

## تأثیر استفاده از خرده‌های لاستیک بر خصوصیات روسازی بتن غلتکی

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
ابوالفضل حسنی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
فرشاد صابری کرهرودی\*، کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Saberi.Farshad@mail.kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۳ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۰

### چکیده

امروزه، با توجه به نیاز بشر به حمل و نقل و رشد روز افزون صنایع لاستیک، هر ساله حجم انبوهی از لاستیک‌های فرسوده وارد چرخه محیط زیست می‌شوند. از این رو، مطالعات زیادی در زمینه استفاده مجدد از آنها صورت گرفته است. با توجه به اهمیت این موضوع، در این تحقیق، به بررسی اثر استفاده از خرده‌های لاستیک فرسوده در روسازی‌های بتن غلتکی پرداخته شده است و سعی شده که خصوصیات اصلی بتن شامل وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین، خرده‌های لاستیک با اندازه تقریبی ماسه به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده و مطالعات پیشین، بر خلاف اثر کاهشی که خرده‌های لاستیک بر مقاومت بتن‌های معمولی داشته‌اند، می‌توانند در بتن غلتکی تا درصد مشخصی سبب افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی شوند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که دانه‌های لاستیک، درصد جذب آب نمونه‌های بتنی را کاهش می‌دهند. به طوری که با افزایش درصد دانه‌های لاستیک در بتن، مقدار جذب آب کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: دانه‌های لاستیکی، روسازی بتن غلتکی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب حجمی آب.

### ۱. مقدمه

آن‌ها می‌توان به سطح ناهموار این روسازی و همچنین صلیبیت آن اشاره کرد. سطح ناهموار، خود سبب به‌وجود آمدن دو مشکل عمده، یکی عدم راحتی سرنشینان خودروها و دیگری آلودگی صوتی در محیط پیرامون در اثر اصطکاک چرخ‌های وسایل نقلیه با سطح ناهموار جاده خواهد شد. عدم انعطاف‌پذیری و صلیبیت آن نیز می‌تواند سبب کاهش عمر سرویس‌دهی این نوع روسازی شود (صابری، ۱۳۹۲).

روسازی بتن غلتکی نوعی از روسازی بتنی است که بتن بر سطح راه ریخته شده و توسط غلتک متراکم می‌گردد (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸). این نوع روسازی، با توجه به عدم نیاز به مسلح کردن و قالب بندی و استفاده از تجهیزات آسفالتی مرسوم در اجرای آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما همانند دیگر روسازی‌ها دارای معایبی نیز می‌باشد که از مهمترین

دمای زیاد همراه است، خیلی سخت خاموش می‌شود. این آتش، همراه با دودی غلیظ و سنگین، در فضا پراکنده می‌شود و در نهایت ماده روغنی از خود بر جای می‌گذارد که می‌تواند سبب آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی گردد.

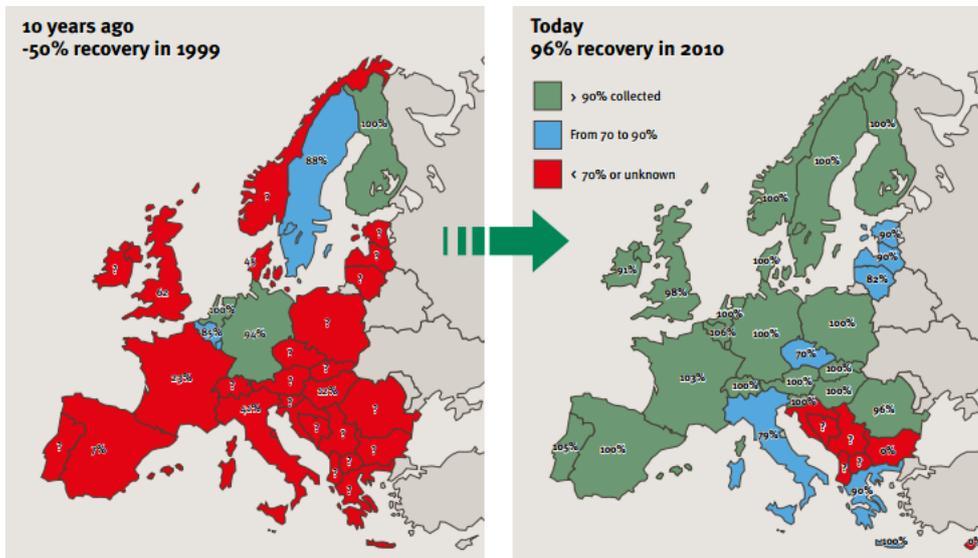


شکل ۱. یک انبار لاستیک‌های فرسوده

شکل ۲، رشد بازیافت لاستیک‌های فرسوده، از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰ در اتحادیه اروپا را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، این رشد صعودی بوده و اهمیت بازیافت این محصول در کشورهای توسعه یافته را نشان می‌دهد.

استفاده از دانه‌های لاستیکی در روسازی‌ها برای اولین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی در روسازی‌های آسفالتی انجام شد و بعد از آن رشد چشمگیری داشته است. طبق مطالعات انجام شده، کاربرد خرده‌های لاستیک در روسازی آسفالتی سبب کاهش هزینه نگهداری، افزایش عمر سرویس‌دهی و کاهش آلودگی صوتی ناشی از تردد وسایل نقلیه می‌شود (براو و بریتو، ۲۰۱۲). همچنین، استفاده از خرده‌های لاستیک در روسازی‌های آسفالتی سبب افزایش بیشتر مقاومت روسازی در برابر تغییرات دما و زهکشی بهتر آن می‌شود (امیرخانیان و بوراتی، ۱۹۹۶).

