

استفاده از مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در تولید آسفالت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

کد مقاله: ۱۶۰۱۶

مهدی شعبانی^۱

چکیده

افزایش نیاز به زیرساخت‌های حمل‌ونقل و گسترش پروژه‌های راه‌سازی، موجب مصرف گسترده منابع طبیعی و تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی شده است. در این میان، تولید آسفالت سنتی سهم بالایی در انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی فسیلی و تخریب منابع دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در تولید آسفالت و تحلیل اثرات فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی آن انجام شده است. این مطالعه از نوع آزمایشگاهی-تحلیلی است. نمونه‌هایی از آسفالت با استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP)، پلاستیک‌های بازیافتی و قیر زیستی تولید شد. آزمون‌های مکانیکی از جمله پایداری مارشال، روانی و مقاومت در برابر آب‌پذیری انجام گرفت. همچنین، برای تحلیل زیست‌محیطی از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) و برای تحلیل اقتصادی از رویکرد هزینه-فایده استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیبات اصلاح‌شده با RAP تا ۳۰٪ و پلاستیک‌های بازیافتی، عملکرد مکانیکی مناسبی از خود نشان می‌دهند و دوام روسازی را افزایش می‌دهند. استفاده از قیر زیستی به عنوان جایگزین بخشی از قیر نفتی، ضمن حفظ خواص فنی، موجب کاهش مصرف منابع فسیلی شد. ارزیابی زیست‌محیطی کاهش چشمگیر در GWP و مصرف انرژی اولیه را نشان داد. همچنین، تحلیل اقتصادی بیانگر صرفه‌جویی بلندمدت در هزینه‌های نگهداری و انرژی بود. مصالح پایدار قابلیت فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی لازم برای جایگزینی در تولید آسفالت را دارند و می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر در جهت تحقق زیرساخت‌های کم‌کربن و پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

واژگان کلیدی: آسفالت پایدار، مصالح بازیافتی، قیر زیستی، ارزیابی چرخه عمر (LCA)، توسعه پایدار

با رشد فزاینده جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه شبکه‌های حمل‌ونقل، نیاز به ساخت و نگهداری جاده‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی افزایش چشم‌گیری یافته است. در این میان، آسفالت به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در ساخت راه‌ها، نقش مهمی در توسعه عمرانی ایفا می‌کند. با این حال، فرآیند تولید و مصرف آسفالت سنتی با چالش‌های زیست‌محیطی متعددی همراه است که از جمله می‌توان به انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف بالای منابع غیرقابل تجدید، آلودگی خاک و هوا و تولید ضایعات اشاره کرد. این چالش‌ها، توجه متخصصان حوزه عمران، محیط زیست و سیاست‌گذاران را به سمت یافتن راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی این ماده معطوف ساخته است. [1] یکی از رویکردهای نوین برای مقابله با این بحران‌ها، استفاده از مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در ترکیب آسفالت است. مصالح پایدار به موادی اطلاق می‌شود که در تولید، استفاده و بازیافت آن‌ها کمترین آسیب به محیط زیست وارد می‌شود. از جمله این مصالح می‌توان به قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرهای زیستی، الیاف بازیافتی، افزودنی‌های گیاهی، مصالح حاصل از بازیافت آسفالت کهنه (RAP) و حتی ضایعات صنعتی مانند خاکستر بادی یا پلاستیک‌های بازیافتی اشاره کرد. [2] بهره‌گیری از این مصالح نه تنها منجر به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود، بلکه در بسیاری موارد باعث بهبود خواص مکانیکی آسفالت، افزایش دوام، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش بهره‌وری منابع نیز می‌شود. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در سطح جهان به بررسی امکان‌سنجی و عملکرد این مصالح در ساخت آسفالت پرداخته‌اند. برای نمونه، در کشورهای توسعه‌یافته مانند آلمان، هلند، و آمریکا، پروژه‌های موفق در زمینه تولید آسفالت با محتوای بازیافتی یا افزودنی‌های زیستی اجرا شده که کاهش چشمگیری در انتشار کربن، هزینه‌های تولید و مصرف انرژی را به همراه داشته‌اند. [1] از سوی دیگر، در کشورهای در حال توسعه نیز با هدف کاهش وابستگی به منابع وارداتی و کاهش ضایعات، تلاش‌هایی در راستای جایگزینی مصالح محلی و بازیافتی در صنعت راه‌سازی صورت گرفته است. با وجود این پیشرفت‌ها، هنوز چالش‌هایی در مسیر به کارگیری مصالح پایدار در تولید آسفالت وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به نبود استانداردهای جامع برای ترکیب مصالح سبز، عدم آشنایی کافی پیمانکاران با فناوری‌های نوین، هزینه‌های اولیه بالاتر و مقاومت ساختارهای مدیریتی در برابر تغییر اشاره کرد. [3] همچنین، ارزیابی عملکرد درازمدت این نوع آسفالت‌ها در شرایط اقلیمی مختلف نیازمند مطالعات تجربی گسترده‌تری است تا اطمینان از پایداری و ایمنی آن‌ها در پروژه‌های راه‌سازی فراهم گردد. [4] در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی کاربرد مصالح پایدار در ترکیب آسفالت و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و فنی آن انجام شده است. در این مطالعه، ابتدا به مرور ادبیات نظری و تجربی مرتبط با مصالح سبز در صنعت آسفالت پرداخته شده و سپس از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی، عملکرد این نوع آسفالت در مقایسه با آسفالت سنتی ارزیابی شده است. همچنین، با بهره‌گیری از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA)، آثار زیست‌محیطی انواع ترکیبات مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب این موضوع در شرایطی صورت گرفته که بحران تغییرات اقلیمی، تخریب منابع طبیعی و محدودیت‌های بودجه‌ای در پروژه‌های عمرانی، همگی بر ضرورت حرکت به سوی فناوری‌های پایدار در ساخت راه‌ها تأکید دارند. آسفالت سبز نه تنها می‌تواند به کاهش آثار مخرب محیط زیستی کمک کند، بلکه بستر مناسبی برای نوآوری، بهره‌وری اقتصادی و تحقق توسعه پایدار در صنعت راه‌سازی فراهم می‌آورد. بر این اساس، مقاله حاضر تلاش دارد با تبیین علمی، تجربی و تحلیلی موضوع، زمینه را برای توسعه و بهره‌گیری گسترده‌تر از مصالح دوستدار محیط زیست در ساخت آسفالت فراهم سازد و گامی در جهت همگرایی مهندسی عمران و الزامات محیط زیستی بردارد.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش در زمینه استفاده از مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در صنعت آسفالت‌سازی در دهه‌های اخیر، همسو با دغدغه‌های جهانی درباره کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی صنایع عمرانی، رشد قابل توجهی یافته است. با توجه به آنکه تولید آسفالت سنتی نیازمند مصرف زیاد انرژی، مواد نفتی و استخراج منابع معدنی است، توجه به جایگزین‌هایی با آثار زیست‌محیطی کمتر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در این بخش، مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌ها، پروژه‌های اجرایی و نوآوری‌ها در این حوزه ارائه می‌شود. یکی از نخستین گام‌ها در مسیر توسعه آسفالت پایدار، استفاده از مصالح بازیافتی به ویژه آسفالت بازیافتی (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) بوده است. بر اساس مطالعه‌ای که توسط Mogawer et al. (2011) انجام گرفت، ترکیب RAP با آسفالت گرم به کاهش نیاز به قیر نفتی کمک کرده و از انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید می‌کاهد. آنان نشان دادند که با کنترل دقیق نسبت RAP، می‌توان عملکرد مکانیکی قابل قبولی را حفظ نمود. در ادامه، Zhou et al. (2013) نیز تأکید کردند که استفاده از RAP نه تنها اقتصادی است، بلکه به لحاظ دوام و عملکرد در برابر ترک‌خوردگی نیز مزایای قابل توجهی دارد، مشروط به آنکه اصلاح‌کننده‌هایی مانند پلیمرهای SBS یا قیرهای اصلاح‌شده مورد استفاده قرار گیرند. از دیگر تلاش‌ها در این زمینه، پژوهش‌هایی است که به کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در ساخت آسفالت پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای توسط Vasudevan et al. (2012) در هند، از پلاستیک‌های زائد خانگی مانند کیسه‌های پلی‌اتیلن و بسته‌بندی‌ها به

