



روسازی بتن غلتکی و تأثیر مواد افزودنی بر خواص آن

مهدی اکبری^{۱*}، امین رحمانی مقدم^۲، حسام صباغیان

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

با توجه به فراوانی منابع نفتی در ایران و در نتیجه آن دسترسی آسان به قیر به عنوان ماده اولیه روسازی آسفالتی، این نوع از روسازی بسیار در کشورمان مرسوم می‌باشد. این موضوع باعث شده است که رویکرد طراحان داخلی به روسازی آسفالتی معطوف شود و نگاه آن‌ها به روسازی بتنی صلب گردد. امروزه هزینه طراحی و اجرا، به عنوان یکی از اصلی‌ترین معیارهای پروژه‌های اجرایی تلقی می‌شود امام نباید آن را به تنهایی مورد توجه قرارداد. اما در کنار آن باید به مسائلی همچون حفظ محیط‌زیست، توسعه پایدار، افزایش بهره‌وری سوخت، کاهش ضایعات و ایمنی را مورد توجه قرارداد. با توجه به مطالعات پیشین روسازی بتن غلتکی از لحاظ هزینه ساخت و اجرا بیشتر از روسازی آسفالتی می‌باشد اما در معیارهای حفظ محیط‌زیست و دوام روسازی مفیدتر و مؤثرتر واقع می‌گردد. با توجه به افزایش روز افزون آلودگی‌های زیست محیط و ضرورت حفظ زیبایی و ایمنی محیط شهری، توجه و مطالعه در مورد روسازی‌های بتن غلتکی برای بهبود مسائل ذکر شده، امری ضروری به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: روسازی بتنی، خاکستر بادی، بتن غلتکی

۱. مقدمه

روسازی راه، سازه‌ای است که بر روی آخرین لایه متراکم شده خاک زمین طبیعی موجود یا اصلاح شده، خاکریزی‌ها، یا کف برش‌های خاکی و یا سنگی که به‌طور کلی بستر روسازی نامیده می‌شود، قرار می‌گیرد. روسازی، معمولاً متشکل از قشرهای نظیر زیراساس، اساس و لایه‌های آسفالتی یا بتنی و یا ترکیبی از آن‌هاست که هر یک تابع مشخصات فنی و دارای ضخامت معینی هستند. به‌طور کلی روسازی‌ها به دودسته روسازی‌های انعطاف‌پذیر و روسازی‌های صلب تقسیم می‌شوند [1].

روسازی‌های صلب یا به عبارتی دیگر روسازی‌های بتنی، دارای سختی خمشی نسبتاً بالایی بوده و بارهای خارجی را با حداقل تغییر شکل در سطح نسبتاً وسیعی به خاک بستر منتقل می‌کنند. دلیل این امر به نظر می‌رسد صلبیت بیشتری روسازی بتنی در مقایسه با روسازی آسفالتی می‌باشد. در این روسازی‌ها مقاومت و کیفیت قشر بتنی عامل تعیین‌کننده توان بارپذیری رویه است و تغییرات مقاومتی خاک بستر، نقش کمتری دارد [2].

روسازی بتنی در راه‌های با حجم ترافیک بالا و سنگین، تونل‌ها و پل‌ها و یا در بارگذاری‌های سریع و مقطعی، مانند فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، گاراژها، کف کارخانه‌ها و غیره استفاده می‌شوند. این روسازی‌ها در صورت در نظر گرفتن تمهیدات



لازم جهت مهار تنش‌های حرارتی و تنش‌های اصطکاکی، از عمر مناسب و توجیه اقتصادی برخوردار هستند، لذا اینکه امروزه در اکثر کشورهای صنعتی که مشکل کمبود سیمان وجود ندارد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [3].