حجم بالای تولید لاستیک فرسوده و نیاز به انبار کردن آن (شکل ۱)، سبب مشکلات عمده‌ای، از جمله بیماری و آتش‌سوزی، می‌شود. همچنین، خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی و نفوذ به آب رودخانه‌ها و آب‌های آشامیدنی وجود دارد. هر یک از این موارد به نوبه خود می‌توانند سبب بروز بیماری‌های مختلف شوند. مشکل دیگر، احتمال زیاد آتش گرفتن انبارهای لاستیک می‌باشد. معمولاً آتش ناشی از انبارهای لاستیک، که با



شکل ۲. مقایسه درصد بازیافت لاستیک در اروپا در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۱۰ (انجمن تولید کنندگان لاستیک اروپا)

دارد که با توجه به وزن مخصوص کمتر دانه‌های لاستیکی نسبت به سنگدانه‌ها، امری واضح می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش اندازه دانه‌های لاستیکی، وزن مخصوص بتن افزایش می‌یابد (براو و بریتو، ۲۰۱۲).

نکته دیگری که در بحث نمونه‌های بتنی ساخته شده با دانه‌های لاستیکی دارای اهمیت است، اثر این دانه‌ها بر اسلامپ بتن می‌باشد. بخصوص که در بتن غلتکی، دارا بودن اسلامپ صفر اهمیت دارد. براساس آزمایش‌هایی که خطیب و بایومی (۱۹۹۹) انجام دادند، افزایش درصد دانه‌های لاستیکی سبب کاهش اسلامپ بتن می‌شود. به طوری که با افزایش دانه‌های لاستیکی به میزان ۴۰٪، مقدار اسلامپ بتن به صفر می‌رسد. از دیگر مطالعاتی که صورت گرفته می‌توان به مطالعه باتاینه و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. آنها در تحقیقات خود، دانه‌های لاستیکی را به مقدار صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین ماسه کردند. مشاهدات آنها نشان داد که با افزایش درصد دانه‌های لاستیکی، مقدار اسلامپ کاهش می‌یابد (اسلامپ به ترتیب برابر با ۷۵، ۶۱، ۳۶، ۱۸، ۱۰ و ۵ به‌دست آمد).

اما تأثیر دانه‌های لاستیکی بر خصوصیات مقاومتی بتن، همچون مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، در مطالعات پیشین نیز قابل مشاهده است. بر این اساس، سه عامل نقش مهمی بر مقاومت بتن‌های لاستیکی دارند: مقدار، ابعاد و بافت سطحی دانه‌های لاستیکی. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که با افزایش مقدار دانه‌های لاستیکی، میزان مقاومت بتن کاهش می‌یابد. در مطالعات گنجیان و همکاران (۲۰۰۹) مشخص شد که با افزایش مقدار دانه‌های لاستیکی جایگزین با شن و سیمان، مقاومت فشاری و خمشی برای هر دو نوع مخلوط کاهش می‌یابد. در این مطالعه، دانه‌های لاستیک جایگزین ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد شن و سیمان شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که به طور

تاکنون مطالعاتی در زمینه اثر استفاده از دانه‌های لاستیکی به عنوان جایگزین سنگدانه‌ها یا سیمان در بتن انجام گرفته است که در قسمت بعد به شرح آنها پرداخته می‌شود.

## ۲. مروری بر مطالعات گذشته

به طور کلی، از نظر فنی و ابعاد، لاستیک‌های فرسوده را می‌توان به ۵ دسته تقسیم نمود: حلقه تیرهای فرسوده، پاره لاستیک، تکه لاستیک، خرده لاستیک و پودر لاستیک.

ضمناً، دانه‌های لاستیک به دو روش زیر تهیه می‌گردد:

الف- روش Cryogenic: در این روش، که از نیتروژن مایع استفاده می‌شود، به علت انجماد سریع، مصرف انرژی الکتریکی زیاد می‌باشد. بنابراین، محصول با مش کم و هزینه زیاد تولید شده و مقرون به صرفه نمی‌باشد. این روش در حال حاضر در جهان کاربرد کمی دارد.

ب- روش Ambient: در این روش، با استفاده از هوای سرد، قطعات لاستیکی توسط توربین‌ها سرد و خشک شده و آماده آسیاب می‌گردند. در مقایسه با روش الف، در این روش نیاز به انرژی کمتر و مصرف هوا زیادتر است، که توسط کمپرسورها و از مخازن حجیم هوا تأمین خواهد شد. روش Ambient مؤثرترین و ارزان‌ترین روش برای بازیافت تیرهای فرسوده می‌باشد (صمدیان، ۱۳۸۵).

در مطالعاتی که تا کنون درباره اثر خرده‌های لاستیک بر بتن انجام شده است، دانه‌های لاستیک با ابعاد مختلف (دانه‌هایی با اندازه دانه‌های شنی تا پودر لاستیک) جایگزین سیمان یا سنگدانه شده است. البته تمامی این مطالعات در ارتباط با بتن‌های معمولی انجام پذیرفته است.

پژوهش‌ها نشان از کاهش وزن مخصوص بتن با جایگزین نمودن دانه‌های لاستیکی بجای سنگدانه‌ها

لاستیک، مقاومت فشاری در نمونه بتنی دارای ۱۰٪ خرده لاستیک افزایش یافت. اما مقاومت فشاری بقیه نمونه‌ها (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) روندی کاهشی داشت. همچنین، مقاومت خمشی نمونه‌ها با افزایش درصد خرده‌های لاستیک کاهش یافت. به طوری که این کاهش مقاومت در نمونه بتنی حاوی ۵۰٪ خرده لاستیک، حدود ۳۲٪ بود.

ابعاد دانه‌های لاستیکی نیز می‌توانند نقش مهمی در مقاومت بتن ایفا کنند. مطالعات الدین و سنوسی (۱۹۹۳) نشان داد که با جایگزینی کامل دانه‌های شن با دانه‌های لاستیک، مقدار مقاومت فشاری حدود ۸۵٪ و مقاومت کششی حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. اما با جایگزینی دانه‌های ماسه با دانه‌های لاستیک، حدود ۶۵٪ کاهش مقاومت فشاری و ۵۰٪ کاهش مقاومت کششی مشاهده می‌گردد.

