رویه آسفالت رنگی

مقاله علمی – پژوهشی

*پرهام حیاتی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
علی‌رضا رجبی، دانش آموخته دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: p.hayati@modares.ac.ir

دریافت:۱۴۰۴/۱۰/۲۰– پذیرش:۱۴۰۵/۰۳/۰۲
صفحه ۲۴۲-۲۲۳

چکیده

آسفالت رنگی با تأمین الزامات مقاومتی و اصطکاکی، جایگزینی مناسب برای رویه‌های قیری در راه‌ها و سطوح پروازی فرودگاه‌ها است. در تولید آسفالت‌های رنگی از چسباننده‌های شفاف (قیر اصلاح شده/چسباننده پلیمری/ رزین‌ها و روغن‌های گیاهی) استفاده شده است. این نوع چسباننده‌ها بی‌رنگ است و از رنگدانه‌های گوناگون(روتایل تیتانیوم، فریت روی، آهن سه اکسید، آلومینات کبالت و اکسید کروم) برای تولید آسفالت‌های رنگی استفاده می‌شود. طرح اختلاط آسفالت رنگی مشابه آسفالت متداول است که برای کاهش اثر سخت کنندگی، رنگدانه‌ها جایگزین بخشی از فیلر مخلوط می‌گردد. میزان رنگدانه در مخلوط بسته به نوع رنگدانه و مشخصات مخلوط آسفالتی در محدوده ۰/۵ تا ۵ (مقدار بهینه تقریبی ٤) درصد وزن کل مخلوط آسفالتی تعیین شده است. مخلوط‌های دارای چسباننده شفاف، عملکرد بهتری در برابر تغییر شکل و نفوذپذیری نسبت به آسفالت قیری متداول دارند. افزودن رنگدانه به چسبنده، درجه عملکردی(مناسب برای سطوح پروازی توقفگاه‌ها)، ویسکوزیته و مقاومت شیارشدگی را افزایش می‌دهد؛ هرچند عمر خستگی در درصدهای بالای رنگدانه کاهش می‌یابد، اما تا ۱ درصد کاربرد رنگدانه بهبود می‌یابد. تولید این آسفالت می بایست حدود ۳۰ درجه سانتی گراد پایین‌تر از دمای آسفالت معمولی (مشابه آسفالت ولرم) تنظیم گردد تا از سوختگی و تغییر رنگ مخلوط جلوگیری شود. آسفالت رنگی اجرا شده با چسباننده شفاف، کندتر گرم و سریع‌تر سرد می‌شود و افزودن رنگدانه این روند را تشدید می‌کند. ترکیبات پلیمری نیز پایداری حرارتی را افزایش می‌دهد. از نظر زیست‌محیطی، آسفالت رنگی با کاهش جزیره گرمایی شهری، انتشار گاز کربن دی اکسید و آسیب لایه اوزون، گزینه‌ای پایدار است. دمای سطحی پایین‌تر و بازتاب بیشتر نور این نوع رویه، مصرف انرژی بابت تأمین روشنایی را کاهش می‌دهد. هزینه اولیه تولید این نوع رویه بیشتر است، اما به دلیل دوام بالاتر و نیاز کمتر به عملیات ترمیم و نگهداری در بلندمدت، مطلوبیت دارد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت رنگی، تغییر شکل رویه، جزیره گرمایی، چسباننده پلیمری شفاف، رنگدانه

۱- مقدمه

در صنعت راهسازی، استفاده از آسفالت سیاه رنگ در مقایسه با آسفالت‌های رنگی رایج‌تر است. آسفالت متداول سیاه رنگ به دلیل مقاومت و استحکام کافی برای بسیاری از روسازی‌ها مناسب است؛ با این حال، آسفالت رنگی در مقایسه با آسفالت متداول برتری‌هایی دارد که می‌تواند آن را به جایگزینی مناسب تبدیل کند. این برتری‌ها شامل آسیب کمتر به محیط زیست، مقاومت بیشتر در برابر پدیده جزیره گرمایی شهری[1]، کاهش تصادفات (به دلیل جلب توجه بیشتر رانندگان) و مقاومت بیشتر در برابر خستگی و نشست است. از نظر اقتصادی نیز، آسفالت رنگی اگرچه هزینه اولیه بیشتری دارد، در بلند مدت مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. با توجه به اینکه امروزه به طور میانگین ۳۰ تا ۳۵ درصد از سطوح شهری با روسازی‌های آسفالتی پوشیده شده‌اند، استفاده از آسفالت‌های مرغوب‌تر در احداث این مسیرها سبب کاهش هزینه‌های ترمیم و نگهداری، خطر

تصادفات و آسیب‌های زیست محیطی می‌شود. (Badin et al., 2024), (Plug., 2023)

برای تولید آسفالت‌های رنگی روش‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، پوشاندن سطح آسفالت سیاه رنگ با یک لایه رنگ است. این شیوه در مسیرهای پرتردد یا برای دوره‌های طولانی مناسب نیست، زیرا لایه رنگ به مرور زمان از سطح روسازی جدا شده و کیفیت اولیه خود را از دست می‌دهد. روش دیگر، اضافه کردن رنگدانه[۲] خشک به آسفالت سیاه متداول است. این روش به دلیل هزینه بالا، محدودیت تنوع رنگ(اغلب فقط رنگ قرمز) و کاهش مقاومت مکانیکی مخلوط، کاربرد چندانی ندارد. روش مورد استفاده دیگر، افزودن مواد معدنی سبک مانند شن، ماسه یا سنگ شکسته رنگی به مخلوط است که ممکن است سبب کاهش دوام مخلوط شود. روش دیگر، استفاده از رنگدانه‌های غیر آلی مثل اکسیدهای آهن، کروم، روی، تیتانیوم و کبالت در مخلوط است. در این حالت می‌توان با جایگزینی قیر عادی مصرفی در مخلوط آسفالتی با چسباننده‌های شفاف پلیمری[۳] و جایگزینی بخشی از سنگدانه‌ها با رنگدانه به نتایج مناسبی دست یافت. در این روش، رنگ مخلوط روشن‌تر از سایر مخلوط‌های دیگر خواهد بود و در نتیجه جذب گرمای ناشی از تابش مستقیم خورشید و اصطکاک چرخ خودروها کاهش می‌یابد. افزایش دمای مخلوط‌های آسفالتی موجب کاهش ویسکوزیته و در نتیجه تغییر شکل مخلوط می‌شود؛ اما در صورتی که دمای مخلوط پایین باشد، از این امر اجتناب می‌شود.

۲- چسباننده‌های شفاف

برای نمایش بهتر رنگ در مخلوط‌های آسفالت رنگی، استفاده از چسباننده‌های شفاف که رنگ بسیار کمتری نسبت به قیر سیاه متداول دارد، اهمیت زیادی دارد. سه روش اصلی برای تولید این نوع چسباننده‌ها وجود دارد:

-اصلاح قیر عادی با حذف آسفالتین‌هایی که عامل اصلی رنگ سیاه قیر هستند. (Pasetto et al., 2023), (Abualia et al., 2024), (Tang et al., 2018) (Badin et al., 2021)

-به کارگیری چسباننده‌های مصنوعی شفاف اصلاح شده با مواد پلیمری خاص به جای چسباننده‌های قیری. (Abualia et al., 2024), (Chen et al., 2024), (Pasetto et al., 2023) (Tang et al., 2018)

-استفاده از رزین‌های مناسب و ترکیب آن‌ها با روغن‌های قابل بازیافت و مواد مشتق شده از گیاهان. (Musco et al., 2024), (Pasetto et al., 2023)

اگرچه نوع سوم این چسباننده‌ها از مشتقات نفتی نیست، اما رفتار رئولوژیکی آن‌ها بسیار شبیه قیر عادی است و برای استفاده در روسازی مناسب است. (Pasetto et al., 2023), (Badin et al., 2024)

در ایران استفاده از قیر به عنوان چسباننده در مخلوط‌های آسفالت رنگی رایج‌تر است. قیر به طور ذاتی رنگ سیاه دارد و برای رنگی کردن مخلوط آسفالتی ساخته شده با آن به مقدار زیادی رنگدانه نیاز است. حتی پس از افزودن رنگدانه، به دلیل وجود رنگ تیره قیر، رنگ نهایی مخلوط روشن و شفاف نخواهد بود. با افزودن ۵ درصد رنگدانه پودری به مخلوط آسفالت متداول، رنگ مخلوط همچنان تیره باقی می‌ماند و کیفیت ظاهری مطلوبی به دست نمی‌آید. برای مثال، رنگ نهایی مخلوط آسفالتی ساخته شده با رنگدانه قرمز (اکسید آهن) در ظاهر بیشتر به رنگ قهوه‌ای نزدیک است تا رنگ قرمز. در مقابل، در مخلوط‌های ساخته شده با چسباننده‌های شفاف، مقدار رنگدانه مورد نیاز کمتر از آسفالت‌های ساخته شده با قیر متداول است و ظاهر آن‌ها نیز بهتر است. (Plug., 2023),(Badin et al., 2021) با اضافه کردن رنگدانه به مخلوط آسفالتی متداول، عملکرد مکانیکی تغییر می‌کند و عمر مفید مخلوط کاهش می‌یابد؛ زیرا رنگدانه‌ها به طور کامل با قیر مخلوط نمی‌شود. طبق تحقیقات میدانی انجام شده در هلند، دلیل ترکیب نشدن با کیفیت مناسب رزین اپوکسی در مخلوط، آب و هوای غالب منطقه است. در نمونه‌های اجرا شده با عمر بالغ بر ده سال، آسفالت‌های رنگی اصلاح نشده (که ارزان‌تر هستند) عملکرد ضعیف‌تری نسبت به چسباننده‌های اصلاح شده پلیمری داشته‌اند. البته این نمونه‌ها، در محل‌هایی با ترافیک بالا اجرا شده‌اند که مناسب آن‌ها نبوده است. برای ترمیم این خرابی‌ها از آسفالت قیری با سنگدانه‌های شکسته قرمز رنگ استفاده شده است که رنگ متفاوتی از قبل دارد (تیره‌تر از نمونه اصلی) و برای مسیرهای پرتردد نامناسب است. (Plug., 2023)

۳- آسفالت رنگی

برای ساخت آسفالت رنگی روش‌های مختلفی وجود دارد که هزینه و کیفیت متفاوت دارد. یکی از نمونه‌های آسفالت رنگی، با ترکیب قیر و سنگدانه‌های رنگی خرد شده تولید می‌شود. شرایط آب و هوایی در هنگام اجرای این نوع آسفالت به شدت مؤثر است و فقط باید در شرایط آب و هوایی گرم و خشک اجرا شود. در غیر این صورت، اجزا با یکدیگر به خوبی ترکیب نمی‌شود و در نتیجه عمر مفید آسفالت به شدت کاهش پیدا می‌کند. این روش اغلب برای ترمیم استفاده می‌شود.

نوع دیگر آسفالت رنگی، از ترکیب سنگدانه‌ها و رنگدانه‌ها با چسباننده شفاف پلیمری ساخته می‌شود. مخلوط آسفالت رنگی تولید شده با چسباننده شفاف اصلاح شده کیفیت مناسبی دارد. در صورت استفاده از چسباننده اصلاح نشده، عملکرد مخلوط از آسفالت متداول ضعیف‌تر می‌شود و در اجرا با سرعت نامناسب، عملکرد آن بدتر نیز خواهد شد. با این حال در صورت

اصلاح چسباننده، عملکرد مخلوط بهبود پیدا می‌کند و از مخلوط آسفالت متداول بهتر خواهد شد. این موضوع اهمیت بالای اصلاح چسباننده را نشان داده است.