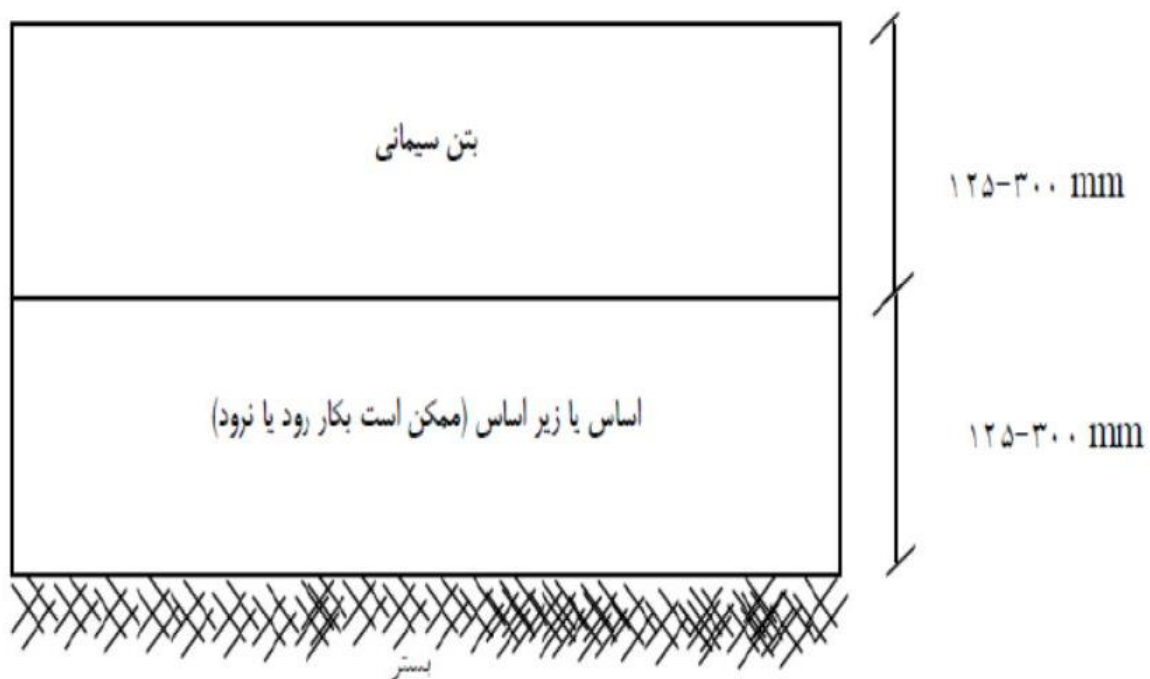
۲. تاریخچه

اولین تجربه استفاده از بتن به‌عنوان روسازی راه، حدود ۱۲۰ سال قبل (سال ۱۸۸۹) در شهر بلفونتاین در ایالت اوهایو، بوده است. اولین روسازی‌های بتنی فرودگاه‌ها طی سال‌های ۱۹۲۷ و ۱۹۲۸ در پایانه فورد در ایالت میشیگان ساخته شد. پس از آن در ساخت باند فرودگاه‌ها، راه‌های جاده‌ای و محوطه‌های بارگیری در فرودگاه‌ها از روسازی بتنی استفاده شد. در نیمه قرن ۲۰ از روسازی‌های بین‌ایالتی در آمریکا استفاده شد. {۱-۵۰} بتن غلتکی تاریخچه چندان طولانی برای کاربرد در روسازی‌های راه ندارد. شاید بتوان گفت اولین استفاده از آن در ساخت رویه راه سال ۱۹۳۰ توسط گروه ارتش مهندسين آمریکا در ساخت کف‌های صنعتی بود. بعد از آن، RCC برای ساخت باند پرواز در فرودگاه واشنگتن در سال ۱۹۴۲ استفاده کردند. از دیگر موارد کاربرد بتن غلتکی در مقیاس بزرگ، در یک محوطه صنعتی در ونکوور کانادا در سال ۱۹۷۶ بود [4].

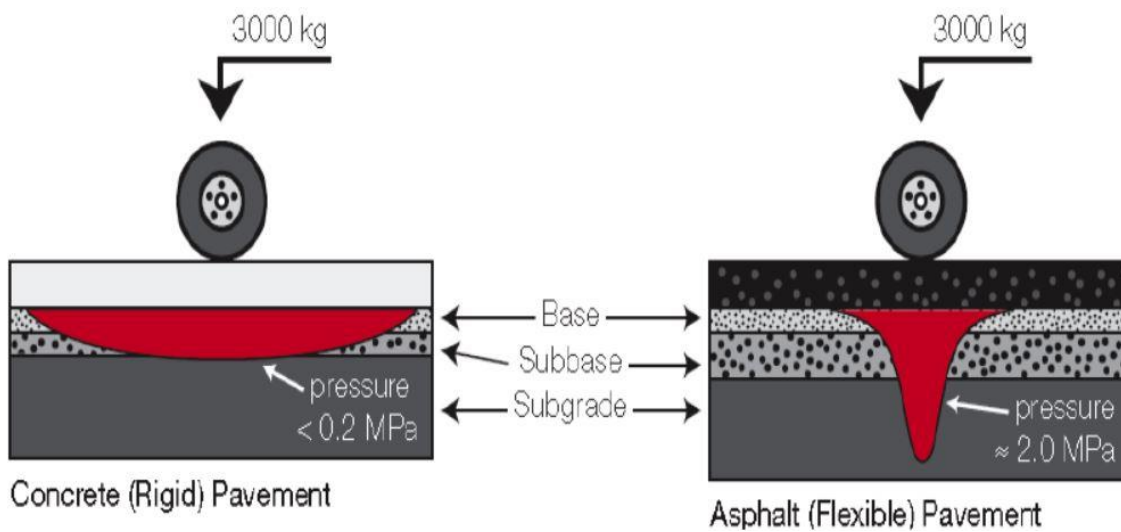
در حال حاضر این نوع روسازی در کشورهای آمریکا شمالی به‌عنوان رویه راه در راه‌های با ترافیک سنگین و با شرایط یخبندان بسیار کاربرد دارند. ضمناً با توجه به اجرای ساده و بدون نیاز به امکانات خاص، این نوع روسازی بسیار مورد توجه قرار می‌باشد.

۳. روسازی بتنی

برای طراحی روسازی بتنی به‌جای تئوری لایه‌ها که در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود، از تئوری صفحات استفاده می‌گردد. تئوری صفحه درواقع همان حالت ساده شده تئوری لایه‌ها است که فرض می‌کند دال بتنی یک صفحه تقریباً ضخیم است که قبل از خمش وارده به آن مسطح بوده و پس از خمش نیز به حالت مسطح باقی خواهد ماند. شکل (۱) تیپ یک روسازی بتنی متداول را نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در زیر دال بتنی اساس و یا زیراساس ممکن است قرار گیرد و یا اینکه دال بتنی مستقیماً بر روی بستر قرار داده شود. دلیل آن نیز به نحوه توزیع تنش در روسازی‌های بتنی برمی‌گردد. شکل (۲) نحوه توزیع تنش در یک روسازی انعطاف‌پذیر و بتنی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود به دلیل مقاومت بالای روسازی‌های بتنی در قبال اعمال بار، توزیع تنش در سطح بیشتر و شدت کمتری نسبت به روسازی‌های انعطاف‌پذیر صورت می‌گیرد که این امر باعث می‌شود روسازی‌های بتنی کمتر نیاز به لایه‌های اساس و زیراساس با توان باربری و ضخامت بالا در مقایسه با روسازی‌های انعطاف‌پذیر داشته باشد [3].



شکل ۱- تیپ یک روسازی بتنی



شکل ۲- نحوه توزیع تنش در روسازی انعطاف‌پذیر و بتنی

۴. مزایای رویه‌های بتنی در مقایسه با آسفالتی

معایب روسازی‌های بتنی در مقایسه با لایه‌های آسفالتی به شرح ذیل می‌باشد:
(الف) رویه‌های بتنی در نواحی با مقاومت بستر کم و ترافیک سنگین نسبت به روسازی آسفالتی ارجحیت دارند.



(ب) هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی بتنی در مقایسه با آسفالتی کمتر است. عمر مفید رویه‌های بتنی بیشتر از روسازی‌های آسفالتی است.

(ج) در مناطق شیب‌دار و کوهستانی با تعداد زیاد وسائل نقلیه سنگین که روسازی آسفالتی جوابگو نمی‌باشد، روسازی بتنی می‌تواند به‌عنوان گزینه خوبی مدنظر قرار گیرد.

(د) در شرایط محیطی با دمای زیاد، عملکرد روسازی بتنی بهتر از آسفالتی است.