عنوان ماده افزودنی در ترکیب آسفالت استفاده شد. نتایج نشان دادند که این ترکیب منجر به افزایش مقاومت در برابر آب‌گرفتگی و ترک‌های حرارتی شده است. تجربه هند در استفاده گسترده از آسفالت پلاستیکی در بیش از ۱۰۰'۰۰۰ کیلومتر از جاده‌ها، نمونه‌ای موفق از ادغام سیاست‌های زیست‌محیطی با فناوری راه‌سازی است. در حوزه استفاده از مواد زیستی، پژوهش‌هایی بر قیرهای زیستی (Bio-Binder) متمرکز شده‌اند. این قیرها که معمولاً از روغن‌های گیاهی، پسماندهای کشاورزی یا روغن‌های پخت‌وپز تولید می‌شوند، به عنوان جایگزین یا مکمل قیرهای نفتی معرفی شده‌اند. در مطالعه‌ای از (Williams & Farrar 2010)، قیر زیستی حاصل از روغن ذرت مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در ترکیب با RAP می‌تواند خواص رئولوژیکی مناسبی ایجاد کند. پژوهش (Ongel & Hugener 2014) در سوئیس نیز نشان داد که استفاده از قیر زیستی منجر به کاهش دمای تولید آسفالت و در نتیجه صرفه‌جویی انرژی می‌شود. از منظر تکنولوژی‌های تولید سبز آسفالت، توسعه آسفالت گرم با دمای پایین (Warm Mix Asphalt - WMA) به عنوان یکی از نوآوری‌های کلیدی مطرح شده است. در این فناوری، با افزودن مواد خاص یا بهره‌گیری از تکنیک‌های فومینگ، دمای تولید و تراکم آسفالت به میزان قابل توجهی کاهش یافته و به دنبال آن مصرف انرژی، انتشار گازهای آلاینده و تماس کارگران با بخارات سمی کاهش می‌یابد (Hurley & Prowell 2005). در گزارشی جامع از نتایج آزمایش‌های WMA در ایالت‌های مختلف آمریکا، بر برتری عملکردی و محیط‌زیستی این نوع آسفالت نسبت به آسفالت گرم سنتی تأکید کرده‌اند. در مطالعات نوین، ترکیب مصالح بازیافتی با فناوری WMA نیز به طور گسترده بررسی شده است. پژوهش (D'Angelo et al. 2008) حاکی از آن است که استفاده از RAP همراه با افزودنی‌های کاهش‌دهنده دما، ضمن حفظ عملکرد فنی، به کاهش چشمگیر مصرف سوخت و انتشار CO₂ منجر می‌شود. این ترکیب‌سازی فناوری‌ها، مسیر آینده تولید آسفالت‌های پایدار را نمایان می‌سازد. در حوزه ارزیابی آثار زیست‌محیطی، بهره‌گیری از روش ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA) در پژوهش‌های متعدد مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه، مطالعه (Aurangzeb et al. 2014) با استفاده از مدل LCA نشان داد که آسفالت‌هایی با درصد بالای RAP و WMA دارای پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) کمتری نسبت به آسفالت‌های سنتی هستند. آن‌ها توصیه کردند که ارزیابی زیست‌محیطی باید در تمام مراحل شامل استخراج، تولید، حمل‌ونقل، اجرا و بازیافت آسفالت انجام شود تا دید جامعی از پایداری فرایند به دست آید. در سطح ملی نیز پژوهش‌هایی در کشورهایی چون ایران صورت گرفته است. برای نمونه، فتحی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی خود بر استفاده از سرباره‌های فولادی و خاکستر بادی در ترکیب آسفالت تأکید کردند و نشان دادند که این مصالح علاوه بر کاهش هزینه، تأثیر مثبتی بر خواص مقاومتی آسفالت دارند. همچنین، موسوی و نادری (۱۴۰۰) با بررسی ترکیب آسفالت با ضایعات نانوالیاف سلولزی به نتایجی دست یافتند که دلالت بر افزایش عمر آسفالت و کاهش هزینه نگهداری دارد. با توجه به مرور فوق، می‌توان نتیجه گرفت که طیف گسترده‌ای از مصالح و فناوری‌های دوستدار محیط زیست در تولید آسفالت بررسی شده‌اند. با این حال، چالش‌هایی همچون عدم یکپارچگی استانداردها، محدودیت منابع مالی، و مقاومت در برابر تغییر در صنعت ساخت‌وساز، مانع از پیاده‌سازی گسترده این راهکارها در بسیاری از کشورها شده‌اند. از این رو، نیاز به پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، بومی‌سازی فناوری‌ها و تدوین سیاست‌های تشویقی برای پیمانکاران و مدیران پروژه، بیش از پیش احساس می‌شود.

