مروری بر اثر افزودنی‌های دوغاب سیمانی بر عملکرد روسازی نیمه انعطاف‌پذیر

مقاله علمی – مروری

امین امیرچقماقی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
پویان ایار*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰
صفحه ۱۰۶-۸۹

چکیده

افزایش بار ترافیکی در آزادراه‌ها، راه‌های شریانی و باندهای پروازی صنعت راهسازی را به سمت طراحی و استفاده از روسازی‌هایی با استحکام و مقاومت شیارشدگی بالا و در عین حال مقرون به صرفه سوق داده است. در دهه‌های اخیر از ترکیب مخلوط آسفالتی متخلخل و دوغاب سیمانی، لایه روسازی‌ای با عملکرد نیمه انعطاف‌پذیر ابداع شده است که تا حد مناسبی از مقاومت لغزشی و مطلوبیت سواری‌دهی روسازی آسفالتی برخوردار بوده و در عین حال استحکام و مقاومت روسازی‌های بتنی را داراست. خواص مقاومتی این نوع از روسازی، وابستگی بسیاری به مشخصات دوغاب پرکننده‌ی آن دارد؛ از این رو اصلاح مشخصات و عملکرد دوغاب از اهمیت بسزایی برخوردار خواهد بود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری در راستای اصلاح خواص و مشخصات دوغاب سیمانی پرکننده روسازی نیمه انعطاف‌پذیر با استفاده از افزودنی‌ها و پوزولان‌های مختلف انجام صورت گرفته است. در این پژوهش تلاش شده است تا با مروری بر پژوهش‌های پیشین، تاثیر افزودنی‌های خاکستر بادی، دوده سیلیس، پلی‌اتیلن ترفتالات، لاتکس استایرن-بوتادین-استایرن، پودر معدنی، لای بازیافتی بر خواص دوغاب سیمانی و مخلوط روسازی نیمه انعطاف‌پذیر نشان داده شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از درصدهای بهینه از این مواد می‌تواند میزان مقاومت فشاری و خمشی، مقاومت شیارشدگی، جمع شدگی، روانی و چسبندگی بین دوغاب و آسفالت را بهبود داده و خواص مورد نظر برای روسازی نیمه انعطاف‌پذیر را تامین نماید.

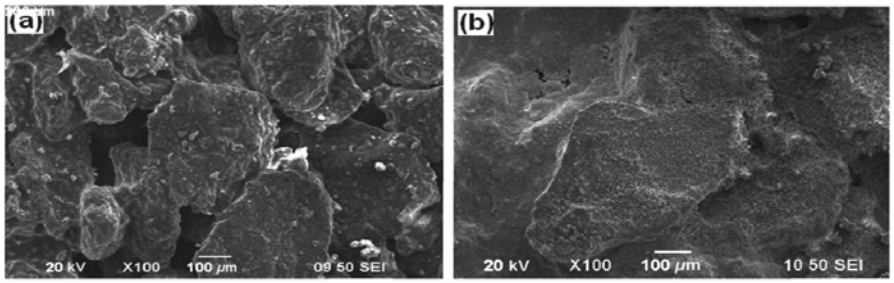
واژه‌های کلیدی: دوغاب سیمانی، روسازی نیمه انعطاف‌پذیر، خمیر سیمان، پوزولان مصنوعی، مخلوط آسفالتی متخلخل

۱-مقدمه

روسازی‌ها در طول دوره‌ی عملکردی خود تحت بارهای ترافیکی و عوامل جوی مختلفی قرار می‌گیرند که این موارد باید در روند طراحی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. به طور سنتی و معمول، روسازی‌ها به دو دسته‌ی انعطاف‌پذیر و صلب تقسیم می‌شوند که روسازی‌های بتن آسفالتی به صورت انعطاف‌پذیر و روسازی‌های بتن سیمانی به صورت صلب در نظر گرفته می‌شوند (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022). روسازی‌های آسفالتی با توجه به مقاومت لغزشی مناسب، کیفیت سواری خوب و همچنین سرعت اجرای بالا به عنوان متداول‌ترین نوع از روسازی‌ها شناخته می‌شوند؛ اما با افزایش بار ترافیکی در آزادراه‌ها، راه‌های اصلی، مسیرهای ویژه اتوبوس و همچنین باندهای فرودگاه‌ها، روسازی‌های انعطاف‌پذیر ضعف‌هایی را در برابر خرابی شیارشدگی و موج زدگی از خود نشان دادند که موجب استفاده از روسازی‌های بتن سیمانی در این نوع از راه‌ها و باندها شد (An et al., 2018; Hassani et al., 2020). روسازی‌های صلب مقاومت فشاری و شیارشدگی بالایی دارند اما به شدت مستعد تنش‌های حرارتی بوده و به دلیل نیاز به درز، سواری‌دهی مطلوبی را تامین نمی‌کنند؛ همچنین از نظر تعمیر و نگهداری صرفه اقتصادی کمتری داشته و با توجه به زمان گیرش طولانی، مدت زمان

زیادی برای شروع بهره برداری و عبور ترافیک نیاز خواهند داشت (Hou et al., 2017; Saboo et al., 2019). روسازی انعطاف‌پذیر و صلب هریک در برابر بارهای ترافیکی شدید و مقاومت در برابر شیارشدگی ضعف‌هایی را از خود نشان می‌دهند؛ از این رو روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر (SFP[1]) با این هدف به وجود آمده‌اند تا با ترکیب خواص روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر و صلب، معایب هریک از انواع روسازی را کاهش داده و عملکرد آن‌ها را در برابر بارهای ترافیکی و شرایط جوی بهبود بخشند و در عین حال مطلوبیت سواری‌دهی و صرفه اقتصادی مناسبی را نیز تامین نمایند (Doma & Ravi Shankar, 2023; Zhao & Yang, 2022). این نوع از روسازی، اولین بار توسط مهندسان فرانسوی در دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی پیشنهاد شد که به نام «سالویاسیم»[2] شناخته می‌شد. اولین دسته‌بندی‌ها برای ساختار اسکلت این روسازی در خدمات آموزشی جهانی[3] و برای ارتش ایالات متحده آمریکا انجام شد. با شروع دهه ۱۹۷۰، این روش بیشتر در فرودگاه های سراسر اروپا و آمریکای شمالی با مطالعات گسترده در مورد خواص مکانیکی آن مورد استفاده قرار گرفت. در این دوره، محققان از این ماده به عنوان روسازی اصلاح شده با رزین یا «دنسیفالت»[4] یاد کردند. با افزایش اطلاعات از عملکرد آن، محققان بعدی در دهه‌های اخیر عنوان روسازی نیمه انعطاف‌پذیر یا ماکادام دوغابدار را با توجه به ساختار آن مورد استفاده قرار دادند. علیرغم نام های مختلف آن در تاریخ، ایده اساسی پر کردن فضای خالی هوا در مخلوط آسفالتی متخلخل با دوغاب سیمان ثابت ماند (Bang et al., 2017; Hlail, 2020; Li et al., 2022; Mayer & Thau, 2001; Setiawan, 2009). روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر با عنوان‌های آسفالت ماکادام با دوغاب سیمانی (CGBM[5])، ماکادام دوغابدار (GM[6])، بتن آسفالتی دوغابدار با دانه‌بندی باز (GOAC[7]) و روسازی آسفالتی با دوغاب سیمانی (CGACP[8]) نیز شناخته می‌شوند؛ این نوع از روسازی، از اسکلت آسفالتی با دانه‌بندی باز تشکیل شده که دوغاب سیمانی داخل منافذ آن تزریق می‌گردد؛ در شکل (۱) نمونه استوانه‌ای ماکادام قیری با دوغاب سیمانی نشان داده شده است (Luo et al., 2020; Mukherjee & Sahoo, 2019). اسکلت آسفالتی مورد استفاده در روسازی نیمه انعطاف‌پذیر باید تخلخل کافی به جهت نفوذ دوغاب درون خود را داشته باشد. در پژوهش‌های پیشین تخلخل اسکلت آسفالتی در بازه‌ها متفاوتی ارائه شده که اجتماع آن‌ها را می‌توان با بازه ۲۰ تا ۳۵ درصد نشان داد؛ اما اولین توصیه‌ها برای میزان تخلخل اسکلت آسفالتی در این نوع از روسازی‌ها که توسط ارتش آمریکا ارائه شد، بازه ۱۵ تا ۲۵ درصد را نشان می‌داد که در حدود ۵ تا ۱۰ درصد کمتر از میزانیست که در پژوهش‌های اخیر توصیه می‌شود (Cai et al., 2020; Hassani et al., 2020; Husain et al., 2014; Setyawan, 2005; Taghipoor et al., 2021).