عامل مهم دیگر، نقش بافت سطحی دانه‌های لاستیک بر مقاومت بتن می‌باشد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شستن دانه‌های لاستیکی قبل از استفاده در بتن می‌تواند تا حد زیادی باعث افزایش مقاومت بتن شود. به طور کلی، هر چه سطح دانه‌های لاستیک زبرتر باشد، میزان چسبندگی آن با ملات سیمانی افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود. در تحقیقات انجام شده، از سه ماده آب، تتراکلرید کربن و هیدروکسید سدیم جهت شستن دانه‌های لاستیک استفاده شده است. رستمی و همکاران (۲۰۰۰) اثر شستشو با آب و تتراکلرید کربن را بر مقاومت بتن مورد بررسی قرار دادند. براساس مطالعات آن‌ها، دانه‌های لاستیکی که قبل از استفاده در بتن با آب شسته شدند، حدود ۱۶٪ افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌هایی که دانه‌های لاستیکی آنها شسته نشده بودند، داشتند. این مقدار برای دانه‌های لاستیکی شسته شده با محلول تتراکلرید کربن برابر ۵۷٪ به دست آمد، که مقدار قابل توجهی است.

کلی افزودن دانه‌های لاستیک سبب کاهش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها می‌شود. اما دو نکته دارای اهمیت است: ۱) برای مخلوط‌های دارای ۵٪ دانه‌های لاستیک، مقاومت فشاری یا خمشی تغییر چندانی نمی‌کند و ۲) مقاومت فشاری نمونه‌های با دانه‌های لاستیکی جایگزین شن بیشتر از نمونه‌های با دانه‌های لاستیکی جایگزین سیمان بود. اما برای مقاومت خمشی، این موضوع برعکس بود. بر این اساس، نتیجه گرفته شده که نمونه‌های با دانه‌های لاستیکی بزرگتر دارای مقاومت فشاری بیشتر و مقاومت خمشی کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر هستند.

ال وی و همکاران (۲۰۱۵) درصد‌های مختلف خرده‌های لاستیک (از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد) را جایگزین ماسه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد دانه‌های لاستیک، مقاومت‌های مکانیکی نمونه‌های بتنی شامل مقاومت فشاری، خمشی و کششی-برشی کاهش می‌یابد.

بنازوک و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی اثر دانه‌های لاستیکی با اندازه کمتر از یک میلی‌متر بر مقاومت خمشی بتن پرداختند. آنها نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف لاستیک را به گونه‌ای ساختند که در تمامی مخلوط‌ها، اسلامپ بتن مقدار یکسان ۹۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر را داشته باشد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نشان داد که افزودن دانه‌های لاستیکی (تا حدود ۲۰٪) سبب افزایش مقاومت خمشی بتن می‌شود. اما پس از آن، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. آن‌ها دلیل این افزایش را جذب انرژی توسط دانه‌های لاستیکی در هنگام تشکیل ترک‌ها عنوان کردند که سبب تأخیر در گسیختگی بتن می‌شود.

همچنین، داسیلوا و همکاران (۲۰۱۵) درصد‌های مختلف خرده لاستیک (از ۱۰ تا ۵۰ درصد) را در بلوک‌های روسازی بتن مورد استفاده قرار دادند. براساس نتایج به دست آمده، با افزایش درصد دانه‌های

ماسه شدند. در ادامه، درصد‌های مختلف دانه‌های لاستیکی با C، C5، C10، C15 و C20 نشان داده شده‌اند. آزمایش‌های صورت گرفته شامل تعیین وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب بتن می‌باشند.

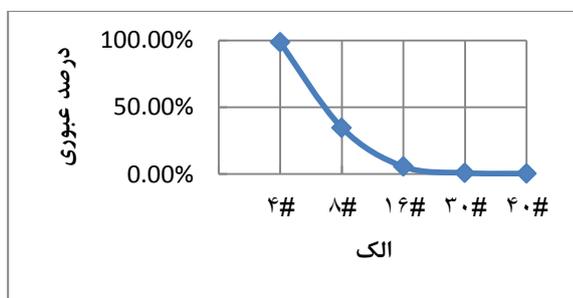
### ۳-۱. مصالح مورد استفاده

در این پژوهش، از دانه‌های لاستیک با اندازه‌هایی قابل جایگزین با ماسه استفاده گردید که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. دانه‌های لاستیک در درصد‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ جایگزین ماسه شدند. ضمناً مقدار وزن مخصوص دانه‌های لاستیکی برابر با ۰/۵۲۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. منحنی دانه‌بندی دانه‌های لاستیک نیز در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳. دانه‌های لاستیکی مورد استفاده در این

پژوهش



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی دانه‌های لاستیکی مورد

استفاده

شن بادامی از نوع کوهی، با حداکثر بُعد ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص  $2/675 \text{ gr/cm}^3$  و جذب آب ۰/۷۲ درصد به دست آمد. وزن مخصوص و جذب آب

سگر و جوکس (۲۰۰۰) در ساخت ملات سیمان، دانه‌های لاستیک را قبل از استفاده، حدود ۲۰ دقیقه در محلول هیدروکسید سدیم (به منظور آبدوست کردن دانه‌های لاستیک) نگه داشتند. این روش، باعث افزایش چسبندگی ملات سیمانی با سطح دانه‌های لاستیک شد.

