فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال بیست ودوم، دوره چهارم، شماره ۸۶ ، بهار ۱۴۰۵

بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در دماهای بالا و متوسط

مقاله علمی- پژوهشی

قاسم طهمورسی، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

*محسن عموزاده عمرانی (نویسنده مسئول اول)، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

*حسن دیواندری (نویسنده مسئول دوم)، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی سیدکاظمی، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول اول: **Mo.Omrani@iau.ac.ir**

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول دوم:**ha.divandari@iau.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰- پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۲۷۸-۲۵۹

چکیده

روسازی‌های آسفالتی همواره در برابر شرایط محیطی و بارهای ترافیکی با چالش‌هایی چون شیارشدگی در دماهای بالا و ترک‌های خستگی در دماهای متوسط مواجه‌اند که موجب کاهش دوام، افت عملکرد و افزایش هزینه‌های نگهداری می‌شود. در مناطق گرم و خشک، این آسیب‌ها شدت بیشتری یافته و عملکرد بلندمدت روسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از رویکردهای نوین در مهندسی روسازی، استفاده از سنگدانه‌های سبک مصنوعی مانند دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) است. ویژگی‌هایی نظیر وزن کم، ساختار متخلخل، ظرفیت گرمایی ویژه و مقاومت مطلوب در برابر شرایط محیطی، لیکا را به گزینه‌ای مناسب برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تبدیل کرده است. نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهد جایگزینی بخشی از مصالح معمولی با لیکا، موجب کاهش شیارشدگی، افزایش مقاومت حرارتی و رطوبتی، بهبود اصطکاک سطح و کاهش صدای ناشی از ترافیک می‌شود. همچنین خاصیت عایق حرارتی لیکا از نفوذ یخبندان به لایه‌های زیرین جلوگیری کرده و عمر مفید روسازی را افزایش می‌دهد. افزون بر این، استفاده از لیکا به کاهش مصرف منابع طبیعی، انرژی حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی منفی کمک کرده است. با این حال، چالش‌هایی مانند جذب بالای قیر، افزایش هزینه تولید و ضرورت تعیین درصد بهینه جایگزینی همچنان مطرح است. مطالعات اخیر، ترکیب لیکا با نانوذرات و مواد پلیمری را روشی مؤثر برای بهبود رفتار مکانیکی و دوام مخلوط‌ها معرفی کرده‌اند. این مقاله با مرور و تحلیل جامع پژوهش‌های پیشین، به بررسی مزایا، محدودیت‌ها و مسیرهای آینده استفاده از لیکا در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا)، رفتار خستگی، رفتار شیارشدگی، نانوذرات.

۱-مقدمه

عملکرد روسازی‌های آسفالتی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط دمایی و بارگذاری ترافیکی قرار دارد. در مناطق گرم و یا دارای نوسانات حرارتی شدید، دو چالش اصلی شیارشدگی در دماهای بالا و ترک‌های خستگی در دماهای متوسط در روسازی راه‌ها

وجود دارد. این دو مشکل نه‌تنها باعث کاهش دوام سازه می‌شوند، بلکه هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را نیز به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهند (Losa *et al.,* 2008; Yinfei, 2020). ازاین‌رو، بهبود ویژگی‌های بهبود عایق حرارتی و عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر در مهندسی روسازی مطرح شده است. یکی از رویکردهای نوین برای ارتقای عملکرد آسفالت، استفاده از مصالح جایگزین به‌ویژه سنگدانه‌های سبک و مقاوم حرارتی است. دانه‌های رس منبسط شونده (light Expanded Clay Aggregate (LECA)) از جمله مصالحی است که به دلیل چگالی پایین، ساختار متخلخل، مقاومت حرارتی مطلوب و پایداری مکانیکی نسبی، پتانسیل بالایی برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی دارد (Khan, 2024; Losa *et al.,* 2008). ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) سبب می‌شود که علاوه بر کاهش وزن روسازی، قابلیت بهبود مقاومت آسفالت در برابر تغییرشکل دائمی و شیارشدگی نیز فراهم گردد (Yinfei, 2020; Tahmouresi *et al.,* 2025).

در سال‌های اخیر، استفاده از مصالح جایگزین و بازیافتی در ساخت روسازی‌ها به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های اجرایی، به یکی از محورهای مهم پژوهش‌های مهندسی راه تبدیل شده است. زیاری و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تأثیر پودر کربن آمورف (ACP) بر ویژگی‌های رطوبتی، خستگی و شیارشدگی آسفالت لاستیکی گزارش کردند که افزودن این ماده موجب افزایش مدول بازگشت‌پذیر و مقاومت کششی غیرمستقیم شده و در عین حال، به بهبود پایداری رطوبتی و کاهش تغییرشکل دائمی کمک می‌کند (Ziari, *et al.,*2023). مقیمی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که افزودن پودر لاستیک خردشده (CR) به مخلوط‌های آسفالتی کم‌انرژی (LEA) موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و بهبود نسبت مقاومت کششی می‌شود و در عین حال تأثیر مثبتی بر دوام مکانیکی در دماهای بالا دارد (Moghimi *et al.,* 2023). عموزاده عمرانی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی امکان استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP) و سرباره فولاد در بتن غلتکی، نشان دادند که به‌کارگیری مصالح جایگزین می‌تواند ضمن حفظ مقاومت مکانیکی، موجب بهبود پایداری و کاهش مصرف منابع طبیعی شود. یافته‌های آن‌ها بیانگر این است که ترکیب مواد نوآورانه و سبک‌وزن در روسازی‌ها، در صورت طراحی مناسب، می‌تواند خواص فیزیکی و حرارتی مطلوبی ایجاد کند. با توجه به این نتایج، بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) نیز می‌تواند در راستای توسعه‌ی مصالح سبک، پایدار و مقاوم در دماهای بالا و متوسط، گامی مؤثر به‌شمار آید(Amouzadeh Omrani *et al.,* 2008). پژوهش‌های آزمایشگاهی اخیر نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از مصالح سنگی درشت‌دانه با دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) می‌تواند موجب افزایش مقاومت در برابر بارگذاری ترافیکی سنگین در دماهای بالا و همچنین کاهش هدایت حرارتی مخلوط آسفالتی گردد، به‌گونه‌ای که دمای سطح روسازی در شرایط گرم کاهش یافته و دوام عملکردی آن ارتقاء یابد (Tahmouresi *et al.*, 2025). بااین‌حال، وجود تخلخل زیاد در دانه‌های رس منبسط‌شونده می‌تواند منجر به افزایش جذب قیر و در نتیجه کاهش کارایی مخلوط شود. این موضوع به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد مستقیم دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در آسفالت مطرح است (Losa *et al.,* 2008). برای رفع این محدودیت، برخی پژوهش‌ها به ترکیب دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) با مواد اصلاح کننده نظیر نانوذرات و پلیمرها پرداخته‌اند. محققان خواص مکانیکی و سطحی مخلوط آسفالت متخلخل اصلاح‌شده با پلیمر و حاوی پودر لاستیک را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این اصلاحات می‌تواند مقاومت در برابر شیارشدگی، دوام و کیفیت سطح آسفالت را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد. نتایج این پژوهش، قابلیت استفاده از افزودنی‌های پلیمری و مواد بازیافتی را برای توسعه مخلوط‌های آسفالتی متخلخل پایدار و مقاوم نشان می‌دهد؛ موضوعی که به‌ویژه در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی سبک‌دانه‌هایی مانند دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) از اهمیت بالایی برخوردار است(Amouzadeh Omrani *et al.,* 2023). پژوهشگران نشان داده‌اند که افزودن پلی فسفریک اسید (PPA) می‌تواند عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای بالا بهبود بخشد و حساسیت دمایی آن‌ها را کاهش دهد(Babagoli & Hosseinpour-Asgar, 2023). باباگلی (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای نشان داد استفاده از افزودنی‌هایی مانند پلیمرها و نانوذرات (NC)، به ویژه EVA/Nc، می‌تواند مقاومت قیر در برابر شیارشدگی و خستگی را بهبود بخشد

و طول عمر مفید روسازی را افزایش دهد(Babagoli, 2022). نتایج این مطالعات بیانگر آن است که استفاده هم‌زمان از دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) و مواد نانوساختار می‌تواند موجب بهبود قابل توجه در رفتار مکانیکی و حرارتی گردد و ضعف ناشی از جذب بالای قیر را تا حد زیادی جبران نماید(Tahmouresi *et al.*, 2025). افزون بر این، مرور کاربرد دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در حوزه‌های دیگر نظیر بتن سبک و مصالح عایق حرارتی نشان می‌دهد که این ماده، به دلیل خواص منحصربه‌فرد، در طیف وسیعی از زمینه‌های مهندسی مورد توجه است و قابلیت انتقال این تجربه‌ها به مهندسی روسازی وجود دارد.

با توجه به پژوهش‌های مختلف موجود در این حوزه ، ضرورت انجام یک مطالعه‌ی مروری جامع در زمینه رفتار مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در دماهای بالا و متوسط، احساس می‌شود. چنین مروری می‌تواند علاوه بر تبیین مزایا و محدودیت‌های مطالعات پیشین، شکاف‌های پژوهشی موجود را نیز آشکار سازد و مسیر تحقیقات آینده را در حوزه ارتقای عملکرد روسازی‌های آسفالتی مشخص نماید.