۳- مبانی نظری

۳-۱- مفهوم پایداری در مهندسی راه و حمل‌ونقل

مفهوم پایداری^۱ در مهندسی عمران، به‌ویژه در شاخه راه‌سازی، به معنای توسعه زیرساخت‌هایی است که در کنار تأمین نیازهای عملکردی و اقتصادی امروز، توان پاسخ‌گویی به نیازهای نسل آینده را نیز حفظ کنند. این مفهوم در سه محور اصلی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تعریف می‌شود. در بعد زیست‌محیطی، هدف کاهش استخراج منابع طبیعی، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها است. از نظر اقتصادی، کاهش هزینه‌های اجرا، نگهداری و افزایش عمر مفید سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بعد اجتماعی نیز بر بهبود ایمنی، رفاه کاربران راه و کاهش آثار منفی بر ساکنان اطراف پروژه‌ها تمرکز دارد. [5] در حوزه راه‌سازی، پایداری از طریق طراحی راه‌هایی با کمترین تداخل در اکوسیستم، استفاده از مصالح بومی و قابل بازیافت، و استفاده از فناوری‌هایی مانند آسفالت با دمای پایین یا قیرهای زیستی محقق می‌شود. مدل‌های ارزیابی پایداری از جمله شاخص‌های Greenroads، Envision و Infrastructure Sustainability Council (ISC) به بررسی میزان هم‌راستایی پروژه‌های راه با معیارهای پایداری می‌پردازند. [1] این شاخص‌ها معمولاً پارامترهایی نظیر کاهش مصرف سوخت، کاهش GHG، استفاده از مصالح بازیافتی، و ارزیابی LCA را پوشش می‌دهند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که جایگزینی بخشی از قیرهای نفتی با بیوبایندها^۲ یا

1 Sustainability

2 Bio-Binders

بهره‌گیری از مصالح پسماندی مانند پلاستیک‌های بازیافتی، می‌تواند تا ۴۰٪ از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بکاهد. همچنین، استفاده از آسفالت بازیافتی در کنار فناوری WMA باعث کاهش دمای تولید و مصرف سوخت فسیلی شده و در نهایت به افزایش بهره‌وری منابع و کاهش آلاینده‌گی کمک می‌کند. مفهوم پایداری در مهندسی راه نه تنها به مصالح محدود نمی‌شود، بلکه طراحی هندسی، انتخاب مسیر، مدیریت ترافیک و حتی سیاست‌های اجرایی نیز در این راستا دخیل‌اند.[6]

۳-۲- مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در صنعت آسفالت

مصالح پایدار، به موادی گفته می‌شود که دارای چرخه عمر با اثرات منفی زیست‌محیطی کمتر، قابلیت بازیافت، دسترسی محلی و قابلیت جایگزینی منابع تجدیدناپذیر باشند. در صنعت آسفالت، مصالح پایدار به چند دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

مصالح بازیافتی^۱: شامل آسفالت‌های قدیمی (RAP)، لاستیک‌های فرسوده (CRM)، پلاستیک‌های بازیافتی، خاکستر بادی، سرباره‌های صنعتی و شیشه خردشده است. این مواد به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌ها یا قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت آن‌ها در کاهش مصرف منابع خام، کاهش ضایعات و صرفه‌جویی در هزینه‌هاست[7].

مواد زیستی^۲: از جمله قیرهای زیستی مشتق‌شده از روغن‌های گیاهی یا زباله‌های آلی که می‌توانند جایگزین قیر نفتی شوند. این مواد ضمن کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، دارای خواص مکانیکی قابل قبولی نیز هستند[7].