متأسفانه مطالعات محدودی در رابطه با پتانسیل جذب صدا توسط بتن لاستیکی صورت پذیرفته است و از آنجا که یکی از مشکلات استفاده از روسازی‌های بتن‌غلتکی در خیابان‌های شهری، آلودگی صوتی ناشی از اصطکاک چرخ‌های وسایل نقلیه با سطح روسازی می‌باشد، این نکته دارای اهمیت است. این آلودگی صوتی را می‌توان به سطح ناهموار روسازی‌های بتن‌غلتکی نسبت داد. به نظر می‌رسد که استفاده از دانه‌های لاستیک در روسازی بتن‌غلتکی می‌تواند تا حد زیادی جهت کاهش این آلودگی مؤثر واقع شود. از این رو، سوکتاسوکول (۲۰۰۹) به بررسی پتانسیل جذب صدا در بتن‌های ساخته شده با دانه‌های لاستیکی پرداخت و از دو نوع مختلف دانه لاستیک با اندازه‌های رد شده از الک شماره ۶ و همچنین رد شده از الک شماره ۲۶ جهت ساخت سه نوع مخلوط بتنی استفاده کرد. در نمونه اول از دانه‌های رد شده از الک ۶، در نمونه دوم از دانه‌های رد شده از الک ۲۶ و در نمونه سوم از مخلوط دانه‌های رد شده از الک‌های ۶ و ۲۶ با درصد‌های ۱۰ و ۲۰ جایگزین با ریزدانه‌ها استفاده کرد. بر این اساس، مقدار ضریب کاهش نویز (NRC) با افزایش مقدار دانه‌های لاستیک کاهش یافت.

### ۳. برنامه کار و روش تحقیق

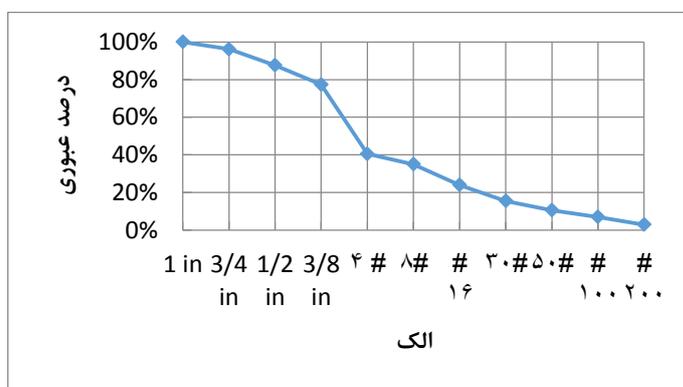
در این پژوهش، طرح اختلاط بتن غلتکی براساس روش تراکم خاک‌ها انجام گردید و پس از به دست آوردن طرح اختلاط بهینه از آب و سیمان، خرده‌های لاستیک در درصد‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ جایگزین

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق-

روان‌کننده	
وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	$1/19 \pm 0/02$
حالت فیزیکی	مایع
رنگ	قهوه‌ای تیره
اسیدیته (pH)	$7/0 \pm 0/5$
یون کلر	ندارد (کمتر از استاندارد BS5075)

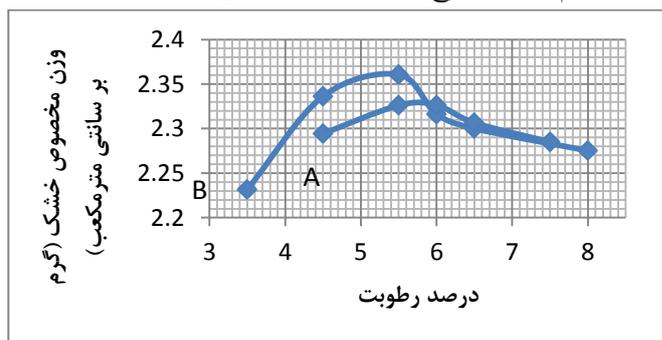
### ۲-۳. طرح اختلاط

در طرح اختلاط بتن غلتکی از روش تراکم استفاده شد. ابتدا براساس استاندارد PCA درصد بهینه از مصالح سنگی تهیه گردید. منحنی دانه‌بندی بهینه به دست آمده سنگدانه‌های مصرفی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. دانه‌بندی بهینه سنگدانه‌ها

با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه‌ها که برابر ۱۹ میلی‌متر است، آزمایش تراکم براساس استاندارد ASTM D-1557، روش D انجام گرفت. آزمایش درصد رطوبت بهینه جهت به‌دست آوردن مقدار آب بهینه بتن با درصدهای مختلف سیمان به سنگدانه برابر با ۱۲ و ۱۴ درصد انجام گردید. نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

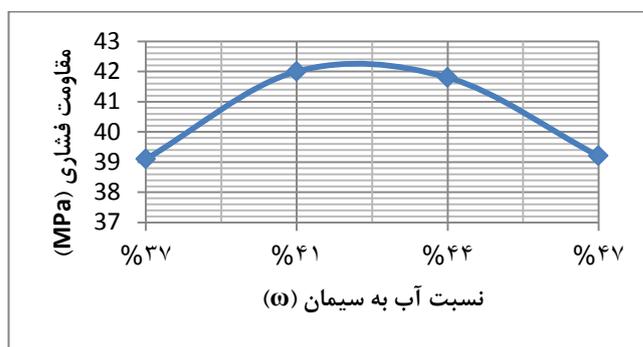


شکل ۶. منحنی تراکم (A: ۱۲٪ و B: ۱۴٪ سیمان)

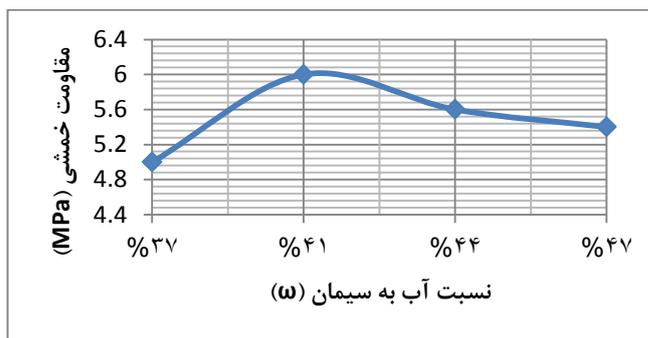
درصد سیمان لازم انتخاب شود. البته آیین‌نامه ACI و PCA به ترتیب مقاومت‌های خمشی و فشاری را در این مرحله مد نظر قرار می‌دهند، که در این پژوهش به بررسی هر دو پرداخته شد. از همین رو، نمونه‌های فشاری و خمشی بتن با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۴ و ۰/۴۷ تهیه گشت و برای هر یک از نسبت‌های آب به سیمان، سه نمونه فشاری و دو نمونه خمشی تهیه گردید. در پایان، آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج به دست آمده مقاومت فشاری و خمشی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

بر اساس شکل ۶، برای مقدار نسبت سیمان به سنگدانه برابر با ۰/۱۴، مقدار وزن مخصوص خشک بیشتری مشاهده می‌شود. از همین رو، در طرح اختلاط ابتدایی مقدار رطوبت بهینه برابر با ۰/۵۵ و مقدار سیمان ۰/۱۴ وزن سنگدانه‌ها در نظر گرفته شده است.