۲- پیشینه تحقیق

نوآوری در ساخت روسازی مزایای مهم صنعتی و اجتماعی را در بر می‌گیرد، که از فن‌آوری‌های پیشرفته و مواد بهینه برای ساخت جاده استفاده گردد، استفاده از دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی یک حوزه نسبتاً جدید از پژوهش است، مطالعه بر روی استفاده از سنگدانه‌های سبک در مخلوط‌های آسفالتی از چند دهه گذشته آغاز شده است، اما توجه ویژه به دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) عمدتاً در دو دهه اخیر افزایش یافته است. با این که بیشتر مطالعات قبلی به کاربرد آن در تولید بتن یا زیرسازی راه‌آهن متمرکز بوده‌اند. در زمینه استفاده از مصالح سبکدانه مصنوعی رس منبسط شده (لیکا) برای ساخت مخلوط‌های قیری اعم از آسفالت سبک و متخلخل و بتن آسفالتی و لایه‌های حفاظتی آسفالتی مقاله‌های اندکی وجود دارد که در زیر به چند نمونه از آن‌ها اشاره می‌شود. پژوهشگران با همکاری دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه ملی تایوان به ارزیابی عملکرد آسفالت حاوی سبک‌دانه‌های رس منبسط شده پرداختند. خصوصیات عملکردی آسفالت حاوی سنگ‌دانه‌های سبک مصنوعی با نام اختصاری SLA که معادل لیکای ساختمانی بررسی کردند. خصوصیات آزمایشگاهی آسفالت با افزودن درصدهای مختلفی از دانه‌های رس منبسط شده مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌های مختلفی مانند نفوذپذیری، مقاومت لغزشی و مقاومت سایشی مصالح و حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد مقاومت سایشی سنگ‌دانه‌های آسفالت با افزودن سبک دانه‌های رس منبسط شده بهبود یافته است و با انجام آزمون حساسیت رطوبتی مشخص شد که مقاومت در برابر عریان شدگی بالایی با افزودن دانه‌های رس منبسط شده به مخلوط آسفالت به وجود می‌آید، و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالت حاوی مصالح سبک دانه مصنوعی بهبود می‌یابد (Shen *et al*,2008).

لوسا و همکاران (۲۰۱۸)، با ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط شده و انجام آزمون‌های مقاومت کششی غیر مستقیم مدول سختی و بار محوری تکراری دریافتند با افزودن دانه‌های رس منبسط شده به مخلوط آسفالت مدول سفتی بالاتر و تغییرشکل شیارشدگی کمتری در مقایسه با نمونه¬های معمولی آسفالتی به وجود می‌آید. در ارزیابی اصطکاک سطحی مخلوط مورد نظر بعد از ٦ ماه اجرای لایه آسفالتی مشاهده شد که میزان اصطکاک سطحی لایه مذکور در حد بهینه قرار دارد و اصطکاک سطح مورد نظر دو برابر مورد نیاز استاندارد است. این میزان اصطکاک بوسیله جایگزینی مصالح سنگی معمولی با دانه‌های رس منبسط شده بدست آمد که نشان دهنده بهبود ایمنی سطح جاده با کاهش مسافت خط ترمز است. علاوه براین میزان صدای تولید شده ناشی از عبور ترافیک بر قطعه مورد نظر کمتر از قطعات مشابه اجرا شده با مصالح معمولی بوده است Losa *et al.*,2018). پژوهشی با عنوان استفاده از رس منبسط شده برای طرح مخلوط لایه قیری رویه با چسبندگی بالا در دانشگاه باسیلیکاتا توسط پروفسور آگوستینا چیوام و اولیتا اس انجام شد. این پژوهش به کاربرد دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در طراحی مخلوط‌های آسفالتی با هدف افزایش چسبندگی سطح روسازی انجام شد. در این مطالعه، تأثیر افزودن لیکا بر خواص عملکردی لایه‌های سطحی آسفالتی مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که لیکا می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت اصطکاکی سطح آسفالت را افزایش دهد که این موضوع بهبود ایمنی عبور و مرور و کاهش

خطر لغزش را به همراه دارد. علاوه بر این، استفاده از لیکا منجر به ایجاد لایه‌های روسازی با دوام بیشتر در برابر عوامل محیطی شده و پایداری مکانیکی آسفالت را ارتقاء می‌بخشد. این مطالعه از دیدگاه طراحی و مدیریت روسازی‌ها، راهکار مناسبی جهت بهره‌برداری بهتر از مصالح سبک‌دانه ارائه کرده است (Agostinacchio and Olita, 2004).

پژوهشگران به دلیل شرایط اقلیمی خاص در منطقه آمازون و کمبود سنگ‌دانه‌های طبیعی برای ساخت روسازی راه و همچنین هزینه بالای حمل و نقل شامل فاصله حمل بیش از ۵۰۰ کیلومتری از محل بستر رودخانه تا محل تولید آسفالت به جستجوی مصالح جایگزین برای سنگ‌دانه‌ها پرداختند، استفاده از خاک رس طبیعی به جهت وجود معادن فراوان در ایالت آمازوناس برزیل مورد آزمون قرار گرفت، پس از آسیاب خاک و مرطوب کردن آن‌ها را در دماهای مختلف ۷۸۰، ۸۵۰، ۹۵۰، ۱۰۵۰، ۱۱۵۰حراردت داده و به حالت کلیسه‌ای در آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های مصنوعی دارای مقاومت مکانیکی و پیوند بهتری نسبت به نمونه‌های طبیعی هستند. این امر به دلیل ساختار متراکم‌تر و خواص بهبود یافته سنگ‌دانه‌های مصنوعی است که موجب افزایش دوام و عملکرد روسازی می‌شود. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مصالح جایگزین می‌تواند راهکاری موثر برای کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت روسازی در مناطق با محدودیت منابع باشد (de Souza Campelo *et al*., 2019).

تحقیق دیگری نیز با عنوان "بررسی استفاده از مخلوط آسفالتی سبک وزن در روسازی انعطاف پذیر در نواحی مستعد یخبندان" در دپارتمان مهندسی عمران در دانشگاه نیوبرسویک انجام شد. خرابی یخبندان یکی از مشکلات اصلی روسازی در نواحی سرد است که روش‌های متداول کاهش آن گران‌قیمت و کم‌اثر هستند. این مطالعه به جای روش‌های معمول، استفاده از مصالح سبک وزن به عنوان لایه‌ای با هدایت حرارتی کم را پیشنهاد داد تا نفوذ یخبندان به لایه‌های زیرین روسازی کاهش یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد مخلوط سبک وزن دارای هدایت گرمایی و انعکاس گرمایی کمتر و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری نسبت به مخلوط‌های معمولی است. این ویژگی‌ها باعث افزایش عایق حرارتی روسازی و کاهش آسیب‌های ناشی از یخبندان می‌شوند. همچنین مدل‌سازی اجزاء محدود نشان داد که استفاده از لایه سطحی و اساس با مصالح سبک وزن می‌تواند نفوذ یخبندان به بستر را به طور کامل حذف کند. در نتیجه این روش علاوه بر بهبود دوام روسازی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را نیز کاهش می‌دهد. این تحقیق اهمیت بالای مصالح سبک وزن در شرایط اقلیمی سرد و سخت را تأکید می‌کند (Khan and Mrawira, 2010). عربانی و همکاران (۲۰۱۹)، به تاثیر استفاده از دانه‌های سبک وزن رس منبسط شده (لیکا) به عنوان بخشی از ریزدانه به منظور بهبود در خواص مکانیکی مخلوط آسفالت پرداختند. به این منظور از ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) به عنوان جایگزین بخش ریزدانه سنگ‌دانه‌ها استفاده شده است. نتایج آزمون‌های مقاومت در برابر تغییر شیارشدگی در دو سطح تنش مختلف نشان می‌دهد که بالاترین مقاومت در برابرتغییر شکل در نمونه‌هایی با ۱۰ درصد دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) مشاهده شده است. نتایج آزمون‌های حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که افزودن دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) به مخلوط آسفالت می‌تواند مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را افزایش دهد(Arabbani et al., 2019).

به طور کلی، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند مزایای متعددی از جمله کاهش وزن روسازی، بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، ارتقای عملکرد حرارتی و افزایش دوام در شرایط اقلیمی سخت به همراه داشته باشد. با این وجود، محدودیت‌هایی مانند افزایش مصرف قیر، نیاز به بهینه‌سازی درصد جایگزینی سنگدانه‌ها، و کمبود مطالعات میدانی در مقیاس بزرگ همچنان پابرجا است. بنابراین، خلأ پژوهشی عمده در این حوزه، انجام تحقیقات جامع‌تر در زمینه پایداری رفتار مخلوط های آسفالتی در دماهای متوسط و بالا، و عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده با دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در شرایط واقعی بهره‌برداری است.

۲-۱- تاریخچه‌ای از تولید و کاربرد دانه‌های رس منبسط شده (لیکا)

واژه «لیکا» برگرفته از عبارت انگلیسی Light Expanded Clay Aggregate (LECA) است. این مواد خام به عنوان سنگدانه‌های سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت معمول، لیکا از ته‌نشین مصالح طبیعی مانند رس، شیل و اسلیت که

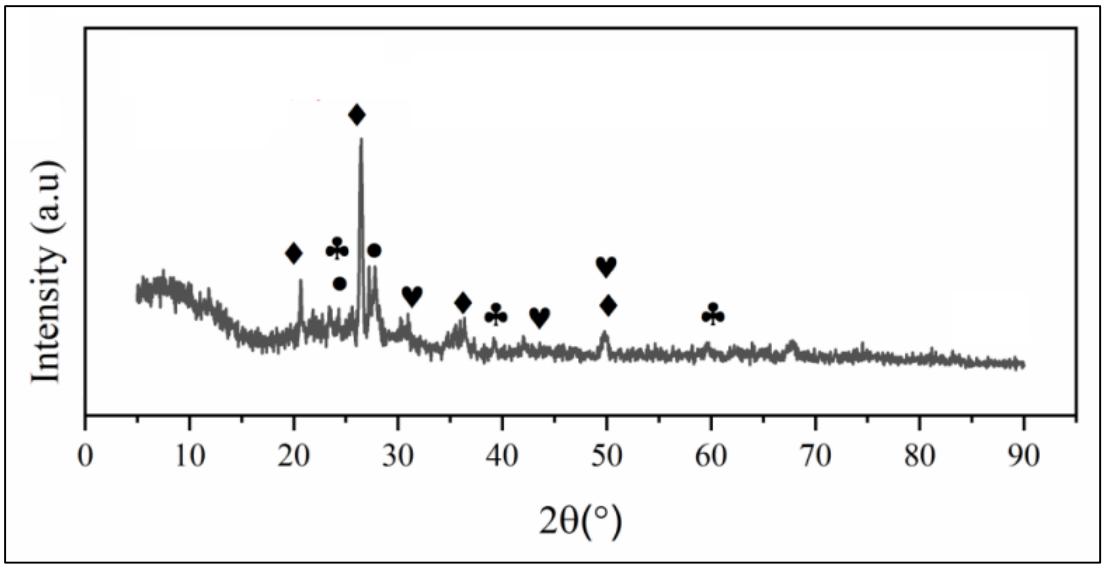
دارای درصد بالایی سیلیس هستند، تشکیل می‌شود. پیشینه استفاده از دانه‌های سبک رس منبسط شده (لیکا) به سال ۱۹۱۷ میلادی بازمی‌گردد. صنعت تولید این فرآورده‌ها در دهه ۱۹۶۰ میلادی در دانمارک پایه‌گذاری شد و در مدت کوتاهی به بسیاری از کشورهای جهان گسترش یافت. امروزه محصولات حاصل از انبساط خاک رس و شیل در بیش از ۲۰ کشور جهان با نام‌های تجاری مختلف تولید می‌شوند. برخی از این کشورها و نام‌های تجاری آن‌ها عبارتند از، دانمارک، نروژ، سوئیس، سوئد، آلمان، فنلاند، پرتغال، انگلیس و ایران با نام Leca ؛ چک، اسلواکی، لهستان و روسیه با نام Keramzite ؛ آمریکا و آفریقای جنوبی با نام Aglite؛ فرانسه با نامLaterlit؛ اسپانیا با نام Liapour. پیشینه تولید دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در ایران به احداث کارخانه لیکا در سال ۱۳۵۵ شمسی بازمی‌گردد و تولید انبوه با کمیت و کیفیت قابل توجه از سال ۱۳۶۰ شمسی آغاز شده است (Mohammadi Tehran, 2009).