شکل ۱. نمونه استوانه‌ای ماکادام قیری با دوغاب سیمانی (Mukherjee & Sahoo, 2019)



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مخلوط آسفالت متخلخل (a) قبل و (b) بعد از تزریق (Hou et al., 2017)

جدول ۱. توسعه و هدف ماکادام دوغاب در گذشته

(Anderton, 2000; Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022; Van de Ven & Molenaar, 2004)

کشور / منطقه	عنوان تجاری	هدف تولید
فرانسه	سالویاسیم	برای ایجاد مقاومت در برابر نشت روغن، سوخت و سایش
ایالات متحده آمریکا	روسازی اصلاح شده با رزین	باند خزش فرودگاه، پیش باند، پارکینگ
اروپا	روسازی مقاوم هاردیکریت[11] روسازی مقاوم ورثیسیم[12] کانفالت[13]	رویه با مقاومت بالا
ژاپن	روسازی ضد شیار[14]	رویه با مقاومت بالا
فرانسه	لایه ترکیبی	رویه با مقاومت بالا

۲- پشینه تحقیق

علاوه به بر تخلخل اسکلت آسفالتی، میزان روانی[9] دوغاب سیمانی نیز تاثیر مستقیم بر کیفیت و میزان پر شدن منافذ اسکلت آسفالتی با دوغاب خواهد داشت؛ از این رو دوغاب آسفالتی باید روانی و کارایی خوبی برای پر کردن فضاهای خالی داشته و در این نوع از روسازی برای ایجاد مقاومت در برابر شیارشدگی و ایجاد یک روسازی بدون درز ایجاد شده است. همچنین یکی دیگر از ویژگی‌های مهم روسازی نیمه انعطاف‌پذیر، افزایش مقاومت اولیه و زمان کمتری است که برای دستیابی به خواص نهایی لایه در مقایسه با روسازی صلب لازم است. این نوع روسازی باید بتواند پس از دو تا سه روز به روی ترافیک باز شود، در حالی که یک روسازی صلب ممکن است به ۲۱ تا ۲۸ روز نیاز داشته باشد؛ در نتیجه دوغاب سیمانی باید سرعت کسب مقاومت بالایی داشته باشد (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022).

جدول ۲. معیارهای پذیرش و رد مخلوط‌های آسفالتی متخلخل - نشریه ۱-۳۸٤

آزمایش	معیار پذیرش	دستورالعمل
درصد جاری شدن قیر[15]	< ٪۰,۳	ASTM D6390
درصد فضای خالی	> ٪۲۰	
افت وزنی کانتابرو[16]	< ٪۲۵	ASTM C131-03
لوتمن اصلاح شده[17]	> ٪۸۰	AASHTO T-283

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، مقاومت فشاری دوغاب سیمانی، اثر بسیار زیادی بر مقاومت فشاری روسازی نیمه انعطاف‌پذیر داشته و به طور کلی می‌توان مقاومت فشاری روسازی را به شکل ۱,۳۵ برابر جذر مقاومت فشاری دوغاب بیان نمود (Setyawan, 2013).

۲-۱-شاخص‌های اصلی عملکرد دوغاب سیمانی

عوامل متعددی برای ارزیابی دوغاب در روسازی‌های نیمه انعطاف پذیر کامپوزیت وجود دارد که از بین آن‌ها، چسبندگی بین دوغاب سیمانی و اسکلت آسفالتی، مقاومت فشاری دوغاب و فضای خالی باقی مانده پس از تزریق دوغاب، مهم ترین این عوامل می‌باشند (Bai et al., 2022).

مقاومت فشاری

مقاومت فشاری دوغاب‌های سیمانی باید پس از ۲۸ روز عمل آوری مورد بررسی قرار گیرند؛ در این مدت هیدراتاسیون سیمان انجام شده و ملات به مقاومت هدف خود رسیده است. برای دستیابی به مشخصات دوغاب استاندارد، مقاومت فشاری هدف برای دوغاب سیمانی، پس از ۲۸ روز عمل آوری، برابر با ٦۰ مگاپاسکال می‌باشد. علاوه بر ارزیابی اصلی که برای عمل‌آوری ۲۸ روزه انجام می‌شود، مقاومت‌های فشاری پس از ۱ و ۷ روز عمل‌آوری نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مقاومت

فشاری هدف برای ۱ روز عمل آوری برابر ۷ مگاپاسکال و برای ۷ روز عمل آوری بین ۱۵ تا ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد (Khan, Sutanto, Khan, et al., 2022).

در مورد دوغاب پر مقاومت، مقاومت فشاری هدف برای ۲۸ روز عمل آوری برابر بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال و برای ۷ روز عمل‌آوری برابر با ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال و برای عمل آوری ۱ روزه، در حدود ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022). لازم به ذکر است که مقاومت فشاری هدف برای کاربری‌های متفاوت و همچنین در کشورهای متفاوت می‌تواند مقادیر مختلفی را داشته باشد؛ لیکن مقادیر ذکر شده در این بخش کاربرد بیشتری داشته و متداول‌تر می‌باشد.

روانی

دوغاب مورد استفاده باید دارای روانی بالایی باشد تا بتواند در اسکلت متخلخل آسفالتی به شکل مناسبی نفوذ کند. در ارزیابی میزان روانی دوغاب با استفاده از مخروط جریان و بر اساس استاندارد ASTM C939، مقدار جریان در بازه ۱۱ تا ۱۶ ثانیه توصیه شده است. همچنین در پژوهش‌ها مشاهده شده است که با توجه به نوع دوغاب، استفاده از نسبت آب به سیمان ۰,۴۵ تا ۰,۶۵ می‌تواند سیالیت مورد نیاز را فراهم نماید؛ همچنین در شرایطی با نسبت آب به سیمان ۰,۳ تا ۰,۴، می‌توان از ۰ تا ۲ درصد فوق روان کننده برای دستیابی به سیالیت مناسب بهره گرفت (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022).

سطح مخصوص مواد دوغاب سیمانی به شدت با روانی مرتبط است؛ هر چه سطح مخصوص بیشتر باشد، دوغاب حاصل روانی بالاتری خواهد داشت. سطح مخصوص بیشتر نشان از دانه‌بندی ریزتر سنگدانه‌های دوغاب داشته که این نکته باعث افزایش سیالیت آن خواهد شد (Hlail et al., 2021). تاثیر پوزولان‌های مختلف بر ویژگی روانی دوغاب در بخش‌های بعد آورده شده است. در پژوهش‌های پیشین افزودنی‌های دوغاب در روسازی نیمه انعطاف‌پذیر مانند اتیلن-وینیل استات خنثی، لاستیک استایرن بوتادین و امولسیون‌های قیری برای بهبود انعطاف پذیری دوغاب استفاده شده‌اند و همچنین مواد نافذی مانند فوق روان‌کننده مبتنی بر نفتالین، فوق روان کننده حباب هوازا و فوق روان‌کننده مبتنی بر پلی‌کربوکسیلن برای بهبود روانی خمیر سیمان مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که افزودنی‌های شیمیایی برای تولید دوغاب سیمان با کارایی بالا ضروری هستند (Doma & Ravi Shankar, 2023).

چسبندگی اسکلت آسفالتی و دوغاب سیمانی

عملکرد چسبندگی بین دوغاب سیمانی و اسکلت آسفالتی، وابسته به خواص مواد تشکیل دهنده‌ی این دو فاز (اسکلت آسفالتی متخلخل و دوغاب سیمانی) خواهد داشت. مواد افزودنی ترکیب شده با دوغاب سیمانی می‌تواند این ویژگی را تحت تاثیر قرار دهد. اصلاح کننده‌های رابط برای تقویت پیوند بین مخلوط آسفالت و دوغاب سیمان استفاده شود که به کاهش ترک در روسازی کمک می‌کند. استفاده از اصلاح کننده‌های رابط در دوغاب‌های سیمانی می‌تواند منجر به بهبود چسبندگی یا سازگاری دوغاب سیمانی با بتن آسفالتی شود. از اصلاح کننده‌های رابط می‌توان به عامل جفت کننده سیلان[18]، لاتکس کربوکسیله استایرن-بوتادین[19] و قیر امولسیونی کاتیونی اشاره کرد (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022; Xu et al., 2020).

۳-افزودنی‌های دوغاب سیمانی

استفاده از مواد پوزولانی و سیمانی (شامل خاکستر بادی، دوده سیلیس، پودر سنگ آهک، سرباره کوره و غیره) می‌تواند برای دستیابی به دوغاب‌هایی با استحکام متوسط به بالا مورد استفاده قرار گیرد که در بخش‌های آینده در این موارد توضیح داده خواهد شد؛ استفاده از دوغاب پوزولانی با استحکام بالاتر منجر به دستیابی به روسازی نیمه انعطاف‌پذیر با استحکام بالاتر خواهد شد و در عین حال استفاده از این مواد در راستای توسعه پایدار نیز خواهد بود. در جدول (۳) تعدادی از پژوهش‌های انجام شده اخیر بر روی افزودنی‌های دوغاب سیمانی در روسازی نیمه انعطاف‌پذیر نام برده شده است.