رفتار آسفالت رنگی دارای چسباننده پلیمری شفاف، در برابر خرابی‌هایی مثل رویش گیاهان و یا نشست، مشابه آسفالت متداول است. با پیر شدگی و تغییرات شرایط آب و هوایی، این خرابی‌ها بیشتر شده و از کیفیت مخلوط آسفالتی کاسته می‌شود. (Plug., 2023)

انتخاب نوع و میزان رنگدانه نیز تأثیر چشمگیری در شفافیت رنگ، دوام و خواص مکانیکی آسفالت‌های رنگی دارد. در آسفالت‌های رنگی از رنگدانه‌ها و سنگدانه‌های معدنی رنگی مختلفی استفاده می‌شود. نوع و مقدار لازم رنگدانه بسته به منبع تأمین آن متفاوت است. رنگ‌های تیره بیشترین مقدار جذب نور فرابنش را دارد. نور فرابنفش، باعث کمرنگ شدن و از بین رفتن رنگ مخلوط آسفالتی می‌شود. (Kawther., 2018) ، (Xu et al., 2023) (Mirzaei, Ghaemi, Akbari Motlagh.,2017)

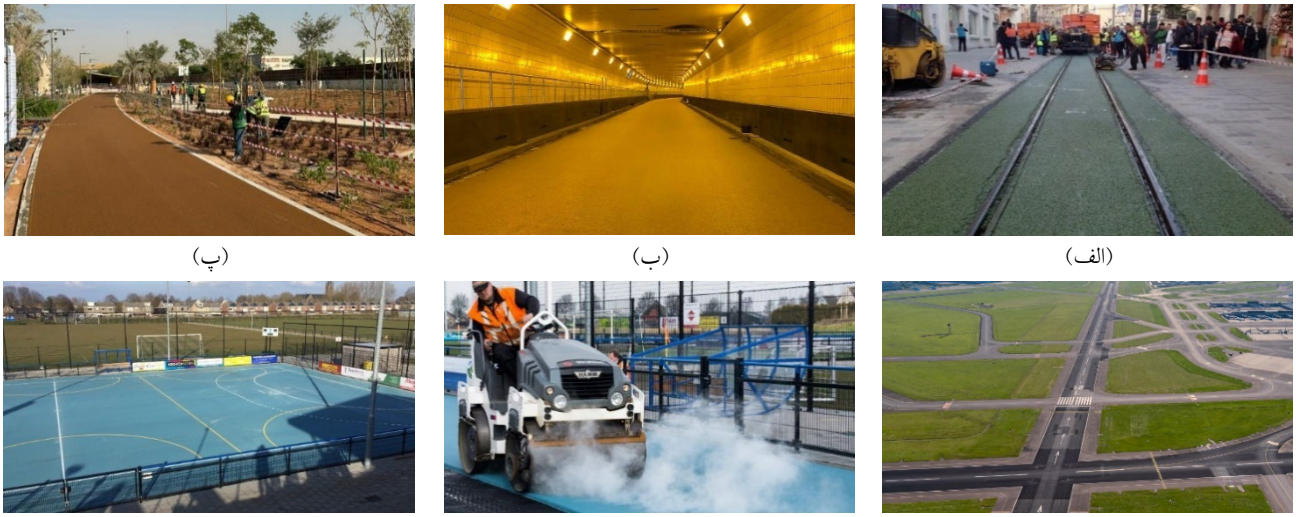
در آسفالت‌های با رنگ روشن و یا بدون رنگ (مخلوط‌های با چسباننده شفاف و بدون رنگدانه)، از سنگدانه‌های روشن و چسباننده شفاف استفاده می‌شود. در برخی موارد نیز برای افزایش سفیدی مخلوط از تیتانیوم دی اکسید(TiO_2) استفاده می‌شود. رنگدانه‌های قرمز شامل اکسید آهن(Fe_2O_3) و رنگدانه‌های ترکیبی تیتانیوم قرمز هستند. در میان این دو گزینه، اکسید آهن بیشترین کاربرد را دارد. برای ایجاد رنگ‌های زرد و نارنجی از اکسیدهای مصنوعی آهن (α-FeOOH) یا فریتِ روی[4] ($ZnFe_2O_4$) استفاده می‌شود. در مقالات بررسی‌شده فریتِ روی به کار رفته است. برای رنگ‌های سبز و آبی می‌توان به ترتیب از اکسید کروم(Cr_2O_3) و آلومینات کبالت($CoAl_2O_4$) استفاده کرد؛ هرچند اطلاعات موجود در مورد این دو رنگدانه محدود است. همچنین مطالعاتی درباره افزودن پودر ترموکرومیک[5] آبی و قرمز به مخلوط آسفالتی موجود است که با تغییر دما، رنگ مخلوط تغییر می‌کند. (Badin et al., 2024)، (Piérard et al., 2016)، (Kim & Elipse, 2024)، (Sun et al., 2020)، (Mirzaei, Ghaemi, Akbari Motlagh.,2017)، (Leite et al., 2009)، (Yu et al., 2020)

به طور کلی، در اکثر منابع علمی مقدار رنگدانه در آسفالت‌های رنگی تا حدود ٤ درصد وزنی از کل مخلوط بهترین نتایج را داشته است.

این مقدار جایگزین سنگدانه‌های مصرفی در مخلوط می‌شود. در حالی که ۵ درصد رنگدانه پودری که پیش‌تر به آن اشاره شد، باید به مخلوط اضافه شود. جدول (۱) برخی رنگدانه‌های مورد استفاده در آسفالت‌های رنگی را نشان داده است. تصاویر ۱(الف–ج) نیز رنگ‌های مختلف آسفالت‌های اجرا شده در سراسر دنیا را نمایش می‌دهد. برای دستیابی به رنگ‌های مختلف می‌توان از انواع رنگدانه‌ها استفاده کرد و در صورت نیاز، می‌توان رنگدانه‌ها را با هم ترکیب نمود. (Plug & Bondt., 2017)، (Ooms Producten)

جدول ۱. رنگدانه‌های مخصوص برای تولید آسفالت رنگی

رنگ آسفالت	رنگدانه مورد استفاده	فرمول شیمیایی / نوع	توضیحات	منابع
سفید	روتایل تیتانیوم/ تیتانیوم دی اکسید	TiO_2	رنگ‌های روشن و سفید. بیشترین بازتاب نور و گرما.	(Badin et al., 2024) (Piérard et al., 2016)
زرد	اکسید مصنوعی آهن فریتِ روی	$ZnFe_2O_4$, α-FeOOH	رنگ زرد یا نارنجی. بیشترین افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی	(Badin et al., 2024) (Piérard et al., 2016)
قرمز	اکسید آهن سنگ غیر آلی تیتانیوم	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$, α-Fe_2O_3, تیتانیوم قرمز، اکسید آهن	ایجاد رنگ قرمز. رنگدانه‌های ترکیبی با انواع اکسیدهای آهن قرمز.	(Badin et al., 2024) (Kim & Elipse, 2024) (Piérard et al., 2016) (Sun et al., 2020)
	پودر ترموکرومیک	-	تغییر رنگ با تغییر دما	(Yu et al., 2020)
آبی	پودر ترموکرومیک	-	تغییر رنگ با تغییر دما	(Yu et al., 2020)
	آلومینات کبالت	$CoAl_2O_4$	نیاز به مطالعات بیشتر	(Leite et al., 2009)
سبز	اکسید کروم	Cr_2O_3	نیاز به مطالعات بیشتر	(Mirzaei et al., 2017) (Leite et al., 2009)



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث) (ج)

تصویر(۱). استفاده از آسفالت‌های رنگی و بی‌رنگ (الف): خیابان استقلال در استانبول، ترکیه (رنگ سبز) (ب): تونل ماس در روتردام، هلند (رنگ زرد) (پ): مسیر ورزشی در ریاض، عربستان (رنگ قرمز/قهوه‌ای) (ت): شانه باند و تاکسی وی‌های فرودگاه آمستردام، هلند(بی‌رنگ) (ث) و (ج): زمین بازی هندبال در روستای نیبیکس وود، هلند(رنگ آبی) (Ooms Producten)

۳-۱- طرح مخلوط

طرح مخلوط آسفالت رنگی طبق استانداردهای متداول روسازی اروپا و آمریکا است؛ اما نیازمند ملاحظات ویژه‌ای در خصوص چسباننده‌ها، رنگدانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر کل مخلوط است. به دلیل خاصیت سخت کنندگی رنگدانه‌ها، نمی‌توان آن‌ها را بدون کاهش مقدار فیلر[۶] به مخلوط اضافه کرد؛ زیرا اثر سخت کنندگی آن‌ها از فیلر بیشتر است و مخلوط بیش از حد سخت می‌شود. معادل سازی فیلر و رنگدانه‌ها بر اساس وزن آن‌ها انجام می‌گیرد. به این ترتیب که به مقدار وزن رنگدانه افزوده شده از وزن فیلر کاسته می‌شود. با توجه به اینکه رنگدانه‌ها چگالی بیشتری نسبت به فیلر سنگ آهکی دارد، جایگزینی فیلر با رنگدانه‌ها موجب کاهش اندک حجم مخلوط می‌شود؛ اما اثر سخت‌کنندگی فیلر توسط رنگدانه‌ها جبران می‌شود. در آزمایش، جرم رنگدانه‌ها و فیلر نزدیک به هم در نظر گرفته شده است. تفاوت حجم بین طرح‌های آزمایشی و طرح مرجع سیاه رنگ، ناچیز بوده و نمونه‌ها به شکلی ساخته شده‌اند که رفتار مکانیکی مشابه با طرح مرجع داشته باشد. نمونهٔ آسفالتی زرد رنگ با سنگدانه‌های پورفیری خاکستری[۷] و نمونهٔ آسفالتی قرمز رنگ با سنگدانه پورفیری قرمز[۸] ساخته شده است. (این دو سنگدانه دارای ترکیبات شیمیایی متعدد است.) همچنین از رنگدانه سفید روتایل تیتانیم[۹] و سنگ آهک برای حفظ تعادل میان درصد فیلر و رنگدانه و تأمین سختی مناسب مخلوط‌ها استفاده شده است. تمامی طرح‌ها مطابق با طرح مخلوط آسفالت ریزدانه(MSA=6mm)، ساخته شده‌اند. برای دستیابی به کیفیت مطلوب، از سنگدانه‌های ریز استفاده می‌شود. در این مخلوط‌ها بخشی از فیلر آهکی و در صورت نیاز بخشی از مصالح سنگی[۱۰]، با رنگدانه، جایگزین شده‌اند تا سفتی ماستیک در مخلوط‌ها حفظ شود و از اختلال در خواص رئولوژیکی اجتناب شود. در این آزمایش، نمونه‌ها عملکرد مشابه با مخلوط آسفالت متداول داشته‌اند.(Piérard et al., 2016) جدول (۲) درصدهای بهینه رنگدانه در طرح مخلوط آسفالت‌های رنگی داغ را برای رنگ‌های مختلف همراه با نوع چسباننده و تغییرات مقدار مصالح نشان داده است. به طور کلی ٤ درصد وزنی رنگدانه، رایج‌ترین «درصد بهینه» برای تولید مخلوط آسفالت رنگی داغ در منابع علمی گزارش شده است.

نتایج نشان داده است این مقدار موجب می‌شود ویسکوزیته مخلوط پائین‌تر از حد کارایی استاندارد سوپر پیو[11] (۳۰۰۰ سانتی پواز در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد) باقی بماند و بهترین تعادل میان مقاومت در برابر شیارشدگی و سختی را نیز فراهم کند. در صورت استفاده از چسباننده پلیمری شفاف، به دلیل بی‌رنگ بودن چسباننده، می‌توان مقدار رنگدانه را تا ۰/۵ درصد وزنی کاهش داد؛ ولی به دلیل وجود اصلاح کننده‌های پلیمری، دما و یا مدت زمان اختلاط کمی بیشتر خواهد شد. (Plug & Bondt., 2017)، (Ooms Producten)، (Rocha Segundo et al., 2020)، (Mohammed & Abed., 2024)

ملات ترمیمی آسفالت رنگی، درصد بالاتری از رنگدانه (۱۰–۱۴٪) برای دوام رنگ و قابلیت ذخیره سازی توصیه شده است. در جدول(۳)، طرح مخلوط بهینه برای مخلوط درزگیر آسفالت امولسیونی رنگی[13] ارائه شده است. موارد زیر جهت اجرای این ملات آسفالتی می‌بایست رعایت گردد: (Sun et al., 2020)

–تمام مواد به صورت وزنی اندازه‌گیری شود.

– آب به میزان ٪۱۱ از مجموع خاک رس[14]، دود سیلیس[15]، رنگدانه و مصالح سنگی به مخلوط اضافه شود.

– ساخت مخلوط با دستگاه مکانیکی انجام شود.

