشی حاصل تعادل نیروها از رابطه (۱) پیروی می‌کند.

$$\sigma_f = 2\tau \frac{1}{d} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که پارامترهای این رابطه عبارت است از:

$\sigma_f$ : تنش کششی الیاف

$\tau$ : مقاومت برشی

$l$ : طول الیاف

$d$ : قطر الیاف

چنانچه از این رابطه نتیجه می‌شود، تنش مقاوم الیاف و در نتیجه مقاومت‌پذیری آن، رابطه مستقیمی با نسبت ظاهری تئوری دارد. معمولاً نسبت ظاهری برای الیاف به طول ۶ تا ۷۶ میلی‌متر، معادل ۳۰ تا ۱۵۰ است. [6]

طبق گزارش دوزگان و همکاران [7]، استفاده از الیاف فولادی به میزان ۱/۵ درصد حجمی بتن باعث افزایش مقاومت کششی تا ۶۱/۲٪ خواهد شد. طبق آزمایش‌های کوکسال و همکاران [8] استفاده از ۰/۵٪ و ۱٪ وزنی بتن از الیاف فلزی با نسبت ظاهری ۶۵ باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به اندازه ۷/۸٪ و ۳۱/۹٪ و الیاف فلزی با

و الیاف فلزی بازیافتی، که در ادامه به تشریح هر یک پرداخته شده است.

### ۳-۱-۱ سنگدانه

سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته در این پژوهش از نوع شکسته رودخانه‌ای است که شامل دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه است که درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفته، بر اساس ردیف شماره ۲ جدول (۴-۲) نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه، تحت عنوان مشخصات فنی عمومی راه، انتخاب شده است و دارای دانه‌بندی ارائه شده در جدول (۱) است.

جدول ۱. دانه‌بندی درشت‌دانه

Passing percentage (%)	Sieve size (mm)	Sieve number
100	25	1 inch
41	19	¾ inch
-	12.5	½ inch
0	4.75	#4

Table.1. Coarse Aggregate Grading

همچنین ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق بر اساس جدول (۴-۴) نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه، تحت عنوان مشخصات فنی عمومی راه انتخاب شده است و دارای دانه‌بندی ارائه شده در جدول (۲) است.

جدول ۲. دانه‌بندی ریزدانه

Passing percentage (%)	Sieve size (mm)	Sieve number
100	19	inch 3/8
95	4.75	#4
80	2.36	#8
50	1.18	#16
34	0.6	#30
19	0.3	#50
5	0.075	#200
0	-	pan

Table.2. Fine Aggregate Grading

بتنی مورد بررسی قرار نگرفته است، بنابراین در این پژوهش این مسئله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- اهمیت موضوع

اهداف اصلی که در این پژوهش در نظر گرفته شده است عبارت است از:

الف) یافتن کاربردی برای استفاده از تایرهای فرسوده برای جلوگیری از انباشته شدن آن‌ها در سطح محیط و مشکلات محیط‌زیستی که در پی آن ایجاد می‌شود.

ب) با توجه به محدود و تجدید ناپذیر بودن برخی منابع از جمله مصالح سنگدانه‌ای و همچنین با توجه به گسترش روزافزون روسازی‌های بتنی، باید سعی شود از مواد و مصالح بازیافتی در بتن استفاده کند، که در این پژوهش از خرده‌لاستیک به جای مصالح ریزدانه استفاده شده است.

ج) در این پژوهش برای اولین بار، از ترکیب مواد مختلف حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده یعنی، خرده‌لاستیک، پودرلاستیک و الیاف فلزی استفاده شده است، تا تأثیر این کاربرد، بر خواصی همچون مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم روسازی بتنی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

د) در این پژوهش برای اولین بار از ترکیب خرده‌لاستیک و پودرلاستیک، با دانه‌بندی مشابه با ریزدانه‌ای که جایگزین آن شده است، استفاده شده است تا تأثیر دانه‌بندی خرده‌لاستیک نیز بر خواص اشاره شده در بالا، مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۳- مطالعات آزمایشگاهی

برای ارزیابی اثر استفاده از خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی بر خواص مکانیکی روسازی بتنی، به یک برنامه آزمایشگاهی احتیاج است، که در این بخش به شرح بخش‌های مختلف این برنامه آزمایشگاهی پرداخته شده است.

### ۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی

مواد و مصالح مصرفی در این پژوهش عبارت است از: سنگدانه، سیمان، آب، افزودنی فوق روان کننده، خرده‌لاستیک

## ۳-۱-۲ سیمان

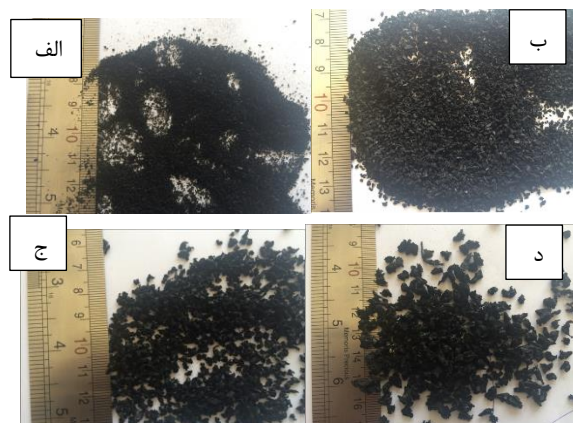
سیمان مورد استفاده شده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ یک است.

## ۳-۱-۳ خرده لاستیک

خرده لاستیک مورد استفاده قرار گرفته در این پژوهش از یک کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده در شهرک صنعتی اشتهارد واقع در استان البرز تهیه شده است که شامل چهار دانه بندی مختلف است، که در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. انواع خرده لاستیک مورد استفاده در این پژوهش (الف):

پودر لاستیک، ب: گرانول سایز ۱، ج: گرانول سایز ۳، د: گرانول سایز ۵)



**Fig. 1.** Different type of crumb rubber used in this research ((الف): crumb powder, (ب): granule1, (ج): granule3, (د): granule5)

در این پژوهش از خرده لاستیک به صورت حجمی و به عنوان جایگزین ریزدانه در ترکیب به میزان ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ استفاده شده است و از ترکیب ۴ نوع خرده لاستیک بالا به گونه‌ای استفاده شده است که دارای دانه بندی تقریباً مشابه با دانه بندی ریزدانه مورد استفاده در نسبت مخلوط باشد که جدول (۳) دانه بندی آن در ادامه نشان داده شده است.

جدول ۳. دانه بندی خرده لاستیک مورد استفاده قرار گرفته

Percentage (%)	Grading	Crumb rubber name	Number
22.48	<0.4mm	Powder	1
24.55	0.4 to 1mm	Granule 1	2
38.90	1 to 3mm	Granule 3	3
14.07	3 to 5mm	Granule 5	4

Table.3. Crumb Rubber Grading

## ۳-۱-۴ آب

آب مورد استفاده در این پژوهش بر اساس آیین نامه بتن ایران و نشریه شماره ۱۰۱ برنامه بودجه، با عنوان مشخصات فنی روسازی، آب آشامیدنی است و نکته بسیار مهم در استفاده از آب در ترکیب، پایین نگه داشتن نسبت آب به سیمان تا حدی است که بتن کارایی مورد نظر را داشته باشد.

## ۳-۱-۵ افزودنی فوق روان کننده

یکی از مشکلاتی که افزودن خرده لاستیک به بتن ایجاد می کند، کاهش کارایی بتن است، برای حل این مشکل در این پژوهش از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر، استفاده شده است تا ضمن افزایش کارایی بتن، نسبت آب به سیمان را کاهش دهد که این موضوع سبب بسیاری مزایای دیگر از جمله افزایش مقاومت ها و دوام بتن، خواهد شد.