۳- مشخصات فنی، تولید و ویژگی‌های دانه‌های رس منبسط شده (لیکا)

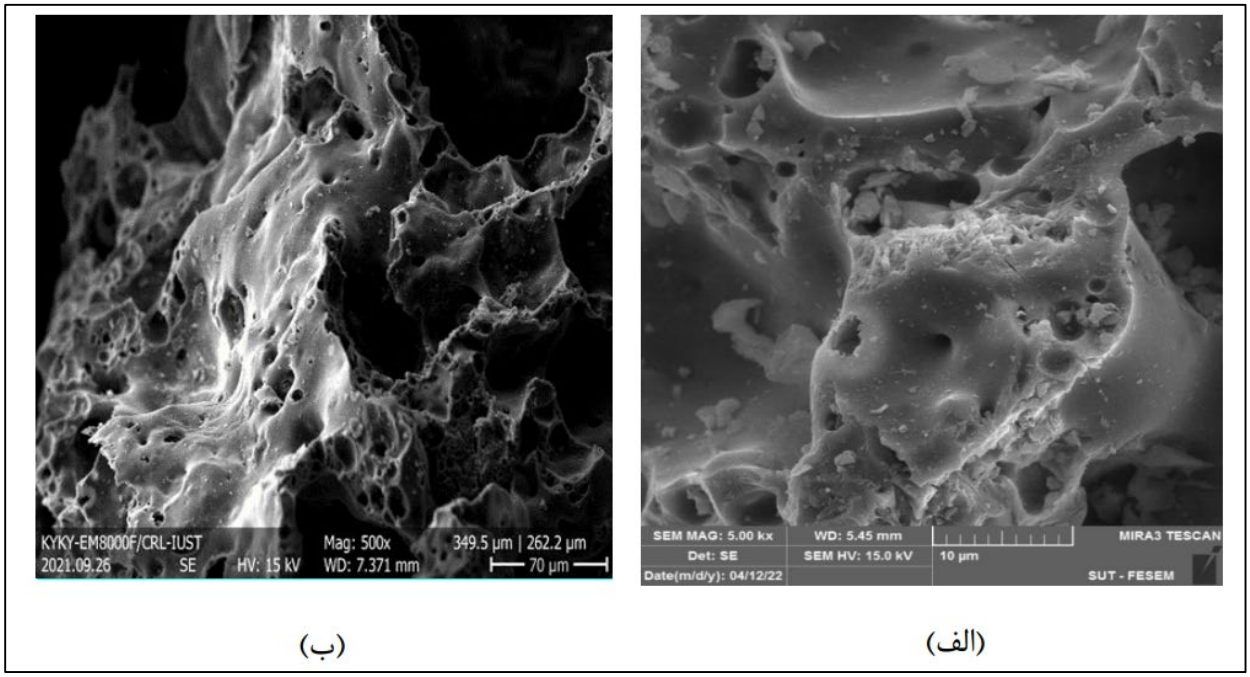
۳-۱- مشخصات فنی دانه‌های رس منبسط شده (لیکا)

سبک‌دانه‌ها به دو دسته طبیعی[۱] و مصنوعی[۲] تقسیم می‌شوند. سنگ‌دانه‌های طبیعی سبک، منشأ آتشفشانی یا رسوبی دارند. مانند سنگ‌دانه‌های پومیس[۳]، اسکریا[۴]، توف[۵] و دیاتومیت[۶]. محدودیت استفاده از این دانه‌ها اغلب به دلیل مشکلات دسترسی به منابع و مسائل حمل و نقل است. دسته دیگر، سنگ‌دانه‌های سبک مصنوعی هستند که به چهار روش تولید می‌شوند. در روش اول سنگ‌دانه‌های مصنوعی از حرارت و انبساط خاک به دست می‌آیند. در روش دوم سرباره مذاب کوره‌های آهن‌گدازی با پاشیدن مقادیر کنترل شده آب به کمک جت آبی، منبسط می‌گردد. در روش سوم از جوش‌های صنعتی حاصل از خاکستر کوره‌های زغال سنگ استفاده می‌شود. و در روش چهارم دانه‌های سبک از ترکیبات آلی مانند پلی استایرن منبسط شده تولید می‌شوند. پرلیت[۷]، رس[۸]، شیل[۹] و اسلیت[۱۰] همگی از جمله مواد اولیه‌ای هستند که به عنوان مواد جانبی صنایع برای ساخت سبک‌دانه‌های مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پرلیت، ورمیکولیت، لیکا[۱۱] (دانه‌های رس منبسط شده است)، لیارپور[۱۲]، گرانیولکس[۱۳] (اسلیت منبسط شده)، بیوتیت-ریولیت[۱۴] لیتاژ[۱۵]، پلایت[۱۶] و سرباره اسفنجی[۱۷] و نظایر آن از جمله سبک‌دانه‌های مصنوعی می‌باشند(Mohammadi Tehran, 2009). تصویر دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج XRD نمونه لیکای خام در شکل (۲) نشان داده شده است. پیک های مشاهده شده در موقعیت‌های ۲۰/۵، ۲۶/۲، ۳۷ و ۴۹/۴ درجه مربوط به کوارتز (SiO_2)، موقعیت‌های ۲۳ و ۲۷ درجه مربوط به آنورتیت ($Ca(Al_2Si_2O_8)$)، موقعیت‌های ۳۲، ۴۳ و ۵۰ درجه متناسب با فاز دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) و موقعیت های ۲۳، ۴۰ و ۶۰ مربوط به فاز کلسیت ($CaCO_3$) هستند(Pishdadi, 2010). شکل (۳) تصویر از آنالیز میکرسکوپ روبشی نشر میدانی برای بررسی مورفولوژیکی سطح لیکا نشان داده شده است که دارای ساختار متخلخل است.

شکل ۱. دانه‌های رس منبسط شونده (Shafigh *et al.*, 2018)



شکل ۲. آنالیز XRD دانه های رس منبسط شونده (لیکا) در شرایط مختلف (● فاز آنورتیت، ♦ فاز کوارتز، ♥ فاز دولومیت، ♣ فاز کلسیت) (Pishdadi, 2010)



شکل ۳. آنالیز میکرسکوپ الکترونی (الف و ب) دانه های رس منبسط شونده (لیکا) (Pishdadi, 2010)

۳-۲- روش تولید دانه‌های رس منبسط شده(لیکا)

۳-۲-۱-ماده اولیه

ماده اولیه برای تولید این سبکدانه‌ها از نوع خاصی از خاک رس که مونت موریونیت یا ایلیت نام دارد، بدست می‌آید. ماده اولیه پس از استخراج و اطیمینان از نداشتن مواد شیمیایی مثل آهک و انجام آزمون‌های انبساط پذیری از سطح و عمق دانه، جهت بررسی انبساط پذیری به واحد فرآوری کارخانه داده می‌شود.

۳-۲-۲- فرآوری اولیه

آماده سازی خاک رس را فرآوری اولیه می‌گویند، در این مرحله مقدار مشخصی از خاک رس از طریق جعبه تغذیه وارد خط تولید می‌شود و پس از عبور از دروازه مغناطیسی وارد آسیاب می‌شود و با آب مخلوط می‌شود، سپس از صفحات مشبک عبور کرده و کاملاً له می‌شود، سپس آماده ورود به آسیاب غلطکی می‌شود. در این مرحله گل رس کاملاً یکنواخت می‌شود و آماده خشک کردن می‌شود.

۳-۲-۳-خشک کردن

گل رس یکنواخت شده در این مرحله وارد خشک کن می‌شود که در ابتدا دمایی بین ۲۰۰ و در انتها به ۵۰۰ تا ٦۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این مرحله به تدریج آب خود را از دست داده و به دانه‌های ریز خشک تبدیل می‌شود.

۳-۲-٤- پخت

در این مرحله دانه‌های خشک شده وارد کوره گردان می‌شوند که دمایی این کوره‌ها تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این دما گازهای ایجاد شده طی فرآیند عملیات حرارتی به سطح دانه می‌آیند که همین باعث ایجاد تخلخل روی دانه‌ها می‌شود.

۳-۲-۵- دانه‌بندی

سبکدانه‌ها پس از طی مراحل تولید به صورت دانه‌بندی مخلوط ۰-۲۵ وارد سرند شده و به سه رده دانه‌بندی ۰-٤، ٤-۱۰ و۱۰-۲۰ میلی‌متر تفکیک می‌شوند. دانه‌های مجزا شده برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rashad, 2018؛ Shokoohi *et al.*, 2017).