جدول۲. درصدهای بهینه در طرح مخلوط آسفالت رنگی

رنگ مخلوط	نوع چسباننده مصرفی	نام و فرمول شیمیایی رنگدانه/سنگدانه	درصد رنگدانه از وزن کل مخلوط	تغییرات مصالح/ فیلرها	منابع
سفید	چسباننده شفاف	روتایلِ تیتانیوم (TiO_2)	٤	–جایگزینی فیلر با رنگدانه، بین ۳ تا ۵ درصد در پروژه‌ها –٤ درصد در طرح‌های آزمایشی	(Badin et al., 2024) (Piérard et al., 2016)
زرد	چسباننده شفاف	پروفیری خاکستری (سنگدانه)	۰/۵	مطابق آسفالت ریزدانه(MSA=6mm)، رنگدانه جایگزین بخشی از فیلر سنگ آهک شد :۰/۵٪ برای رنگ زرد، ۲٪ تیتانیوم دی اکسید برای سفید، ٤٪ فیلر سنگ آهک	(Piérard et al., 2016)
نارنجی	چسباننده شفاف	فریتِ روی نارنجی ($ZnFe_2O_4$)	٤	رنگدانه جایگزین بخشی از فیلر می‌شود.	(Badin et al., 2024)
قرمز	چسباننده شفاف	آهن سه اکسید (Fe_2O_3)	۱/۵	فیلر سنگ آهک به ٪۳/۵ کاهش یافت و رنگدانه قرمز به میزان ٪۱/۵ اضافه شد.	(Piérard et al., 2016)
	چسباننده قیری اصلاح شده با استایرن بوتادین استایرن[12]	پودر ترموکرومیک قرمز	۵	به مخلوط آسفالتی اصلاح شده افزوده می‌شود.	(Yu et al., 2020)
آبی	چسباننده قیری اصلاح شده با استایرن بوتادین استایرن	پودر ترموکرومیک آبی	۵	به مخلوط آسفالتی اصلاح شده افزوده می‌شود.	(Yu et al., 2020)
	–	آلومینات کبالت ($CoAl_2O_4$)	نیاز به مطالعات بیشتر	–	(Leite et al., 2009)
سبز	–	اکسیدِ کروم (Cr_2O_3)	نیاز به مطالعات بیشتر	–	(Mirzaei et al., 2017) (Leite et al., 2009)

٤-خواص

٤-١- درجه عملکردی

افزودن رنگدانه‌های تیتانیوم دی اکسید، فریتِ روی و اکسیدِ آهن، به دلیل تغییر خواص حرارتی و مکانیکی مخلوط آسفالتی موجب تغییر درجه عملکردی[16] می‌شود. اگرچه تغییرات درجه عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده رنگدانه‌دار به طور مستقیم آزمایش و گزارش نشده است، اما نتایج برخی آزمایشات مرتبط نشان داده است که چسبانندهای شفاف به طور ذاتی عملکرد بهتری نسبت به چسبانندهای سیاه رنگ متداول دارد و با افزودن رنگدانه‌ها به مخلوط‌های آسفالتی، تغییرات قابل توجهی در رفتار مخلوط به وجود می‌آید.

جدول ۳. طرح مخلوط بهینه ملات ترمیمی آسفالت رنگی (Sun et al., 2020)

ماده تشکیل‌دهنده	درصد وزنی توصیه شده
خاک رس	۱۵–۱۷
دود سیلیس	۱۲–۱۶
رنگدانه	۱۰–۱٤
مصالح سنگی	۲۸–۳۲
قیر امولسیونی رنگی	۲۵–۳۲

جدول ٤. نتایج مطالعات درجه عملکردی و آزمایشات موثر بر آن
(Mohammed & Abed., 2024)، (Bocci et al., 2012)، (Plug., 2023)، (Badin et al., 2024)

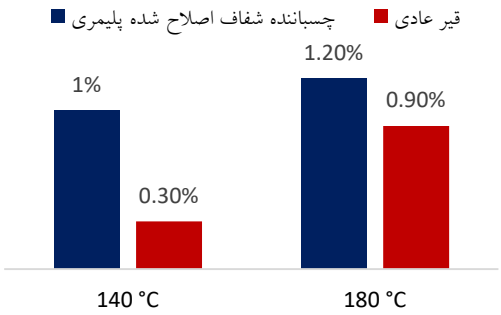
ویژگی / آزمایش	آسفالت متداول (مبنای مقایسه)	آسفالت شفاف + رنگدانه (TiO_2 / Fe_2O_3 / $ZnFe_2O_4$)	(↑↓) تغییرات	توضیحات
درجه عملکردی (PG)	PG 58-XX (دمای بالای ٥٨C°)	-با افزودن TiO_2 نانو به مخلوط، دمای بالای درجه عملکردی از ٦٤C° به ٧٦C° می رسد و در دمای پائین شکننده‌تر می‌شود.	≈ ↑١٢°C	افزایش یک درجه، درجه عملکردی با ۳ درصد TiO_2 و دو درجه در ۵ تا ۷ درصد TiO_2؛ چسباننده شفاف به PG 76 می‌رسد. یعنی برای دماهای بالا مناسب‌تر است.
ویسکوزیته (١٣٥°C)	≈ ٣٠٠ mPa (حد روسازی سوپر پیو)	• TiO_2 (٪١) ← ٪٢٩ ↑ • TiO_2 (٪٣) ← ٪٤٢ ↑ • TiO_2 (٪٥–٧) ← ٪٥٦ ↑ -چسباننده شفاف خالص: ١٥٠–٢٥٠mPa·s -چسباننده پلیمری شفاف: ٥٠٠–٧٠٠mPa·s	با افزودن روتایلِ تیتانیوم به مخلوط آسفالتی، ٢٩–٥٦ ٪ افزایش پیدا می‌کند.	روتایلِ تیتانیوم (TiO_2) ویسکوزیته را بالا می‌برد؛ چسباننده پلیمری شفاف همچنان روان و با کارایی بالا است.
عمق شیارشدگی (میلی‌متر)	≈ ٥/٨ mm (مبنای مقایسه)	چسباننده شفاف خالص ≈ ٥/١ mm • TiO_2 (٪٤) ≈ ٣/٥ mm • Fe_2O_3 (٪٤) ≈ ٤/٧ mm • $ZnFe_2O_4$ (٪٤) ≈ ١/٥ mm	• چسباننده شفاف خالص ← ٪١٢/١ ↓ • TiO_2 ← ٪ ٣٩/٧ ↓ • Fe_2O_3 ← ٪ ١٩ ↓ • $ZnFe_2O_4$ ← ٪٧٤/١ ↓	رنگدانه‌ها ماستیک را سخت‌تر کرده و تغییر شکل دائمی را کاهش می‌دهند.
شاخص مقاومت شیار ($G^*/\sin\delta$)	مبنا ×١	• TiO_2 (٪٣) ← ٪٥١ ↑ • TiO_2 (٪٥–٧) ← ٪٦٤ ↑	≈ ٥١ – ٦٤٪ ↑	افزایش نشان‌دهنده سختی بیشتر در دماهای بالا است.
مقاومت خستگی (LAS)	مبنای عمر خستگی	• TiO_2 (٪٥) ← ٪٣٠ ↓ • TiO_2 (٪٧) ← ٪٣٤ ↓	≈ ٣٠ - ٣٤٪↓	مقادیر بالای روتایلِ تیتانیوم عمر خستگی را کاهش می‌دهند، اما در ١٪ بهبود اندک دارد.

جدول(٤) درجه عملکردی و خواص مؤثر بر آن را نشان داده است. بر اساس داده‌ها، افزودن روتایلِ تیتانیوم(TiO_2) مقاومت در برابر شیار شدگی را تا حدود٦٠ درصد افزایش می‌دهد و درجه عملکردی را تا دو درجه بالا می‌برد؛ اما مصرف بیش از حد آن می‌تواند عمر خستگی[17] را حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. (Mohammed & Abed., 2024)، (Bocci et al., 2012)، (Plug., 2023)، (Badin et al., 2024)

استفاده از رنگدانه‌ها، به ویژه فریتِ روی ($ZnFe_2O_4$)، عمق شیارشدگی را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد که علت آن افزایش چسبندگی بین چسباننده و مصالح سنگی در مخلوط است. درجه عملکردی مخلوط‌های آسفالتی با چسباننده شفاف به تنهایی حدود ٧٦ است و ویسکوزیته آن‌ها کمتر از آسفالت متداول است. ویسکوزیته پائین را می‌توان با افزودن رنگدانه به مخلوط تا حدی جبران کرد. به طوری که حتی در مخلوط‌های آسفالتی بی‌رنگ نیز می‌توان از روتایلِ تیتانیوم (TiO_2) استفاده کرد. با افزایش ویسکوزیته، برای اختلاط مواد دمای بالاتری نیاز است؛ با این حال، در این حالت حد استاندارد سوپر پیو یعنی ۳۰۰۰ سانتی پواز تا دمای٦- درجه سانتی گراد حفظ می‌شود که ویسکوزیته مناسبی برای پمپاژ مخلوط است؛ اما شکنندگی آن در دمای ۱۲- درجه سانتی گراد بیشتر از آسفالت متداول است و الاستیسیته مخلوط کاهش پیدا می‌کند. (Mohammed & Abed., 2024)

٤-۲- تأثیر دما بر مخلوط

مخلوط‌های ساخته شده با چسباننده شفاف دارای مولکول‌های بزرگ و سنگین کمتری در مقایسه با قیر عادی هستند. به همین دلیل اجرای آن‌ها باید در دمای پائین‌تری نسبت به قیر عادی انجام شود؛ زیرا در دماهای بسیار بالا، چسبانده دچار سوختگی می‌شود و کیفیت خود را از دست می‌دهد. رنگدانه‌ها نیز به دما حساس هستند و در دماهای بالا ناپایدار شده و رنگ آن‌ها تغییر می‌کند. دمای ساخت مخلوط با چسباننده‌های پلیمری شفاف مصنوعی کمتر از مخلوط با سایر چسباننده‌ها است. اگرچه این ویژگی باعث سهولت فرآیند ساخت آسفالت می‌شود، اما همچنان تولید گازهای نامطلوب و بد بو حاصل از تبخیر مواد شیمیایی آروماتیک، رزین‌های نفتی و چسباننده در مخلوط را به همراه دارد. مقاومت مواد پلیمری در برابر حرارت بیشتر از رزین‌های نفتی است و در چسباننده نیز موجب ایجاد پایداری حرارتی می‌شود. امروزه با چسباننده‌های شفاف می‌توان مخلوط آسفالت گرم[18] را در دمای حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از حالت استاندارد تولید کرد که باعث کاهش تولید گازهای نامطلوب می‌شود. در دماهای بالا، ویسکوزیته چسباننده شفاف کمتر از ویسکوزیته چسباننده قیری در همان دما است. بنابراین، دمای لازم برای ترکیب و اختلاط مخلوط آسفالتی با چسباننده‌های شفاف کمتر از دمای مورد نیاز برای مخلوط آسفالت متداول است. چسباننده‌های شفاف مصنوعی قابل رنگدانه‌زنی مورد استفاده در روسازی‌های رنگی، در دمای ۱۲۰ تا ۱٤۰ درجه سانتی‌گراد قابلیت اختلاط و در دمای ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد قابلیت تراکم دارد. در حالی که نقطه جوش ۹۰ درصد ترکیبات سایر چسباننده‌ها، بالای ۱٤۰ درجه سانتی‌گراد است. شکل(۱) و جدول(۵) مقایسه کاهش وزن چسباننده پلیمری شفاف با قیر عادی است. نمونه‌ها به مدت چهار ساعت در دمای ۱٤۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار گرفته شده‌اند و مقدار کاهش وزن آن‌ها اندازه گیری شده است. کاهش وزن باعث تولید گاز می‌شود. در شکل(۱) بر روی هر ستونِ نمودار درصد کاهش وزن در این دو دما نشان داده شده است. بر اساس داده‌ها، اختلاط، حمل و اجرای مخلوط‌های آسفالتی با چسباننده شفاف باید در دمای پائین‌تری نسبت به مخلوط آسفالتی متداول انجام شود. (Plug., 2023)، (Wang et al., 2023)، (Tang et al., 2018)، (Chen & Zhang., 2017)