شکل ۲. الیاف فلزی حاصل از تایرهای فرسوده



**Fig. 2.** Recycled still fiber from old tire

## ۳-۱-۶ الیاف فلزی حاصل از تایرهای فرسوده

الیاف فلزی مورد استفاده قرار گرفته در این پژوهش، که در شکل (۲)، نشان داده شده است، از همان کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده، که برای تهیه خرده لاستیک به آنجا مراجعه شده بود، تهیه شده، این الیاف در برخی موارد برای ساخت دریچه های منهل های آب و فاضلاب که احتیاج به مقاومت بالا دارند و سازه های مشابه، مورد استفاده قرار می گیرند، ولی اکثریت این الیاف بلا استفاده مانده و به کارخانه های ذوب فلزات فرستاده می شوند و در آنجا ذوب شده و به شمش های

نفوذ دیگر که در تماس با سطح بتن تازه نباشد پوشانده شود و پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها را باید از قالب‌ها خارج ساخت.

در عمل‌آوری ثانویه، پس‌ازاینکه نمونه‌ها از قالب خارج شدند به مدت ۲۸ روز در آب با دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرارگرفته و پس از گذشت ۲۸ روز از آب خارج‌شده و در اتاق بخار قرار می‌گیرند تا فرایند آماده‌سازی آن‌ها برای آزمایش صورت پذیرد.

### ۳-۴ آزمایش‌ها

آزمایش‌هایی که در راستای این تحقیق انجام‌شده‌اند: عبارت است از: مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم، که در این قسمت به شرح چگونگی انجام این آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

### ۳-۴-۱ آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، صورت گرفت. بر اساس این استاندارد نباید یک نمونه دارای قطرهای با اختلاف بیش از ۲٪ باشد. این آزمایش با دستگاه UTM ساخته‌شده توسط شرکت SANTAM با ظرفیت بارگذاری ۱۰۰ تن انجام گرفت.

فلزی تبدیل می‌شوند، که مشکل این کار این است که جنس این نوع از الیاف، برای استفاده در صنایع تولید تایر مرغوب بوده ولی به دلیل نازکی، در فرایند ذوب، حدود ۴۰٪ آن می‌سوزد.

در این پژوهش اثر استفاده از خرده‌لاستیک بر مقاومت‌های روسازی بتنی با و بدون الیاف فلزی بازیافتی بررسی شده، که در مواردی که از الیاف فلزی استفاده شده است مقدار آن برابر با ۰/۵٪ حجم کل بتن بوده است.

### ۳-۲ نسبت مخلوط

در این پژوهش از روش حجم مطلق بر اساس استاندارد ACI\_211.1، برای تعیین نسبت مخلوط بتن مورد استفاده که بتن معمولی است، استفاده شده است. با توجه به مواد و مصالح مورد استفاده قرار گرفته در این پژوهش که در بخش‌های قبل شرح داده‌شده‌اند، نسبت مخلوط در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، مطابق با جدول (۴) خواهد بود.

### ۳-۳ عمل‌آوری نمونه‌ها

عمل‌آوری نمونه‌ها نیز بر اساس استاندارد ASTM C192 صورت گرفته و به شرح زیر است:

در عمل‌آوری اولیه، به‌منظور جلوگیری از تبخیر آب از سطح بتن باید سطح آن با یک نایلون یا یک پوشش غیرقابل

جدول ۴. جزئیات نسبت‌های مخلوط و تعداد نمونه‌ها

Number Of Specimens	Steel fiber (kg/m <sup>3</sup> )	Crumb rubber (kg/m <sup>3</sup> )	Super plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Water (liter/m <sup>3</sup> )	Mix design	No.
6	0	0	4.11	411	754	951	164	C0F0	1
6	0	15.68	4.11	411	716.3	951	164	C5F0	2
6	0	31.35	4.11	411	678.6	951	164	C10F0	3
6	0	47.03	4.11	411	640.9	951	164	C15F0	4
6	0	62.70	4.11	411	603.2	951	164	C20F0	5
6	39	0	4.11	411	754	951	164	C0F5	6
6	39	15.68	4.11	411	716.3	951	164	C5F5	7
6	39	31.35	4.11	411	678.6	951	164	C10F5	8
6	39	47.03	4.11	411	640.9	951	164	C15F5	9
6	39	62.70	4.11	411	603.2	951	164	C20F5	10