(ه) به دلیل فراهم ساختن دید بیشتر در شب برای استفاده‌کنندگان، روسازی بتنی از نظر ایمنی نسبت به آسفالتی ارجح است.

(و) ضخامت روسازی بتنی در مقایسه با روسازی آسفالتی کمتر است و در نتیجه در نواحی که محدودیت ضخامت وجود دارد، ارجحیت داشته و در عین حال در مصرف مصالح نیز صرفه‌جویی می‌گردد.

(ز) به دلیل صرفه‌جویی در به‌کارگیری مصالح در لایه‌های بتنی، تخریب منابع طبیعی و محیط‌زیست کمتر صورت می‌گیرد.

(ح) با توجه به گران شدن فرآورده‌های نفتی خصوصاً قیر، هزینه احداث روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی ارزان‌تر تمام می‌شود.

۵. معایب رویه‌های بتنی در مقایسه با لایه‌های آسفالتی

معایب روسازی‌های بتنی در مقایسه با لایه‌های آسفالتی به شرح ذیل می‌باشد:

(الف) اجرای تعمیرات و عملیات ترمیم در روسازی بتنی مشکل‌تر است.

(ب) وجود درزهای انبساط به‌عنوان یکی از نقاط ضعف رویه‌های بتنی محسوب می‌گردد که در تشدید خرابی‌ها و تخریب بتن نقش مهمی دارد.

(ج) بروز پدیده پامپینگ و خارج شدن مصالح ریزدانه از محل درزهای انبساط در صورت عدم استفاده از مصالح زهکش به‌عنوان یکی از ضعف‌های روسازی بتنی محسوب می‌گردد.

(د) دانش فنی و تجربه ساخت روسازی‌های آسفالتی در میان پیمانکاران در مقایسه با روسازی بتنی بسیار بیشتر است، از این رو اجرای رویه‌های بتنی به دلیل نیاز به ماشین‌آلات پیشرفته‌تر و جدیدتر و عدم مهارت‌های فنی و تجربه‌های عملی مشکل‌تر است.

۶. موارد کاربرد رویه‌های بتنی

(الف) در راه‌های واقع در مناطق گرمسیر با حجم ترافیک سنگین به‌ویژه در شیب‌های تند و گردنه‌ها که سرعت وسائل نقلیه سنگین کم است.

(ب) در بخش‌هایی از مسیر راه یا باند فرودگاه که مقاومت بستر آن ضعیف است.

(ج) در تقاطعات و میدان‌ها که نیروهای شدید برشی از ترمز به روسازی راه وارد می‌شود.

(د) در مناطقی که دسترسی به مصالح شن و ماسه و معادن سنگ مناسب و سخت، کم است و یا محدودیت حجم وجود دارد.

(ه) در مناطقی که فاصله حمل و هزینه حمل مصالح سنگی به محل کار غیراقتصادی است.



و) در ابتدا وانت‌های باندهای فرودگاه، تاکسی‌روها استفاده از رویه بتنی ارجحیت دارد.

۷. معرفی بتن غلتکی

بتن غلتکی نوع خاصی از بتن است که جهت ساخت روسازی‌های بتنی به کار می‌رود. نوع بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه با بتن غلتکی سدسازی چه به لحاظ مواد و مصالح و چه به لحاظ روش اجرا، دارای تفاوت‌های اساسی است. بتن غلتکی روسازی راه عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگدانه‌ها، مواد سیمانی و آب که در مخلوط‌کن بتن ترکیب شده و همگن می‌گردد و ماده تولیدشده دارای کارایی و ظاهری مشابه با مخلوط شن، با اسلامپ صفر است. مخلوط بتن غلتکی توسط کامیون، حمل و با دستگاه‌های روسازی آسفالتی که علاوه بر میله لرزشی به میله کوبشی نیز مجهز هستند، در لایه‌هایی که ضخامت حداکثر آن‌ها در وضعیت متراکم شده از ۲۵ سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند، پخش می‌شوند. لایه پخش شده، توسط غلتک‌های فولادی و بیرهای متراکم می‌گردد. در مقایسه با روسازی بتنی معمولی، روسازی بتن غلتکی دارای مزیت‌هایی همچون سرعت بالای اجرا و هزینه کمتر است [3].



شکل ۳ - نحوه اجرای روسازی بتن غلتکی



۸. جایگاه بتن غلتکی در روسازی‌های بتنی

روسازی بتن غلتکی به‌عنوان یک نوع روسازی بتنی محسوب می‌گردد که جزء روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار قرار می‌گیرد. درواقع روند طراحی روسازی بتن غلتکی شبیه به طراحی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار با درز انبساط یا درزهای اجرایی بدون داول است. به‌طورکلی تفاوت عمده‌ای بین روسازی بتن غلتکی و روسازی بتن معمولی بدون داول در ارتباط با شیوه ساخت روسازی، فواصل درزها، عملکرد درزها از نظر انتقال بار و خصوصیات ظاهری و سطحی آن‌ها وجود دارد. این نوع بتن در روسازی راه، در حالت تازه با بتن معمولی متفاوت بوده و بسیار سفت‌تر و کارایی آن به‌مراتب کمتر است [5].

مشخصه این بتن مقدار کم آب اختلاط است که این امر لزوم نیاز به داشتن دستگاه‌های اختلاط قوی را نشان می‌دهد و این امکان را نشان می‌دهد و این امکان را فراهم می‌آورد که به‌جای ویبره‌های متداول از ویبره‌های غلتکی برای استفاده شود. تراکم در این نوع روسازی در دو مرحله صورت می‌گیرد. ابتدا با غلتک‌های ویبره‌ای متراکم می‌شود و سپس از یک غلتک لاستیکی استفاده می‌شود. برای اجتناب از ایجاد ترک‌های باز، بهتر است درزها در فواصل ۶ متری از هم اجرا وند. از مزایای این نوع روسازی این است که در مدت زمان کمتری نسبت به سایر روسازی‌های بتنی به ترافیک می‌توان اجازه عبور داد، از ماشین‌آلات متداول در روسازی آسفالتی می‌توان استفاده کرد و هیچ‌گونه تسلیح با میلگرد مانند روسازی بتنی دیگر لازم ندارد. اجرای آن راحت‌تر است و زمان کمتری در مقایسه با روسازی‌های بتنی لازم دارد و عملکرد سازه‌ای خوبی دارد. با توجه به اینکه افت بتن غلتکی کمتر از بتن مسلح است، عرض بازشدگی درز کمتر است و انتقال بار کمی بیشتر از روسازی‌های بتنی درزدار غیرمسلح خواهد بود. از معایب بارز این نوع روسازی، چنانکه اشاره خواهد شد، می‌توان به مشخصه سطحی آن اشاره کرد که به دلیل تأمین نشدن مقاومت لغزشی کافی در سرعت‌های بالا بهتر است لایه‌ای از آسفالت به ضخامت حداقل اجرایی روی آن اجرا کرد [3].