در مرحله بعد، جهت به دست آوردن طرح اختلاط، با ثابت در نظر گرفتن مقدار آب به دست آمده در مرحله قبل (۵/۵ درصد)، نمونه‌های مختلف بتنی با درصد‌های مختلف سیمان تهیه گشت تا مقاومت نمونه‌های بتنی را در درصد‌های مختلف سیمان سنجیده و براساس بیشترین مقاومت و مقاومت مورد نیاز،



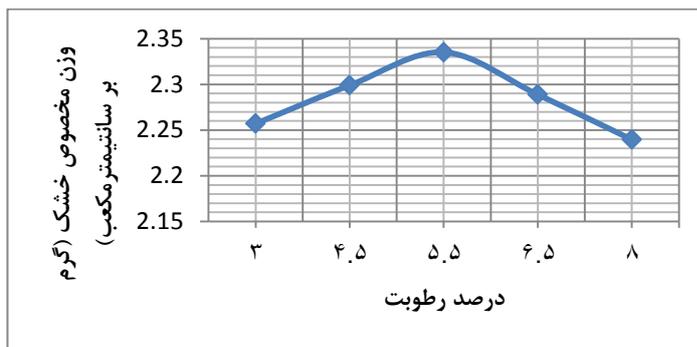
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌ها



شکل ۸. مقاومت خمشی نمونه‌ها

در مرحله آخر، جهت به دست آوردن طرح اختلاط بهینه، آزمایش درصد رطوبت بهینه مجدداً انجام گردید. نتایج به دست آمده از این آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است، برای نسبت آب به سیمان تقریبی برابر با ۰/۴۳ حداکثر مقاومت فشاری و برای نسبت آب به سیمان تقریبی برابر با ۰/۴۱، حداکثر مقاومت خمشی را داریم. در مجموع، با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۴ در نظر گرفته شد.



شکل ۹. آزمایش تراکم نهایی

براین اساس، رطوبت بهینه برابر با ۵/۵ درصد و سیمان بهینه برابر ۱۴٪ وزن سنگدانه استاندارد به دست آمد. طرح اختلاط نهایی بتن غلتکی در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲. طرح اختلاط نهایی بتن غلتکی

مصالح	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	فیلر	آب	سیمان	W/C
وزن حجمی (kg/m <sup>3</sup> )	۳۱۲/۳	۸۳۲/۸	۸۱۵/۴	۶۸/۸	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	٪۴۳/۸

از گذشت یک دقیقه، آب باقی مانده را به همراه فوق-روان کننده به مخلوط اضافه کرده تا مخلوط به مدت ۲ دقیقه دیگر هم زده شود. طرح اختلاط نهایی مخلوطها در جدول ۳ قابل مشاهده است. همچنین، بلافاصله بعد از پایان یافتن عمل اختلاط، آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه برای مخلوط بتن انجام شد.

جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا مصالح سنگی به همراه خرده‌های لاستیک با دقت وزن و در مخلوط کن ریخته شده و برای ۳۰ ثانیه در حالت خشک هم زده شدند. سپس نیمی از آب اختلاط را در مخلوط کن ریخته تا مصالح برای حدود یک دقیقه هم زده شوند. در مرحله بعد، مصالح سیمانی به مخلوط اضافه شده و بعد

جدول ۳. طرح اختلاط مخلوطها

W/C (%)	آب	ماده سیمانی	فیلر	ماسه		شن نخودی	شن بادامی	نمونه
				دانه‌های لاستیکی	سنگدانه طبیعی			
۴۳/۷	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	۶۸/۸	-	۸۱۵/۴	۸۳۲/۸	۳۱۲/۳	C
۴۳/۷	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	۶۸/۸	۸/۱	۷۷۴/۶	۸۳۲/۸	۳۱۲/۳	C5
۴۳/۷	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	۶۸/۸	۱۶/۳	۷۳۳/۹	۸۳۲/۸	۳۱۲/۳	C10
۴۳/۷	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	۶۸/۸	۲۴/۴	۶۹۳/۱	۸۳۲/۸	۳۱۲/۳	C15
۴۳/۷	۱۲۸/۸	۲۹۴/۲	۶۸/۸	۳۲/۵	۶۵۲/۳	۸۳۲/۸	۳۱۲/۳	C20

در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه، قالب‌های بتنی از استخر بیرون آورده شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب بتن برابر با استانداردهای جدول ۴ انجام شد.

جدول ۴. استانداردهای آزمایش‌ها

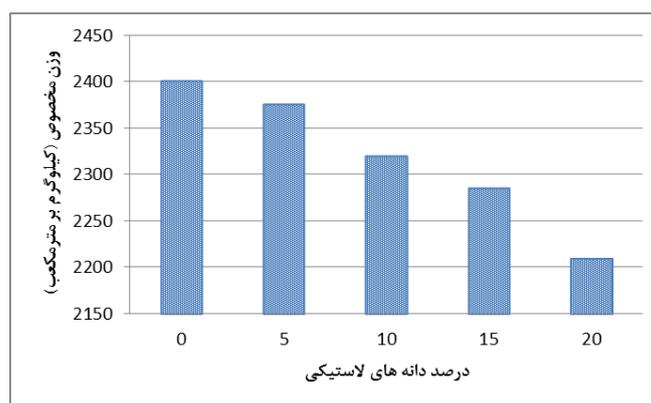
شرح آزمایش	استاندارد	سنین آزمایش (روز)	ابعاد نمونه‌ها
مقاومت فشاری	BS 1881-part116	۷ ۲۸	مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر
مقاومت خمشی	BS 1881-part118	۷ ۲۸	منشوری ۱۰*۱۰*۵۰ سانتی‌متر
جذب حجمی بتن	BS 1881-part122	۲۸	مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. وزن مخصوص بتن تازه