Table.4. Concrete Mixes and Number of Specimens

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

28-days compressive strength (average) (MPa)	28-days compressive strength (MPa)			Steel fiber percentage (%)	Crumb rubber percentage (%)	Mix design	Number
	Specimen3	Specimen 2	Specimen 1				
50.11	52.2	46.23	51.9	0	0	C0F0	1
45.29	41.7	48.5	45.66	0	5	C5F0	2
31.63	30.91	32.30	31.69	0	10	C10F0	3
25.10	23.8	27.70	23.79	0	15	C15F0	4
18.47	21.9	15.5	18	0	20	C20F0	5
49.95	58.8	43.5	46.56	0.5	0	C0F5	6
44.50	44.4	42.6	46.5	0.5	5	C5F5	7
33.21	34.92	30.39	34.32	0.5	10	C10F5	8
29.29	27.13	30.45	30.28	0.5	15	C15F5	9
27.93	32.23	22.09	29.47	0.5	20	C20F5	10

Table.6. Compressive Strength Test Results

#### ۴- نتایج

در این تحقیق آزمایش‌ها مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به تشریح نتایج هر یک پرداخته شده است.

##### ۴-۱ مقاومت فشاری

مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه UTM بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با جابه‌جایی ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه، صورت گرفت. از هر حالت ۳ نمونه برای این آزمایش ساخته شده است و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج آن‌ها و میانگین این نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج ارائه گرفته شده از آزمون مقاومت فشاری می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و بدون الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۹/۶، ۳۶/۹، ۴۹/۹ و ۶۳/۱ درصدی، بوده است.

ب) مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و نیم درصد الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۰/۳، ۱۱/۲، ۳۳/۷، ۴۱/۵ و ۴۴/۳ درصدی، بوده است. در این موارد مشاهده می‌شود که

در انجام این آزمایش ابتدا یک پیش بارگذاری سبک در حد چند کیلوگرم به نمونه وارد می‌شود تا صفحه‌های بالا و پایین دستگاه به خوبی بر سطح نمونه بنشینند، پس از آن نیرو با نرخ جابه‌جایی ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه بر نمونه وارد می‌شود و این روند تا زمانی که نمونه بشکند ادامه پیدا می‌کند و مقداری هم پس از آن ادامه پیدا می‌کند تا نمونه تقریباً خود را رها کند، در طی این فرایند، نمودار نیرو-جابه‌جایی برای هر نمونه ترسیم می‌شود.

##### ۴-۲-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM C496 روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، صورت گرفت، این آزمایش با همان دستگاه مقاومت فشاری انجام شد.

این آزمایش که اصطلاحاً به آزمایش برزلی نیز مشهور است، بدین صورت است که ابتدا یک پیش بارگذاری در حد چند کیلوگرم را به نمونه وارد کرده و پس از ثابت شدن نمونه، بارگذاری با نرخ جابه‌جایی ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر آن وارد می‌شود و این روند در نمونه‌های بدون الیاف تا زمان شکست آن و اندکی پس از آن ادامه پیدا می‌کند ولی در نمونه‌های دارای الیاف تا زمانی پس از شکست ادامه پیدا می‌کند که نمونه به دو نیم تبدیل شود. در انتها نمودار نیرو-جابه‌جایی برای هر نمونه ترسیم می‌شود.