شکل ۱. درصد کاهش وزن طی ۲۴۰ دقیقه

(Tang et ،(Wang et al., 2023) ،(Plug., 2023)
(Chen & Zhang., 2017) ،al., 2018)

جدول ۵. مقایسه درصد کاهش وزن قیر شفاف اصلاح شده و عادی

(Chen & Zhang., 2017) ،(Tang et al., 2018) ،(Wang et al., 2023) ،(Plug., 2023)

نمونه / شرایط	قیر متداول (قیر خالص)	چسباننده شفاف اصلاح شده پلیمری
دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد – مدت ۲۴۰ دقیقه	< ٪۰/۳	٪۱/۰~
دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد – مدت ۲۴۰ دقیقه	~ ۰/۶–۰/۹ ٪	~ ٪۱/۲

یکی دیگر از عوامل مهم در عملکرد روسازی‌ها، جذب و دفع گرما توسط چسبانندهها و آسفالت‌های ساخته شده از آن‌ها است. استفاده از آسفالت رنگی باعث کاهش دما از حدود ۲ تا ۱۸ درجه سانتی گراد در مقایسه با آسفالت متداول سیاه رنگ می‌شود.(Chen et al., 2025), (Riaz et al., 2024) در طول روز سطح آسفالت به طور مستقیم در معرض تابش نور خورشید قرار دارد و گرما جذب می‌کند. بخشی از این گرما به عمق روسازی نفوذ کرده و در طول شب، به تدریج از سطح آن آزاد می‌شود. طبق آزمایش‌ها، دمای هوای اطراف روسازی در شب همواره بالاتر از دمای سطح آن است.(Synnefa et al., 2011) بر اساس مطالعات، افزایش دمای مخلوط آسفالتی متداول از ۴۵ به ۵۰ درجه سانتی گراد حدود ۰/۴ ساعت (۲۴ دقیقه) زمان نیاز دارد و برای همین میزان سرمایش زمان بیشتری لازم است. در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با چسباننده شفاف بدون رنگدانه، زمان گرمایش اندکی کمتر از دو برابر آسفالت متداول بوده است؛ در حالی که سرمایش آن بین ۰/۳ تا ۰/۴ ساعت (حدود ۲۰ دقیقه) ثبت شده است.(Badin et al., 2024)

دانه به مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با چسبانندههای شفاف، مقاومت در مقابل گرمایش بیشتر نیز می‌شود. به عنوان مثال، مخلوط آسفالتی ساخته شده با چسباننده شفاف و رنگدانه تیتانیم دی اکسید(سفید رنگ) به بیشتر از یک ساعت برای ۱۰ درجه سانتی گراد گرمایش و حدود ۲۰ دقیقه برای سرمایش نیاز دارد. کاهش دمای مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف و رنگدانه فریت روی (نارنجی رنگ) به میزان ۵ درجه سانتی گراد، ۰/۳۱ ساعت (۱۸/۶ دقیقه) زمان می‌برد. نتایج نشان داده است آسفالت با چسباننده شفاف در مقایسه با آسفالت متداول قیری عملکرد بهتری در برابر تغییرات دمایی دارد. آسفالت متداول قیری سیاه رنگ بیشترین جذب گرما را دارد و زمان بیشتری برای سرد شدن نیاز دارد و موجب تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری می‌شود. این اثر، باعث افزایش دمای داخل نواحی شهری در مقایسه با نواحی دیگر می‌شود؛ در حالی که استفاده از یک لایه نازک آسفالت با رنگ غالب سفید، دمای هوای اطراف روسازی را در وزش باد کم، حدود ۵ درجه سانتی گراد کاهش می‌دهد. (Synnefa et al., 2011)

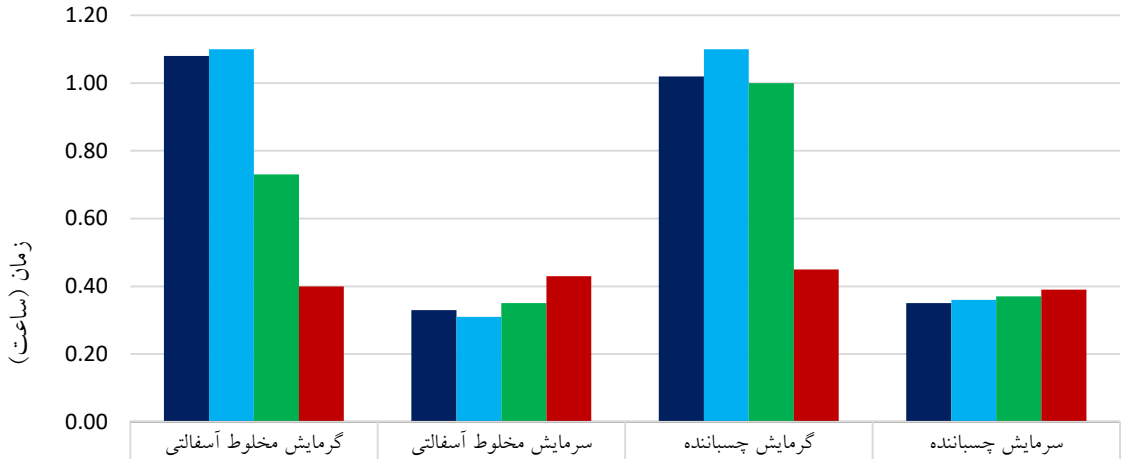
در جدول (٦) و شکل(۲) نتایج آزمایش گرمایش و سرمایش نمونه‌ها ارائه شده است. مخلوط آسفالتی متداول سیاه رنگ از سایر مخلوط‌ها سریع‌تر گرم و کندتر سرد می‌شود. (Badin et al., 2024)

کاهش دما در روسازی حتی به میزان ۵ درجه سانتی گراد می‌تواند پایداری دینامیکی و مقاومت در برابر شیار شدگی آسفالت را بهبود بخشد. در دمای بالا نیز، ویسکوزیته بالای آسفالت رنگی موجب افزایش مقاومت شیار شدگی می‌شود. این ویژگی‌ها، خصوصیت‌های مثبت آسفالت رنگی را برجسته‌تر می‌کند. (Badin et al., 2024)

در مجموع، مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف دیرتر گرم می‌شود و سریع‌تر سرد می‌شود، در حالی که مخلوط آسفالتی متداول سیاه رنگ زودتر گرم شده و دیرتر خنک می‌شود. این ویژگی، این امکان را فراهم می‌کند تا با توجه به شرایط مورد نیاز، ویژگی‌های حرارتی مخلوط آسفالتی را تنظیم و اصلاح کرد. بر اساس آزمایش‌ها، دمای سطحی مخلوط‌های آسفالتی رنگی همواره کمتر از آسفالت متداول است. دلیل آن رنگ تیره آسفالت متداول و جذب کمتر گرما توسط مخلوط آسفالت‌های رنگی است.(Synnefa et al., 2011)

جدول ٦. نتایج آزمایش‌های گرمایش و سرمایش (Badin et al., 2024)

	توضیحات / فرمول شیمیایی		بازه گرمایش (°C)	زمان گرمایش (ساعت)	بازه سرمایش (°C)	زمان سرمایش (ساعت)
نوع مخلوط آسفالتی	مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف و رنگدانه فریتِ روی	C.B+$ZnFe_2O_4$	٤٥ تا ٥٠	≈۱/۰۸	٥٠ تا ٤٥	≈۰/۳۳
	مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف و رنگدانه تیتانیوم دی اکسید	C.B+TiO_2	٤٥ تا ٥٠	≈۱/۱	٥٠ تا ٤٥	≈۰/۳۱
	مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف بدون رنگدانه	Neat C.B	٤٥ تا ٥٠	≈۰/۷۳	٥٠ تا ٤٥	≈۰/۳٥
	مخلوط آسفالتی با قیر عادی	Conv. Black	٤٥ تا ٥٠	≈۰/٤	٥٠ تا ٤٥	≈۰/٤۳
نوع چسباننده قیری	فریتِ روی مخلوط شده با چسباننده شفاف	$ZnFe_2O_4$ blended C.B	٤٥ تا ٥٥	≈۱/۰۲	٥٥ تا ٤٥	≈۰/۳٥
	تیتانیوم دی اکسید مخلوط شده با چسباننده شفاف	TiO_2 blended C.B	٤٥ تا ٥٥	≈۱/۱	٥٥ تا ٤٥	≈۰/۳٦
	چسباننده شفاف	Neat C.B	٤٥ تا ٥٥	≈۱/۰	٥٥ تا ٤٥	≈۰/۳۷
	چسباننده سیاه عادی	Conv. Black Binder	٤٥ تا ٥٥	≈۰/٤٥	٥٥ تا ٤٥	≈۰/۳۹



	گرمایش مخلوط آسفالتی	سرمایش مخلوط آسفالتی	گرمایش چسباننده	سرمایش چسباننده
فریتِ روی	1.08	0.33	1.02	0.35
تیتانیوم دی اکسید	1.10	0.31	1.10	0.36
چسباننده شفاف بی‌رنگ	0.73	0.35	1.00	0.37
چسباننده سیاه عادی	0.40	0.43	0.45	0.39

شکل ۲. مقایسه زمان تقریبی سرمایش و گرمایش مخلوط‌های آسفالتی و چسبانندهای شفاف

(Badin et al., 2024)

٤-٣- خواص ویسکوزیته

خواص رئولوژیکی، روانی و تغییر شکل سیالات را تحت تنش‌های وارد بر آن‌ها مشخص می‌کند. به طور کلی افزودن اصلاح کننده‌ها و انواع افزودنی‌ها، در شرایط گوناگون آب و هوایی، بر رفتار رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر گذار است و می بایست در فرآیند تولید، حمل و اجرای آسفالت‌ها ملاحظات لازم در نظر گرفته شود. (Rocha Segundo et al., 2020)، (Hafeez et al., 2019)

ویسکوزیته مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان با برخی افزودنی‌ها کنترل نمود. برای کاهش ویسکوزیته مخلوط و بهبود اختلاط مواد، می‌توان از روغن چسباننده آروماتیک استفاده کرد تا مخلوط روان‌تر شود. در مقابل با افزودن ۳۵ تا ۵۰ درصد رزین نفتی به مخلوط، نقطه نرمی بالا می‌رود و ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه شکل پذیری مخلوط کم می‌شود. اثر این ماده در دمای بالا و پائین مشابه است؛ ولی در دمای پائین اثر شکنندگی بیشتری در مخلوط ایجاد می‌کند. افزودن مواد پلیمری نیز به دلیل تشکیل ساختارهای شبکه مانند در مخلوط، بر روی رفتار آن تأثیر زیادی دارد. اصلاح کننده‌های پلیمری در مخلوط، پایداری حرارتی را در دماهای بالا افزایش داده و در دماهای پائین شکل پذیری را افزایش می‌دهد.(Tang et al., 2018) (Badin, Ahmad, (Nivitha & Murali Krishnan., 2018) (Chen & Zhang., 2017)، Ali ., 2020)

اصلاح کننده‌های پلیمری استایرن بوتادین استایرن و اتیلن وینیل استات[19]، در مقیاس ریزبافتی، به شکل همگنی در مخلوط پراکنده می‌شود و در نتیجه رفتار رئولوژیکی روسازی بهبود می‌یابد؛ اما پلی اتیلن[20] پراکندگی ناهمگن‌تری دارد و سبب عملکرد ضعیف‌تری در مخلوط می‌شود. از نظر الاستیسیته، چسباننده‌هایی که با پلی اتیلن اصلاح شده‌اند، سختی بیشتری دارد و در دمای پائین مقاومت کمتری در برابر ترک خوردگی از خود نشان می‌دهد؛ اما برای دمای بالا مناسب است. پلی یورتان[21] نیز ویسکوزیته مخلوط را حتی بیشتر از استایرن بوتادین استایرن افزایش می‌دهد و سبب بهبود دوام می‌شود. با افزودن مقدار زیاد اصلاح کننده پلیمری به مخلوط، ویسکوزیته مخلوط افزایش پیدا می‌کند. هرچه سختی و ویسکوزیته مخلوط بیشتر باشد، اجرای آن باید در دمای بالاتری انجام شود. (Bocci et al ., 2012), (Zhang et al., 2024)، (Chen et al., 2024) (Wang et al., 2024)