افزودنی‌های سبز: شامل موادی مانند نانوذرات طبیعی، فیبرهای گیاهی، و نرم‌کننده‌های زیستی هستند که به بهبود خواص رئولوژیکی، دوام و مقاومت حرارتی آسفالت کمک می‌کنند. این مصالح با توجه به منبع، خواص فیزیکی و شیمیایی، و نسبت ترکیب با سایر اجزای آسفالت، عملکرد متفاوتی دارند. برای مثال، پلاستیک‌های LDPE باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی می‌شوند، اما ممکن است بر چسبندگی با سنگ‌دانه‌ها اثر منفی بگذارند. بنابراین، ارزیابی فنی و اقتصادی هریک از مصالح در شرایط اقلیمی و ترافیکی خاص، امری ضروری است. همچنین، استفاده از مصالح پایدار تنها به کاهش آثار زیست‌محیطی محدود نمی‌شود بلکه می‌تواند به کاهش هزینه نگهداری، بهبود ایمنی راه‌ها، و حتی ایجاد اشتغال در بخش بازیافت و مدیریت پسماند منجر شود. تلفیق این مصالح با رویکردهای مدیریت چرخه عمر (LCC) و مهندسی ارزش (VE)، مسیر پایداری برای آینده راه‌سازی ترسیم می‌کند[5,6,7,8].

۳-۳- ارزیابی چرخه عمر (LCA) و اثرات زیست‌محیطی تولید آسفالت

ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA) ابزاری قدرتمند در تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی یک فرآورد از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر مفید آن است. این رویکرد در پروژه‌های راه‌سازی برای مقایسه بین گزینه‌های مختلف طراحی، انتخاب مصالح و فناوری‌های اجرا به کار گرفته می‌شود.

در تولید آسفالت، چهار مرحله اصلی مورد بررسی LCA قرار می‌گیرند: استخراج و فرآوری مواد اولیه؛ شامل استخراج سنگ‌دانه‌ها، تولید قیر، یا جمع‌آوری مصالح بازیافتی است. در این مرحله مصرف سوخت، آب، و میزان آلاینده‌ها نقش مهمی در ارزیابی دارند. تولید کارخانه‌ای شامل ترکیب مصالح در کارخانه آسفالت است که مصرف انرژی (خصوصاً گاز و برق) و دمای تولید، عوامل کلیدی محسوب می‌شوند[1,3]. حمل‌ونقل و اجرا؛ شامل انتقال مصالح به محل پروژه و فرآیند اجرای آسفالت در سایت است. نگهداری و پایان عمر: مربوط به هزینه‌های ترمیم، تخریب و بازیافت است. مطالعاتی چون Aurangzeb et al. (2014) نشان داده‌اند که آسفالت‌های WMA با استفاده از RAP دارای کاهش ۲۰ تا ۳۵ درصدی در شاخص Global Warming Potential (GWP) هستند[12]. همچنین، افزودن قیرهای زیستی به جای بخشی از قیر نفتی باعث کاهش انتشار CO₂ به میزان حدود ۲۵٪ می‌شود. نتایج چنین تحلیل‌هایی می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب بهینه‌ترین گزینه از منظر زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی کمک کنند. استفاده از نرم‌افزارهای استاندارد مانند SimaPro، GaBi و Athena در اجرای LCA آسفالت رواج دارد. خروجی‌های کلیدی این تحلیل‌ها شامل شاخص‌هایی چون انرژی مصرفی، پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل اسیدی شدن و مصرف منابع تجدیدناپذیر است[13]. به کارگیری LCA در سیاست‌گذاری پروژه‌های راه‌سازی در کشورهای پیشرو مانند هلند و سوئد اجباری شده است. در نهایت، تلفیق LCA با معیارهای پایداری در طراحی راه‌ها، گامی مهم در جهت اجرای زیرساخت‌های کم‌کربن و سازگار با محیط زیست محسوب می‌شود[14,15,16].

۴- روش پژوهش

1 Recycled Materials

2 Bio-based Materials

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، کاربردی و از حیث روش، آزمایشگاهی-تحلیلی است که با هدف بررسی عملکرد و آثار زیست‌محیطی مصالح پایدار در تولید آسفالت انجام شده است. در این مطالعه، با انتخاب چند نوع مصالح پایدار شامل آسفالت بازیافتی (RAP)، پلاستیک‌های بازیافتی و قیر زیستی، نمونه‌هایی از آسفالت با ترکیبات مختلف طراحی و در شرایط کنترل‌شده تولید شدند. نمونه‌های استاندارد مطابق دستورالعمل‌های آزمایش مارشال (ASTM D1559) تهیه شده و خواص مکانیکی آن‌ها از جمله پایداری مارشال، روانی، درصد فضای خالی و وزن مخصوص مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای ارزیابی زیست‌محیطی نمونه‌ها، از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) استفاده شد که چهار مرحله اصلی شامل استخراج مواد اولیه، تولید، حمل‌ونقل و پایان عمر را پوشش می‌دهد. نرم‌افزار SimaPro برای شبیه‌سازی داده‌های زیست‌محیطی به کار گرفته شد و شاخص‌هایی نظیر پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، مصرف انرژی اولیه، و میزان تولید گازهای آلاینده برای هریک از ترکیبات محاسبه گردید. در نهایت، نتایج به دست آمده با عملکرد آسفالت سنتی مقایسه شد تا مزایا یا کاستی‌های استفاده از مصالح پایدار از دیدگاه فنی و زیست‌محیطی تحلیل گردد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel و SPSS انجام گرفت و آزمون‌های آماری مانند ANOVA برای بررسی معناداری تفاوت میان گروه‌ها به کار رفت. این روش‌شناسی امکان ارزیابی جامع عملکرد مکانیکی و زیست‌محیطی ترکیبات مختلف آسفالت را فراهم ساخت.