یکی از آزمایش‌های مرسوم در بحث کیفیت بتن، آزمایش وزن مخصوص بتن تازه می‌باشد که برای تمامی مخلوط‌ها بعد از خارج کردن از مخلوط‌کن، انجام گرفت. نتایج آزمایش وزن مخصوص در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن دانه‌های لاستیکی به ملات، وزن مخصوص

بتن تازه کاهش می‌یابد و هر چه درصد لاستیک افزوده بیشتر شود، روند کاهش وزن مخصوص بتن نیز بیشتر می‌شود. دلیل این کاهش وزن مخصوص را می‌توان در کمتر بودن وزن مخصوص دانه‌های لاستیک نسبت به سنگدانه‌های طبیعی (ماسه) یافت. کاهش وزن مخصوص بتن می‌تواند کاربردهای مختلفی داشته باشد؛ برای نمونه، سبب ساخت بلوک‌های بتنی با وزن مخصوص کمتر شود.



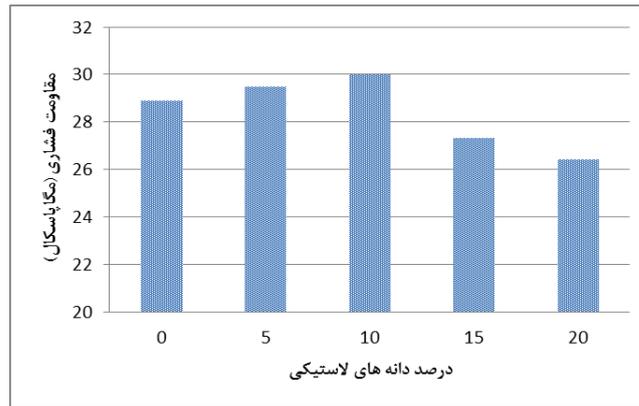
شکل ۱۰. نمودار وزن مخصوص بتن تازه

##### ۴-۲. مقاومت فشاری

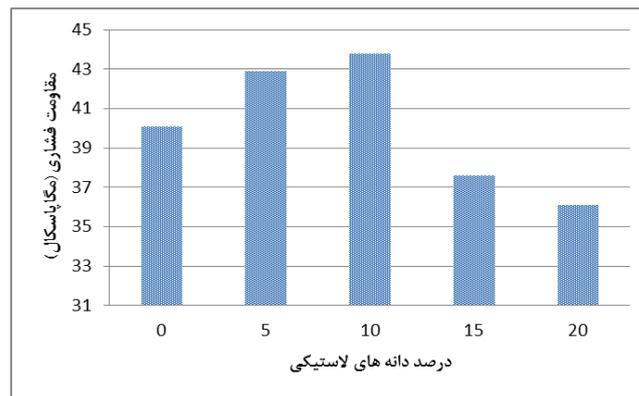
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های سخت شده در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۶ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی‌متر

ساخته شد و مقاومت فشاری نهایی مخلوط‌ها در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه از میانگین مقاومت نمونه‌های ساخته شده به دست آمد. نتایج نهایی مقاومت فشاری در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است.

تأثیر استفاده از خرده‌های لاستیک بر خصوصیات روسازی بتن غلتکی



شکل ۱۱. نمودار مقاومت فشاری ۷ روزه



شکل ۱۲. نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه

آن را مقدار بیشتر آب بتن معمولی نسبت به بتن غلتکی آزمایش شده دانست. چرا که آب بیشتر سبب ایجاد ناهمگنی در بتن در هنگام عمل تراکم بتن تازه می‌شود. در واقع، با توجه به وزن مخصوص کم، دانه‌های لاستیک در هنگام عمل ویریه تمایل به حرکت به سمت بالا دارند. این موضوع سبب تمرکز دانه‌های لاستیک در قسمت بالای نمونه‌ها می‌شود. در نتیجه، نمونه بتنی دارای نقاط بحرانی می‌گردد. این نقاط بحرانی به شدت می‌توانند سبب کاهش مقاومت بتن گردند. از این رو، به نظر می‌آید که استفاده از خرده‌های لاستیک در بتن غلتکی توجه بیشتری نسبت به بتن‌های معمولی دارد. در بتن‌های معمولی، به دلیل نسبت آب به سیمان زیاد و ویریه در قسمت بالای نمونه بتن تازه متمرکز می‌گردند و در نتیجه سبب افت شدید مقاومت فشاری می‌گردد.

برخلاف بتن‌های معمولی که افزایش مقاومت فشاری از ۷ روزگی تا ۲۸ روزگی حدود ۳۰٪ است، در بتن‌های لاستیکی، افزایش مقاومتی از ۳۶٪ (نمونه C20) تا ۴۶٪ (نمونه C10) مشاهده می‌شود.

همچنین، افزودن دانه‌های لاستیکی تا حدی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. به طوری که نمونه دارای ۱۰٪ خرده لاستیک، بیشترین مقاومت را در بین سایر نمونه‌ها به دست آورد و مقاومت ۲۸ روزه آن به حداکثر مقدار  $43/8 \text{ MPa}$  رسید. این در حالی است که مقاومت نمونه کنترلی حدود  $40/1 \text{ MPa}$  می‌باشد. این نشان می‌دهد که افزودن ۱۰٪ خرده‌های لاستیک، مقاومت فشاری بتن را بیش از ۹٪ افزایش می‌دهد.