طبق تحقیقات میدانی در محله هوبیِ چین، دلیل اصلی کاهش کیفیت عملکرد قیر مصنوعی با رنگ روشن[22] با پیر شدگی، نابودی ساختار کلوییدی در آن است. (Tang et al., 2018)

وجود رنگدانه‌های متفاوت در مخلوط‌های آسفالتی نیز بر ویسکوزیته مخلوط مؤثر است. جدول(۷) تأثیر وجود رنگدانه نانو تیتانیوم دی اکسید(TiO_2) در چسباننده و تفاوت آن با چسبانندهٔ قیری را نشان داده است. با افزودن نانو تیتانیم دی اکسید (TiO_2) تا ۰/۵ درصد به مخلوط آسفالتی، به ویژه با چسباننده شفاف، عمر خستگی کاهش پیدا می‌کند؛ اما برای افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، مقدار بهینه ۱۰ درصد است. به دلیل رنگ سفید و خواص فتوکاتالیستی[23] حاصل از افزودن تیتانیم دی اکسید(TiO_2) به مخلوط آسفالتی، استفاده از آن در تونل‌ها و محل‌هایی که در آن‌ها آرام سازی ترافیک[24] انجام شده است، مناسب است. (Mohammed & Abed., 2024)، (Rocha Segundo et al., 2020)،(Bocci et al., 2012)، (Plug., 2023)

جدول ۷. مقایسه ویسکوزیته چسباننده‌ها

(Plug., 2023), (Bocci et al., 2012),(Rocha Segundo et al., 2020), (Mohammed & Abed., 2024)

نوع قیر/چسباننده	اصلاح کننده	رنگ	ویسکوزیته تقریبی در دمای ۱۳۵°C (Pa·s)	توضیحات/مقایسه با مرجع در دمای ۱۳۵°C	ویسکوزیته تقریبی در دمای ۱۶۵°C (Pa·s)	مقایسه با مرجع در دمای ۱۶۵°C
قیر خالص متداول (مرجع)	–	سیاه (به دلیل وجود آسفالتین)	۰/۶۵ (مبنای مقایسه)	مقدار مرجع برای آسفالت اصلاح نشده (معمولاً ویسکوزتر از چسباننده شفاف اصلاح نشده)	۰/۱	مرجع
اصلاح‌شده با TiO_2 نانو	٪۱ TiO_2	سفید	۰/۸۸	٪۳۵ ↑	۰/۱۵	٪۵/ ↑
اصلاح‌شده با TiO_2 نانو	٪۳ TiO_2	سفید	۱/۰۸	٪۶۶ ↑	۰/۲	٪۱ ↑

اصلاح‌شده با TiO_2 نانو	٪۵ TiO_2	سفید	۱/۴۵	٪۱۲۳ ↑ ویسکوزیته ماکسیمم	۰/۲۴	٪۱/۴ ↑
اصلاح‌شده با TiO_2 نانو	٪۷ TiO_2	سفید	۱/۳۸	٪۱۱۲ ↑	۰/۲۸	٪۱/۸ ↑
چسباننده شفاف (حذف آسفالتین از قیر خالص)	– (شفاف)	بی رنگ (بدون رنگدانه)	۱/۳۳	٪۱۰۴ ↑	۰/۳۹	٪۲/۹ ↑
چسباننده شفاف مصنوعی قابل رنگدانه زنی	اصلاح نشده	بی رنگ (بدون رنگدانه)	۰/۱۵–۰/۲۵	کمتر از آسفالت متداول (مرجع)	–	–
چسباننده شفاف مصنوعی قابل رنگدانه زنی	اصلاح شده پلیمری	بی رنگ (بدون رنگدانه)	۰/۵۰–۰/۷۰	ویسکوزیته بالاتر؛ همچنان کمتر از دامنه تغییرات مرجع	–	–
چسباننده شفاف مصنوعی قابل رنگدانه زنی	اصلاح شده پلیمری (دمای پایین)	بی رنگ (بدون رنگدانه)	<۰/۵۰	طراحی‌شده برای دمای اختلاط پایین‌تر	–	–

٤-٤-تغییر شکل

با کاهش اندازه دانه بندی مصالح افزوده شده به مخلوط آسفالتی، پیوندهای بین مصالح و چسباننده استحکام می‌یابد و در نتیجه تغییر شکل مخلوط آسفالتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گرافین نانو پلیت[۲۵] ماده‌ای است که تشکیل دهنده آلتروپ‌های کربنی است و با پیوستن آن‌ها به یکدیگر گرافیت[۲۶] تشکیل می‌شود. خاصیت نانو در این ماده، باعث ایجاد پیوندهای مستحکمی در ترکیب می‌شود. در نتیجه با افزودن این ماده به مخلوط، مشابه افزودن نانو تیتانیوم دی اکسید که پیش‌تر به آن اشاره شد روانی، نفوذپذیری و تغییر شکل کاهش پیدا می‌کند؛ در مقابل سختی و مقاومت در برابر شیار شدگی افزایش می‌یابد. (Hafeez et al., 2019)

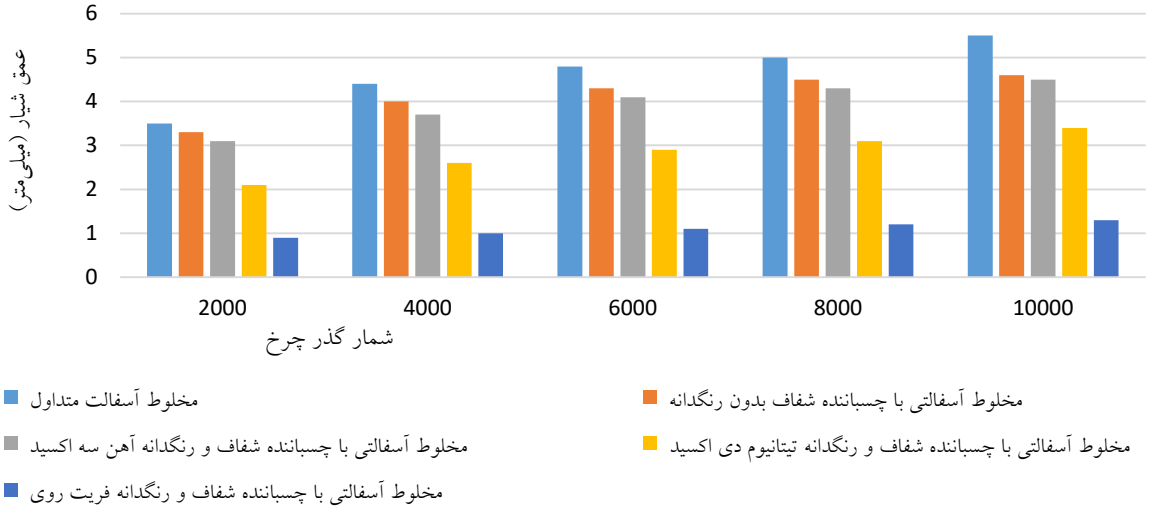
اغلب برای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با چسباننده شفاف قابل رنگدانه‌زنی[۲۷]، از استاندارد چسباننده پلیمری متداول (EN 14023) یا چسباننده قیری متداول برای آن‌ها استفاده می‌شود. البته استانداردهایی مختص به آن‌ها نیز موجود است. کیفیت آسفالت وابسته به کیفیت چسباننده مصرفی در آن است و کیفیت چسباننده می‌تواند بین قیر عادی تا قیر اصلاح شده پلیمری[۲۸] با کیفیت بالا، متغیر باشد. چسباننده شفاف اصلاح شده پلیمری حداقل رفتار قیر اصلاح شده پلیمری را دارد و گسیختگی زود هنگام آن در شرایط یکسان انتظار نمی‌رود؛ البته سختی کاهش پیدا می‌کند که این مورد در مغایرت با الزامات اجرایی لایه فوقانی نیست. (Plug., 2023)

یک چسباننده مصنوعی اصلاح شده پلیمری شفاف دارای درجه عملکردی ۷۶[۲۹]، عملکرد مکانیکی و کیفیت مناسبی برای استفاده در ساخت آسفالت‌های رنگی دارد. در مقایسه چسباننده مصنوعی شفاف با درجه عملکردی ۷۶ با قیر اصلاح شده پلیمری، تفاوت‌هایی وجود دارد. مخلوط ساخته شده با چسباننده مصنوعی شفاف با درجه عملکردی ۷۶، علاوه بر نمایش بهتر رنگ، در برابر شیار شدگی و خستگی مقاوم‌تر است و در نتیجه دوام بیشتری دارد. چسباننده پلیمری، خود دارای ویژگی‌های مشابه با مخلوط آسفالت متداول است، اما تفاوت‌هایی مثل درجه حرارت پائین‌تر برای مخلوط کردن و اجرا وجود دارد که باید در نظر گرفته شود.(Plug., 2023)

آسفالت‌های ساخته شده با چسباننده شفاف در برابر تغییر شکل عملکرد بهتری در مقایسه با آسفالت‌های متداول دارد. پنج نمونه آسفالت شامل آسفالت متداول، آسفالت با چسباننده شفاف بدون رنگدانه، آسفالت با چسباننده شفاف با رنگدانه‌های فریتِ روی(نارنجی)، آهن سه اکسید (قرمز) و تیتانیم دی اکسیدِ (سفید) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا مقدار مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل اندازه‌گیری شود. آزمایش اول، آزمایش شبیه سازی عبور چرخ کوپر[۳۰] و آزمایش دوم، تست مدول دینامیکی با تحلیل واریانسی نمونه‌ها است.

نتایج آزمایش چرخ کوپر نشان داده است اثر شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی با چسباننده شفاف بدون رنگدانه و با

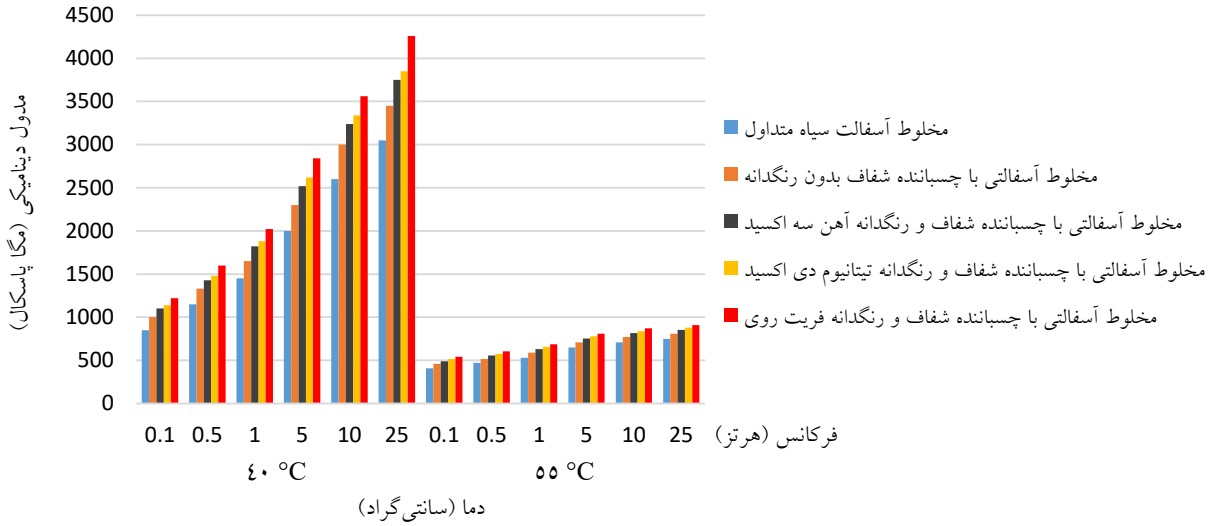
رنگدانه، کمتر از مخلوط آسفالت با چسباننده قیری است. در بین نمونه‌های آزمایش شده کمترین و بیشترین مقدار شیار شدگی به ترتیب در مخلوط آسفالتی با فریتِ روی و در مخلوط آسفالت متداول بوده است. یکی دیگر از اهداف این آزمایش، ارزیابی رویکرد آسفالت در دماهای بالا است. جایگزینی چسباننده قیری سیاه رنگ که جذب گرمای زیادی دارد با چسباننده شفاف، یکی از روش‌های افزایش مقاومت مخلوط در برابر دمای بالا است. افزایش سختی مخلوط آسفالتی در دمای بالا، نشان دهنده بهبود رفتار الاستیک چسباننده است. همچنین نتایج نشان داده است که نفوذپذیری مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف کمتر از آسفالت متداول است. شکل(۳) نتایج آزمایش در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد است. (Badin et al., 2024)