شکل ۴. مقایسه مقاومت فشاری نسبت مخلوط‌های مختلف

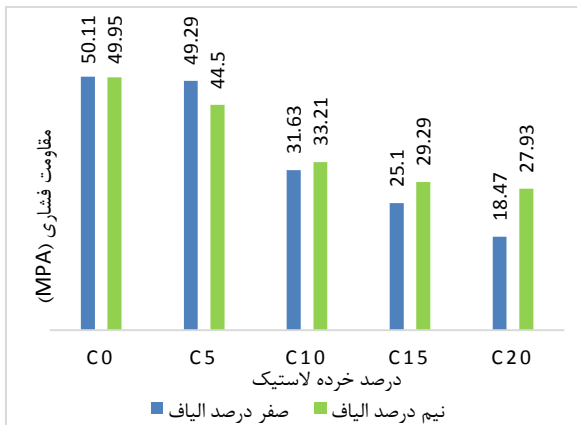


Fig. 4. Comparison between different mix designs compressive test

۴-۲ مقاومت کششی غیرمستقیم

در این پژوهش، مقاومت کششی به صورت غیرمستقیم و با اعمال نیروی جانبی و با استفاده از دستگاه UTM روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با جابه‌جایی ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، صورت گرفت. از هر حالت ۳ نمونه برای این آزمایش ساخته شده است و مقاومت کششی آن‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

28-days indirection tensile strength (average) (MPa)	28-days indirection tensile strength (MPa)			Steel fiber percentage (%)	Crumb rubber percentage (%)	Mix design	Number
	Specimen3	Specimen 2	Specimen 1				
4.26	3.60	4.57	4.61	0	0	C0F0	1
3.94	3.94	4.26	3.62	0	5	C5F0	2
3.61	4.15	3.61	3.06	0	10	C10F0	3
3.35	3.32	3.16	3.56	0	15	C15F0	4
2.93	2.85	3.06	2.87	0	20	C20F0	5
7.15	7.87	6.97	6.62	0.5	0	C0F5	6
6.25	5.80	6.57	6.38	0.5	5	C5F5	7
5.64	5.15	6.02	5.74	0.5	10	C10F5	8
5.02	5.41	4.64	5.02	0.5	15	C15F5	9
4.41	4.38	5.04	4.92	0.5	20	C20F5	10

Table.6. Indirect Tensile Test Results

مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فلزی و بتن شاهد تقریباً برابر است و به جز در ۰/۵ خرده‌لاستیک، که کاهش مقاومت فشاری بتن دارای الیاف فلزی نسبت به بتن بدون الیاف، بیشتر است، در جایگزینی‌های بیشتر خرده‌لاستیک، بتن دارای نیم درصد الیاف فلزی دارای کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌های مشابه بدون الیاف فلزی خواهد بود. همچنین تصاویر مربوط به نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم در شکل (۳) و مقایسه مربوط به نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل (۴)، نشان داده شده است.

شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش‌های مقاومت فشاری و

کششی غیرمستقیم



Fig. 3. Specimens for indirect tensile test and compressive strength test



الیاف فلزی در تحمل تنش‌های کششی ایجاد شده در بتن است، چراکه توان کششی الیاف فلزی بسیار بالا است.

## ۶- نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمایش‌ها و تحلیل و بررسی روی آن‌ها، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- مقاومت فشاری نمونه‌های با جایگزینی خرده‌لاستیک به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده-لاستیک، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۹/۶، ۳۶/۹، ۴۹/۹ و ۶۳/۱ درصدی و نمونه‌های با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی خرده‌لاستیک و ۰/۵٪ الیاف فلزی، به ترتیب دارای کاهش ۰/۳، ۱۱/۲، ۳۳/۷، ۴۱/۵ و ۴۴/۳ درصدی بوده است، بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد بتن حاوی خرده‌لاستیک و الیاف فلزی، از لحاظ مقاومت فشاری نسبت به نمونه حاوی خرده‌لاستیک به تنهایی بهتر بوده و کاهش مقاومت کمتری خواهد داشت.