ماده اولیه نوع خاصی از خاک رس پس از استخراج و اطیمینان از نداشتن مواد شیمیایی به واحد فرآوری کارخانه داده می شود. در شکل (٤) شماتیک فرآیند تولید دانه رس منبسط شده (لیکا) نشان داده شده است. در فرآینده اولیه خاک رس از طریق مخزن تغذیه وارد خط تولید می‌شود و پس از عبور از دروازه مغناطیسی وارد آسیاب می‌شود و با آب مخلوط می‌شود، سپس از صفحات مشبک عبور کرده و کاملاً له می‌شود، سپس آماده ورود به آسیاب غلطکی می‌شود. در این مرحله گل رس کاملاً یکنواخت می‌شود و آماده خشک کردن می‌شود. سپس گل رس یکنواخت شده در این مرحله وارد خشک کن می‌شود که در ابتدا دمایی بین ۲۰۰ و در انتها به ۵۰۰ تا ٦۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این مرحله به تدریج آب خود را از دست داده و به دانه‌های ریز خشک تبدیل می‌شود. در مرحله بعدی دانه‌های خشک شده وارد کوره گردان می‌شوند که دمایی این کوره ها تا ۱۲۰۰ سانتی‌گراد می‌رسد. در این دما گازهای ایجاد شده طی فرآیند عملیات حرارتی به سطح دانه می‌آیند که همین باعث ایجاد تخلخل روی دانه‌ها می‌شود. کوره‌های پخت دانه‌های رس منبسط شده(لیکا) به‌طور عمده در دو نوع طراحی می‌شوند:۱- کوره‌های دوار: در این نوع کوره‌ها، مواد اولیه با حرکت پیوسته و به‌صورت یکنواخت با چرخش درام حرارت داده می شود. ۲- کوره‌های عمودی: در این نوع کوره‌ها، مواد به صورت لایه‌ای وارد کوره می‌شوند و فرآیند پخت در ارتفاع‌های مختلف انجام می‌شود. کوره‌های پخت دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) معمولاً شامل:

۱-منابع حرارتی: مشعل‌های تولید دمای بالا در کوره به‌منظور پخت رس

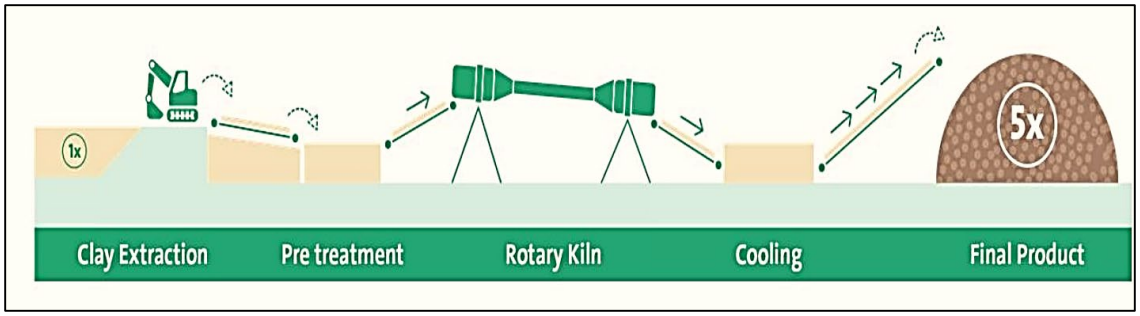
۲-سیستم تغذیه مواد اولیه: رس‌ها به‌صورت دانه‌های کوچک وارد کوره می‌شوند.

۳- منطقه پخت: در این قسمت، رس‌ها تحت دمای بالا قرار می‌گیرند و فرآیند انبساط آغاز می‌شود و دانه‌های با ساختار توخالی تبدیل می شود.

٤ - نوار نقاله‌ها: برای جابجایی رس‌ها از مرحله تغذیه تا مرحله انبساط و سپس خروج دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) از کوره

۵- سیستم تهویه: جهت خروج گازهای حاصل از پخت و کنترل دمای کوره (Rashad, 2018; Shokoohi *et al.*, 2017).

در آیین نامه *EN13055* به هر سنگ‌دانه‌ای اطلاق می‌شود که چگالی انبوهی (غیر متراکم) کمتر از ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب داشته باشد (Owens and Newman,2003).



شکل٤. شماتیک فرآیند تولید دانه رس منبسط شده (Roces *et al.*, 2019)

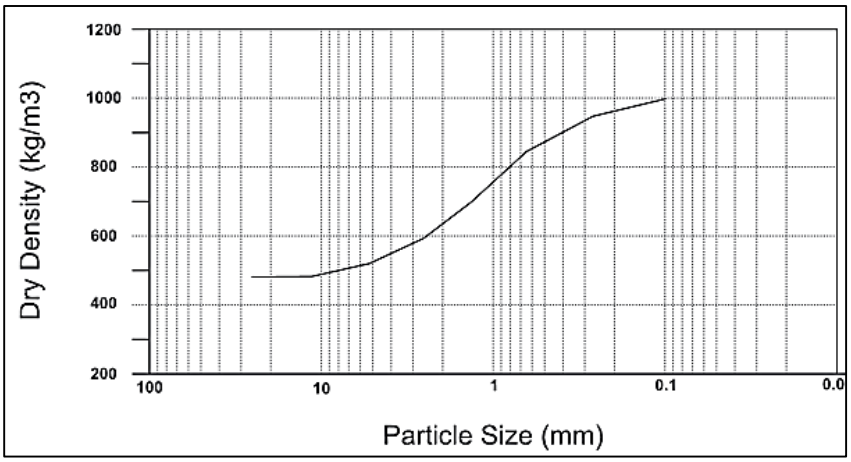
۳-۳- برخی از ویژگی‌های مهم دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا)

۳-۳-۱-وزن و چگالی

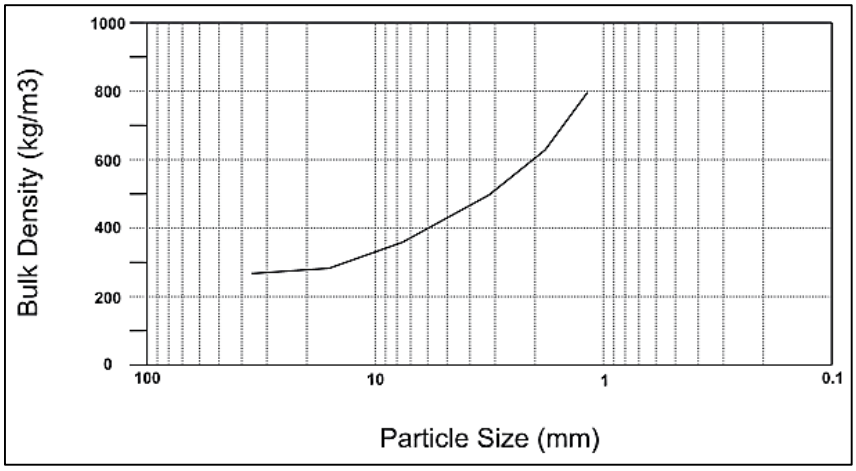
دانه رس منبسط شده (لیکا) به دلیل ماهیت تخلخل، سبک‌تر از سنگدانه‌های معمولی است، بنابراین، مشخصه اصلی آن جهت استفاده، چگالی کم آن است. کاربرد مخلوط‌آسفالت گرم با چگالی کمتر می‌تواند منجر به مزایایی به لحاظ ابعاد و وزن سازه در ابنیه‌های فنی و روسازی راه گردد(Ahmad *et al.*, 2019).

استفاده از دانه‌های رس منبسط شده در مخلوط آسفالتی روسازی‌های عرشه فولادی با کاهش وزن بار مرده روسازی پل می‌تواند منجر به بهبود وضعیت تنش وارده شده به پل شود. وزن حجمی دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) بستگی مستقیمی به شرایط تولید ماده اولیه دارد، به عنوان یک قاعده کلی وزن حجمی دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) با افزایش اندازه دانه، کاهش می‌یابد، این قاعده نتیجه منطقی پدیده انبساط حجم است. به دلیل وجود منافذ، اختلاف بین چگالی دانه خشک و اشباع و حالت انبوه (غیرمتراکم) وجود دارد، اما به دلیل لعاب و پوشش رویه دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) و منافذ درونی بسته، این میزان بسیار کمتر از پوکه‌های معدنی است. در شکل (۵) و (٦) نمودارهای وزن مخصوص خشک و ظاهری نمونه‌ای از دانه‌های رس منبسط شده برحسب اندازه دانه نشان داده شده است (Mohammadi Tehran, 2009).

وزن مخصوص مهمترین عامل شناسایی و طبقه‌بندی دانه‌های سبک است. به عنوان یک قاعده کلی وزن فضایی دانه‌های لیکا با افزایش اندازه دانه، کاهش می‌یابد. این قاعده نتیجه پدیده انبساط است. جدول (۱) وزن مخصوص دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) براساس اندازه را نشان می‌دهد.



شکل۵. وزن مخصوص خشک دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) (Mohammadi Tehran, 2009)



شکل ٦. وزن مخصوص ظاهری دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) (Mohammadi Tehran, 2009)

جدول ۱. وزن مخصوص دانه‌های لیکا (Mohammadi Tehran, 2009)

اندازه قطر دانه رس منبسط شونده (میلی‌متر)	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۰	۵۰۰
۱۰	۵۳۰
۳	۵۷۰
۱	۷٦۰
۰/٤	۹۰۰
۰/۱	۱۰۰۰

۳-۳-۲-کاهش آلودگی صوتی

آلودگی صوتی یکی از جدی ترین آلودگی‌های شهرها است که کار و زندگی عمومی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حتی باعث بروز بیماری‌های روانی و فیزیولوژیکی می‌شود. کنترل آلودگی صوتی ترافیک به یک مشکل اصلی تبدیل شده است (Chu *et al.*,2023). ناهنجاری‌های صوتی ناشی از ترافیک به اصواتی گفته می‌شوند که منبع تولید آن‌ها وسایل نقلیه موتوری سبک و سنگین استفاده کننده از راه‌ها می‌باشند که خود شامل دو بخش اصوات تولید شده از قوای محرکه خودرو نظیر صدای موتور و تمامی متعلقات آن، سیستم خروج گاز (اگزوز) و دستگاه انتقال قدرت و اصوات تولید شده از تماس چرخ و سطح راه می‌باشند. لذا ناهنجاری‌های صوتی ناشی از ترافیک به عنوان آلاینده‌های محیطی شناخته می‌شوند. در سرتاسر جهان صدای ایجاد شده توسط سیستم‌های حمل و نقلی بیشترین نقش را در آلودگی‌های صوتی دارد که در این میان آلودگی صوتی بزرگراه‌ها نقش برجسته‌ای دارد و لذا محققان به دنبال راه حل‌های کاهش صدای تولید شده بوده‌اند. یکی از اقدامات صورت گرفته نصب موانع صدا است، اما موانع صدا معمولاً بدترکیب، خطرناک و بسیار گران هستند و به همین دلیل سمت و سوی تحقیقات به طرف اصلاح نوع روسازی و یا بافت آن کشیده شد (Camomilla *et al.*,1990). ضریب جذب صوت، بخشی از انرژی صوتی است، که هنگام انعکاسی موج صدا توسط سطح مصالح صدا جذب می‌گردد. به عبارت دیگر، ضریب جذب عبارت است از نسبت انرژی جذب شده به انرژی تابشی که بین صفر تا ۱۰۰٪ تغییر می‌کند. هرچه ضریب جذب صوتی ماده‌ای بیشتر باشد، میزان افزایش صدای ناشی از انعکاسی از سطح آن کمتر خواهد بود (نشریه۲-۳۸٤). دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) به دلیل سطح متخلخل قادرند امواج صوتی ناشی از سیستم انتقال نیروی خودرو

و نیز ناشی از عبور تایر روی سطوح روسازی را به گونه‌ای جذب نمایند که تنها بخشی از آن بازتاب گردد (Mohammadi Tehran, 2009).