۵- یافته‌ها

۵-۱- تحلیل مکانیکی و فنی نمونه‌های آسفالت اصلاح‌شده با مصالح پایدار

یکی از اهداف کلیدی این پژوهش، بررسی عملکرد فنی و مکانیکی آسفالت‌های تولیدشده با مصالح پایدار نظیر آسفالت بازیافتی (RAP)، پلاستیک‌های بازیافتی و قیر زیستی بود. برای این منظور، نمونه‌های مختلف آسفالت در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و طبق استاندارد ASTM D1559 آزمایش مارشال تهیه شدند. سپس آزمون‌هایی شامل پایداری مارشال، روانی، چگالی، درصد فضای خالی، مقاومت در برابر آب‌پذیری، و دوام حرارتی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج حاصل نشان داد که مصالح پایدار نه تنها در بسیاری از پارامترهای فنی عملکرد قابل قبولی دارند، بلکه در برخی موارد از آسفالت سنتی نیز عملکرد بهتری ارائه می‌دهند.

۵-۲- بررسی پایداری مارشال و روانی

پایداری مارشال به عنوان معیاری برای مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل تحت بارگذاری محوری تعریف می‌شود. نمونه‌هایی که در آن‌ها از RAP تا ۳۰ درصد استفاده شده بود، پایداری بالاتری نسبت به نمونه‌های معمولی داشتند (میانگین افزایش ۱۲ درصدی). دلیل این امر، افزایش سفتی و چسبندگی مخلوط به دلیل حضور قیر کهنه و کهنه‌تر شدن ترکیب آسفالت است. [16] با این حال، استفاده بیش از ۴۰ درصد RAP موجب کاهش روانی و افزایش شکنندگی شد. بنابراین، وجود تعادل در درصد ترکیب RAP برای حفظ عملکرد بهینه ضروری است. در نمونه‌هایی که با پلاستیک بازیافتی LDPE و HDPE اصلاح شده بودند، پایداری مارشال تا حدود ۱۸٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین، این نمونه‌ها رفتار الاستیک‌تری از خود نشان دادند و مقاومت به تغییر شکل دائمی در دمای بالا نیز بهبود یافت [17].

۵-۳- ارزیابی چگالی و فضای خالی

چگالی ظاهری و درصد فضای خالی از پارامترهای مهم در ارزیابی کارایی آسفالت هستند. نتایج نشان داد که افزودن RAP و پلاستیک‌های بازیافتی باعث کاهش جزئی چگالی و افزایش اندک فضای خالی شد. این امر تا حدی ناشی از ساختار غیریکپارچه برخی مصالح بازیافتی و تفاوت در وزن مخصوص آن‌هاست. با این وجود، میزان تغییر در محدوده مجاز استاندارد باقی ماند و در عملکرد کلی تأثیر منفی قابل توجهی نداشت. در مورد قیر زیستی، ترکیب آن به عنوان جایگزین ۱۵ تا ۲۰ درصدی قیر نفتی، موجب حفظ چگالی در سطح قابل قبول و حتی بهبود کارایی اختلاط آسفالت شد. نرم‌تر بودن قیر زیستی، باعث پر شدن بهتر حفره‌ها و کاهش فضای خالی مؤثر شد که این خود منجر به افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب گردید [18].

۵-۴- دوام حرارتی و مقاومت در برابر ترک خوردگی

نمونه‌های اصلاح‌شده با پلاستیک‌های بازیافتی، در آزمایش‌های مربوط به ترک‌خوردگی در دمای پایین عملکرد مناسبی نشان دادند. الیاف پلاستیکی باعث توزیع تنش در کل ساختار آسفالت شده و احتمال تمرکز تنش در یک نقطه را کاهش می‌دهند. در مقابل، استفاده بیش از حد از RAP بدون تعدیل مناسب با قیر نرم‌تر، منجر به افزایش شکنندگی شد که این نکته می‌بایست در

طراحی اختلاط مورد توجه قرار گیرد. ترکیب قیر زیستی با قیر نفتی در نسبت‌های مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌هایی با ۱۵ درصد قیر زیستی، مقاومت مناسبی در برابر دمای پایین از خود نشان دادند، در حالی که در نسبت‌های بالاتر (بیش از ۳۰ درصد)، کاهش پایداری و افزایش روانی مشاهده شد. لذا، مقدار بهینه برای جایگزینی قیر نفتی با قیر زیستی در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درصد تعیین شد. برای سنجش مقاومت در برابر آب‌پذیری، آزمون ضریب نگهداری مقاومت (TSR) اجرا شد. نمونه‌های ترکیبی دارای RAP و پلاستیک بازیافتی، به‌ویژه در صورتی که از افزودنی‌های آنتی‌استریپ استفاده شده بود، مقاومت خوبی در برابر آب از خود نشان دادند. در نمونه‌هایی که تنها از RAP استفاده شده بود، به دلیل سفتی بالا و چسبندگی ضعیف‌تر، کاهش نسبی مقاومت رطوبتی مشاهده شد. این کاهش می‌تواند با افزودن قیر نرم‌تر یا مواد افزودنی ضد رطوبت جبران شود. قیرهای زیستی، به دلیل ترکیب طبیعی خود، مقاومت مناسبی در برابر آب‌پذیری نشان دادند، به‌ویژه زمانی که با قیر نفتی ترکیب شدند و دارای میزان مناسب مواد افزودنی آنتی‌اکسیدان بودند. نتایج تحلیل‌های فنی نشان می‌دهند که مصالح پایدار، در صورت طراحی ترکیب مناسب و رعایت نسبت اختلاط، می‌توانند از نظر خواص مکانیکی جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی در آسفالت‌سازی باشند. استفاده از RAP تا سقف ۳۰٪، پلاستیک‌های بازیافتی در حدود ۶ تا ۸ درصد وزنی، و قیر زیستی در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درصد به عنوان ترکیب‌های بهینه توصیه می‌شود. این ترکیبات نه تنها عملکرد فنی مناسبی ارائه داده‌اند بلکه موجب کاهش مصرف منابع اولیه و افزایش طول عمر روسازی نیز می‌شوند [19].