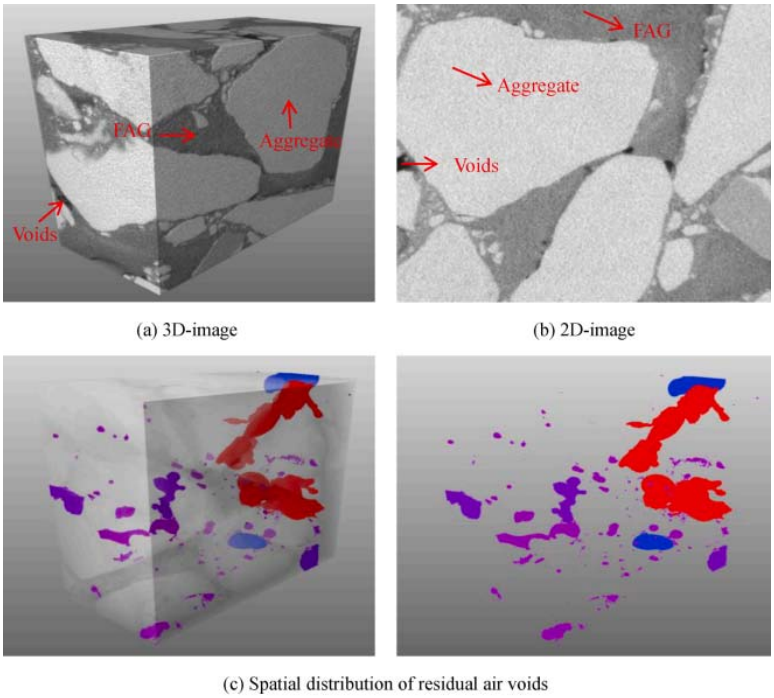
۳-۱-خاکستر بادی

خاکستر بادی که در طی احتراق زغال سنگ برای تولید انرژی تولید می شود، یک محصول فرعی صنعتی است که به عنوان یک آلاینده زیست محیطی شناخته می شود. به دلیل مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط خاکستر بادی، تحقیقات قابل توجهی برای استفاده از این ماده به عنوان ماده اولیه در صنایع مختلف انجام شده است (Ahmaruzzaman, 2010).

افزودن خاکستر بادی به ملات سیمانی باعث افزایش روانی و نفوذ پذیری آن خواهد شده و جمع‌شدگی هنگام گیرش را بهبود می‌بخشد؛ اما از سمت مقابل، در پژوهش‌های پیشین مشاهده شده است که با افزایش خاکستر بادی مقاومت خمشی و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد (Doma & Ravi Shankar, 2023; Zhang et al., 2021).

جدول ۱. برخی از پژوهش‌های اخیر انجام شده بر روی افزودنی‌های دوغاب

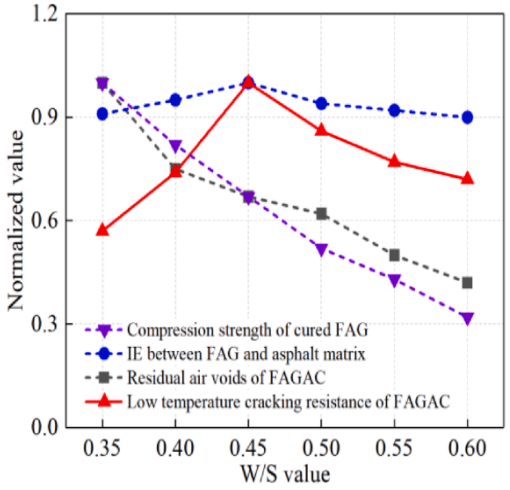
پژوهش	افزودنی دوغاب	معیارهای بررسی شده	
سون‌چن و همکاران (Songqiang et al., 2024)	پودر معدنی	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی	- مقاومت جمع‌شدگی
خان و همکاران (Khan, Sutanto, Khan, et al., 2022)	پلی اتیلن ترفتالات	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی	- عمر خستگی - پیش‌بینی عملکرد
خان و همکاران (Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022)	پلی اتیلن ترفتالات خاکستر بادی	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی	- مقاومت جمع‌شدگی
سلوکی و همکاران (Solouki et al., 2022)	لجن زباله تصفیه شده	- کشش غیرمستقیم - حساسیت دمایی	- خستگی دمای پایین
فانگ و همکاران (Fang et al., 2022)	دوده سیلیس فوق روان‌کننده پلی کربوکسیلات	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری	- خواص رئولوژیکی - زمان گیرش
بای و همکاران (Bai et al., 2022)	خاکستر بادی	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی	- میکرواستراکچر - حساسیت رطوبتی
زارعی و همکاران (Zarei et al., 2020)	قیر امولسیونی	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی - مقاومت شیارشدگی	- ترک دمای پایین - حساسیت رطوبتی
لو و همکاران (Luo et al., 2020)	لاتکس استایرن-بوتادین-استایرن	- روانی دوغاب - مقاومت فشاری و خمشی - پایداری دمای بالا	- حساسیت رطوبتی - تخلخل نهایی - ترک دمای پایین
هلیل و همکاران (Hlail et al., 2020)	دوده سیلیس خاکستر لجن کاغذ	- روانی	- مقاومت فشاری و خمشی
خان و همکاران (Khan et al., 2019)	پلی اتیلن ترفتالات	- جریان	- مقاومت فشاری و خمشی
ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016)	خاکستر بادی پودر معدنی	- روانی - شکل پذیری	- مقاومت فشاری و خمشی - مقاومت جمع‌شدگی
کوتینگ و همکاران (Koting et al., 2014)	دوده سیلیس فوق روان‌کننده پلی کربوکسیلات	- روانی و کارایی	- مقاومت فشاری و خمشی



شکل ۳. تصاویر کامپیوتری مربوط به FAGAC با نسبت W/S برابر ۰,۴۵ – (a) عکس سه بعدی، (b) عکس دو بعدی، (c) توزیع فضای خالی باقیمانده (Bai et al., 2022)

در پژوهش‌های انجام شده بر روی نمونه آسفالت متخلخل با دوغاب ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی (FAG)[۲۰] مشاهده شده است که، مقدار نسبت آب به مواد جامد (W/S) به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و سیالیت ملات FAG تأثیر گذار است. تمام ملات‌های با نسبت W/S از ۰,۳۵ تا ۰,۶۰ کارایی مناسبی داشته و مشاهده شد که مقدار پرشدگی دوغاب در تمام نمونه‌های مخلوط آسفالتی بیش از ۹۰ درصد بوده است. علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش مقدار W/S میزان انرژی چسبندگی بین دوغاب و اسکلت آسفالتی در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین نشان داده شد که تاثیر قابل توجهی بر مقاومت ترک خوردگی دمای پایین، مقاومت در برابر رطوبت و خستگی مخلوط آسفالتی متخلخل با دوغاب ژئوپلیمری با پایه خاکستر بادی دارد (FAGAC)[۲۱]. در نهایت مشاهده شد که برای دستیابی به چسبندگی بهینه بین دوغاب ژئوپلیمری و اسکلت آسفالتی، نسبت W/S برابر با ۰,۴۵ مناسب خواهد بود. تصاویر کامپیوتری مربوط به FAGAC با نسبت W/S برابر ۰,۴۵ و همچنین توزیع فضای خالی باقی مانده‌ی آن در شکل (۳) نشان داده شده است (Bai et al., 2022).

پایداری در دمای بالا و مقاومت در برابر رطوبت FAGAC با افزایش مقدار W/S کاهش می‌یابد، اما مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و عملکرد خستگی آن ابتدا افزایش و سپس با افزایش مقدار W/S کاهش پیدا می‌کند. FAGAC با مقدار W/S برابر ۰,۴۵ دارای عملکرد بهینه شده متعادل و جامع برای عملکرد راه می‌باشد. نمودار نتایج مربوط به آزمایش‌های نمونه مخلوط FAGAC بر اساس مقادیر متفاوت W/S در شکل (٤) قابل مشاهده است (Bai et al., 2022).