۹. خواص و عملکرد روسازی‌های بتن غلتکی

بتن غلتکی جهت کاربرد به‌عنوان روسازی راه در حالت تازه با بتن معمولی متفاوت بوده و بسیار سفت‌تر و کارایی آن به‌مراتب کمتر است. با توجه به اهمیت کارایی بتن و تأثیر آن روی تراکم‌پذیری، بحث خواص بتن غلتکی روسازی در حالت تازه در بخش‌های بعدی تشریح شده است. در حالت سخت شده، بتن غلتکی روسازی از بسیاری جهات مشابه بتن معمولی است و پارامترهای اصلی تأثیرگذار روی خواص بتن‌های معمولی نظیر نسبت آب به سیمان (W/C) و میزان تراکم، تأثیر مشابه روی خواص بتن غلتکی روسازی دارند. درعین حال باید توجه داشت، به علت کارایی بسیار پایین این نوع بتن‌ها، روش‌های تهیه آزمون‌ها جهت بررسی خواص آن‌ها با بتن معمولی تفاوت دارد. آزمون‌های بتن غلتکی از طریق روش‌های ویژه نظیر کوبش با چکش‌های بادی مخصوص و یا روش‌های ارتعاشی تحت سربار و یا از طریق اجرای مقطع آزمایشی و بریدن نمونه‌های لازم و یا مغزه‌گیری صورت می‌گیرد. در ادامه اطلاعاتی در خصوص خواص مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی ارائه شده است. علاوه بر خواص مخلوط‌های بتن غلتکی به عملکرد روسازی‌های بتن غلتکی از نقطه‌نظر کیفیت سطح و دوام نیز پرداخته شده است [6].



۱۰. روسازی بتن غلتکی از نظر زیست‌محیطی

برای تهیه آسفالت قیری به چیزی حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد دما نیاز هست و در نتیجه برای تولید این نوع آسفالت مقادیر قابل‌توجهی سوخت به مصرف می‌رسد و می‌توان گفت به لحاظ زیست‌محیطی، اقتصادی و خصوصاً آلودگی هوا در کلان‌شهرها بسیار نامناسب است. همچنین باعث صرفه‌جویی در مصرف سوخت و حذف آلودگی‌های حین پخت و انتقال آسفالت می‌گردد.

رویه بتنی غلتکی به خاطر نفوذناپذیری مواد متشکله آن به بافت مصالح و طبیعت، به‌عنوان رویه سازگار هیچ‌گونه مشکل زیست‌محیطی در محدوده کاربردی خود ندارند و تا پایان دوره دوام مواد و مصالح متشکله آن به‌عنوان بخشی از طبیعت تعریف می‌شود. رنگ خاکستری و خنثی روسازی بتن غلتکی، ضریب جذب دمای مناسبی دارد و این به خاصیت پایین آوردن دمای محیط کمک می‌کند.

دلیل وجود منابع نفتی فراوان از جمله قیر، روسازی اکثر راه‌ها در ایران از نوع روسازی‌های آسفالتی است. با توجه به هزینه بالای تهیه قیر و آلودگی زیست‌محیطی هیدروکربورهای ناشی از پخت لکه‌گیری، عمر کوتاه و گرانی قیمت تمام‌شده آسفالت، این روسازی را از گردانه مصرف کشورمان خارج خواهد کرد. از طرفی با توجه به تولید ۶۰ میلیون تنی سیمان در ایران و ارزانی مصالح و هزینه‌های اجرای کم، اجرای سریع و آسان، مقاومت و دوام و سازگاری با محیط‌زیست و هوای گرم و سرد بتن غلتکی در آینده در پروژه‌های ساخت راه‌های ارتباطی، ساخت سدها، پارکینگ فرودگاه‌ها، محوطه و ترمینال‌های بنادر و روسازی راه و غیره در حال گسترش است. امروزه علاوه بر اهداف اقتصادی و فنی، جنبه‌های زیست‌محیطی و ملزومات توسعه پایدار نیز به‌طور فزاینده در طراحی، ساخت و نگهداری روسازی‌ها و پروژه‌های زیر ساختاری دیگر در نظر گرفته می‌شود. روسازی‌های سازگار با محیط‌زیست آن‌هایی هستند که در همه ابعاد از جمله طراحی، ساخت و نگهداری آن‌ها مسائل محیط‌زیستی در نظر گرفته می‌شود. به دلیل عمر طولانی، روسازی بتنی از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و سودمند است و به حداقل مصرف مواد، انرژی و سایر منابع برای ساخت‌وساز، نگهداری و بازسازی در طول عمر نیاز دارد. روسازی‌های بتنی با طول عمر بالا، کمتر نیاز به ترمیم و بازسازی مکرر دارند و به ایمنی بزرگراه و کاهش ازدحام کمک می‌کنند. البته لازم به ذکر است که تعمیر و مرمت روسازی‌های بتنی مشکل‌تر از تعمیر و مرمت روسازی‌های آسفالتی است.

روسازی‌های بتنی در کشورهای مختلف برای ۶ تا ۶۰ سال عمر خدمت‌دهی، با نگهداری کمتر طراحی شده است. این نوع روسازی‌ها در صورت در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت مهار تنش‌های حرارتی و اصطکاک، از عمر مناسب و توجه اقتصادی برخوردار می‌باشند، کما اینکه امروزه در اکثر کشورهای صنعتی با مشکل کمبود سیمان وجود ندارد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کشور ما نیز با توجه به افزایش قیمت روسازی‌های آسفالتی و در راستای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش مسائل زیست‌محیطی و سرمایه‌گذاری، به‌علاوه فواید تکنیکی و فنی متعدد، باید استفاده از روسازی‌های بتنی برای جاده‌ها و بزرگراه‌ها مورد توجه قرار گیرد و بستری مناسب برای رقابت روسازی‌های بتنی با روسازی‌های آسفالتی فراهم گردد.