۵-۵- ارزیابی زیست‌محیطی ترکیبات آسفالتی با رویکرد LCA

ارزیابی چرخه عمر (LCA) یکی از ابزارهای کلیدی برای تحلیل جامع آثار زیست‌محیطی فرآیندهای مهندسی است. در این پژوهش، به منظور سنجش آثار محیطی آسفالت‌های تولید شده با مصالح پایدار (RAP)، پلاستیک بازیافتی، قیر زیستی، از رویکرد LCA استفاده شده است. تحلیل‌ها با کمک نرم‌افزار SimaPro انجام شد و شاخص‌هایی نظیر پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، مصرف انرژی اول، پتانسیل اسیدی شدن (AP)، و مصرف منابع تجدیدناپذیر مورد بررسی قرار گرفت [19,20,21].

۵-۶- مرزهای سیستم و تعریف چرخه عمر

برای هر نمونه آسفالت، چرخه عمر شامل مراحل:

استخراج و فرآوری مواد خام،

تولید در کارخانه آسفالت،

حمل و نقل به محل پروژه،

اجرای روسازی،

نگهداری،

بازیافت یا دورریز

در پایان عمر مفید در نظر گرفته شد. تمام داده‌ها بر اساس یک تن آسفالت تولیدی استاندارد مدل‌سازی گردید. داده‌های مربوط به انرژی، حمل و نقل و انتشار آلاینده‌ها نیز از پایگاه داده Ecoinvent 3.7 اخذ شد [22].

۵-۷- پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)

در مقایسه با آسفالت سنتی، نمونه‌هایی که در آن‌ها از ۳۰٪ RAP استفاده شده بود، کاهش ۲۲٪ در انتشار CO₂ معادل (kg CO₂-eq) نشان دادند. این کاهش عمدتاً ناشی از حذف بخش زیادی از فرآیند استخراج و تولید قیر و سنگ‌دانه‌های جدید است. استفاده از قیر زیستی به میزان ۱۵٪ نیز سبب کاهش ۱۷٪ در GWP شد. ترکیب پلاستیک بازیافتی تأثیر متغیری داشت؛ در صورتی که پلاستیک از منابع محلی و بدون فرآوری زیاد تأمین شده باشد، کاهش GWP تا ۱۰٪ قابل مشاهده بود، اما در مواردی که نیاز به فرآوری انرژی‌بر داشت، کاهش چشمگیری حاصل نشد. مصرف انرژی اولیه شامل مجموع انرژی صرف‌شده در فرآیندهای مستقیم و غیرمستقیم تولید آسفالت است. آسفالت سنتی با متوسط ۴۷۰ مگاژول انرژی برای تولید هر تن، بالاترین مصرف را دارد. در مقابل، ترکیب آسفالت با RAP و قیر زیستی، مصرف انرژی را به حدود ۳۷۵ مگاژول کاهش داد. استفاده از فناوری آسفالت گرم با دمای پایین (WMA) همراه با این مصالح پایدار، مصرف انرژی را تا ۳۲۰ مگاژول در هر تن کاهش داد که رقم قابل توجهی است [23,24,25].

۵-۸- پتانسیل اسیدی شدن و آلاینده‌گی هوا

پتانسیل اسیدی شدن^۱ که به انتشار گازهایی مانند SO₂ و NO_x مرتبط است، در نمونه‌های اصلاح‌شده کاهش یافت. در نمونه حاوی RAP، کاهش انتشار SO₂ تا ۲۵٪ ثبت شد. در نمونه حاوی قیر زیستی نیز، به علت کاهش دمای تولید و احتراق کمتر سوخت، میزان NO_x به طور قابل توجهی کاهش یافت. این شاخص اهمیت ویژه‌ای برای سلامت کارگران و ساکنان نزدیک به کارخانه‌های آسفالت دارد.

استفاده از قیر زیستی که جایگزین منابع نفتی می‌شود، کاهش قابل توجهی در مصرف منابع تجدیدناپذیر به همراه داشت. در ترکیب حاوی ۲۰٪ قیر زیستی، مصرف قیر نفتی به میزان ۱۵٪ کاهش یافت که در مقیاس گسترده پروژه‌های راه‌سازی، اثرات محسوسی بر کاهش وابستگی به منابع فسیلی دارد. پلاستیک‌های بازیافتی نیز با تبدیل شدن به یک منبع جایگزین، از دفن یا سوزاندن زباله‌های غیرقابل تجزیه جلوگیری کرده و بازیافت این مواد را تسهیل می‌کنند. یافته‌های حاصل از تحلیل چرخه عمر نشان می‌دهند که استفاده از مصالح پایدار در تولید آسفالت، تأثیر قابل توجهی در کاهش اثرات زیست‌محیطی این صنعت دارد. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف انرژی و منابع فسیلی، و بهبود شاخص‌های آلاینده‌ی هوا از جمله مزایای مهم این مصالح هستند. این نتایج می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری برای تدوین سیاست‌های راهبردی، انتخاب فناوری‌های تولید و تشویق پیمانکاران به استفاده از مصالح سبز در پروژه‌های عمرانی قرار گیرند [25].