شکل ٤. نتایج آزمایش‌های نمونه FAGAC بر اساس مقادیر W/S (Bai et al., 2022)

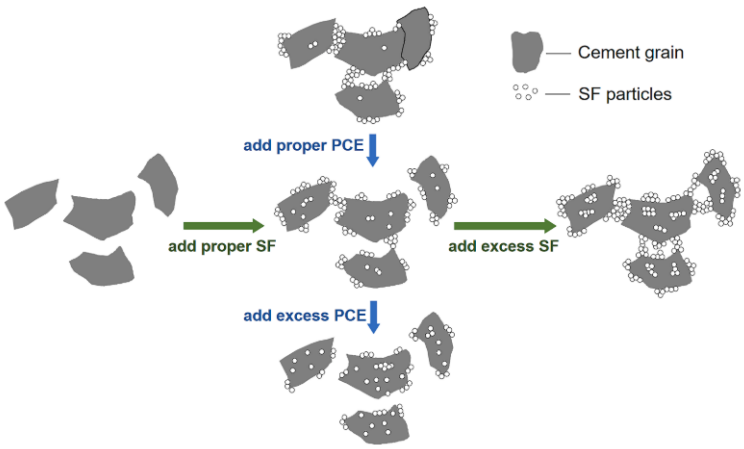
دوده سیلیس

دوده سیلیس (SF)[۲۲] یکی از پر مصرف‌ترین پوزولان‌ها است که افزودن آن به مخلوط‌های سیمانی منجر به تخلخل، نفوذپذیری و آب افتادگی کمتری می‌شود، زیرا اکسیدهای آن (SiO_2) با هیدروکسیدهای کلسیم که از هیدراتاسیون سیمان پرتلند معمولی تولید می‌شوند، واکنش داده و آن‌ها را مصرف می‌کنند (Mazloom et al., 2004). مطالعات نشان داده است که استفاده از دوده سیلیسی، جداشدگی و آب افتادگی مواد تزریق شده را کاهش داده و زمان جریان را کاهش می‌دهد (Doma & Ravi Shankar, 2023; Hlail et al., 2020). افزودن همزمان دوده سیلیس و فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات (PCE)[۲۳] روانی دوغاب سیمانی پرمقاومت زودگیر(EHSG)[۲۴] را بدون تاثیر منفی بر سایر خواص بهبود می‌بخشد. زمان جریان دوغاب به صورت خطی با تنش تسلیم دینامیکی مرتبط است. افزودن دوده سیلیس ویسکوزیته را کاهش می‌دهد اما تنش تسلیم دینامیکی دوغاب را افزایش خواهد داد. ادغام فوق روان‌کننده ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم دینامیکی را کاهش می‌دهد، اما می‌تواند ویسکوزیته را افزایش دهد. مقدار دوده سیلیس با توجه به مقدار فوق روان‌کننده و به منظور بهبود خواص رئولوژیکی دوغاب تنظیم می‌شود. مقدار پایین دوده سیلیس اثر درهم‌تنیدگی بین دانه‌های سیمان را ضعیف می‌کند، در حالی که مقدار زیاد آن پل‌هایی را بین ذره‌ها ایجاد کرده و یا حتی بین لایه‌های جذبی، همپوشانی ایجاد می‌کند. فوق روان‌کننده از تجمع دانه‌های سیمان جلوگیری کرده، میزان پل‌های ناشی از دوده سیلیس را کاهش داده و توانایی پخش شدن بهتری را به ذرات خواهد داد (Fang et al., 2022).

در شکل (۵) اثر افزودن دوده سیلیس و فوق روان‌کننده به دوغاب به صورت شماتیک نشان داده شده است. دوده سیلیس با دوز پایین اثر درهم تنیدگی بین دانه‌های سیمان را ضعیف می‌کند، در حالی که مقدار اضافی آن پل‌هایی بین ذرات سیمان به وجود خواهد آورد. افزودن فوق روان‌کننده از تجمع دانه‌های سیمان جلوگیری کرده و پتانسیل ایجاد پل دوده سیلیس را کاهش داده و توانایی پخش شدن ذرات را افزایش می‌دهد (Fang et al., 2022). به طور کلی نتایج پژوهش کوتینک و همکاران نشان داده است که جایگزین کردن سیمان با دوده سیلیس به میزان ۵ درصد در دوغاب و استفاده از نسبت آب به سیمان ۰٫۳ همراه با ۲ درصد فوق روان‌کننده می‌تواند مقاومت فشاری ۱ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵۷ و ۹۲ مگاپاسکال را تامین نمایید (Koting et al., 2014).

پودر معدنی

در بسیاری از موارد، پودر معدنی (پودر سنگ آهک) به دلیل قیمت پایین و در دسترس بودن زیاد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن پودر معدنی به دوغاب سیمان باعث بهبود روانی و نفوذپذیری شده و جمع‌شدگی هنگام گیرش را کاهش داده و جداشدگی هنگام آماده سازی را از بین می‌برد؛ همچنین از سمت مقابل باعث کاهش استحکام ملات سیمانی خواهد شد (Doma & Ravi Shankar, 2023; Uchikawa et al., 1996).

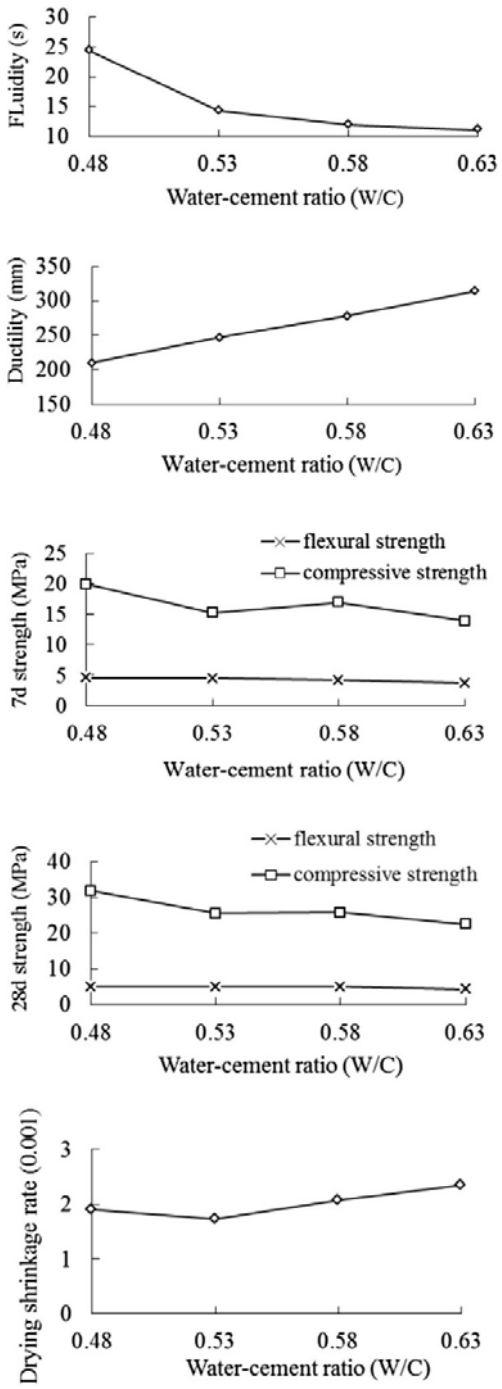


شکل ۵. اثر SF و PCE بر تجمع ذرات دوغاب EHSG (Fang et al., 2022)