۲- با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک در بتن، مقاومت کششی غیرمستقیم آن دارای ۷/۵، ۱۵/۳، ۲۱/۴ و ۳۱/۲ درصدی خواهد بود و با افزودن ۰/۵٪ الیاف فلزی به بتن با جایگزینی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک، مقاومت کششی غیرمستقیم به ترتیب به میزان ۶۷/۸، ۴۶/۷، ۳۲/۴، ۱۷/۸ و ۳/۵ درصد افزایش می‌یابد و این نتیجه حاصل می‌شود که مقاومت کششی بتن، در اثر افزودن الیاف فلزی افزایش و در اثر افزایش میزان جایگزینی خرده-لاستیک، کاهش خواهد یافت.

۳- کاهش مشاهده شده در مقاومت‌های فشاری و کششی غیرمستقیم، به دلیل ضعیف‌تر بودن پیوند میان خرده‌لاستیک و خمیر سیمان نسبت به سنگ‌دانه و خمیر سیمان، سبک‌تر بودن بتن حاوی خرده‌لاستیک نسبت به نمونه شاهد و صاف‌تر بودن سطح خرده‌لاستیک نسبت به سنگ‌دانه و عدم وجود منافذ در آن باشد [13].

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، نتایج زیر حاصل می‌شود:

الف) در اثر افزایش میزان خرده‌لاستیک به بتن، مستقل از اینکه بتن دارای الیاف فلزی است یا خیر، مقاومت کششی غیرمستقیم بتن دارای روند نزولی خواهد بود.

ب) مقاومت کششی بتن حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و بدون الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، دارای کاهش به ترتیب ۷/۵، ۱۵/۳، ۲۱/۴ و ۳۱/۲ درصدی، خواهد بود.

ج) مقاومت کششی بتن حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و با نیم درصد الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، دارای افزایش به ترتیب ۶۷/۸، ۴۶/۷، ۳۲/۴ و ۱۷/۸ و ۳/۵ درصدی است.

## ۵- تحلیل نتایج

دلیل کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتنی حاوی خرده‌لاستیک، با افزایش درصد جایگزینی خرده‌لاستیک، نسبت به نمونه‌های شاهد، کم بودن چسبندگی بین خرده‌لاستیک و خمیر سیمان نسبت به چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها است [13]، همچنین از دیگر دلایل آن می‌توان به: سبک‌تر بودن بتن حاوی خرده‌لاستیک نسبت به بتن معمولی و صاف‌تر بودن سطح و عدم وجود منافذ در خرده‌لاستیک نسبت به سنگ‌دانه‌ها اشاره نمود [14].

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مشاهده می‌شود که افزودن نیم درصد الیاف فلزی بازیافتی منجر به بهبود در روند کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی خرده‌لاستیک، می‌شود، که دلیل آن می‌تواند مقاومت کردن الیاف فلزی در برابر فشار و همچنین نگه‌داشتن خرده‌های لاستیک موجود در بتن در یک ماتریس منسجم‌تر نسبت به حالت بدون الیاف باشد.

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، مشاهده می‌شود که با جایگزینی حتی ۲۰ درصد خرده‌لاستیک به جای ریزدانه، مقاومت کششی، در اثر افزودن تنها نیم درصد الیاف فلزی بازیافتی، افزایش می‌یابد، که دلیل آن مشارکت

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X05005574>

8. Koksai F, Altun F, Yiğit İ, Şahin Y. 2008 Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Constr Build Mater*;22(8):1874–80.
9. Topçu IB. 1995 The properties of rubberized concretes. *Cem Concr Res*;25(2):304–10.
10. Soutsos MN, Le TT, Lampropoulos AP. 2012 Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Constr Build Mater*;36:704–10.
11. Meddah MS, Bencheikh M. 2009 Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Constr Build Mater*;23(10):3196–205.
12. Chou LH, Yang CK, Lee MT, Shu CC. 2010 Effects of partial oxidation of crumb rubber on properties of rubberized mortar. *Compos Part B Eng*;41(8):613–6.
13. Ganjian E, Khorami M, Maghsoudi AA. 2009 Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Constr Build Mater*;23(5):1828–36.
14. Thomas BS, Gupta RC, Kalla P, Csetenyi L. 2014 Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Constr Build Mater [Internet]*;59:204–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.074>