۳-۳-۳- حذف پدیده اسکی روی آب و افزایش اصطکاک

به طور کلی تمام آسفالت‌های رایج (سرد و گرم) با دانه‌بندی توپر دارای سطحی صاف و تقریباً غیرقابل نفوذ می‌باشند که این صاف بودن وغیرقابل نفوذ بودن در هنگام بارندگی موجب کاهش ایمنی وسایل نقلیه می‌شود. عملکرد روسازی آسفالتی به شدت تحت تأثیر عوامل آب و هوایی مانند دما و بارندگی است. در شرایط متفاوت دما و رطوبت، ویژگی‌های مصالح روسازی تغییر یافته و در نتیجه بر عملکرد روسازی تأثیر می‌گذارد. تحقیقات قابل توجهی برای مطالعه تأثیر عوامل آب و هوایی بر عملکرد روسازی انجام شده است (Zeiada *et al*, 2019). زمانی که سطح راه در معرض بارندگی قرار می‌گیرد، قشر نازکی از آب به ضخامت چند میکرون تا چند میلیمتر روی روسازی راه ایجاد می‌گردد. آب مشابه یک روان کننده عمل نموده و منجر به کاهش مقاومت لغزندگی سطح راه می‌شود. افت میزان مقاومت لغزندگی، شرایط خطرناکی را برای وسایل نقلیه ایجاد می‌کند. از طرفی، بافت درشت روسازی به عنوان مهمترین عامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی، نمایانگر قابلیت زهکشی در مقیاس ریزسطح روسازی است؛ به گونه‌ای که برآمدگی‌های موجود روی سطح راه و فاصله بین سنگ‌دانه‌های درشت، موجب کاهش ضخامت قشر نازک آب تشکیل شده بین روسازی و چرخ می‌شود. از طرف دیگر، ترافیک عبوری روی راه، بافت درشت روسازی را به تدریج کاهش داده و در سرعت‌های زیاد و بارش‌های شدید، آج لاستیک به تنهایی توانایی پراکندگی آب جمع شده بین لاستیک و روسازی را ندارد. همین امر، موجب می‌شود لایه‌ای از آب بین لاستیک و روسازی قرار گیرد و تماس بین لاستیک و روسازی را از بین ببرد و چرخ روی فیلمی از آب سُر بخورد. این پدیده را هیدروپلنینگ نامگذاری می‌کنند و آن را متأثر از عوامل متعددی مرتبط با چرخ خودرو، سیال و سطح روسازی می‌دانند .در هنگام وقوع این پدیده، کنترل فرمان خودرو و توانایی چرخ‌ها در ترمز کردن و یا حرکت در پیچ‌ها، به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و احتمال وقوع تصادف به طور قابل توجهی بالا می‌رود (Dehnad, 2021). آزمایش اندازه گیری ضریب اصطکاک با دستگاه آونگ انگلیسی انجام می گیرد. نتایج میانگین نشانه اصطکاک (BPN) در جدول (۲) آمده است. مقایسه نتایج مسافت ترمزگیری در شرایط مرطوب نمونه‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) و آسفالت معمولی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج آزمون آونگ انگلیسی نمونه‌های آسفالت حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) و آسفالت معمولی(Mohammadi Tehran, 2009)

تعداد تکرار بار	BPN نمونه آسفالتی حاوی لیکا	BPN نمونه آسفالتی معمولی
۵۰۰۰	۷۰	۷۱
۱۰۰۰۰	۷۲	۷۲
۵۰۰۰۰	٦۸	۷۳
۱۰۰۰۰۰	۷۰	۷۰
۳۰۰۰۰۰	۷۲	۵۷
۵۰۰۰۰۰	٦۳	۵٤

جدول ۳. مقایسه نتایج مسافت ترمزگیری نمونه‌های آسفالت حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) و آسفالت معمولی (Mohammadi Tehran, 2009).

سرعت (km/hr)	نمونه آسفالتی حاوی لیکا(ml)	نمونه آسفالتی معمولی (ml)
۵۰	۱۲/٤۵	۱٤/۹۵
۸۰	۳٤/۷٦	٤۵/۸٦

۳-۳-٤- جذب آب

خواص جذب آب دانه‌های رس منبسط شده به دلیل وجود تخلخل روی سطوح دارای اهمیت بالای است. مقادیر جذب آب این دانه‌ها بین ۱۰ تا ۵۰ درصد است که بستگی به روش تولید، خواص ماده اولیه، بافت سطح و اندازه دانه‌های رس منبسط شده تغییر می‌کند. اگر بافت سطح شیشه‌ای باشد، جذب آب آن کاهش می‌یابد. با افزایش اندازه دانه‌ها و کاهش چگالی، ظرفیت جذب آب نیز افزایش می‌یابد (Vijayalakshmi & Ramanagopal, 2018). روسازی بر روی عرشه پل یک لایه ساختاری مهم است که از عرشه پل در برابر رطوبت و آب باران محافظت می‌کند و کیفیت خدمات و مقاومت در برابر لغزش را فراهم می‌کند. در این صورت باید اقدامات خاصی برای حفاظت از روسازی انجام شود که در این میان استفاده از مصالح جدید مانند دانه‌های رس منبسط شده در روسازی راه می‌تواند مؤثر باشد.

۳-۳-۵- کاهش آسیب یخ زدگی

هنگامی که درجه حرارت هوا برای مدت دو تا سه روز در زیر صفر درجه سانتی‌گراد باقی بماند، آب موجود در بدنه خاک یخ می‌زند. خاک سبب تورم و درنهایت ترک خوردن و ناهمواری روسازی می‌شود. لنزهای یخ به موازات سطح زمین تشکیل می‌شوند و میزان تورم اغلب برابر با ضخامت مجموع لنزهای یخ در زیر بستر و تا عمق نفوذ یخبندان است. یخ‌زدگی زیراساس در شرایط ناهمگونی زیراساس، تغییرات شرایط محیطی و جریان آب، سبب تورم ناهمگن و ترک می‌شود. با ذوب شدن یخ‌ها، آب حاصل از ذوب یخ سبب کاهش ظرفیت باربری زیراساس و بدنه راه می‌گردد و باعث آسیب تحت اثر بار آمد و شد می‌شود دانه‌های رس منبسط شده چرخه‌های متوالی یخبندان را به راحتی می‌توانند تحمل کنند. دانه‌های رس منبسط شده آب انتقال یافته به روش موییننگی را حذف می‌کند و با زهکشی مناسب بدنه راه را از ورود آب محافظت می‌کند. همچنین ویژگی رسانایی حرارتی کم دانه‌های رس منبسط شده سبب کنترل نفوذ یخبندان در عمق می‌شود (Mohammadi Tehran, 2009).

۳-۳-٦-کاهش انعکاس نور

استفاده‌کنندگان از وسایل نقلیه موتوری باید به راه پیش خود توجه کنند. در سرعت‌های نرمال راه باید از فاصله قابل توجه رؤیت شود. از آنجائی که ارتفاع چشم انسان درون اتومبیل حدود ۱/۲متر بالاتر از سطح جاده است، بنابراین راننده وسیله نقلیه، جاده را با زاویه حدود ۱ درجه یا کمتر می‌نگرد. تحت چنین زاویه‌های بیشتر سطوح، نور را به شدت منعکس می‌کنند و وقتی که سطح صاف باشد معمولاً به صورت آینه به نظر می‌رسد. این حالتی است که در مورد سطوح پوشیده با آب حادث می‌شود، آب حاصل از یک باران کوچک روی سطح آسفالت سنتی باعث به وجود آمدن چنین حالتی می‌گردد.

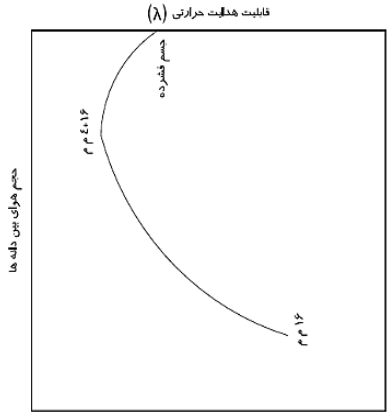
انعکاس نور هم در روز مهم است و هم در تاریکی، در روز یک سطح افقی با انعکاس آینه‌ای آسمان را منعکس می‌کند. حتی آسمان ابری به طور نسبی بسیار روشن است، به طوری که سطح راه تقریباً به روشنی آسمان خواهد بود. علاوه بر آن در نور انعکاسی تمام خصوصیات سطح راه به خصوص خط‌کشی‌ها محو شده و به نظر غیر قابل رویت می‌گردند.

در مورد راه‌های دارای روشنایی شب‌ها نیز وضع به همین صورت است (Nicholls, 1998).