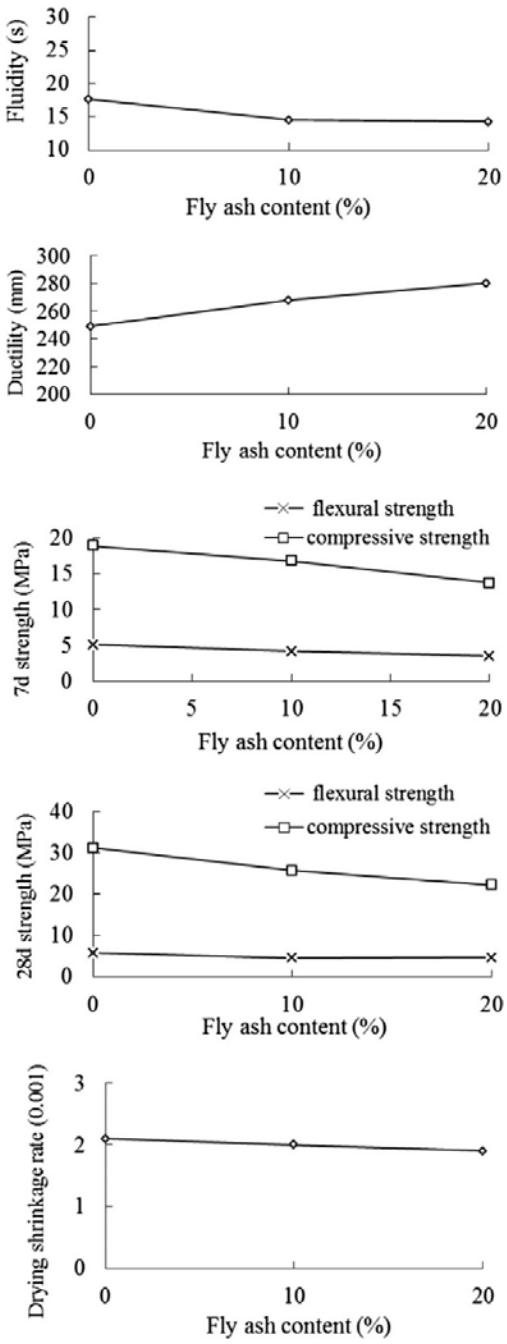
پودر معدنی معمولا همراه با خاکستر بادی در ملات سیمانی و خمیر سیمانی استفاده می‌شود تا به عنوان مکمل عملکرد بهتری داشته باشند. در مورد ویژگی‌های سیالیت، استحکام و جمع‌شدگی زمان گیرش خمیر سیمان، پژوهش‌ها نشان داده است که نسبت آب به سیمان بیشترین تاثیر را دارد، پس از آن میزان خاکستر بادی اثر گذار بوده و کمترین میزان اثر گذاری مربوط به پودر معدنی می‌باشد. نسبت آب به سیمان توصیه شده در محدوده ۰,۵٦ تا ۰,۵۸ بوده و مقدار خاکستر بادی و پودر معدنی هرکدام به میزان ٪۱۰ پیشنهاد شده است. برای ملات سیمان نیز مشاهده شده است که در مورد خواص ذکر شده، نسبت آب به سیمان بیشترین تاثیر را داشته و اثر گذاری پودر معدنی و خاکستر بادی به طور کلی یکسان می‌باشد. لازم به ذکر است که خمیر سیمان در برابر ملات سیمان عملکرد بهتری داشته و برای استفاده به عنوان دوغاب توصیه می‌شود. در اشکال (٦)، (۷) و (۸) به ترتیب تاثیر نسبت آب به سیمان، خاکستر بادی و پودر معدنی بر خواص خمیر سیمان نشان داده شده است(Zhang et al., 2016). سون‌چنگ و همکاران در پژوهش خود، پودر معدنی را همراه با روان‌کننده در ملات ماسه سیمان مورد استفاده قرار دادند و نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۵ درصد از سیمان با پودر معدنی همراه در نسبت آب به سیمان ۰,٤۵ و با نسبت ماسه به سیمان ۰,۲ همراه با مقادیر مناسب افزودنی‌های روان کننده و متورم کننده می‌تواند، مقاومت فشاری و خمشی و جمع شدگی هنگام گیرش ملات سیمانی را بهبود داده و مقاومت مخلوط آسفالتی را نسبت به حالت دوغاب ریزی نشده تا ٤ برابر افزایش دهد (Songqiang et al., 2024).

لجن بازیافتی

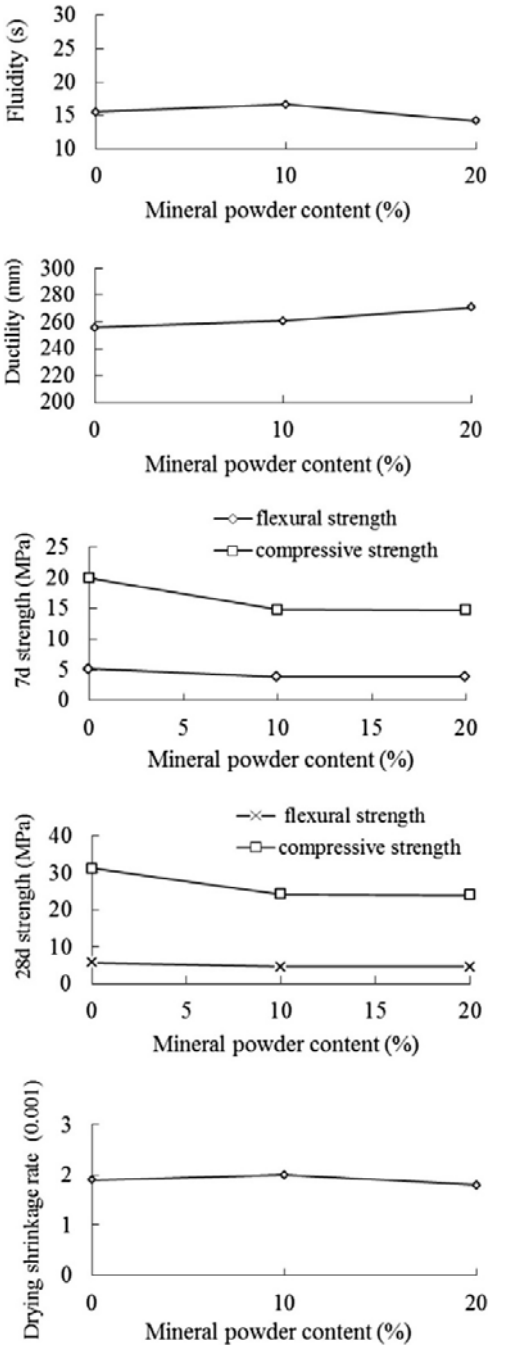
لجن، یکی از مواد ضایعات حاصل از فرآیند تولید سنگ آهک بوده که به عنوان یک افزودنی در ساخت مخلوط روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گل و لای از دریاچه رسوب استخراج شده و در انبارهای ذخیره می‌شود تا آب اضافی آن تبخیر گردد. مواد حاصل تصفیه شده و سنگ‌ها خرد شده، چوب، ریشه گیاهان و مواد اضافی آن جدا خواهد شد. پس از فرآیند تصفیه، لای به مدت ٤۸ ساعت در گرمکن با دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد خشک شده و سپس با استفاده از دستگاه لس آنجلس خرد شده و الک می‌شود. در نهایت لای خام به مدت ٤۸ ساعت تحت دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و برای استفاده در مخلوط دوغاب سیمانی آماده می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد در صورت استفاده از اسکلت آسفالتی با تخلخل بیش از ۲۵ تا ۳۰ درصد، استفاده از لجن زباله تصفیه شده، در تراکم پذیری و کارایی مخلوط آسفالتی متخلخل اثر گذار نخواهد بود. مقادیر مقاومت کشش غیرمستقیم (ITS)[۲۵] و نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم (ITSR)[۲٦] پس از افزودن لای کلسینه تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. مقدار ITS به میزان جزئی کاهش یافته؛ که با این حال، از حداقل چسبندگی پیشنهاد شده برای آسفالت متخلخل به میزان قابل توجهی بالاتر می‌باشد. روند مشابهی برای ITSR نیز مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که افزودن سیلت کلسینه شده مقاومت در برابر خستگی مخلوط متخلخل را در دماهای پایین نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش می‌دهد (Solouki et al., 2022).



شکل ٦. تاثیر نسبت آب به سیمان بر خواص خمیر سیمان – مثال نمونه (Zhang et al., 2016)



شکل ۷. تاثیر مقدار خاکستر بادی بر خواص خمیر سیمان – مثال نمونه (Zhang et al., 2016)



شکل ۸. تاثیر مقدار پودر معدنی بر خواص خمیر سیمان – مثال نمونه (Zhang et al., 2016)

در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که ITS و ITSR مخلوط‌های دوغاب شده عملکرد بهتری را برای مخلوط شاهد در مقایسه با آزمایشی نشان داد و هنگامی که ژئوپلیمر به عنوان ماده تزریق استفاده شد، افت تقریبا ۲۸ درصدی مشاهده شده و همچنین ITSR ژئوپلیمر ٦,٥ درصد کمتر از نمونه کنترل بود. با توجه به عملکرد مکانیکی پایین تر مواد تزریقی مبتنی بر ژئوپلیمر، نمونه های تجربی مقادیر ITSR پایین‌تری را نشان دادند. مخلوط‌های دوغاب شده با ژئوپلیمر خواص خستگی در دمای پایین بهتری را در مقایسه با نمونه شاهد نشان دادند. روسازی نیمه انعطاف‌پذیر دوغاب شده با ژئوپلیمر حساسیت

دمایی کمتری را در مقایسه با دوغاب شاهد نشان می‌دهد (Solouki et al., 2022).