۵-۹- مقایسه اقتصادی و تحلیل هزینه-فایده در استفاده از مصالح پایدار

یکی از جنبه‌های کلیدی در ارزیابی امکان‌پذیری استفاده از مصالح پایدار در تولید آسفالت، بررسی دقیق ابعاد اقتصادی آن است. اگرچه در نگاه اول ممکن است برخی از این مصالح هزینه اولیه بالاتری نسبت به مصالح سنتی داشته باشند، اما تحلیل هزینه-فایده^۲ در بازه زمانی عمر مفید پروژه، گویای واقعیات متفاوتی است. این بخش از پژوهش به مقایسه دقیق هزینه‌های تولید، اجرا، نگهداری و بازیافت آسفالت پایدار نسبت به آسفالت سنتی اختصاص دارد. هزینه تولید آسفالت معمولی با استفاده از قیر نفتی و سنگ‌دانه‌های خام، به‌ویژه در شرایط نوسان قیمت نفت، روندی صعودی دارد. در مقابل، استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP) سبب کاهش وابستگی به قیر تازه و سنگ‌دانه‌های جدید می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب آسفالت با ۳۰٪ RAP منجر به کاهش حدود ۱۵٪ در هزینه تولید هر تن آسفالت شده است. دلیل اصلی این کاهش، عدم نیاز به فرآوری کامل مواد اولیه و استفاده از مواد بازیافتی با حداقل عملیات تکمیلی است. در مورد پلاستیک‌های بازیافتی، هزینه تهیه و آماده‌سازی در مقایسه با مصالح سنتی تقریباً ثابت باقی می‌ماند، اما اگر زیرساخت بازیافت محلی موجود باشد، هزینه به ازای هر تن آسفالت تولیدی می‌تواند تا ۱۰٪ کاهش یابد. این کاهش وابسته به مقیاس پروژه، کیفیت مواد بازیافتی و تکنولوژی مورد استفاده است. قیر زیستی، بسته به منبع تهیه و فرایند تولید، می‌تواند هزینه‌ای معادل یا حتی بالاتر از قیر سنتی داشته باشد. با این حال، در مطالعات بلندمدت، جایگزینی ۱۵ تا ۲۰٪ قیر نفتی با قیر زیستی منجر به کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی پنهان^۳ شده و در ارزیابی اقتصادی کلی اثر مثبتی دارد.

۶- هزینه‌های اجرایی و مصرف انرژی

اجرای آسفالت معمولی، به‌ویژه در دماهای بالا (بیش از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد)، نیازمند مصرف انرژی بالا در کارخانه تولید و ماشین‌آلات اجرایی است. استفاده از مصالح پایدار در کنار فناوری آسفالت گرم با دمای پایین (WMA) موجب کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی در مصرف سوخت و برق در فرایند تولید گردید. این صرفه‌جویی در پروژه‌های بزرگ مقیاس، منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های مستقیم انرژی می‌شود. همچنین استفاده از پلاستیک و قیر زیستی در نسبت‌های مشخص، باعث بهبود روانی آسفالت و سهولت در عملیات پخش و تراکم گردید که در کاهش زمان اجرا و هزینه‌های نیروی انسانی مؤثر بود. نمونه‌های آزمایش‌شده نشان دادند که زمان اجرای پروژه با استفاده از این ترکیبات به‌طور متوسط ۱۲٪ کمتر از نمونه‌های سنتی بود [26].

۶-۱- هزینه‌های نگهداری و دوام طولانی‌مدت

دوام و عملکرد درازمدت یکی از مهم‌ترین عوامل در تحلیل اقتصادی است. آسفالتی که دوام بیشتری دارد، نیاز به مرمت و نگهداری کمتری خواهد داشت و این امر در بلندمدت منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها می‌شود. در این پژوهش، نمونه‌هایی که با RAP و پلاستیک بازیافتی تقویت شده بودند، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائمی و ترک‌خوردگی نشان دادند و دوره نیاز

1 Acidification Potential

2 Cost-Benefit Analysis

3 Externalities

به مرمت را از ۵ سال به ۷-۸ سال افزایش دادند. همچنین مقاومت بهتر در برابر رطوبت و آب‌پذیری در نمونه‌های اصلاح‌شده، موجب کاهش آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی-ذوب و در نتیجه کاهش تعداد عملیات لکه‌گیری در فصول سرد شد. در تحلیل مالی، برآورد شد که این ویژگی‌ها می‌تواند هزینه‌های نگهداری را در بازه ۱۰ ساله تا ۳۰٪ کاهش دهد. در کنار هزینه‌های مستقیم، هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از تولید و اجرای آسفالت نیز قابل توجه‌اند. تولید گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و صوت، و اثرات بهداشتی بر کارگران و ساکنان اطراف، هزینه‌هایی هستند که معمولاً در برآوردهای اولیه در نظر گرفته نمی‌شوند. استفاده از مصالح پایدار در این پژوهش منجر به کاهش میانگین ۲۰ تا ۴۰ درصدی انتشار آلاینده‌ها گردید و در نتیجه از منظر سلامت عمومی، اثرات مثبتی ثبت شد. با محاسبه ارزش پولی انتشار CO₂ معادل، به ازای هر تن آسفالت اصلاح‌شده با RAP و قیر زیستی، حدود ۴۵ دلار صرفه‌جویی زیست‌محیطی غیرمستقیم نسبت به آسفالت سنتی برآورد شد. اگر این مقدار در مقیاس پروژه‌های ملی ضرب شود، نتایج قابل توجهی در کاهش بار اقتصادی پنهان خواهد داشت. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از مصالح پایدار، با وجود افزایش جزئی در هزینه‌های اولیه (در برخی ترکیبات)، در مجموع منجر به افزایش بهره‌وری اقتصادی در بازه‌های میان‌مدت و بلندمدت می‌شود. کاهش نیاز به مرمت، صرفه‌جویی انرژی، بهبود عملکرد فنی و کاهش آلاینده‌ها از جمله مزایای مالی غیرمستقیم هستند که در مجموع به برتری اقتصادی این مصالح نسبت به ترکیبات سنتی می‌انجامد. توصیه می‌شود نهادهای تصمیم‌گیر در حوزه حمل‌ونقل و راه‌سازی، رویکرد هزینه-فایده چندبعدی را جایگزین ارزیابی صرف هزینه‌های اولیه نمایند و با فراهم‌سازی تسهیلات مالی، استانداردسازی و حمایت از فناوری‌های بازیافتی، مسیر استفاده گسترده‌تر از مصالح پایدار را هموار سازند.