شکل۳. نتایج آزمایش چرخ کوپر در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد (Badin et al., 2024)

٤-٥- مدول دینامیکی

آزمایش مدول دینامیکی برای شبیه سازی تغییرات اقلیمی، در دو دمای ٤٠ و ٥٥ درجه سانتی گراد طبق آیین نامه آشتو (AASHTOTP62) انجام شده است. مقدار مدول دینامیکی با مقاومت آسفالت در برابر شیارشدگی رابطه مستقیم دارد. به این معنی که هرچقدر مدول دینامیکی مخلوط بالاتر باشد، مقاومت آن نیز در مقابل تغییر شکل دائم یا همان شیارشدگی بیشتر است و برعکس. در شکل(٤)، آزمایش در دو دمای ٤٠ و ٥٥ درجه سانتی گراد و فرکانس بین ۰/۱ و ۲۵ هرتز انجام شده است. واحد اندازه گیری فرکانس بر حسب هرتز و مدول دینامیکی بر حسب مگا پاسکال است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، آسفالت متداول، مدول دینامیکی پائین‌تری در مقایسه با طرح‌های دیگر با چسباننده شفاف دارد. مانند آزمایش پیشین، با افزودن رنگدانه به مخلوط، عملکرد نمونه‌ها بهبود پیدا می‌کند. آسفالت با چسباننده شفاف و رنگدانه فریتِ روی($ZnFe_2O_4$) با داشتن بیشترین مدول دینامیکی، بیشترین مقاومت در برابر شیار شدگی را دارد. پس از آن به ترتیب از بیشترین به کمترین مقاومت، آسفالت با چسباننده شفاف و رنگدانه سفید تیتانیوم دی اکسید (TiO_2)، آسفالت با چسباننده شفاف و رنگدانه قرمز آهن سه اکسید (Fe_2O_3) و چسباننده شفاف بدون رنگدانه است. مقاومت مخلوط آسفالت متداول با چسباننده قیری در برابر شیار شدگی از تمامی نمونه‌های دیگر کمتر است. طبق نمودار، با افزایش فرکانس وارده در هر دو دما، مدول دینامیکی افزایش پیدا می‌کند که یعنی مقاومت در برابر شیار شدگی نیز بیشتر می‌شود. مدول دینامیکی با افزایش دما، کاهش پیدا کرده و در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد کمتر از در دمای ٤٠ درجه سانتی گراد است. به طور کلی، نتایج آزمایش نشان داده است که اضافه کردن رنگدانه، به ویژه فریتِ روی، به مخلوط‌های آسفالتی با چسباننده شفاف مقاومت در برابرِ تغییر شکل دائم یا همان خرابی‌های مخلوط در دماهای بالا را افزایش می‌دهد. این موضوع نشان دهنده فوایدی است که این رنگدانه‌ها برای روسازی‌های آسفالتی دارد. فوایدی همچون افزایش دوام و بهبود عملکرد. همچنین اضافه کردن رنگدانه به مخلوط‌های آسفالتی رفتار آن‌ها را در دماهای بالا، با کاهش دمای سطحی و داخلی روسازی، در عین عدم کاهش عمر خستگی، بهبود می‌بخشد. (Badin et al., 2024)



شکل ٤. مقایسه مدول دینامیکی نمونه‌های آزمایشی در دماهای ۴۰ و ۵۵ درجه سانتی گراد (Badin et al., 2024)

٤-٦- خواص بهره برداری

وجود اصطکاک در روسازی اهمیت بالایی دارد و برای عملکرد بهینه ترمز وسایل نقلیه، در پیچ‌های پرخطر و برای جلوگیری از لغزیدن خودروها مؤثر است؛ البته بیش از حد بودن اصطکاک بین چرخ و رویه باعث خرابی زود هنگام لاستیک چرخ‌ها، تشدید آلودگی صوتی، سایش سطح رویه و بر جای ماندن رد مسیر چرخ خودروها بر روی روسازی می‌شود که سطح روسازی را تیره رنگ می‌کند. اصطکاک سطوح روسازی از زبر بودن سطح آن به وجود می‌آید. روسازی‌هایی که دارای ریزبافت‌های سطحی درشت‌تری باشد و مقدار صیقلی بودن سطح آن‌ها کمتر باشد، اصطکاک بیشتری دارد. در محاسبه اصطکاک سطحی و سایش مرطوب[۳۱] ملات ترمیمی آسفالت رنگی با طرح مخلوط بهینه مطابق جدول (۳) و سنگدانه‌های سنگ بازالت با دانه بندی یکنواخت ۱/۱۸ میلی‌متر به عنوان مصالح سنگی، عدد پاندول انگلیسی[۳۲] با افزایش مقدار سنگدانه تا ۱۰ درصد وزنی با سرعت بالا افزایش پیدا می‌کند؛ اما بیش از آن روند افزایش عدد پاندول کند می‌شود. عدد بدست آمده، بزرگ‌تر از ۳۲ است و طبق استانداردهای کشور انگلیس، اصطکاک سطحی مورد نیاز جاده ترمیم شده بازیابی می‌شود. در نتیجه بهتر است در روسازی‌هایی که برای اصطکاک آن‌ها نسبت مشخصی الزامی است، درصد سنگدانه‌ها ۱۰ درصد باشد. (Yang et al., 2022).

در مناطق دارای آب و هوای مرطوب درصد بهینه قیر در مخلوط ٤/٨ درصد و تخلخل ٤ درصد است. در این حالت مقادیر فضای خالی بین ذرات[۳۳]، فضای خالی پرشده با قیر[۳۴] و روانی، همگی با الزامات مطابقت دارد. البته در سایت‌های اجرایی درصد بهینه قیر، ۵/۲ درصد پیش بینی می‌شود. لازم به ذکر است طرح آزمایش شده در مقیاس کوچک و برای ترمیم راه‌ها بررسی شده است و برای مسیرهای طولانی‌تر نیاز به بررسی بیشتر دارد. (Liang et al., 2013)، (Sun et al., 2020)

اجرای مخلوط‌های آسفالتی رنگی با چسباننده پلیمری

اجرای آسفالت رنگی ساخته شده با چسباننده پلیمری شفاف نسبت به سایر روش‌های تولید آسفالت رنگی رایج تر است، زیرا روند ساخت مخلوط با این روش بهینه‌تر است. چسباننده‌های قابل رنگدانه‌زنی مصنوعی پلیمری، مشابه قیر عادی، از ترکیبات پتروشیمی و محصولات نفتی ساخته می‌شود. بنابراین، با اصلاحات شیمیایی مناسب می‌توان ویژگی‌های قیر اصلاح شده پلیمری را در چسباننده پلیمری شفاف ایجاد کرد. البته رفتار این نوع چسباننده‌ها در مخلوط آسفالتی به طور کامل مشابه آسفالت قیری نیست. به دلیل نبود استاندارد خاص برای تولید آسفالت با چسباننده شفاف و شباهت زیاد رفتار آن‌ها به مخلوط‌های قیری، در بسیاری از موارد، از استاندارد مخلوط‌های آسفالت قیری متداول برای آن‌ها استفاده می‌شود؛ کیفیت نهایی مخلوط وابسته به شرایط تولید و ویژگی‌های فنی و کیفی مصالح

اولیه به کار رفته در آن، می‌تواند متفاوت باشد.(Plug., 2023)، (Plug., 2017) با تنظیم فرمولاسیون مخلوط و افزودن مواد اصلاح کننده می‌توان خواص مطلوبی در مخلوط آسفالتی ایجاد کرد. به عنوان مثال، افزودن پلی‌اتیلن به مخلوط‌های آسفالتی موجب بهبود سختی و افزایش دوام در برابر شرایط مختلف آب و هوایی و تغییرات دمایی می‌شود. (Zhang et al., 2024)

تأثیر هندسه شهری

بافت شهری، به ویژه در فضای مابین آسمان خراش‌های شهری[۳۵]، بر روی فرآیند گرمایش و سرمایش روسازی تأثیرگذار است. وجود ساختمان‌های مرتفع در اطراف روسازی، اثرات متناقضی بر این روند دارد؛ به طوری که از یک سو با ایجاد سایه بر روی روسازی سبب سرمایش سریع‌تر روسازی می‌شود، اما از سوی دیگر در صورت قرارگیری روسازی در معرض تابش مستقیم نور خورشید، گرمای جذب شده را دیرتر دفع می‌کند. دلیل آن احاطه روسازی توسط سازه‌های مرتفع است. نسبت بخش قابل مشاهده آسمان از یک نقطه مشخص بر روی سطح افق یا روسازی، به کل نیم کره بالای آن نقطه، فاکتور دید آسمانی[۳۶] نامیده می‌شود. بر اساس این فاکتور، در صورت وجود سازه‌های مرتفع در اطراف روسازی، روند سرمایش روسازی در شب کندتر است؛ در حالی که روسازی‌های واقع در محل‌های با سازه‌های کوتاه‌تر و یا در محیط‌های باز، در شب یا در زیر سایه، گرمای جذب شده را با سرعت بیشتری دفع می‌کند و سریع‌تر خنک می‌شود. با جایگذاری این فاکتور در فرمول(۱)، اثر جزیره گرمایی شهری محاسبه می‌گردد. هرچه فاکتور دید آسمانی بیشتر باشد، تبادل حرارتی روسازی با محیط اطراف، به ویژه سرمایش هنگام شب، محدودتر شده و اثر جزیره گرمایی شهری تشدید می‌شود. این فاکتور بر روی آسفالت‌های رنگی نیز مؤثر خواهد بود و می بایست در طراحی لحاظ شود. (Abdi et al., 2023)، (Liu, Guo, & Jiang., 2023)، Cambridge (Systematics, Inc., 2005)

$$\Delta T_{r\text{-}u\ (max)} = 7.45 + 3.97(\ln H/W) \qquad (۱)$$

$\Delta T_{r\text{-}u\ (max)}$: اثر جزیره گرمایی (درجه سانتی گراد)

H: ارتفاع سازه‌ها (فوت)

W: عرض روسازی (فوت)

کاربرد

از آسفالت رنگی می‌توان استفاده‌های گسترده‌ای کرد. می‌توان برای مشخص کردن محل پیاده‌روها، سرعت‌گیرها، خطوط ویژه دوچرخه سواری، مسیرهای اتوبوس و BRT[۳۷]، ورودی‌ها و داخل تونل‌ها(به منظور کاهش هزینه روشنایی)، تقاطع‌ها، دوربرگردان‌ها، محل‌های توقف در مسیرهای پر تردد، تعیین سرعت‌های مجاز در خطوط مختلف بزرگراه‌ها، نشان دادن جهت حرکت، شانه راه‌ها، در مسیرهای یکنواخت برای جلوگیری از خستگی رانندگان و شانه‌های باند پرواز و حتی باند پرواز فرودگاه‌ها از رنگ‌های مختلف این گونه آسفالت‌ها استفاده کرد. به کار گیری آسفالت‌های رنگی علاوه بر ایجاد جلوه‌ای تازه در ظاهر شهرها، زیبا سازی مسیرها و کاهش جزیره گرمایی شهری، ایمنی رانندگی را نیز افزایش می‌دهد. با استفاده از فناوری آسفالت‌های رنگی می‌توان انتظار داشت آمار تکان دهنده تصادفات و تلفات ناشی از آن‌ها به شکل چشمگیری کاهش پیدا کند. (Xin., 2014)، (Mirzaei, Ghaemi, Akbari Motlagh., 2017)، (Ooms producten)