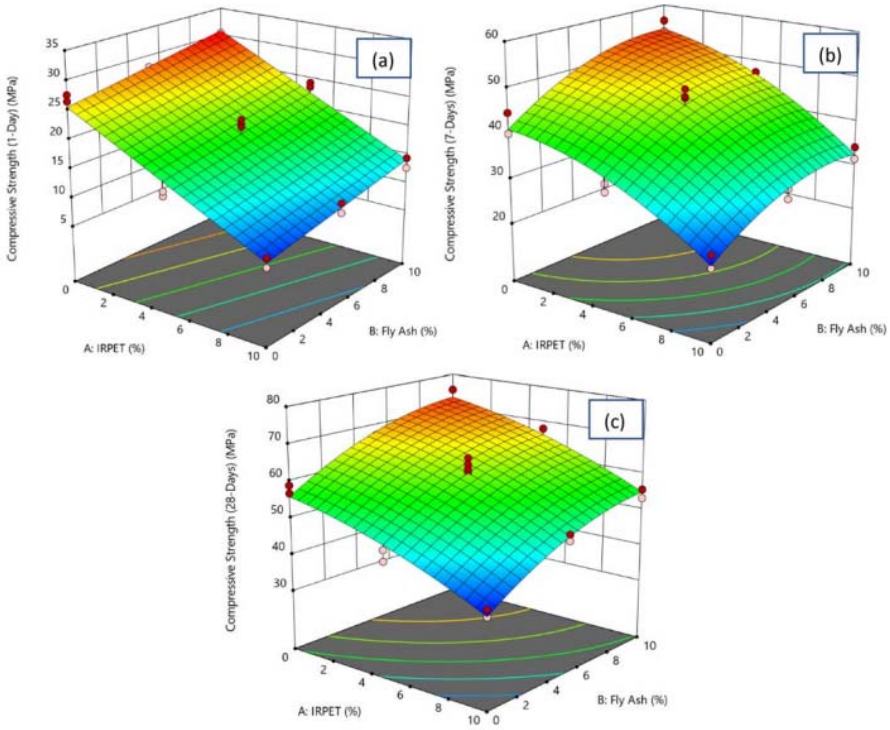
پلی‌اتیلن ترفتالات

بر اساس مطالعات گذشته، در شرایطی که پلی‌اتیلن ترفتالات معمولی (NPET)[۲۷] به میزان ۵ و ۱۰ درصد جایگزین سیمان شود، زمان خروج دوغاب حدود ۱۶ و ۷۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش پیدا می‌کند. با این حال، هیچ اثر قابل توجهی بر میزان سیالیت دوغاب های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات پرتوداده شده (IRPET)[۲۸] وجود ندارد (Khan et al., 2021; Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022).

در پژوهشی دیگر نیز مشاهده شده که، افزایش مقدار ضایعات PET در دوغاب (بدون خاکستر بادی و دوده سیلیس) از ۰ تا ۱۰ درصد منجر به افزایش ۱۱ تا ۵۵ درصدی در میزان جریان می‌شود. این اتفاق به دلیل اندازه ذرات بزرگ PET در مقایسه با سیمان است. هنگامی که سیمان با ۱۰٪ خاکستر بادی جایگزین می‌شود، ارزش جریان دوغاب های سیمانی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، در حالی که دوده سیلیس باعث افزایش مقدار جریان می‌شود (Khan, Sutanto, Khan, et al., 2022).

جمع‌شدگی هنگام گیرش دوغاب‌ها با افزایش محتویات NPET کاهش می یابد. با این حال، در شرایطی که از IRPET استفاده شود، هیچ تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان جمع‌شدگی مشاهده نمی‌گردد (Khan et al., 2021).

مقاومت فشاری نمونه با NPET (۵ تا ۱۰ درصد جایگزین سیمان) پس از ۱ روز عمل آوری، نسبت به نمونه‌ی شاهد، به میزان ۵۹ تا ۷۸ درصد کاهش می‌یابد؛ اما پژوهش‌ها نشان داد که استفاده از IRPET، این میزان کاهش مقاومت را بازیابی می‌کند. در شرایط عمل آوری پس از ۷ و ۲۸ روز نیز مشاهده شده است که کاهش مقاومت در حدود ۲۶ تا ۴۶ درصد بوده که میزان بازیابی مقاومت در حدود ۸ تا ۲۲ درصد مشاهده شده است.

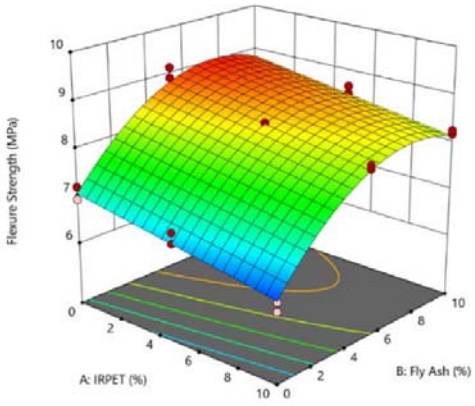


شکل ۹. تاثیر جایگزینی IRPET و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری دوغاب سیمانی – (a) ۱ روز، (b) ۷ روز و (c) ۲۸ روز عمل آوری (Khan et al., 2021; Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022)

جایگزینی خاکستر بادی با سیمان باعث افزایش استحکام فشاری نمونه، به خصوص پس از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری خواهد شد. دوغاب حاوی NPET (با یا بدون جایگزینی خاکستر بادی) نمی‌تواند مقاومت فشاری لازم را فراهم کند، اما در شرایط پرتودهی شده، مشاهده شده است که دوغاب با ۵٪ IRPET به همراه ۵٪ یا ۱۰٪ خاکستر بادی مقاومت فشاری

مورد نیاز را تامین می‌نماید. در شکل (۹)، تاثیر جایگزینی IRPET و خاکستر بادی با سیمان بر مقاومت فشاری مخلوط نشان داده شده است (Khan, Sutanto, Khan, et al., 2022; Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022).

جایگزینی NPET با سیمان مقاومت خمشی را تا ۱۳ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که استفاده از IRPET می‌تواند ۵ درصد از مقاومت خمشی از دست رفته را بازیابی کند. البته لازم به ذکر است که تمام دوغاب‌ها به مقاومت خمشی مورد نظر (۳ مگاپاسکال) دست می‌یابند، که نمودار آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است (Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022). بهینه سازی چندبعدی نشان داده است که ادغام ۲,۵۷ درصد NPET با ۸,۰۵ درصد خاکستر بادی، خواص فیزیک و مقاومتی هدف را تامین می‌کند. همچنین با پرتودهی می‌توان مقدار IRPET را به ٤,۷۵ درصد افزایش داده و همراه با ۱۰ درصد خاکستر بادی، مقادیر عملکردی مورد نیاز را تامین نمود. از این رو، مقدار زیادی پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعات می‌تواند به عنوان جایگزین جزئی سیمان در دوغاب‌های سیمانی برای سطح روسازی نیمه انعطاف پذیر استفاده شود. استفاده از این ماده، به عنوان یک ماده بازیافتی گامی در جهت توسعه پایدار خواهد بود (Khan et al., 2019; Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022).



شکل ۱۰. تاثیر جایگزینی IRPET و FA بر مقاومت خمشی دوغاب سیمانی (Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022)

لاتکس استایرن-بوتادین-استایرن

اصلاح کننده لاتکس استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)[۲۹] برای اصلاح عملکرد ملات سیمان معمولی استفاده می‌شود. فیلم نازکی از لاتکس می‌تواند از توسعه بیشتر ریز ترک‌ها در ملات سیمان جلوگیری کند. SBS به دو صورت پودر خشک و ژل مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است (Luo et al., 2020).

در پژوهش‌های پیشین، نمونه‌هایی بر اساس طراحی بهینه آسفالت با معیارهای تخلخل، روانی، استقامت مارشال و نفوذ پذیری ساخته شد تا آزمایش‌ها مرتبط با سیالیت، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد، دوغاب سیمانی اصلاح شده با لاتکس به شکل قابل توجهی استحکام بیشتری نسبت به دوغاب اصلاح نشده دارد؛ و البته میزان سیالیت آن کمی کمتر از دوغاب اصلاح نشده خواهد بود (Luo et al., 2020).

شکل ۱۱. حالت ظاهری اصلاح کننده لاتکس به صورت پودر خشک و ژل (Luo et al., 2020)

همچنین مشاهده شد است، دوغاب اصلاح شده با لاتکس، نسبت به دوغاب اصلاح نشده، عملکرد بهتری در دمای بالا و عملکرد ضعیف‌تری در دمای پایین خواهد داشت. همچنین حساسیت به رطوبت آن بیشتر و عملکرد خستگی ضعیف تری از خود نشان خواهد داد؛ البته لازم به ذکر است که میزان آسیب رطوبتی و عملکرد دمای پایین روسازی نیمه انعطاف‌پذیر با دوغاب‌های اصلاح شده، می‌تواند مقادیر مجاز را براورده کند (Luo et al., 2020).

قیر امولسیونی

خمیر سیمان در مقایسه با مخلوط آسفالتی ماده سخت‌تری بوده و مدول برجهندگی متفاوتی نسبت به آن دارد و این امر بر اتصال و چسبندگی بین دو فاز اسکلت آسفالتی و دوغاب سیمانی اثر گذار است که در نهایت منجر به کاهش استحکام و کرنش کششی مخلوط آسفالتی نیمه انعطاف‌پذیر می‌شود. افزودن قیر امولسیونی به خمیر یا ملات سیمان برای ایجاد یک ماده تزریقی مناسب که انعطاف‌پذیری بیشتری داشته و چسبندگی بهتری را با اسکلت آسفالتی متخلخل ایجاد کند، می‌تواند این مشکل را حدودی بهبود دهد (Zarei et al., 2020).