عمر بهره‌برداری روسازی بتنی نسبت به روسازی آسفالتی بیشتر است به‌طوری‌که این نوع روسازی عمر بهره‌برداری به میزان حداقل ۲ برابر عمر روسازی‌های آسفالتی می‌باشند [7]. روسازی‌های بتنی با طول عمر بالا، کمتر نیاز به ترمیم و بازسازی مکرر دارند و به ایمنی بزرگراه و کاهش ازدحام کمک می‌کنند چراکه روسازی بتنی همانند روسازی آسفالتی نیازی به نگهداری دائمی، تعمیر و جایگزینی ندارد که این کاهش عملیات نگهداری خود به معنی کاهش هزینه‌ها است. البته لازم به ذکر است که تعمیر و مرمت روسازی‌های بتنی مشکل‌تر از تعمیر و مرمت روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. روسازی‌های بتنی در کشورهای مختلف برای ۳۰ تا بیش از ۵۰ سال عمر خدمت‌دهی، با نگهداری کمتر



طراحی شده است. روسازی بتنی در صورت مهار تنش‌های حرارتی و اصطکاکی از عمر مناسب و توجیه اقتصادی برخوردار می‌باشند [8].

۱۱. اثر افزودنی بر روسازی بتن غلتکی

امروزه به دلیل حفظ محیط‌زیست، پیشرفت پایدار در آینده، حفظ منابع طبیعی و کاهش هزینه‌های مواد اولیه برای مهندسی، گرایش عمومی به سمت استفاده از مواد قابل بازیافت طبیعی و استفاده از مواد بازیافتی در ساخت و فعالیت‌های عمرانی، می‌رود. یکی از مصالح ضایعاتی که می‌توان با استفاده از آن در بتن سبب بازیافت آن شد، خاکستر بادی است. یکی دیگر از مصالح ضایعاتی، لاستیک‌های بازیافتی می‌باشند. روش‌های دفع لاستیک‌های از رده خارج شده شامل مدفون نمودن در زمین، سوزاندن، استفاده به عنوان سوخت، تجزیه با استفاده از حرارت، تبدیل کردن به کربن سیاه و... می‌باشد. این روش‌های مقابله با لاستیک‌های ضایعاتی از طریق آلوده‌سازی هوا، خاک و آب باعث ایجاد انواع خطرات مانند به خطر انداختن سلامتی موجودات، لطمات زیست‌محیطی و اقتصادی می‌گردد. در سالیان اخیر نوعی چالش برای به کارگیری مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین مصالح سنگدان‌های که برای حفاظت بیشتر از محیط‌زیست صورت می‌گیرد، آغاز گردیده است. یکی از راهکارهای موجود استفاده از لاستیک‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین مصالح سنگدان‌های در بتن است. با این کار می‌توان از لاستیک‌های ضایعاتی استفاده و از آلودگی‌های دفع آن جلوگیری نمود. این عمل که باعث جلوگیری از آزادسازی حجم زیاد گاز دی‌اکسید کربن می‌شود، از لحاظ اقتصادی نیز با کاهش حجم سنگدان‌های مصرفی باعث صرفه‌جویی اقتصادی می‌گردد.

کاو و همکاران در مطالعات خود با جایگزینی ۴۵ تا ۹۵ درصد وزنی خاکستر بادی بجای سیمان در ۶ بازه متفاوت، با افزایش میزان خاکستر بادی از ۰ تا ۵۵ درصد کاهش در مقاومت اولیه و افزایش مقاومت در بازه زمانی بیشتر را مشاهده نموده است و با افزودن مقدار ۵۵ تا ۹۵ درصد خاکستر بادی کاهش میزان مقاومت را در تمامی بازه‌های زمانی داریم. در پژوهش علی مردانی و همکاران در نمونه‌هایی که خاکستر بادی را جایگزین سنگدانه نموده است، تأثیر چندانی در مدول الاستیسیته مشاهده نمی‌شود. همچنین میزان کاهش جرم ناشی از تست ذوب یخبندان در نمونه‌هایی که خاکستر بادی جایگزین سیمان شد، افزایش داشت و در نمونه‌هایی که خاکستر بادی جایگزین سنگدانه شد، کاهش پیدا کرد. همچنین با جایگزینی ۸۱ درصدی خاکستر بادی از حیث مقاومت و دوام تأثیرات مثبتی مشاهده شد. گسولگو و همکاران با افزودن لاستیک به بتن، به بتن سبک‌تری دست یافتند. با افزودن لاستیک چگالی نمونه‌ها، ۲ الی ۱۱ درصد نسبت به نمونه کنترلی کاهش یافت. نتایج مشابه توسط هولمس و همکاران و پلیسر و همکاران حاکی از کاهش ۱۳ درصدی چگالی بتن لاستیک‌دار نسبت به نمونه کنترلی بود. در تحقیقات گنجیان و همکاران در سال ۲۰۰۹ دلایل کاهش مقاومت فشاری بتن با افزودن لاستیک این چنین بیان می‌گردد:

- سیمان باید اطراف سنگدانه‌ها را کاملاً بپوشاند اما وقتی لاستیک به کار می‌بریم این اتفاق به خوبی صورت نمی‌پذیرد که سبب گسترش ترک‌ها با سرعت بیشتری در زمان بارگذاری می‌گردد و نمونه سریع تخریب می‌گردد.
- پیوند بین سیمان و لاستیک بسیار ضعیف‌تر از پیوند بین سیمان و مصالح سنگی است که سبب گسترش غیریکنواخت ترک‌ها در هنگام وارد کردن فشار می‌شود.
- مقاومت فشاری وابسته به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده بتن است و با افزایش درصد لاستیک کاهش مقاومت روی می‌دهد.