۳-۳-۷-رسانایی حرارت

انتقال انرژی حرارتی از جایی به جای دیگر به سه روش رسانایی، همرفتی و تشعشع صورت می‌گیرد. در روش رسانایی، حرارت از طریق جسم انتقال می‌یابد. با استفاده از مواد نارسانا یا دارای رسانایی ناچیز، میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد. برای انتقال حرارت به روش همرفتی، باید هوا امکان جریان یافتن داشته باشد. دراین صورت هوا با گرم شدن منبسط می‌گردد و جریان پیدا می‌کند و با تماس با اجسام سرد، حرارت را انتقال می‌دهد. محدود کردن فضاهای دارای هوا به ابعاد کوچکتر از ۲۵ میلی‌متر (با تعبیه لایه‌های مناسب) انتقال حرارت را در این روش کاهش می‌دهد و سرانجام تشعشع روشی برای انتقال حرارت اجسام تحت تأثیر تابش است. کاربرد اجسامی که بتوانند سهم بیشتری از انرژی را بازتاب دهند، یک روش مناسب برای جلوگیری از این حالت انتقال حرارت است.

برای ارزیابی کمی میزان رسانایی یا مقاومت حرارتی اجسام از ضرایب متداولی استفاده می‌شود. مقدار توان حرارتی از دست رفته بر حسب وات از یک متر مربع سطح و یک متر ضخامت مصالح با اختلاف یک درجه سانتی‌گراد بین دو سمت آن را ضریب رسانایی حرارتی می‌نامند. مقاومت حرارتی عکس این ضریب است. تخلخل بسته درونی بالای دانه‌های رس منبسط شده سبب قابلیت رسانایی حرارتی ناچیزی این دانه‌ها می‌گردد مقادیر رسانایی حرارتی برای دانه‌های بزرگتر، کاهش می‌یابد. همچنین در یک توده انبوه از مصالح، میزان قابلیت رسانایی حرارتی به تراکم توده بستگی پیدا می‌کند به این ترتیب که برای انبوهی از دانه‌های درشت، میزان تخلخل و هوای بین دانه‌ها زیاد می‌شود و جریان همرفتی سبب افزایش رسانایی حرارتی می‌گردد. در این حال انتقال حرارت از طریق تشعشع ناچیز است. قابلیت رسانایی حرارتی با کاهش تخلخل در شرایط فوق کاهش می‌یابد، تا زمانی که به دلیل تراکم بیشتر دانه‌ها و افزایش تماس آن‌ها، رسانایی حرارتی مجداداً افزایش یابد. بنابراین کمترین مقدار رسانایی حرارتی به ازای مقدار تراکم معینی قابل دستیابی است. این مفهوم در نمودار شکل (۷) دیده می‌شود (Mohammadi Tehran, 2009).



شکل ۷. نمودار اثر تراکم بر رسانایی حرارتی دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) (Mohammadi Tehran, 2009)

۳-۳-۸- ویژگی شیمیایی

آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد PH دانه‌های رس منبسط شده در حدود ۷/۲ است و از نظر شیمیایی خنثی هستند (Hubertova and Hela,2013). در جدول شماره (٤) آنالیز شیمیایی دانه‌های رس منبسط شده نشان داده شده است.

جدول ٤. آنالیز شیمیایی دانه رس منبسط شده (لیکا) (Mohammadi Tehran, 2009)

SiO_2	٦٦/٠٥	MgO	١/٩٩	SiO_3	٠/٠٣
AL_2O_3	١٦/٥٧	TiO_2	٠/٧٨	Na_2O	٠/٦٩
Fe_2O_3	٧/١٠	P_2O_5	٠/٢١	K_2O	٢/٦٩
CaO	٢/٤٦	MnO	٠/٠٩	مجموع	٩٨/٦٦

۳-۳-۹- نقش دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در حفاظت از محیط زیست

دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) به دلیل دارا بودن ویژگی‌های مهمی چون تخلخل، عایق حرارتی می‌توانند جایگزین مناسبی برای بسیاری از مصالح معدنی مورد استفاده در حفاظت محیط زیست باشد. یک نکته بسیار مهم در کاربرد مصالح برای حفاظت از محیط زیست، عاری بودن آن‌ها از مواد مضر است. به بیان دیگر لازم است تا حد امکان از موادی که سازگار محیط زیست هستند و به راحتی در طبیعت جذب می‌شوند و یا حداقل اثر آلایندگی را داشته باشند. دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) به دلیل دوام و پایداری قابل توجه در برابر مواد شیمیایی و PH نزدیک به۷/۲، هیچگونه اثر مخربی بر طبیعت ندارد. از سوی دیگر ماده اولیه تولید این دانه‌ها (رس) یک ماده کاملاً طبیعی و سازگار محیط زیست است. با توجه به اینکه هیچ ماده افزودنی دیگری (به جزء

هیدروکربورها و موادآلی) در تولید آن به کار نمی‌رود، می‌توان بیان داشت که فرآیند تولید کمترین اثر مخرب را بر محیط زیست دارد و فرآورده نهایی نیز سازگار با طبیعت است.

٤- کاربرد دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در روسازی و نتایج آزمایشگاهی

٤-١- بررسی نتایج استفاده از دانه‌های رس منبسط شده (لیکا)

مطالعات انجام‌شده در زمینه استفاده از دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان بر اساس جنبه‌های مختلف عملکردی و کاربردی به چند دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد. نخست، دسته‌ای از پژوهش‌ها به تاثیر دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تمرکز داشته‌اند. این دسته از تحقیقات عمدتاً به بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی، و خستگی و استحکام کششی غیرمستقیم پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های معمولی با دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت مکانیکی مخلوط را بهبود بخشد (de Souza Campelo, 2008; Arabbani et al., 2019).

به طور خاص، استفاده بهینه از درصد جایگزینی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) (حدود ۲۵ درصد) جایگزین درشت‌دانه و اصلاح با نانواکسیدآلومینیوم موجب بهبود رفتار خستگی و شیارشدگی می‌شود (Tahmouresi *et al*., 2025).

دسته دوم پژوهش‌ها به اثرات عایق حرارتی و عملکرد روسازی در شرایط اقلیمی خاص اختصاص یافته است. در این مطالعات، نقش دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) به عنوان یک ماده سبک و با ظرفیت گرمایی ویژه بالا که می‌تواند هدایت حرارتی مخلوط آسفالتی را کاهش دهد. تحقیق انجام شده در دانشگاه نیوبرسویک نشان داد که استفاده از مخلوط آسفالتی سبک وزن حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) به عنوان لایه سطحی و اساس می‌تواند نفوذ یخبندان به لایه‌های زیرین روسازی را به طور چشمگیری کاهش دهد و در نتیجه عمر مفید روسازی را افزایش دهد. این ویژگی حرارتی باعث کاهش نیاز به تعمیرات پرهزینه ناشی از خرابی‌های مرتبط با یخبندان می‌شود (Khan & Mrawira, 2010).

در نهایت، دسته سوم مطالعات به بررسی جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از لیکا پرداخته‌اند. تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های طبیعی با دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) نه تنها به کاهش مصرف منابع طبیعی کمک می‌کند بلکه به دلیل وزن کمتر، هزینه‌های حمل و نقل و انرژی مصرفی در تولید روسازی را کاهش می‌دهد (Agostinacchio & Olita, 2004; de Souza Campelo *et al*., 2019) با این حال، این مزایا همراه با چالش‌هایی همچون افزایش مصرف قیر و نیاز به تنظیم دقیق طرح مخلوط برای حفظ کیفیت مکانیکی همراه است. علاوه بر این دسته‌بندی‌ها، تفاوت در روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های انجام شده نیز در تحلیل موضوع نقش مهمی دارد. مطالعات از آزمون‌های مختلفی مانند آزمون مقاومت سایشی، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، و مدل‌سازی حرارتی بهره برده‌اند که نتایج متنوعی ارائه داده‌اند و نیاز به استانداردسازی روش‌ها را نشان می‌دهد.

در مجموع، بررسی و تحلیل دسته‌بندی شده تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی مزایای فراوانی در بهبود عملکرد مکانیکی، افزایش دوام و کاهش اثرات اقلیمی مخرب دارد. با این حال، بهینه‌سازی طرح مخلوط و انجام مطالعات میدانی گسترده‌تر برای ارزیابی عملکرد بلندمدت این مصالح ضروری است.

٤-٢- مقایسه روش‌ها و تکنیک‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در مطالعات مرتبط با استفاده از دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی، مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی مختلف به منظور ارزیابی خواص مکانیکی، حرارتی و دوام این مخلوط‌ها به کار گرفته شده است. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند که در این بخش به مقایسه آنها پرداخته می‌شود.

آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم

این آزمون یکی از روش‌های کلیدی برای سنجش مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی است و به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی تاثیر

دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در بهبود مقاومت مخلوط‌ها آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (Losa *et al.*, 2018). با این حال، این آزمون تنها رفتار کوتاه‌مدت مخلوط را می‌سنجد و نمی‌تواند به‌طور کامل پاسخ خستگی در برابر بارگذاری‌های تکراری را شبیه‌سازی کند.

آزمون استقامت مارشال

یکی دیگر از آزمون‌های متداول برای ارزیابی مقاومت مکانیکی و ثبات مخلوط‌های آسفالتی است که در تحقیقات مختلف به کار رفته است. این آزمون به دلیل سهولت اجرا و قابلیت تکرار بالا، برای تعیین بهینه درصد لیکا در مخلوط‌ها بسیار کاربردی است. اما محدودیت اصلی آن در عدم توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار مخلوط در شرایط دمایی و بارگذاری متفاوت است (Agostinacchio and Olita, 2004).

آزمون حساسیت رطوبتی

برای ارزیابی پایداری مخلوط‌های آسفالتی در برابر نفوذ رطوبت، آزمون‌هایی مانند تست مقاومت کششی پس از اشباع (TSR) انجام می‌شود. این آزمون‌ها نشان داده‌اند که استفاده از دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) می‌تواند مقاومت مخلوط در برابر آسیب‌های رطوبتی را افزایش دهد (Arabbani ;de Souza Campelo, 2008 et al., 2019). با این وجود، شرایط آزمایشگاهی ممکن است به طور کامل رفتار واقعی مخلوط در شرایط محیطی متغیر را شبیه‌سازی نکند.