از آسفالت‌های رنگی در کشورهای زیادی در سراسر دنیا مثل کره جنوبی، چین، قطر، آمریکا، کانادا، هلند، اسپانیا، چیلی، ایسلند، آلمان، روسیه، سنگاپور و استرالیا استفاده شده است. یکی از جنبه‌های کاربرد این نوع روسازی‌ها، ارتقای زیبایی محیط شهری است. نمونه‌ای از آسفالت رنگی، خیابان عبدالله بن جاسم در نزدیکی بازار سوق واقف شهر دوحه در کشور قطر است. این خیابان به رنگ آبی اجرا شده است. از دیدگاه مهندسی، قطر به عنوان کشوری با اقلیم کویری و با پوشش گیاهی کمتر از یک درصد کشوری بسیار گرم است. احداث این مسیر آبی رنگ، در کاهش گرمای این شهر نقش مؤثری ایفا کرده و باعث کاهش قابل توجه دما در منطقه شده است. (Chen et al., 2024)، (Riaz et al., 2024)، (Rousta et al., 2022)، (Kawther.,

(Plug & Bondt., 2017)، (Xing et al., 2018)، 2018)، (Synnefa et al., 2011)

عوامل زیست محیطی

آسفالت‌های رنگی به دلیل داشتن رنگدانه‌های روشن‌تر از رنگ تیره آسفالت متداول، در کاهش پدیده جزیره گرمایی شهری اثر چشمگیری دارد. بازتاب بیشتر نور و جذب کمتر گرما توسط این روسازی‌ها موجب کاهش دمای سطح و لایه‌های زیرین آن‌ها و در نتیجه کاهش دمای محیط اطراف می‌شود. این کاهش دما نه تنها به کاهش انتشار کربن دی اکسید در مقیاس گسترده کمک می‌کند، بلکه در ابعاد شهری، ملی و حتی جهانی نیز می‌تواند اثر مثبتی در کاهش پدیده گرمایش داشته باشد. این افت دما باعث کاهش مصرف انرژی برای خنک کردن منازل، اداره‌ها و خودروها نیز می‌شود. همچنین بازتاب بیشتر نور به معنی نیاز کمتر انرژی برای روشنایی مسیرها است. تقاضای بالای انرژی منجر به فعالیت زیاد نیروگاه‌ها و در پی آن افزایش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای می‌شود که سلامت بسیاری از عموم را تهدید می‌کند؛ فعالیت کارخانه‌ها خود باعث افزایش دمای شهرها، تولید گازهای ناسالم و آسیب به لایه اوزون می‌شود. بنابراین، جایگزینی چسباننده‌های قیری سیاه رنگ متداول در آسفالت‌ها با چسباننده‌های پلیمری شفاف، راهکاری مؤثر برای مقابله با برخی پیامدهای منفی روسازی‌ها است. (Badin et al., 2024)، (Riaz et al., 2024)، (Plug., 2023)، (Rocha Segundo et al., 2020)، (Sun et al., 2020)، (Hafeez et al., 2019)، (Nivitha & Murali Krishnan., 2018)، (Tang et al., 2018)، (Plug & Bondt., 2017)، (Piérard et al., 2016)، (Bocci et al., 2012)

بازتاب نور

چسباننده‌های شفاف در مقایسه با چسباننده‌های قیری متداول، میزان جذب نور کمتری در مخلوط‌های آسفالتی دارد. این ویژگی باعث مصرف کمتر انرژی الکتریکی برای روشنایی مسیرهای با روسازی رنگی تا حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد می‌شود. طبق مطالعات، روسازی‌هایی که بازتاب نور بیشتری دارد، سرویس دهی طولانی‌تری نیز دارد.(Akbari & Kolokosta., 2016) همچنین در مقابله با پدیده جزیره گرمایی شهری و روند تولید کربن دی اکسید اثر مثبتی دارد؛ زیرا گرمای کمتری جذب می‌شود و دمای مخلوط آسفالتی پائین باقی می‌ماند. (Badin et al., 2024)، (Plug., 2023) استفاده از رنگدانه‌ها در چسباننده‌های شفاف جذب نور و ویژگی‌های حرارتی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور کلی، جذب نور با دمای سطحی روسازی رابطه عکس دارد. به این معنا که هرچه بازتاب نور بیشتر باشد، جذب گرما کمتر خواهد بود. با این حال بازتاب بیش از حد نور خورشید، می‌تواند چالش‌هایی ایجاد کند و برای افراد ناخوشایند باشد. مشکلاتی مانند کاهش قابلیت دید خطوط سفید توسط رانندگان در طول روز یا دشواری دید مناسب در فضاهایی مثل محل بازی کودکان نمونه‌هایی از این چالش‌ها است. برای مقابله با این گونه مشکلات، می‌توان از رنگ‌های تیره‌تر یا آسفالت متداول سیاه رنگ که سطح آن با رنگ دلخواه پوشیده شده است استفاده کرد. در این روش بازتاب نور تا ۲۳ درصد کاهش می‌یابد و دمای سطحی مخلوط ۱۵ درجه سانتی گراد کمتر از آسفالت متداول سیاه رنگ خواهد بود. اگرچه در اثر پیر شدگی مسیرهای پر تردد، سطح روسازی آلوده شده و یا لایه رنگ از روسازی جدا می‌شود و شفافیت و زیبایی اولیه روسازی کاسته می‌شود، ولی همچنان در مقایسه با آسفالت‌های سیاه رنگ، تیرگی آن‌ها کمتر است و در بازتاب نور عملکرد بهتری دارد. (Synnefa et al., 2011)

هزینه

یکی از دلایل پوشاندن سطح آسفالت متداول با رنگ، مقرون به صرفه بودن این روش است؛ هرچند با گذر زمان این لایه رنگ فرسوده شده و نیاز به ترمیم و بهسازی دارد. در حالی که در آسفالت‌های رنگی که رنگدانه‌ها در بین مصالح سنگی مخلوط آسفالتی به کار رفته‌اند، جداسازی آن‌ها ممکن نیست. علاوه بر این، برای کاهش هزینه‌ها می‌توان از آسفالت رنگی فقط به عنوان یک لایه سطحی بر روی آسفالت‌های متداول استفاده کرد. البته در این حالت، دفع گرمای جذب شده از سطح روسازی، می‌تواند مشکلات دیگری به وجود آورد. با به کارگیری آسفالت رنگی، هزینه‌های استفاده از رنگ‌های شیمیایی و ماشین آلات رنگ حذف می‌شود و با هزینه اولیه چسباننده شفاف و رنگدانه‌ها جایگزین می‌شود. مخلوط آسفالتی با چسباننده شفاف در مقایسه با آسفالت متداول، به مقدار کمتری رنگدانه برای رنگی شدن نیاز دارد و کیفیت رنگ بهتری نیز ارائه می‌دهد. همانطور که اشاره شد، مطالعات نیز نشان داده است که این گونه آسفالت‌ها نسبت

به آسفالت متداول مقاومت و کیفیت بهتری دارد و در بلند مدت عملکرد بهینه‌تری نیز از خود نشان داده است.
به کارگیری این نوع آسفالت‌ها علاوه بر افزایش دوام، موجب کاهش میانگین دمای کلان شهرها نیز می‌شود. در نتیجه مصرف انرژی برای سرمایش منازل، ادارات و ساختمان‌ها در فصل‌های گرم سال کاهش خواهد یافت. همچنین به دلیل بازتاب بیشتر نور در آسفالت‌های دارای چسباننده شفاف، نیاز مصرف انرژی برای روشنایی این مسیرها کاهش یافته و هزینه کمتری برای انرژی الکتریکی و تجهیزات روشنایی مسیرها مصرف می‌شود. این موضوعات در مقیاس کلان کمک بزرگی به اقتصاد کشور خواهد کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان سنجی کاربرد آسفالت‌های رنگی به عنوان لایه رویه در روسازی بررسی شده است. نتایج نشان داد:
-آسفالت رنگی به دلیل تأمین الزامات مقاومتی، اصطکاکی و بهره‌برداری لازمِ روسازی‌های آسفالتی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای رویه های قیری در بزرگراه‌ها، آزاد راه‌ها و سطوح پروازی فرودگاه‌ها باشد.
-مناسب‌ترین روش تولید آسفالت رنگی، ساخت مخلوط با چسباننده شفاف اصلاح شده است. برای رنگی کردن مخلوط از رنگدانه‌های روتایلِ تیتانیوم(TiO_2) برای رنگ سفید، فریتِ روی($ZnFe_2O_4$) برای رنگ زرد یا نارنجی، اکسیدِ آهن (Fe_2O_3) برای رنگ قرمز، آلومینات کبالت($CoAl_2O_4$) برای رنگ آبی و اکسیدِ کروم(Cr_2O_3) برای رنگ سبز استفاده می‌شود. به طور متوسط درصد بهینه رنگدانه در مخلوط ٤ درصد است. در آسفالت‌های رنگی ساخته شده با چسباننده شفاف بخشی از فیلر سنگدانه‌ها با رنگدانه جایگزین می‌شود. این جایگزینی بر اساس وزن مصالح انجام می‌شود.
-مخلوط‌های با چسباننده‌های شفاف به تنهایی دارای عملکرد بهتری در برابر تغییر شکل و نفوذپذیری نسبت به مخلوط‌های آسفالت قیری هستند. استفاده از مصالح ریزدانه در مخلوط نیز شکل پذیری و نفوذپذیری در مخلوط را بیش از پیش کاهش می‌دهد.
-افزودن رنگدانه به عنوان بخشی از چسبنده قیری مخلوط، درجه عملکردی، ویسکوزیته و شاخص مقاومت شیار شدگی مخلوط را افزایش می‌دهد. عمر خستگیِ مخلوط کاهش پیدا می‌کند اما با ۱ درصد رنگدانه، بهبود می‌دهد. با توجه به الزام سازمان هوانوردی فدرال[۳۸] مبنی بر افزایش درجه عملکردی قیر تا دو درجه، کاربرد آسفالت رنگی می‌تواند گزینه مناسبی برای سطوح پروازی توقفگاه‌ها[۳۹] باشد.
-تولید آسفالت رنگی باید در دمای حدود ۳۰ درجه سانتی گراد پایین‌تر از آسفالت با چسبانندههای نفتی انجام شود زیرا در دماهای بالا باعث سوختگی و تغییر رنگ چسباننده و رنگدانه‌ها می‌شود. مخلوط آسفالت با چسباننده شفاف در مقایسه با مخلوط آسفالت متداول در برابر گرما، کندتر گرم و سریع‌تر سرد می‌شود. افزودن رنگدانه به مخلوط این روند را تشدید می‌کند. مدول دینامیکی را افزایش می‌دهد؛ تغییر شکل و شیارشدگی را کاهش می‌دهد. افرودن ترکیبات پلیمری به چسبانندهها نیز باعث افزایش پایداری حرارتی مخلوط می‌شود.
-به دلیل شباهت زیاد مخلوطهای آسفالت تولید شده با چسباننده شفاف و مخلوطهای آسفالت تولید شده با قیر می‌توان با تنظیم فرمولاسیون آن به ویژگی‌های مطلوب رسید.
-هندسه شهری بر روند سرمایش و گرمایش روسازی مؤثر است و باید در حین اجرا مد نظر قرار گرفته شود.
-آسفالت رنگی، مخلوطهای دوستدار محیط زیست هستند و پدیده‌های مخربی مانند جزیره گرمایی شهری، تولید بیش از حد گاز کربن دی‌اکسید و آسیب لایه اوزون را کاهش می‌دهد. دمای سطحی آسفالت‌های رنگی در مقایسه با آسفالت‌های متداول به دلیل بازتاب بیشتر نور، کمتر است؛ این ویژگی باعث مصرف کمتر انرژی برای روشنایی می‌شود.
-ساخت آسفالت‌های رنگی هزینه‌ی بیشتری را ایجاد کند ولی در مدت طولانی از جهات بسیاری به صرفه‌تر از آسفالت‌های متداول است و نیاز کمتری به بهسازی و ترمیم دارد. با توجه به خواص این نوع رویه هزینه آن مستهلک است.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Urban heat island (UHI)
2. Pigment
3. Polymer-Modified Clear Binders
4. Zinc Ferrite
5. Thermochromic powder
6. Filler
7. Grey porphyry
8. Red porphyry
9. Titanium rutile
10. Aggregate
11. Superpave standard
12. Styrene butadiene styrene (SBS)
13. Colored emulsified seal mixture (CEASM)
14. Clay
15. Silica fume
16. Performance grade (PG)
17. Fatigue life
18. Warm mix asphalt (WMA)
19. Ethylene vinyl acetate (EVA)
20. Poly ethylene (PE)
21. Polyuerthane (PU)
22. Light-colored synthetic asphalt (LCSA)
23. Photocatalytical
24. Calming traffic
25. Graphene Nano-Platelets (GNPs)
26. Graphite
27. Pigmentable clear binder
28. Polymer modified bitumen (PMB)
29. PG76 synthetic clear binder
30. Cooper Wheel Tracking Test (CWTT)
31. Wet track abrasion test (WTAT)
32. British pendulum number (BPN)
33. Voids in mineral aggregate (VMA)
34. Voids filled with asphalt (VFA)
35. Urban canyon
36. Sky-view factor
37. Bus Rapid Transit
38. Federal Aviation Administration (FAA)
39. Aprons