زارعی و همکاران در پژوهش خود نشان داده اند که افزودن قیر امولسیون به دوغاب سیمانی، چسبندگی خمیر سیمان به مخلوط آسفالتی متخلخل را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد؛ اما از سمت مقابل با توجه به افزایش انعطاف‌پذیری دوغاب در اثر افزودن قیر امولسیون، مقاومت شیار شدگی مخلوط آسفالتی به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت، البته نتایج نشان داده است که در شرایطی نسبت قیر امولسیون به سیمان از ۰,٤ بیشتر نشده باشد، مخلوط آسفالتی مقاومت شیارشدگی کافی را خواهد داشت. در نهایت نتایج نشان داده است که نسبت ۰,۲ قیر امولسیون به سیمان، می‌تواند نتایج خوبی را برای شیارشدگی نشان داده و مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی قابل قبولی نشان دهد، همچنین مقاومت در برابر یخ زدگی و ترک خوردگی دمای پایین بسیار بهتری نسبت به حالت دوغاب بدون قیر امولسیون نشان دهد. از این رو استفاده از دوغاب سیمانی با قیر امولسیون در مناطق با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد می‌تواند مفید باشد (Zarei et al., 2020). در شکل (۱۲) مخلوط آسفالت نیمه انعطاف‌پذیر با دوغاب عادی و همراه با قیر امولسیونی نشان داده شده است.

شکل ۱۲. روسازی نیمه انعطاف‌پذیر با دوغاب سیمانی (چپ) و دوغاب سیمانی با قیر امولسیون (راست) (Zarei et al., 2020)

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی مطالعات پیشین در مورد خواص عملکردی روسازی نیمه‌انعطاف‌پذیر کامپوزیت و دوغاب سیمانی پرداخته شده و تاثیر مواد افزودنی و ترکیبات مختلف بر خواص و مشخصات دوغاب و اسکلت آسفالتی متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. خلاصه نتایج پژوهش‌های پیشین به شرح زیر می‌باشد:

- نفوذپذیری دوغاب، مقاومت فشاری دوغاب و چسبندگی بین دوغاب سیمانی و مخلوط آسفالتی اصلی‌ترین معیارهای بررسی دوغاب‌های سیمانی بوده که در عملکرد روسازی نیمه انعطاف‌پذیر اثر گذار می‌باشند.
- به طور کلی دستورالعمل مشخصی برای حداقل درجه اشباع مخلوط پس از دوغاب ریزی مشخص نشده، اما در پژوهش‌های پیشین حداقل مقدار درجه اشباع در حدود ۹۲ تا ۹٦ درصد در نظر گرفته شده است.
- افزودن قیر امولسیون کاتیونی به دوغاب سیمانی باعث افزایش چسبندگی در فصل مشترک اسکلت آسفالتی متخلخل و دوغاب سیمانی خواهد شد که البته مقاومت شیارشدگی مخلوط را کاهش می‌دهد.
- افزودن خاکستر بادی به ملات سیمانی باعث افزایش روانی و نفوذ پذیری آن خواهد شده و جمع‌شدگی هنگام گیرش را بهبود می‌بخشد؛ اما از سمت مقابل، در پژوهش‌های پیشین مشاهده شده است که با افزایش خاکستر بادی مقاومت خمشی و مقاومت فشاری مخلوط کاهش می‌یابد.
- افزودن همزمان دوده سیلیس و فوق روان کننده پلی‌کربوکسیلات با درصدهای مناسب، سیالیت دوغاب سیمانی پرمقاومت زودگیر را بدون تاثیر منفی بر سایر خواص بهبود می‌بخشد.

– استفاده از لجن ضایعات عملیات حرارتی به عنوان پرکننده در آسفالت متخلخل نتایج امیدوار کننده‌ای را در زمینه ITS و ITSR نشان داده است. با این حال، استفاده از سیلت کلسینه شده با ضایعات برای تولید مواد تزریقی مبتنی بر ژئوپلیمر منجر به کاهش قابل توجهی در خواص مکانیکی بتن آسفالتی نهایی خواهد شد.

– بهینه‌سازی چندبعدی نشان می‌دهد که ادغام مقدار ۲,۵۷ درصد NPET با ۸,۰۵ درصد خاکستر بادی خواص فیزیکی و مقاومتی هدف را تامین می‌کند. در صورت استفاده از پلی‌اتیلن ترفتالات پرتو تابیده شده، می‌توان تا ٤,۷۵ درصد از این افزودنی را همراه با ۱۰ درصد خاکستر بادی استفاده نمود.

– دوغاب اصلاح شده با لاتکس، نسبت به دوغاب اصلاح نشده، عملکرد بهتری در دمای بالاتر داشته و اما در دمای پایین عملکرد ضعیف تری خواهد داشت. همچنین حساسیت به رطوبت آن بیشتر و عملکرد خستگی ضعیف تری خواهد داشت.

مطالعات پیشین عمدتا بر اساس نتایج آزمایشگاهی با هدف بررسی ویژگی‌های کوتاه مدت و عملکردی روسازی بوده و نتایج نشان داده شده است که این نوع از روسازی عملکرد بهتری در مقایسه با روسازی‌های آسفالتی و بتنی قبلی می‌تواند از خود نشان دهد، از این رو انجام پژوهش‌هایی با هدف بررسی طولانی مدت این نوع از روسازی می‌تواند نتایج کامل‌تری را از عملکرد این نوع از روسازی نشان دهد؛ همچنین پژوهش‌هایی با هدف ارزیابی چرخه عمر (LCA) نیاز خواهد بود تا علاوه بر جنبه‌های فنی و بررسی عملکرد روسازی، جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی استفاده از پوزولان‌ها و افزودنی‌ها در کنار هزینه‌های اجرا و تعمیر و نگهداری این نوع از روسازی‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. از سوی دیگر، روسازی نیمه انعطاف‌پذیر به طور کلی به شکل یک روکش و لایه‌ای با ضخامت کم مورد استفاده قرار می‌گیرد، از این رو پژوهش‌های بیشتری به جهت بررسی شکل انتقال بار به لایه‌های زیرین روسازی و عملکرد همزمان رویه نیمه انعطاف‌پذیر با لایه‌ی زیر آن مورد نیاز خواهد بود.

٦–پی‌نوشت‌ها

1. Semi-Flexible Pavement (SFP)
2. Salviacim
3. World Education Services (WES)
4. Densiphalt
5. Cement Grouted Bituminous Macadam (CGBM)
6. Grouted Macadam (GM)
7. Grouted open-graded asphalt concrete (GOAC)
8. Cement Grouted Asphalt Concrete Pavement (CGACP)
9. fluidity
۱۰. ریخت شناسی (Morphology): علمی است که شکل، اندازه و ساختار مواد را مورد بررسی و شناخت قرار می‌دهد.
11. Hardicrete Heavy Duty Surfacing
12. Worthycim Heavy Duty Paving
13. Confalt
14. RP-Pavement (Rut Proof Pavement)
15. Asphalt Draindown Test
16. Cantabro Test
17. Modified Lottman Test
18. Silane Coupling Agent
19. Carboxylated Styrene–Butadiene Latex
20. Fly Ash based Geopolymer (FAG)
21. FAG grouting asphalt concrete (FAGAC)
22. Silica Fume (SF)
23. Polycarboxylate Superplasticizer (PCE)
24. Early High Strength Grouting Material (EHSG)
25. Indirect Tensile Strength (ITS)
26. Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)
27. Normal Polyethylene Terephthalate (NPET)
28. Irradiated Polyethylene Terephthalate (IRPET)
29. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS polymer)

۷–مراجع

-Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, *36*(3), 327-363.

–An, S., Ai, C., Ren, D., Rahman, A., & Qiu, Y. (2018). Laboratory and field evaluation of a novel cement grout asphalt composite, *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(8), 04018179.

–Anderton, G. L. (2000). Engineering properties of resin modified pavement (RMP) for mechanistic design.

–Bai, T., Liang, Y., Li, C., Jiang, X., Li, Y., Chen, A., Wang, H., Xu, F., & Peng, C. (2022). Application and validation of fly ash based geopolymer mortar as grouting material in porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, *332*, 127154 .

–Bang, J. W., Lee, B. J., & Kim, Y. Y. (2017). Development of a semirigid pavement incorporating ultrarapid hardening cement and chemical admixtures for cement grouts. *Advances in Materials Science and Engineering*.