## References

## ۷- مراجع

1. Sukontasukkul P, Chaikaew C. 2006 Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Constr Build Mater*;20(7):450–7.
2. Thomas BS, Kumar S, Mehra P, Gupta RC, Joseph M, Csetenyi LJ. 2016 Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. *Constr Build Mater [Internet]*;124:906–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.110>
3. Thomas BS, Chandra Gupta R. 2016 Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *J Clean Prod [Internet]*;113:86–92. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
4. Thomas BS, Gupta RC. 2016 A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renew Sustain Energy Rev [Internet]*;54:1323–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>
5. Li D, Mills JE, Benn BT, Ma X. 2014 Abrasion and impact resistance investigation of crumbed rubber concrete (CRC); I:255–60.
6. 440R-96 A. 2002 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *Aci*;96(Reapproved):1–68.
7. Düzgün OA, Gül R, Aydin AC. 2005 Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Mater Lett [Internet]*;59(27):3357–63. Available from:

# Evaluation of Recycled Products from Worn Tires Effect on the Mechanical Properties of Concrete Pavement

Ali Zarei<sup>1</sup>, Abolfazl Hassani\*<sup>2</sup>

1- M.Sc. Student of Highway and Transportation Engineering, Department of Highway and Transportation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Highway and Transportation Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

hassani@modares.ac.ir

## Abstract:

By increasing the use of vehicles today, a large number of tires are produced daily, and on the other hand, the number of worn tires has risen and, given the fact that they are not environmentally friendly, and their recycling is not economical, the worn tires are observed in different parts of the earth in a sporadic or massive manner, this issue causing many environmental problems, including a potential fire hazard, a place for the accumulation and cultivation of insects and rodent organisms such as rats. One of the solutions used to remove worn tires is burning, that cause produce toxic gases and air pollution, and the black powder resulting from the burning of tires causes pollution of surface water and soils. In some cases worn tires are used to produce carbon black, which has a lower quality and higher cost than carbon produced from crumb rubber, therefore, it is necessary to find solutions for the use of recycled materials from tires, on the other hand, by increasing the use of concrete structures, including concrete pavement and use of this pavement in many new pavements, and noting that the primary sources of concrete production, including sand, are limited and exhausted, the need to use alternatives for these materials in concrete pavements is becoming increasingly important. So in this research to resolve the problems, the combination of rubber and recycled steel fibers from worn tires is used in concrete pavements, also it should be noted that the composition of the crumb rubber consists of rubbers with three different granules and crumb powder that made from a recycling factory for worn tires, and then the mechanical properties of the concrete made from the replacement of these materials, has been evaluated. In this research, 0, 5, 10, 15 and 20 percent of crumb rubber mix was used as a fine grained substitute for concrete pavement. Also, in another state, half percent of the steel fibers recovered from worn tires were added to these samples. The results of this study indicate that the compressive strength of samples with 5, 10, 15 and 20% crumb rubber in comparison with the control sample was reduced by 1.6, 36.9, 49.9% and 63.1%, and samples with 0, 5, 10, 15 and 20% crumb rubber and 0.5% steel fibers, respectively, decreased by 0.3, 11.2, 33.7, 5 / 41% and 44.3% respectively. Therefore, it is observed that the compressive strength of concrete containing crumb rubber and steel fibers is better than specimens with crumb rubber. Also, by replacing 5%, 10%, 15% and 20% of crumb rubber in concrete, its indirect tensile strength would be reduced by 7.5%, 15.3%, 41.4% and 31.2% , and by adding 0.5% of the steel fibers to the concrete by replacing 0, 5, 10, 15 and 20% of crumb rubber in concrete, Indirect tensile strength increased by 67.8%, 46.7%, 32.4%, 17.8% and 3.5%, respectively, and it is concluded that the tensile strength of concrete increases due to the addition of steel fibers. Due to the increase in the amount of petroleum residue replacement.

**Key words:** worn tire, compressive strength, indirect tensile strength, concrete pavement, recycling