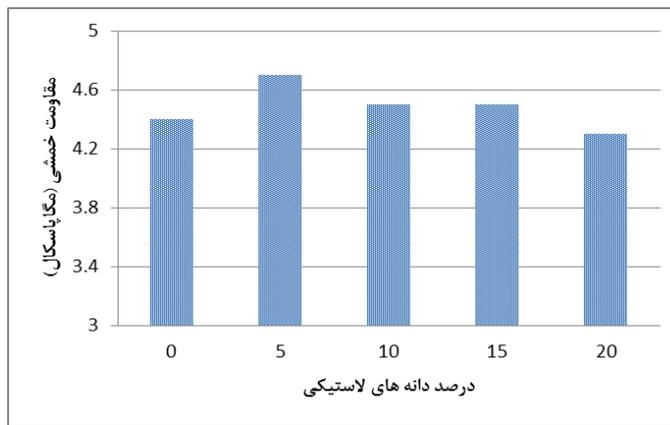
البته در مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران روی بتن‌های معمولی به اثر کاهشی خرده لاستیک بر مقاومت بتن معمولی اشاره شده است که می‌توان دلیل

روسازی براساس مقاومت خمشی بتن تعیین می‌گردد. آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های سخت شده در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام شد. برای هر طرح اختلاط ۴ نمونه منشوری با ابعاد ۱۰\*۱۰\*۵۰ سانتی‌متر ساخته شد. مقاومت خمشی نهایی مخلوط‌ها در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه از میانگین مقاومت نمونه‌های ساخته شده به دست آمد. نتایج مقاومت خمشی ۷ روزه و ۲۸ روزه به صورت نمودار در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود.

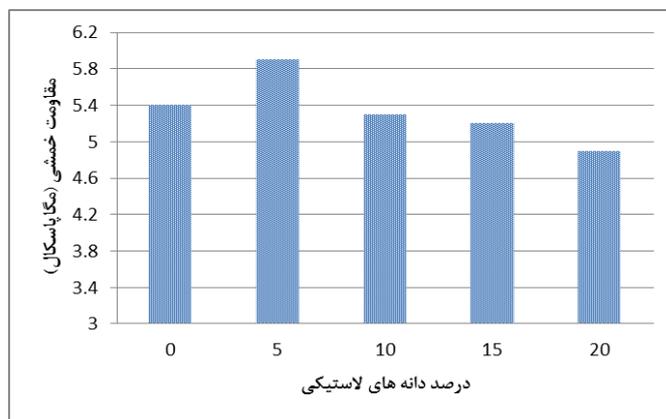
به هر حال، این نقیصه تا حد زیادی با توجه به نسبت آب به سیمان کم در بتن‌های غلتکی و در نتیجه اصطکاک بیشتر بین دانه‌های لاستیک و سنگدانه‌های طبیعی کمتر امکان خودنمایی دارد، که خود می‌تواند توجیهی بر استفاده از خرده‌های لاستیک در بتن‌های غلتکی روسازی باشد.

### ۳-۴. مقاومت خمشی

در طراحی روسازی‌های بتنی، مقاومت خمشی نقشی کلیدی ایفا می‌کند. به طوری که ضخامت



شکل ۱۳. مقاومت خمشی ۷ روزه



شکل ۱۴. مقاومت خمشی ۲۸ روزه

روزگی حدود ۴۶٪ افزایش مقاومت فشاری دارد. اما این مقدار برای مقاومت خمشی تنها ۱۸٪ است.

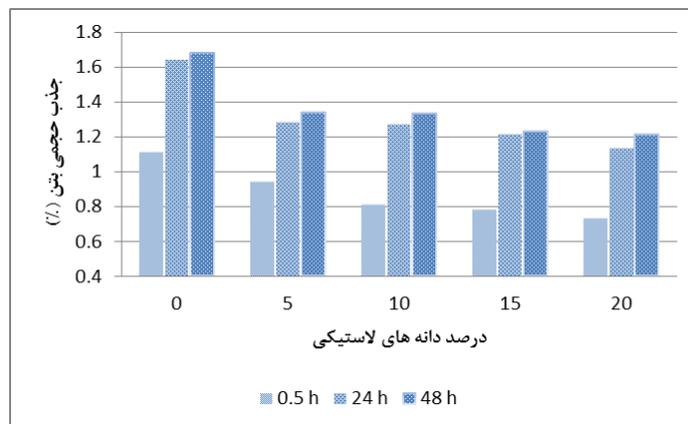
بر خلاف مقاومت فشاری، درصد افزایش مقاومت خمشی از سن ۷ روزگی تا ۲۸ روزگی کمتر می‌باشد. برای مثال، نمونه C10 از سن ۷ روزگی تا ۲۸

سنگدانه‌ها می‌توان شاهد توزیع همگن دانه‌های لاستیک در نمونه‌های بتن غلتکی بود.

#### ۴-۴. جذب حجمی آب توسط بتن

جهت انجام این آزمایش از سه نمونه مکعبی بتن با ابعاد ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی‌متر استفاده شد و میزان جذب آب از میانگین نتایج این سه نمونه به دست آمد. آزمایش جذب حجمی بتن در سن ۲۸ روزه روی نمونه‌های خشک شده (در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ روز) انجام گرفت. نتایج جذب آب ۰/۵، ۲۴ و ۴۸ ساعته در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

همچنین، خرده‌های لاستیک تا حدی سبب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی شدند. به طوری که در سن ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت خمشی بتن برای نمونه دارای ۵٪ خرده لاستیک برابر ۵/۹ MPa به دست آمد که نسبت به نمونه کنترلی (C) دارای حدود ۱۰٪ مقاومت بیشتر می‌باشد. همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، توزیع مناسب دانه‌های لاستیک در بتن می‌تواند تأثیر عمده‌ای در افزایش مقاومت بتن داشته باشد و با توجه به نسبت آب به سیمان کم در بتن غلتکی و در نتیجه افزایش اصطکاک بین دانه‌های لاستیک و