–Cai, X., Zhang, J., Zhang, H., Yao, Z., Chen, X., & Yang, J. (2020). Identification of microstructural characteristics in semi-flexible pavement material

based cementitious grouts on flexural strength of semi-flexible pavement. *Materials*, *12*(24), 4133.

-Khan, M. I., Sutanto, M. H., Khan, K ,.Iqbal, M., Napiah, M. B., Zoorob, S. E., Klemeš, J. J., Bokhari, A., & Rafiq, W. (2022). Effective use of recycled waste PET in cementitious grouts for developing sustainable semi-flexible pavement surfacing using artificial neural network (ANN). *Journal of Cleaner Production*, *340*, 130840 .

-Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiah, M. B., Khan, K., & Rafiq, W. (2021). Design optimization and statistical modeling of cementitious grout containing irradiated plastic waste and silica fume using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *271*, 121504 .

-Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiah, M. B., Zoorob, S. E., Yusoff, N. I. M., Usman, A., & Memon, A. M. (2022). Irradiated polyethylene terephthalate and fly ash based grouts for semi-flexible pavement: design and optimisation using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*. *23*(8), 2515-2530.

-Khan, M. I., Sutanto, M. H., Yusoff, N. I. M., Zoorob, S. E., Rafiq, W., Ali, M., Fediuk, R., & Vatin, N. I. (2022). Cementitious Grouts for Semi-Flexible Pavement Surfaces—A Review. *Materials*, *15*(15), 5466 .

-Koting, S., Karim, M. R., Mahmud, H., Mashaan, N. S., Ibrahim, M. R., Katman, H., & Husain, N. M. (2014). Effects of using silica fume and polycarboxylate-type superplasticizer on physical properties of cementitious grout mixtures for semiflexible pavement surfacing. *The Scientific World Journal*.

-Li, G., Xiong, H., Ren, Q., Zheng, X., & Wu, L. (2022). Experimental Study and Performance Characterization of Semi–Flexible Pavements. *Coatings*, *12*(2), 241.

-Ling, S., Sun, Y., Sun, D., & Jelagin, D. (2022). Pore characteristics and permeability simulation of porous asphalt mixture in pouring semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *330*, 127253.

-Luo, S., Yang, X., Zhong, K., & Yin, J. (2020). Open-graded asphalt concrete grouted by latex modified cement mortar. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(1), 61-77.

-Mayer, J., & Thau, M. (2001). Jointless pavements for heavy-duty airport application: The semi-flexible approach. In *Advancing Airfield Pavements*, 87-100.

using micromechanics and nano-techniques. *Construction and Building Materials*, *246*, 118426 .

–Chen, Z., Qiao, J., Yang, X., Sun, Y., & Sun, D. (2023). A review of grouting materials for pouring semi-flexible pavement: Materials, design and performance. *Construction and Building Materials*, *379*, 131235 .

–Doma, H. K., & Ravi Shankar, A. (2023). State-of-the-Art of Grouting in Semi-flexible Pavement: Materials and Design. In Recent Trends in Construction Technology and Management, Springer.135-148.

–Fang, Y., Wang, X., Jia, L., Liu, C., Zhao, Z., Chen, C., & Zhang, Y. (2022). Synergistic effect of polycarboxylate superplasticizer and silica fume on early properties of early high strength grouting material for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *319*, 126065.

–Hassani, A., Taghipoor, M., & Karimi, M. M. (2020). A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance. *Construction and Building Materials*, *253*, 119196 .

–Hlail, S. H. (2020). Toward semi flexible pavement application for Iraqi highway and airport pavements: Review its feasibility. *Kerbala Journal for Engineering Science* (2), 1-15 .

–Hlail, S. H., Al-Busaltan, S., & Shaban, A. M. (2020). Sustainable Development of Highly Flowable Cementitious Grouts for Semi-flexible Pavement Mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

–Hlail, S. H., Al-Busaltan, S., & Shaban, A. M. (2021). Durability Evaluation: Sustainable Semi-flexible Pavement Mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

–Hou, S., Xu, T., & Huang, K. (2017). Aggregate gradation influence on grouting results and mix design of asphalt mixture skeleton for semi-flexible pavement. *Journal of Testing and Evaluation*, *45(2)*, 591-600.

-Husain, N. M., Karim, M. R., Mahmud, H. B., & Koting, S. (2014). Effects of aggregate gradation on the physical properties of semiflexible pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*.

-Khan, M. I., Huat, H. Y., Dun, M. H .b. M., Sutanto, M. H., Jarghouyeh, E. N., & Zoorob, S. E. (2019). Effect of irradiated and non-irradiated waste PET

-Taghipoor, M., Hassani, A., & Karimi, M. M. (2021). Development of procedure for design and preparation of open-graded asphalt mixture used in semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *306*, 124884 .

-Uchikawa, H., Hanehara, S., & Hirao, H. (1996). Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, *26*(1), 101-111 .

-Van de Ven, M., & Molenaar, A. (2004). Mechanical characterization of combi-layer (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *73* .

-Xu, Y., Jiang, Y., Xue, J., Tong, X., & Cheng, Y. (2020). High-performance semi-flexible pavement coating material with the microscopic interface Optimization. *Coatings*, *10*(3), 268 .

-Zarei, S., Ouyang, J., Yang, W., & Zhao, Y. (2020). Experimental analysis of semi-flexible pavement by using an appropriate cement asphalt emulsion paste. *Construction and Building Materials*, *230*, 116994 .

-Zhang, J., Cai, J., Pei, J., Li, R., & Chen, X. (2016). Formulation and performance comparison of grouting materials for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *115*, 582-592 .

-Zhang, Y., Wang, Y., Wu, Z.-G., Lu, Y.-M., Kang, A.-H., & Xiao, P. (2021). Optimal design of geopolymer grouting material for semi-flexible pavement based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *306*, 124779 .

-Zhao, W., & Yang, Q. (2022). Influence analysis of performance of semi-flexible pavement based on aggregate distribution characteristics of matrix skeleton. *Construction and Building Materials*, *338*, 127633 .

-Mazloom, M., Ramezanianpour, A., & Brooks, J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, *26*(4), 347-357 .

-Mukherjee, D., & Sahoo, U. C. (2019). Laboratory characterization of a cement grouted bituminous macadam made with Portland slag cement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *12*(6), 574-580 .

-Saboo, N., Ranjeesh, R., Gupta, A., & Suresh ,M. (2019). Development of hierarchical ranking strategy for the asphalt skeleton in semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *201*, 149-158 .

-Setiawan, A. (2009). Design and properties of hot mixture porous asphalt for semi-flexible pavement applications. *Media Teknik Sipil*, *5*(2), 41-46 .

-Setyawan, A. (2005). Design and properties of hot mixture porous asphalt for semi-flexible pavement applications. *Jurnal Penelitian Media Teknik Sipil, Edisi Juli* .

-Setyawan, A. (2013). Asessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements. *Procedia Engineering*, *54*, 863-874 .

-Solouki, A., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2022). Thermally Treated Waste Silt as Geopolymer Grouting Material and Filler for Semiflexible Pavements. *Infrastructures*, *7*(8), 99 .

-Songqiang, C., Jian, Z., Xi, W., & Zining, C. (2024). Research on innovative preparation and performance of semi flexible pavement materials. *Case Studies in Construction Materials*, e03050 .

A Review of the Effect of Cementitious Grout Additives on the Performance of Semi-Flexible Pavement

Amin Amirchaghmaghi, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Pooyan Ayar, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Mahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

The increase in traffic load on freeways, arterial roads, and runways has led the road construction industry to design and use pavements with high strength, rutting resistance, and cost-effectiveness. In recent decades, a pavement with semi-flexible performance has been invented from the combination of porous asphalt mixture and cementitious grouts, which has the appropriate level of sliding resistance and rideability of asphalt pavement. At the same time, it has the strength and resistance of concrete pavements. The resistance properties of this type of pavement are highly dependent on the characteristics of its filling grout. Therefore, modifying the characteristics and performance of grout is very important. In recent years, much research has been carried out in order to improve the properties and characteristics of semi-flexible pavement-filling cementitious grouts using different additives and pozzolans. In this research, an attempt has been made to show the effect of additives of fly ash, silica fume, polyethylene terephthalate, styrene-butadiene-styrene latex, mineral powder, recycled layer on the properties of cementitious grouts and semi-flexible pavement mixture by reviewing previous researches. The results show that using optimal percentages of these materials can improve the compressive and bending strength, rutting resistance, shrinkage, fluidity, and adhesion between the slurry and asphalt and provide the target properties for semi-flexible pavement.

Keywords: Cementitious Grouts, Semi-Flexible Pavement, Cement Paste, Artificial Pozzolan, Porous Asphalt Mixture