آزمون‌های مقاومت سایشی و لغزش

برای ارزیابی عملکرد سطحی مخلوط‌های آسفالتی و بهبود ایمنی رانندگی به کار می‌روند. مطالعه ازاین آزمون‌ها برای اثبات افزایش اصطکاک سطحی مخلوط‌های حاوی دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) استفاده کرده است. مزیت این روش‌ها، ارائه داده‌های مستقیم درباره کیفیت سطح جاده است، اما محدودیت آنها در نیاز به تجهیزات تخصصی و عدم ارزیابی خواص ساختاری مخلوط است. (Losa *et al.* 2018).

آزمون‌های حرارتی و مدل‌سازی اجزاء محدود

برای بررسی تاثیر دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) بر رفتار حرارتی روسازی، مطالعاتی مانند تحقیق دانشگاه نیوبرسویک از آزمون‌های هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی و انعکاس گرمایی استفاده کرده‌اند. همچنین، مدل‌سازی اجزاء محدود برای شبیه‌سازی نفوذ یخبندان به کار رفته است. این روش‌ها قابلیت پیش‌بینی اثرات حرارتی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) را به خوبی نشان می‌دهند اما نیازمند داده‌های دقیق و پیچیده برای مدل‌سازی هستند و ممکن است از نظر اجرایی محدودیت‌هایی داشته باشند (Khan and Mrawira, 2010).

۵- نتیجه‌گیری

۵-۱- تحلیل عملکرد استفاده از دانه‌های رس منبسط شده در روسازی

تحلیل عملکرد دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی نشان‌دهنده تاثیرات مثبت و متعددی بر بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و دوام روسازی‌ها است. از منظر مکانیکی، مطالعات متعددی گزارش داده‌اند که افزودن لیکا به عنوان سبک‌دانه در درصدهای بهینه، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک و شیارشدگی بهبود می‌بخشد. برای مثال، پژوهش Der Shen (۲۰۰۸) نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) مقاومت سایشی بالاتری داشته و حساسیت رطوبتی آنها کاهش یافته است، که این امر باعث افزایش دوام و پایداری روسازی در شرایط آب و هوایی مختلف می‌شود. همچنین، عربانی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که استفاده از ۱۰ تا ۲۰ درصد لیکا در بخش ریزدانه مخلوط آسفالتی، منجر به افزایش چشمگیر مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش آسیب‌های ناشی از رطوبت گردیده است.

از جنبه عایق حرارتی، دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) به دلیل ساختار متخلخل و ظرفیت گرمایی ویژه بالا، نقش مهمی در بهبود عملکرد روسازی در شرایط اقلیمی سرد و مستعد یخبندان دارد. تحقیق دانشگاه نیوبرسویک (Khan & Mrawira, 2010) با تاکید بر ویژگی‌های عایق حرارتی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی سبک وزن می‌توانند نفوذ یخبندان

به لایه‌های زیرین روسازی را به طور قابل توجهی کاهش داده و بدین ترتیب خرابی‌های ناشی از یخبندان را به حداقل برسانند. این ویژگی نه تنها دوام روسازی را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های تعمیر و نگهداری ناشی از خرابی‌های آب و هوایی را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین، ظرفیت گرمایی بالاتر دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) موجب حفظ بهتر حرارت در روسازی و کاهش تنش‌های حرارتی می‌شود.

از منظر ایمنی و عملکرد سطحی، استفاده از دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) منجر به افزایش اصطکاک سطحی و کاهش صدای تولید شده در اثر عبور ترافیک شده است. مطالعه Losa *et al.*(2018) نشان داد که لایه‌های آسفالتی حاوی لیکا دارای اصطکاک سطحی دو برابر استاندارد بوده و سطح جاده را برای رانندگان ایمن‌تر می‌کند. همچنین کاهش صدای ترافیک در این لایه‌ها، مزیتی قابل توجه برای کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری و پرتردد به شمار می‌رود.

در زمینه زیست‌محیطی و اقتصادی، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های طبیعی با دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) باعث کاهش استخراج مصالح طبیعی و کاهش مصرف انرژی مرتبط با حمل‌ونقل شده است. تحقیقات مختلف (Agostinacchio & Olita, 2004; de Souza Campelo *et al.,* 2019). نشان داده‌اند که این جایگزینی، علاوه بر مزایای فنی، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی داشته و هزینه‌های تولید روسازی را کاهش می‌دهد. با این حال، نیاز به طرح دقیق اختلاط مخلوط‌های آسفالتی برای کنترل میزان مصرف قیر و حفظ کیفیت نهایی روسازی دارد.

در مجموع، نتایج مهم پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بهره‌گیری از دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند دوام و عملکرد عایق حرارتی روسازی‌ها را بهبود بخشد، سطح ایمنی را افزایش دهد و هزینه‌های زیست محیطی و اقتصادی با در نظر گرفتن عمر خدمت‌دهی روسازی، کاهش دهد. با این حال، بهینه‌سازی میزان جایگزینی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) و انجام مطالعات میدانی گسترده‌تر برای تایید این نتایج در شرایط واقعی از اهمیت بالایی برخوردار است.

۵-۲- جمع بندی و شناسایی نقاط ضعف و قوت بکارگیری دانه های رس منبسط شونده (لیکا)

استفاده از دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) در مخلوط‌های آسفالتی دارای نقاط قوت قابل توجهی است که در مطالعات مختلف به آن اشاره شده است. از جمله مهم‌ترین مزایای این مصالح می‌توان به کاهش وزن نهایی روسازی اشاره کرد که منجر به کاهش بار وارد بر زیرساخت‌ها می‌شود. همچنین، دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت در برابر شیارشدگی و افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی ایجاد می‌کند (Arabbani et al., 2019). ویژگی‌های حرارتی مطلوب این دانه‌ها، به ویژه در مناطق سردسیر، باعث کاهش نفوذ یخبندان به لایه‌های زیرین روسازی شده و از خرابی‌های زودرس روسازی جلوگیری می‌کند (Khan & Mrawira, 2010). علاوه بر این، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های طبیعی با لیکا به حفظ منابع طبیعی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل کمک شایانی می‌کند (de Souza Campelo *et al.,* 2019). مطالعه اخیر نیز نشان داده است که بهینه‌سازی درصد جایگزینی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) و کنترل دقیق پارامترهای اختلاط می‌تواند عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی را به طور چشمگیری بهبود بخشد و اثرات جانبی افزایش مصرف قیر را کاهش دهد (Tahmouresi *et al*., 2025).

با وجود این مزایا، محدودیت‌هایی نیز در کاربرد این مصالح وجود دارد که باید به آنها توجه شود. نخست، افزایش مصرف قیر در مخلوط‌های حاوی دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) ، به دلیل خاصیت جذب بالای این دانه‌ها، می‌تواند هزینه‌های نهایی را افزایش دهد و نیازمند بهینه‌سازی درصد جایگزینی باشد (Agostinacchio & Olita, 2004). همچنین، مطالعات میدانی گسترده و بلندمدت محدود بوده و بسیاری از نتایج به آزمایش‌های آزمایشگاهی و مقیاس‌های کوچک محدود شده‌اند، که ممکن است تمام اثرات محیطی و بارگذاری واقعی را منعکس نکنند (Sakthivel *et al*., 2024). از سوی دیگر، مقاومت در برابر خستگی و رفتار مخلوط‌ها در دماهای متوسط و شرایط بهره‌برداری متنوع هنوز نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. مطالعه طهمورسی و همکاران در سال۲۰۲۵ نیز بر لزوم انجام تحقیقات میدانی

طولانی‌مدت و بررسی‌های جامع‌تر رفتار خستگی تأکید دارد (Tahmouresi *et al*., 2025).

در نهایت، فرآیند تولید و کیفیت لیکای مورد استفاده نیز می‌تواند بر عملکرد نهایی مخلوط تأثیرگذار باشد که این امر نیازمند استانداردسازی بیشتر است (de Souza Campelo *et al.,* 2019).

مطالعات محدود اما کاربردی در زمینه استفاده از دانه‌های رس منبسط شده در مخلوط‌های آسفالت نشان‌دهنده تأثیر مثبت این ماده بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی روسازی‌ها است، اعم نتایج بررسی تحقیقات نشان داد:

-استفاده از دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه باعث کاهش نسبی مقاومت مارشال می‌شود، اما مقادیر به‌دست‌آمده همچنان در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار دارند. همچنین، افزودن قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم موجب جبران و حتی بهبود این کاهش مقاومت شده است. افزودن لیکا به‌طور کلی باعث افزایش تغییرشکل‌های خزشی در دماهای بالا می‌شود، اما در حضور نانو افزودنی‌ها، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی افزایش پیدا می‌کند

– آزمون‌های حساسیت رطوبتی نشان دادند که افزودن دانه‌های رس منبسط شده به مخلوط آسفالت موجب افزایش مقاومت در برابر عریان شدگی می‌شود که این موضوع می‌تواند عملکرد روسازی را در شرایط محیطی مرطوب بهبود بخشد. همچنین بیشترین مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌هایی با ۱۰ درصد دانه‌های رس منبسط شده مشاهده شد.

– با جایگزینی مصالح سنگی معمولی با دانه‌های رس منبسط شده، بهبود ایمنی سطح جاده گزارش شد که این بهبود ناشی از افزایش میزان اصطکاک و کاهش مسافت خط ترمز است. علاوه بر این، کاهش صدای تولید شده در قطعات روسازی حاوی این مصالح نسبت به مصالح معمولی نشان‌دهنده اثرات مثبت زیست‌محیطی و کاهش آلودگی صوتی است. نتایج پژوهشی دیگر، علاوه بر بهبود ویژگی‌های سطحی و مکانیکی، کاهش مصرف مصالح طبیعی را نیز از مزایای استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک رس منبسط شده (لیکا) عنوان کرده است.

– مخلوط‌های آسفالت ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های مصنوعی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی پیوند بهتری بین اجزای خود دارند که این امر می‌تواند منجر به بهبود عملکرد روسازی شود. به کارگیری لایه‌های سبک وزن آسفالتی در روسازی‌ها به عنوان راهکاری مؤثر جهت حذف نفوذ یخبندان در بستر معرفی شده است، که می‌تواند نقش مهمی در افزایش طول عمر روسازی داشته باشد. جایگزینی سنگ‌دانه درشت با لیکا و استفاده همزمان از نانواکسیدآلومینیوم، حاکی از بهبود چشمگیر مقاومت مکانیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده بوده است.