- به دلیل کمتر بودن چگالی لاستیک نسبت به سایر اجزای تشکیل‌دهنده بتن، در هنگام اختلاط دانه‌های لاستیکی به سمت بالا حرکت کرده و مخلوط بتنی ناهمگن می‌شود که سبب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد.

منصور فخری و فرشاد صابری افزایش ۹ درصدی مقاومت خمشی در نمونه‌هایی با ۵ درصد جایگزینی خرده لاستیک در سن ۸۲ روز را گزارش نمودند. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های لاستیکی کاهش مقاومت خمشی را گزارش نمودند.

توماس و همکارانش در پژوهش خود مقاومت در برابر سایش بهتری برای بتن لاستیک‌دار نسبت به نمونه کمتر ولی گزارش نمودند.

براو و بریتو در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که درصد جذب آب حجمی با افزایش درصد جایگزینی و همچنین افزایش اندازه دانه‌های لاستیکی افزایش می‌یابد.

۱۱. اثر افزودن خاکستر بادی و پودر لاستیک بر خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی

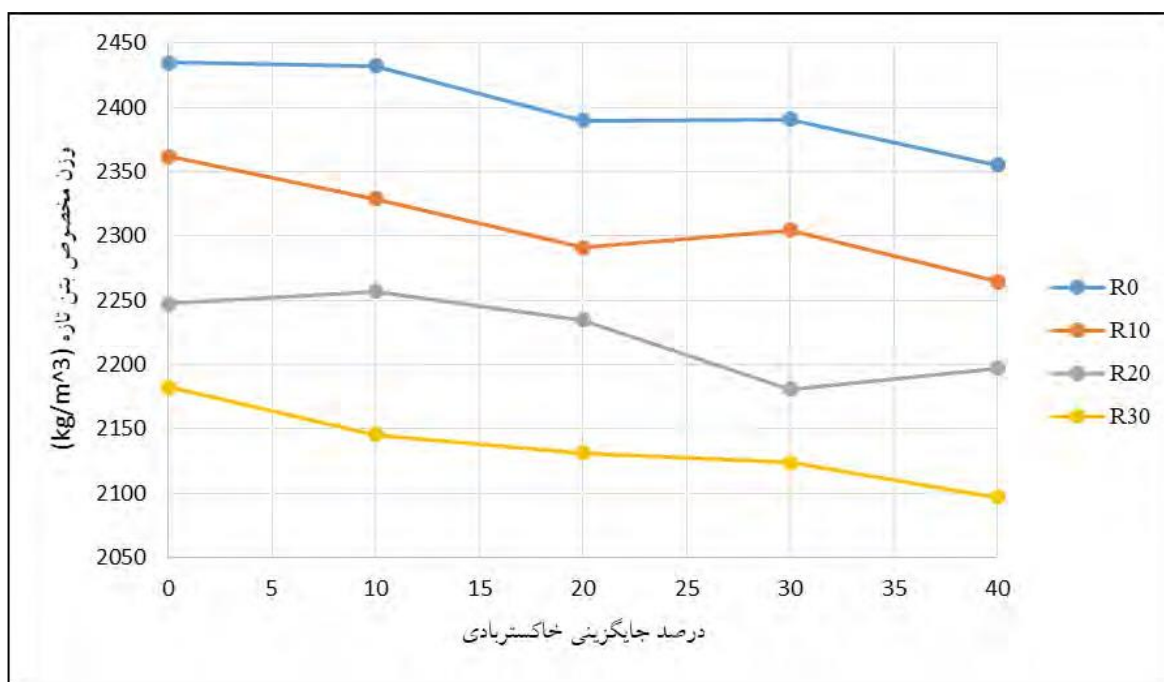
در پژوهشی که توسط فخری و همکاران صورت گرفت، به بررسی تأثیر افزودنی‌های خاکستر بادی و پودر لاستیک بر خواص مکانیکی بتن غلتکی پرداختند. در این پژوهش، طرح اختلاط بتن غلتکی بر اساس روش تراکم خاک انجام گردید. خرده‌های لاستیک در درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین حجمی مصالح ریزدانه و خاکستر بادی در درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ جایگزین وزنی سیمان شدند [9].

از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان تهران برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. مقدار وزن مخصوص آن مطابق استاندارد ASTM C188 95- برابر با 3.11 gr / cm^3 به دست آمد. در این پژوهش از خاکستر بادی پروکریت ۶۳، که بر اساس استاندارد BS ۳۸۹۲ در کلاس F قرار می‌گیرد، استفاده شده است. وزن مخصوص خاکستر بادی، 2.3 gr / cm^3 به دست آمده است.

بر اساس نشریه ۳۵۴ راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور، مقدار مصالح خشک سیمانی باید مقدار ۱۰ الی ۱۷ درصد وزن مصالح خشک مصرفی در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی باشد. در این پژوهش مقدار مصالح سیمانی را ۱۴ درصد وزن مصالح خشک مصرفی در مخلوط بتن غلتکی انتخاب گردید. خاکستر بادی نیز به عنوان جایگزین مصالح سیمانی به صورت جایگزین وزنی با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مورد استفاده قرار گرفت. دانه‌های لاستیکی نیز به عنوان جایگزین قسمت ریزدانه مصالح سنگدانه‌ای (عبوری از الک شماره ۴) با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین حجمی مورد استفاده قرار گرفت [9].

نتایج حاصل از این پژوهش پس از انجام ساخت نمونه و انجام آزمایش‌ها به صورت زیر به دست آمد. در این شکل‌ها R0، R10، R20 و R30 به ترتیب درصد افزودنی دانه‌های لاستیکی به مخلوط بتنی می‌باشد.