۷- مراجع

-Abdi, Z., Alizadeh, H., Mohammadi, S., & Sabouri, S. (2023). Analysis of urban form typology using urban heat island indicators: Case study of Ferdous neighborhood of Tabriz. *Frontiers in Ecology and Evolution,* 10, 1065538. **doi.org/10.3389/fevo.2022.1065538**

-Abualia, A., Akentuna, M., Mohammad, L. N., Cooper, S. B., III, & Cooper, S. B., Jr. (2024). Improving Asphalt Binder Durability Using Sustainable Materials: A Rheological and Chemical Analysis of Polymer-, Rubber, and Epoxy-Modified Asphalt Binders. *Sustainability*, *16*(13), 5379. **doi.org/10.3390/su16135379**

-Akbari, H., & Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings, 133,* 834–842. **doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.06**

-Badin, G., Ahmad, N., & Ali, H. M. (2020). Experimental investigation into the thermal augmentation of pigmented asphalt. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *551*, Article 123974. **doi.org/10.1016/j.physa.2019.123974**

-Badin, G., Ahmad, N., Huang, Y., & Mahmood, Y. (2024). Evaluation of Pigment-Modified Clear Binders and Asphalts: An Approach towards Sustainable, Heat Harvesting, and Non-Black Pavements. *Infrastructures*, (5), 88. **doi.org/10.3390/infrastructures9050088**

-Badin, G.; Ahmad, N.; Ali, H.M.; Ahmad, T. Jameel, M.S, (2021). Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. *Constr. Build. Mater*. 302, 124212. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212**

-Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., & Virgili, A. (2012). Clear asphalt mixture for wearing course in tunnels: Experimental application in the province of bolzano. Procedia - *Social and Behavioral Sciences, 53,* 115–124. **doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.865**

-Cambridge Systematics, Inc. (2005). *Cool pavement report: EPA cool pavements study – Task 5.* U.S. Environmental Protection Agency, Heat Island Reduction Initiative.

-Chen, C., & Zhang, W. (2017). The pavement performance research on the powder colored asphalt mixture. *MATEC Web of Conferences,* 95, 01008. **doi.org/10.1051/matecconf/20179501008**

-Chen, S., Zhuo, S., Xu, G., Chen, X., Yu, L., & Xu, Q. (2024). Rheological and chemical indices to characterize long-term oxidative aging of SBS/rubber composite-modified asphalt binders. *Frontiers in Materials, 11,* 1346754. **doi.org/10.3389/fmats.2024.1346754**

-Chen, Z., Xing, C., Yuan, D., Peng, H., & Jiang, W. (2025). Analysis of cooling performance and environmental benefit of asphalt pavement materials using light-colored aggregates. *Construction and Building Materials, 458,* 139498. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139498**

-Hafeez, M., Ahmad, N., Kamal, M. A., Rafi, J., Haq, M. F. u., Jamal, Zaidi, S. B. A., & Nasir, M. A. (2019). Experimental Investigation into the Structural and Functional Performance of Graphene Nano-Platelet (GNP)-Doped Asphalt. *Applied Sciences*, *9*(4), 686. **doi.org/10.3390/app9040686**

Kawther, K. (2018). Colored asphalt and street print are decorating paving in public spaces. *MATEC Web of Conferences, 162*, 05027. **doi.org/10.1051/matecconf/201816205027**

-Kim, J. W., & Elipse, C. (2024). Feasibility Assessment of Mudstone Aggregate as an Alternative Material for Colored Asphalt Pavement in South Korea. *Applied Sciences*, *14*(19), 8601. **doi.org/10.3390/app14198601**

–Leite, L. F. M., Bittencourt, C. P., Martins, A. T., Macedo, M. G. de O., & Filho, L. R. S. (2009). Pigmentable asphalt binder composition (United States Patent No. US20090137703A1).

-Liang, C. F., Wang, H. Y., Lu, J. K., & Chen, H. C. (2013). The investigation of colored normal temperature asphalt concrete. Advanced *Materials Research, 723,* 686–693. **doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.686**

-Liu, B., Guo, X., & Jiang, J. (2023). How Urban Morphology Relates to the Urban Heat Island Effect: A Multi-Indicator Study. *Sustainability*, *15*(14), 10787. **doi.org/10.3390/su151410787**

–Mirzaei, E., Ghaemi,S. M. and Akbari Motlagh, A. (2017). Investigating the Specifications and Properties of Colored Asphalt. *Road*, *25*(91), 77-86. (in Persian)

-Mohammed, A. & Abed, A. (2024). Effect of nano-TiO2 on physical and rheological properties of asphalt cement. *Open Engineering, 14*(1), 20220520. **doi.org/10.1515/eng-2022-0520**

-Musco, A., Tarsi, G., Tataranni, P., Salzano, E., & Sangiorgi, C. (2024). Use of bio-based products towards more sustainable road paving binders: A state-of-the-art review. *Journal of Road Engineering, 4*(2), 151–162. **doi.org/10.1016/j.jreng.2024.04.002**

-Nivitha, M. R., & Murali Krishnan, J. (2018). Rheological characterisation of unmodified and modified bitumen in the 90–200°C temperature regime. *Road Materials and Pavement Design, 21*(5), 1341–1358. **doi.org/10.1080/14680629.2018.1552890**

-Ooms producten: engineer and manufacturer of clear binders and asphalt. (Company): Ooms civiel bv.

-Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2023). Advances in the Rheology of Synthetic Binder for Sustainable Road Pavements: An Improved

doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.01
-Tang, P., Mo, L., Pan, C., Fang, H., Javilla, B., & Riara, M. (2018). Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer modifiers. *Construction and Building Materials, 161,* 175–185. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.098**
-Wang, S., Yang, C., Zhao, J., Li, C., & Fan, X. (2023). Rapid and direct assessment of asphalt volatile organic compound emission based on carbon fiber ionization mass spectrometry. *ACS Omega*, 8(14), 12968–12979.
doi.org/10.1021/acsomega.3c00163
-Wang, W., Liu, B., Jin, D., Yu, M., & Zeng, J. (2024). Durability Investigation of Ultra-Thin Polyurethane Wearing Course for Asphalt Pavement. *Materials*, 17(20), 4977. **doi.org/10.3390/ma17204977**
-Xing, L., Lei, B., Chen, Z., & Dai, X. (2018). Preparation technology for cementing material of colored asphalt pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, *12*(2), 1–6. **doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000618**
-Xu, S., Wang, C., Wang, Y., Yao, Q., Ma, H., Jia, X., & Fang, L. (2023). Evaluation of asphalt ageing degree based on asphalt color. *Engineering Research Express, 5*(1), 015003.
doi.org/10.1088/2631-8695/acb11f
-Yang, W., Zhang, K., Yuan, J., Li, H., & Feng, Z. (2022). Tire-track resistance performance of acrylic resin emulsion coatings for colored asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design, 23*(4), 874–889.
doi.org/10.1080/14680629.2020.1847727
-Yu, B., Peng, W., Liu, J., Zhang, J., Li, W., & Hong, Q. (2020). Research on the performance of temperature responsive asphalt mixture with thermochromic material. *Road Materials and Pavement Design, 23*(3), 713–724.
doi.org/10.1080/14680629.2020.1842792
-Zhang, S., Yan, Y., Yang, Y., & Guo, R. (2024). Study on the Physical and Rheological Characterisation of Low-Density Polyethylene (LDPE)/Recycled Crumb Rubber (RCR) on Asphalt Binders. *Molecules*, *29*(3), 716.
doi.org/10.3390/molecules29030716
Protocol for DSR Testing. *Sustainability*, *15*(6), 5146.
doi.org/10.3390/su15065146
-Piérard, N., De Visscher, J., Vansteenkiste, S., & Vanelstraete, A. (2016). Coloured asphalt pavements: Mix design and laboratory performance testing. In F. Canestrari & M. N. Partl (Eds.), 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous. *Materials, Springer Netherlands*. *Vol. 11, 283–294.*
doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_23
-Plug, C. P., & Hagos, E. T. (2023). Clear binder in warm mix coloured asphalt: A high-quality, circular and safe application*. Ooms Producten.*
-Plug, K., de Bondt, A. (2017). Required Mechanical Properties of a Clear Binder for Coloured Asphalt Concrete. *The sixteenth Asphalt, Pavement Engineering and Infrastructure Conference*, LJMU, Liverpool.
-Riaz, A., Yasir, N., Badin, G., & Mahmood, Y. (2024). Innovative Pavement Solutions: A Comprehensive Review from Conventional Asphalt to Sustainable Colored lternatives. *Infrastructures*, *9*(10), 186.
doi.org/10.3390/infrastructures9100186
-Rocha Segundo, I., Landi, S., Jr., Margaritis, A., Pipintakos, G., Freitas, E., Vuye, C., Blom, J., Tytgat, T., Denys, S., & Carneiro, J. (2020). Physicochemical and Rheological Properties of a Transparent Asphalt Binder Modified with Nano-TiO2. *Nanomaterials*, *10*(11), 2152. **doi.org/10.3390/nano10112152**
-Rousta, I., Olafsson, H., Zhang, H., Moniruzzaman, M., Baranowski, P., & Krzyszczak, J. (2022). Anthropogenic factors affecting the vegetation dynamics in the arid middle east. *Environmental and Climate Technologies, 26*(1), 774–805. **doi.org/10.2478/rtuect-2022-0060**
-Sun, Z., Zhu, Z., Zhang, J., & Wu, C. (2020). Composition optimization and field application of colored emulsified asphalt seal mixture. *Frontiers in Materials, 7,* 258. **doi.org/10.3389/fmats.2020.00258**
-Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D. N., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment, 46*(1), 38–44.

Colored Asphalt Pavement

Parham Hayati, *Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

Alireza Rajabi, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

E-mail: p.hayati@modares.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Colored asphalt, meeting resistance and friction requirements, is a suitable alternative to conventional asphalt concrete in roads and airfield pavements. In the production of colored asphalts, transparent binders (modified bitumen, polymer-modified binders, resins and vegetable oils) are used. These types of binders are colorless, and various pigments (titanium rutile, zinc ferrite, iron tri-oxide, cobalt aluminate, and chromium oxide) are used to produce colored asphalts. The mix design of colored asphalt mixture is similar to conventional asphalt concrete, except that pigments replace a portion of the filler in the asphalt concrete mixture to reduce hardening effects. The amount of pigment in the asphalt concrete mixture, depending on the pigment type and asphalt concrete specifications, ranges from 0.5% to 5% (optimal approximate value of 4%) of the total weight of the mixture. Mixtures with transparent binders perform better against deformation and permeability compared to conventional asphalt concrete. Adding pigment to the binder increases the performance grade (suitable for airport apron surfaces), viscosity, and rutting resistance; although fatigue life decreases at high pigment percentages, it improves at pigment contents up to 1%. The production temperature of this asphalt should be set about 30°C lower than that of conventional asphalt (similar to warm-mix) to prevent burning and discoloration of the mixture. Colored asphalt made with transparent binder heats up more slowly and cools down more quickly, and the addition of pigment intensifies this process. Polymeric compounds also increase thermal stability. From an environmental perspective, colored asphalt is a sustainable option, reducing urban heat islands, carbon dioxide emissions, and ozone layer damage. The lower surface temperature and higher light reflectivity of this type of pavement reduce energy consumption for lighting. Although the initial production cost of this type of pavement is higher, it is favorable in the long term due to its higher durability and reduced need for repair and maintenance operations.

Keywords: Colored Asphalt, Pavement Deformation, Heat Island, Polymer Modified Clear Binder, Pigment