ترکیب دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) با فناوری نانو می‌تواند راهکاری نوآورانه برای افزایش کارایی آسفالت، به‌ویژه در شرایط دمایی شدید باشد (Tahmouresi et al., 2025).

در مجموع، نتایج مطالعات بیانگر آن است که استفاده از دانه‌های رس منبسط شده و مصالح سبک وزن می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی، ایمنی و عملکرد روسازی‌ها را بهبود دهد. همچنین به‌کارگیری دانه‌های رس منبسط شونده (لیکا) در ترکیب با فناوری‌های نوین، از جمله اصلاح با نانوذرات، می‌تواند بهبود قابل ملاحظه‌ای در رفتار حرارتی و مکانیکی آسفالت در دماهای بالا و متوسط ایجاد کند. با این حال، تفاوت‌هایی در درصد بهینه استفاده و نوع مصالح به کار رفته مشاهده می‌شود که نیازمند بررسی‌های بیشتر و آزمایش‌های میدانی در شرایط محیطی مختلف است. تحقیق حاضر با هدف بررسی و بهینه‌سازی درصد دانه‌های رس منبسط شده در مخلوط آسفالت، در راستای تکمیل مطالعات پیشین و رفع برخی از محدودیت‌های آنها انجام شده است.

٦-پی‌نوشت‌ها

1.Natural
2.Artificial
3.Pumice
4.Scoria
5.Tuff
6.Diatomite
7.Clay
8.Shale
9.Slate
10. LECA
11. Liapor
12. Granulex (Lightweight Expanded Slate Aggregate)
13. Biotite-Rhyolite
14. Lytag
15. Pellite
16. Foamed Slag
17. Foamed Slag

۷- مراجع

-Agostinacchio, M., & Olita, S. (2004, October). Use of expanded clay for the mix design of high-grip bituminous wearing courses. In Proc., SIIV 2004, *2nd International Congress: New Technologies and Modeling Tools for Roads Applications to Design and Management.*

-Ahmad, M. R., Chen, B., & Farasat Ali Shah, S. (2019). Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials,* 220, 253–266. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.198**

-Amouzadeh Omrani, M., Hassan Nezhad, A., & Shahbazi, V. (2022). Investigating the possibility of using recycled asphalt pavement (RAP) and steel slag as a substitute for part of the materials in roller compacted concrete (RCC) pavements. *Journal of Concrete Structures and Materials,* 7(1), 5–22.

-Amouzadeh Omrani, M., Izadi, A., & Jafarzadeh, F. (2023). Evaluation of mechanical and physical surface properties of polymer modified porous asphalt containing rubber powder. *Quarterly Journal of Transportation Engineering,* 15(1), 3183–3201.

-Arabbani, M., Jafari, H., & Hamedi, G. (2015). Investigation of the effect of using fine LECA on the mechanical properties of porous asphalt mixtures. *7th Iranian Bitumen and Asphalt Conference,* Tehran, Iran.

-Babagoli, R. (2022). Evaluation of the medium- and high-temperature behavior of bitumen modified by ethylene–vinyl acetate–montmorillonite nanocomposite. *Road Journal,* 30(113), 277–290. **doi.org/10.22034/road.2022.159686**

-Babagoli, R., & Hosseinpour-Asgar, A. (2023). Investigation of the performance properties of bitumen and asphalt mixtures modified with polyphosphoric acid. *Road Journal,* 31(114), 291–300. **doi.org/10.22034/road.2023.165155**

-Camomilla, G., Malgarini, M., & Gervasio, S. (1990). Sound absorption and winter performance of porous asphalt pavement. *Transportation Research Record,* 1265, 1–8.

-Chu, X., Thom, N., Dawson, A., Qin, L., & Chen, H. (2023). Drainage effects on shear behaviour and stiffness of subgrade soils and pavement drainage implications. *Construction and Building Materials,* 389, 131697. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131697**

-de Souza Campelo, N., da Silva Campos, A. M. L., & Aragão, A. F. (2019). Comparative analysis of asphalt concrete mixtures employing pebbles and synthetic coarse aggregate of calcined clay in the Amazon region. *International Journal of Pavement Engineering,* 20(5), 507–518. **doi.org/10.1080/10298436.2017.1366730**

-Dehnad, S. M. H. (2021). Investigation of hydroplaning occurrence on pavement surface by introducing a new laboratory device. *Transportation Infrastructure Engineering,* 7(4), 99–115. **doi.org/10.22075/jtie.2021.22402.1505**

-Hubertová, M., & Hela, R. (2013). Durability of lightweight expanded clay aggregate concrete. *Procedia Engineering,* 65, 2-6.

-Khan, A., & Mrawira, D. (2010). Investigation of the use of lightweight aggregate hot-mixed asphalt in flexible pavements in frost susceptible areas. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 22(2), 171–178. **doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000052**

-Khan, S. A., Hussain, F., Khushnood, R. A., Amjad, H., & Ahmad, F. (2024). Feasibility study of expanded clay aggregate lightweight concrete for nonstructural applications. *Advances in Civil Engineering.* 8263261 **doi.org/10.1155/2024/8263261**

-Losa, M., Mortini, P., Barzaghi, R., Ribotto, P., Terreni, M. R., Marzoli, S. B., & Giovanelli, M. (2008). Mechanical and performance-related properties of asphalt mixes containing expanded clay aggregate. *Transportation*

-Shen, D., & Wu, C. M. (2008). Performance evaluation of porous asphalt with granulated synthetic lightweight aggregate. *Construction and Building Materials,* 22(5), 902–910.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.008
-Shokoohi, R., Samadi, M. T., Samarghandi, M. R., Ahmadian, M., Karimaian, K., & Poormohammadi, A. (2017). Comparing the performance of granular coral limestone and Leca in adsorbing Acid Cyanine 5R from aqueous solution. *Saudi Journal of Biological Sciences,* 24(4), 749-759.
doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.04.008
-Tahmouresi, G., Amouzadeh Omrani, M., Divandari, H., & Seyedkazemi, A. (2025). Experimental investigation of the mechanical properties of asphalt mixtures containing lightweight expanded clay aggregate replacing coarse aggregates and modified with nano-AL_2O_3. *International Journal of Pavement Engineering,* 26(1), 2532690.
-Vijayalakshmi, R., & Ramanagopal, S. (2018). Structural concrete using expanded clay aggregate: A review. *Indian Journal of Science and Technology,* 11(16), 1–12.
doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i16/121237
-Yinfei, D., Mingxin, D., Haibin, D., Deyi, D., Peifeng, C., & Cong, M. (2020). Incorporating hollow glass microsphere to cool asphalt pavement: Preliminary evaluation of asphalt mastic. *Construction and Building Materials,* 244, 118380.
-Zeiada, W., Hamad, K., Omar, M., Underwood, B. S., Khalil, M. A., & Karzad, A. S. (2019). Investigation and modelling of asphalt pavement performance in cold regions. *International Journal of Pavement Engineering,* 20(8), 986–997.
doi.org/10.1080/10298436.2017.1384505
-Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M., & Amini, A. (2023). Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials,* 404.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.039
Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2051(1), 43-50.
doi.org/10.3141/2051-04
-Moghimi, S., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. (2023). Evaluation of rutting, fatigue, and moisture resistance of low-energy asphalt mixtures modified by crumb rubber. *Advances in Civil Engineering,* 2023, 6668963.
doi.org/10.1155/2023/6668963
-Mohammadi Tehran, F. (2009). Comprehensive guide to LECA—Lightweight expanded clay aggregates and their products. *Technical Office of LECA Company,* Iran.
-Nicholls, J. C. (Ed.). (1998). Asphalt Surfacing. *CRC Press*.
-Owens, P. L., & Newman, J. B. (2003). Lightweight aggregate manufacture. *In Advanced concrete technology set*, 1–12.
-Pishdadi, F. (2022). Investigation of the possibility of modifying the surface of lightweight expanded clay aggregates, (LECA) to improve adsorption performance, Master's thesis, Iran University of Science and Technology.
-Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material–An overview. *Construction and Building Materials,* 170, 757-775.
-Roces, E., Muñiz-Menéndez, M., González-Galindo, J., & Estaire, J. (2021). Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing. *Construction and Building Materials,* 313, 125486.
-Sakthivel, S. N., Singh, B., & Kathuria, A. (2024). Moisture susceptibility of HMA containing high siliceous quartzite aggregates: A comparative study of hydrated lime addition methods. *Road Materials and Pavement Design.*
-Shafigh, P., Chai, L. J., Mahmud, H. B., & Nomeli, M. A. (2018). A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate. *Construction and Building Materials,* 190, 1220–1230.

A Review on the Performance of Asphalt Mixtures Containing Expanded Clay Aggregate (LECA) at High and Medium Temperatures

Ghasem Tahmouresi, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.

Mohsen Amouzadeh Omrani, *Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*

Hassan Divandari, *Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

Ali Seyed Kazemi, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.

E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir

E-mail: ha.divandari@iau.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: January 2026

ABSTRCT

Asphalt pavements constantly face challenges caused by environmental conditions and traffic loads, such as rutting at high temperatures and fatigue cracking at moderate temperatures, which reduce durability, performance, and increase maintenance costs. These distresses become more severe in hot and arid regions, significantly affecting the long-term performance of pavements. One of the innovative approaches in pavement engineering is the use of artificial lightweight aggregates such as expanded clay (LECA). Due to its low weight, porous structure, specific heat capacity, and high resistance to environmental factors, LECA has become an attractive material for improving asphalt mixture performance. Laboratory and field studies have demonstrated that replacing part of conventional aggregates with LECA can significantly reduce rutting, enhance thermal and moisture resistance, improve surface friction, and decrease traffic noise. Moreover, the insulating property of LECA prevents frost penetration into the lower layers, thereby extending the pavement service life. In addition, the use of LECA helps reduce the consumption of natural resources, transportation energy, and adverse environmental impacts. However, challenges such as high bitumen absorption, increased production costs, and the need to determine the optimal replacement percentage still remain. Recent studies have suggested combining LECA with nanomaterials and polymers as an effective strategy to enhance mechanical behavior and durability. This paper provides a comprehensive review and analysis of previous research, focusing on the benefits, limitations, and future research directions for the application of LECA in modified asphalt mixtures.

Keywords: Expanded Clay Aggregates (LECA), Fatigue Behavior, Rutting Behavior, Nanoparticles