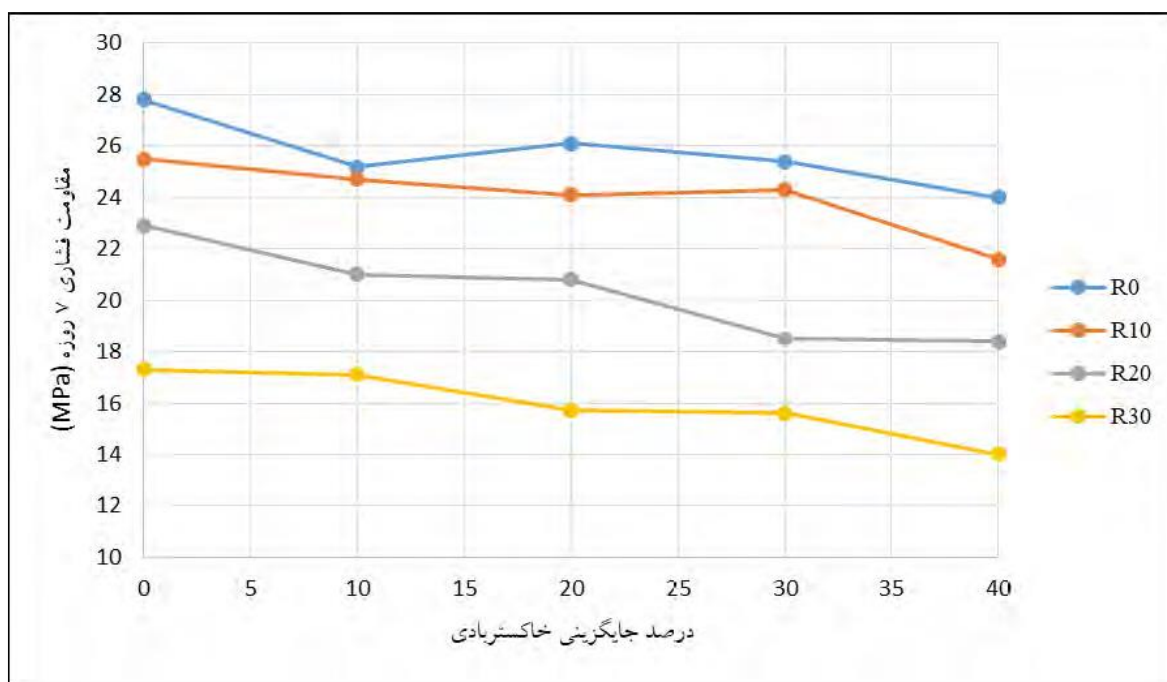
همان‌طور که مشاهده می‌کنید با افزودن مقادیر خاکستر بادی به بتن و جایگزین کردن آن با سیمان، چگالی بتن کاهش می‌یابد و هر چه درصد خاکستر بادی افزایش بیابد، روند کاهشی وزن مخصوص بتن نیز بیشتر می‌شود. با افزایش درصد خرده لاستیک و جایگزینی آن با مصالح سنگی ریزدانه‌ای نیز شاهد کاهش وزن مخصوص بتن خواهیم بود. به دلیل اختلاف زیاد بین وزن مخصوص مصالح سنگ‌دانه‌ای و خرده لاستیک، روند کاهشی وزن مخصوص نسبت به جایگزینی خاکستر بادی با سیمان، به مراتب با سرعت بیشتری صورت می‌پذیرد.



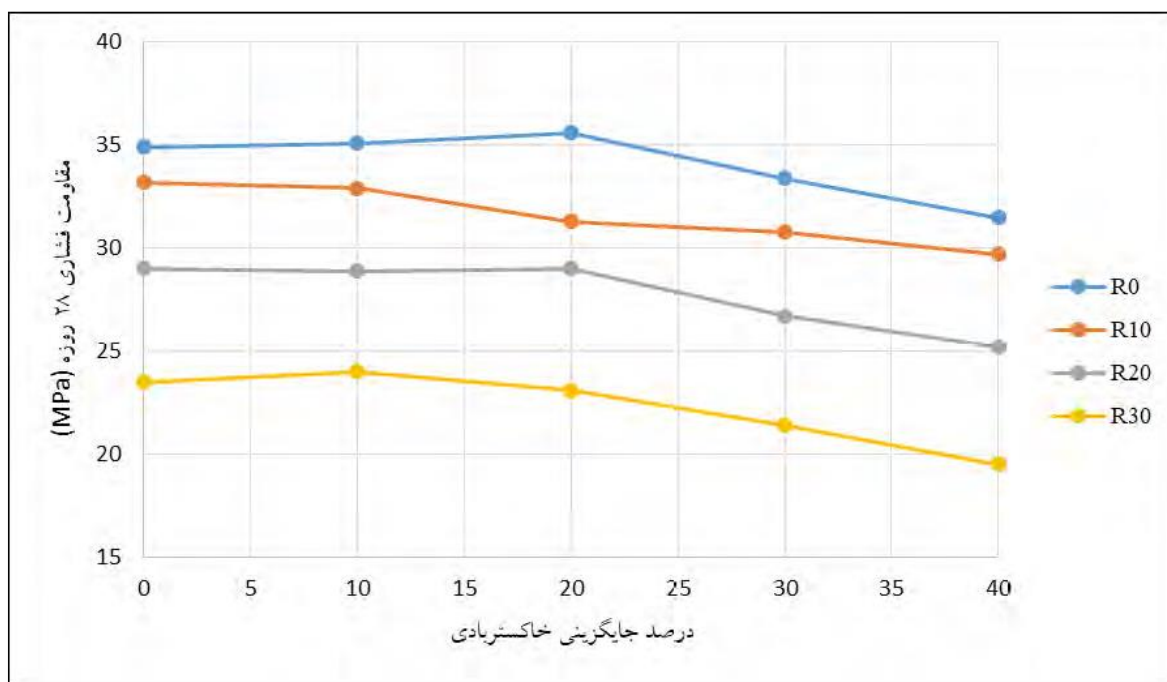
شکل ۴ وزن مخصوص بتن تازه (کیلوگرم بر مترمکعب)

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های سخت شده در سنین ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۹۱ روزه انجام شد. برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی‌متر مکعب ساخته شد و مقاومت فشاری نهایی مخلوط‌ها در سنین ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۹۱ روزه از میانگین مقاومت نمونه‌های ساخته‌شده به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از مقاومت فشاری در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۶ قابل‌مشاهده است، در نمونه‌های ۷ روزه، افزایش خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت نمونه می‌گردد. دانه‌های لاستیک نیز با توجه به افزایش درصد جایگزینی سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های می‌شوند. این کاهش مقاومت به‌مراتب بیشتر از میزان کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی خاکستر بادی در این نمونه‌هاست. در نمونه‌های ۲۸ روزه، میزان کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی خاکستر بادی کاهش‌یافته اما همچنان تأثیر منفی چشمگیر افزایش درصد جایگزینی دانه‌های لاستیکی بر مقاومت نمونه‌ها در این سن روی می‌دهد.