شکل ۱۵. نمودار جذب حجمی آب توسط نمونه‌های بتن لاستیکی

در روسازی‌های بتن غلتکی در مناطق با اقلیم سردسیر می‌باشد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

نتایجی که از آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش به دست آمد به صورت زیر خلاصه می‌شود:  
 ۱- استفاده از خرده‌های لاستیک فرسوده در مخلوط بتن غلتکی سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. به طوری که مقاومت فشاری نمونه‌های با ۵ و ۱۰ درصد دانه‌های لاستیک نسبت به مقاومت نمونه کنترلی (C)

همین‌طور که از شکل ۱۵ پیداست، با گذشت زمان، جذب حجمی بتن افزایش یافته، که امری بدیهی است. افزایش دانه‌های لاستیک به طور کلی سبب کاهش جذب حجمی بتن شده است که دلیل آن می‌تواند عدم جذب آب توسط دانه‌های لاستیک باشد و با هر چه بیشتر شدن دانه‌های لاستیک در بتن و جایگزین شدن آنها با سنگدانه طبیعی (ماسه) میزان جذب آب بتن کاهش می‌یابد. جذب آب کم نمونه‌ها می‌تواند سبب افزایش مقاومت ذوب-انجماد گردد که این خود نقطه مثبتی جهت استفاده از خرده‌های لاستیک

بتن تازه کاهش می‌یابد، که امری بدیهی است. در واقع، این کاهش به دلیل وزن مخصوص کمتر دانه‌های لاستیکی نسبت به ماسه اتفاق می‌افتد؛

۵- با توجه به اینکه بیشینه مقاومت فشاری برای مقدار ۱۰٪ دانه‌های لاستیکی و بیشینه مقاومت خمشی برای مقدار ۵٪ دانه‌های لاستیکی اتفاق می‌افتد، از این رو به نظر می‌رسد که مقداری بین ۵٪ تا ۱۰٪ دانه‌های لاستیک بیشینه مقاومت فشاری و خمشی اتفاق می‌افتد.

۶- در مجموع، با توجه به تأثیری که دانه‌های لاستیک در افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی و کاهش جذب آب بتن دارند، استفاده از دانه‌های لاستیک در بتن غلتکی می‌تواند توجیه داشته باشد. ذکر این نکته ضروری است که استفاده از دانه‌های لاستیک همچنین سبب کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از انبارهای لاستیک‌های فرسوده می‌شود.

افزایش یافت و بیشترین مقدار مقاومت فشاری برای بتن دارای ۱۰٪ دانه‌های لاستیکی به دست آمد؛

۲- استفاده از دانه‌های لاستیکی تا حدودی مقاومت خمشی بتن را افزایش می‌دهد. به طوری که برای مخلوط دارای ۵٪ خرده لاستیک، بیشترین مقاومت خمشی به دست آمد. در تحقیق‌های انجام گرفته توسط پژوهشگران، بجز بنازوک و همکاران (۲۰۰۷)، به کاهش مقاومت خمشی بتن دارای دانه‌های لاستیکی اشاره شده است. می‌توان دلیل آن را تفاوت میزان آب در مخلوط بتن غلتکی با بتن معمولی دانست؛

۳- آزمایش جذب حجمی بتن نشان از کاهش جذب آب نمونه‌های بتنی دارای دانه‌های لاستیک نسبت به نمونه کنترلی دارد. به طوری که با افزایش مقدار لاستیک، میزان جذب آب کمتر شد، که دلیل آن را می‌توان عدم جذب آب توسط دانه‌های لاستیک دانست؛

۴- در آزمایش وزن مخصوص بتن مشاهده شد که با افزایش درصد دانه‌های لاستیکی، میزان وزن مخصوص

## ۶. مراجع

صابری کرهرودی، ف. ۱۳۹۲. "بررسی اثر استفاده از خرده لاستیک بر روسازی‌های بتن غلتکی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

صمدیان، ف. ۱۳۸۵. "گزارش بازیافت لاستیک". وزارت صنایع و معادن.

وزارت راه و ترابری. ۱۳۸۸. "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور". پژوهشکده حمل و نقل، نشریه ۳۵۴.

American Society for Testing and Materials. 1991. "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort". ASTM D1557.

Amirkhanian, S. and Burati, J. 1996. "Utilization of Waste Tires in Asphaltic Materials". Final Project Report, National Technical Information Service, Alexandria, VA, USA.

Batayneh, M. K., Marie, I. and Asi, I. 2008. "Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries". Waste Manage., 28(11): 2171-2176.

Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J. M. and Quéneudec, M. 2007. "Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes". Cement Concrete Comp., 29(10): 732-740.

British Standard Testing Concrete. 1983. "Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes". Part 116.

British Standard Testing Concrete. 1983. "Method for Determination of Flexural Strength". Part 118.

British Standard Testing Concrete. 1983. "Method for determination of water absorption". Part 122.

Da Silva, F. M., Barbosa, L. A. G., Lintz, R. C. C. and Jacintho, A. E. P. 2015. "Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber". Constr. Build. Mater., 91: 71-79.

Eldin, N. N. and Senouci, A. B. 1993. "Rubber-tire particles as concrete aggregate". J. Mater. Civil Eng., 5(4): 478-496.

Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A. A. 2009. "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete". Constr. Build. Mater., 23(5): 1828-1836.

Khatib, Z. K. and Bayomy, F. M. 1999. "Rubberized Portland cement concrete". J. Mater. Civil Eng., 11(3): 206-213.

Lv, J., Zhou, T., Du, Q. and Wu, H. 2015. "Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete". Constr. Build. Mater., 91: 145-149.

Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T. and Zundi, I. 2000. "Use of recycled rubber tires in concrete". Proc. of the International Conference on Concrete, Vol. 399, Thomas Telford Services Ltd., London, UK.

Segre, N. and Joekes, I. 2000. "Use of tire rubber particles as addition to cement paste". Cement Concrete Res., 30(9): 1421-1425.

Sukontasukkul, P. 2009. "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel". Constr. Build. Mater., 23(2): 1084-1092.