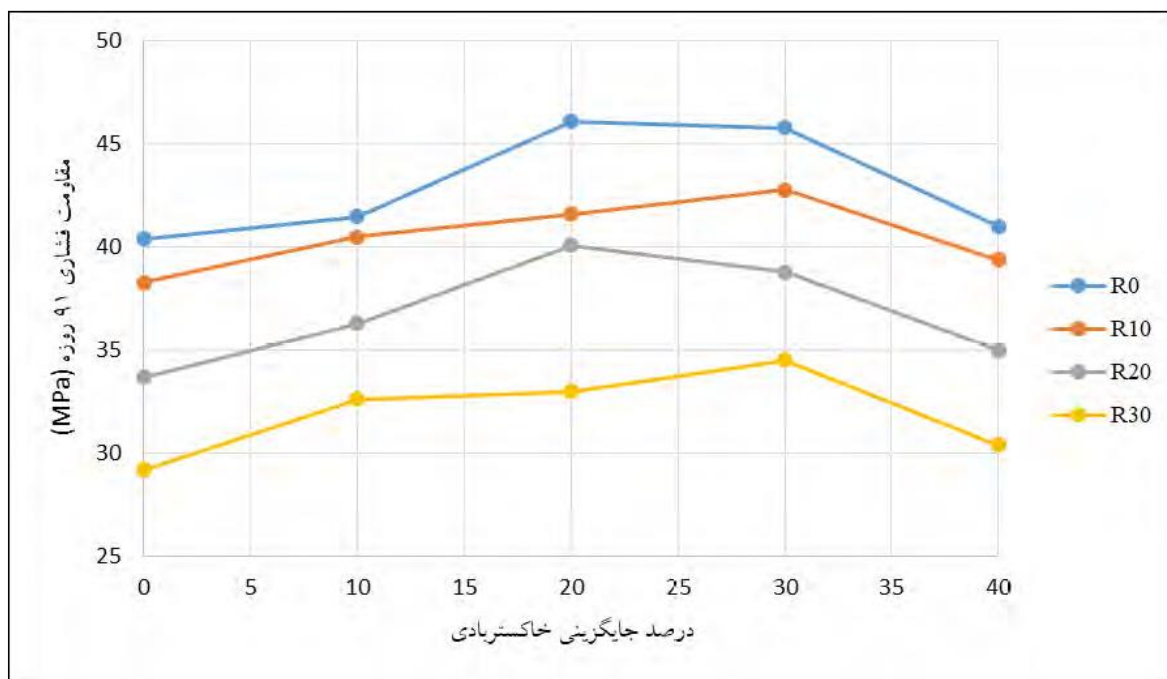
اما در شکل ۸ و برای نمونه‌های ۹۱ روزه شاهد رویداد متفاوتی خواهیم بود. تأثیر جایگزینی خاکستر بادی در درازمدت سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی کنترلی می‌گردد. این اثر افزایشی تا در صد جایگزینی ۳۰ درصدی ادامه داشته و در نمونه‌های دارای درصد جایگزینی بالاتر روند کاهشی خواهد داشت. دانه‌های لاستیکی نیز همچنان مانند نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، با افزایش درصد جایگزینی سبب کاهش تصاعدی مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردند [9].



شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه (مگا پاسکال)



شکل ۶ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال)



شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۹۱ روزه (مگا پاسکال)

۱۲. نتیجه‌گیری

با توجه به رویکرد کشور به روسازی‌های آسفالتی به علت وجود ذخایر نفتی، اثرهای منفی زیست‌محیطی آن ممکن است کمتر مورد توجه قرار گیرد. لذا به عنوان یک روش جایگزین می‌توان از رویه بتنی استفاده نمود که یکی از موارد نوین آن بتن غلتکی می‌باشد. این نوع بتن می‌تواند با توجه به اختلاط آن، اثرات نظیر گرم شدن محیط زیست، کاهش وابستگی به ذخایر نفتی، بهبود کمک به دید راننده به علت روشن بودن سطح آن و غیره کمک کند.

در نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری، افزایش درصد جایگزینی دانه‌های لاستیکی در تمامی سنین باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. در نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری، افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه سبب کاهش جزی مقاومت فشاری شده ولی در نمونه‌های ۹۱ روزه سبب افزایش مقاومت همراه با افزایش درصد جایگزینی تا ۳۰ درصد و سبب کاهش مقاومت در درصدهای بالاتر می‌گردد.

بنابراین با توجه به افزایش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی، توجه بیشتر به این نوع از روسازی مهم به نظر می‌رسد.



۱۳. مراجع

۱. آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه ۲۳۴، معاونت نظارت راهبردی، وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰
۲. کاربرد بتن غلتکی در راهسازی، وزارت راه و ترابری معاونت آموزش و تحقیقات فناوری، ۱۳۸۴
۳. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، نشریه ۳۵۴، "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور"، ۱۳۸۸
۴. بررسی اثر مشخصات سنگدانه‌ها در خواص بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه، صادق اکبرنژاد، ابوالفضل حسینی، محمد شکرچی زاده، ۱۳۸۶
5. Huang, Y. H. (2004). Pavement design and analysis. Pearson/PrenticeHall
6. ACI 325.10, (2000), State of art Report on Roller Compacted Concrete Pavements, American Concrete Institute Report ACI 325.10-95.
۷. حسین نادرپور، پویان فخاریان، کوشا مرادعلیان "دومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی"
۸. رویه بتنی و اثرات آن بر محیط شهری، مهدی اکبری، امین رحمانی مقدم، ایمان دارایی، چهارمین کنفرانس ملی صنعت سیمان و افق پیش رو، ۱۳۹۷
۹. تاثیر افزودنی‌های خاکستربادی و لاستیک ضایعاتی بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی، منصور فخری، میثاق محمدعلی‌زاده، علی معصومی، کنفرانس ملی مطالعات نوین مهندسی عمران، معماری، شهرسازی و محیط زیست در قرن ۲۱، ۱۳۹۷