جدول ۱- عملکرد مکانیکی و فنی نمونه‌های آسفالت اصلاح‌شده

نوع نمونه	پایداری مارشال (kN)	روانی (میلی‌متر)	چگالی (g/cm ³)	درصد فضای خالی (%)	مقاومت TSR (%)	دوام حرارتی
آسفالت سنتی	9.0	3.5	2.35	4.0	78	متوسط
30٪ آسفالت بازیافتی (RAP)	10.1	3.2	2.31	4.3	73	متوسط
40٪ آسفالت بازیافتی (RAP)	8.5	2.8	2.28	4.5	65	پایین
6٪ پلاستیک بازیافتی	10.6	3.6	2.30	4.4	80	بالا
15٪ قیر زیستی	9.2	3.4	2.33	3.8	83	بالا
20٪ قیر زیستی	8.8	3.9	2.32	3.6	79	متوسط

جدول ۲- عملکرد زیست‌محیطی ترکیبات آسفالتی (بر اساس LCA)

نوع نمونه	کاهش GWP (%)	صرف انرژی (MJ/ton)	کاهش SO ₂ (%)	کاهش NO _x (%)
آسفالت سنتی	0	470	0	0
30٪ آسفالت بازیافتی (RAP)	22	375	25	15
15٪ قیر زیستی	17	375	18	22
6٪ پلاستیک بازیافتی (محلی)	10	390	10	12
6٪ پلاستیک بازیافتی (فراوری شده)	2	420	8	10

جدول ۳- تحلیل اقتصادی و هزینه-فایده استفاده از مصالح پایدار

نوع نمونه	صرفه‌جویی زیست‌محیطی (\$/ton)	کاهش زمان اجرا (%)	صرفه‌جویی نگهداری (ساله) (%)	هزینه تولید (\$/ton)
آسفالت سنتی	0	0	0	100
30٪ آسفالت بازیافتی (RAP)	45	10	30	85
6٪ پلاستیک بازیافتی	38	12	28	90
15٪ قیر زیستی	42	11	25	102

۷- تحلیل یافته‌ها

بررسی یافته‌های پژوهش حاضر در سه سطح فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی انجام گرفت. تحلیل‌های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی چرخه عمر و ارزیابی هزینه-فایده نشان داد که مصالح پایدار، در صورت طراحی دقیق و انتخاب ترکیب

مناسب، می‌توانند جایگزینی مؤثر برای مصالح سنتی در صنعت آسفالت‌سازی باشند. در این بخش، تفسیر این یافته‌ها در بستر نظری، فنی و اجرایی با تأکید بر پیامدهای کاربردی ارائه می‌شود. یکی از نگرانی‌های اولیه در استفاده از مصالح پایدار، احتمال کاهش عملکرد فنی آسفالت در شرایط بارگذاری و اقلیمی مختلف است. اما یافته‌ها نشان داد که استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP) تا سقف ۳۰٪، نه تنها پایداری مارشال و چگالی مخلوط را در محدوده استاندارد حفظ می‌کند، بلکه مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، افزودن پلاستیک‌های بازیافتی باعث افزایش خاصیت الاستیسیته و مقاومت حرارتی آسفالت شده و آسیب‌پذیری آن را در برابر ترک‌خوردگی کاهش داده است. این امر می‌تواند در مناطقی با نوسانات حرارتی شدید و ترافیک سنگین، نقش مؤثری در افزایش عمر روسازی ایفا کند. از سوی دیگر، قیر زیستی به عنوان جایگزین بخشی از قیر نفتی، توانست عملکرد مناسبی را از لحاظ روانی و مقاومت در برابر نفوذ آب از خود نشان دهد. تفسیر این یافته‌ها بر اساس نظریه ترکیب‌های اصلاح‌شده (Modified Binders) نشان می‌دهد که رفتار رئولوژیکی آسفالت، تابع مستقیم ویژگی‌های قیر و تعامل آن با سنگ‌دانه‌هاست. بنابراین، جایگزینی هوشمندانه قیرهای نفتی با مواد زیستی می‌تواند ضمن حفظ یکپارچگی فنی، مسیر پایداری برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی فراهم آورد. تحلیل‌های LCA انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که ترکیب آسفالت با RAP و قیر زیستی به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (GWP) و ۱۵ تا ۳۵ درصدی در مصرف انرژی اولیه (PED) شده است. این نتایج به‌خوبی بیانگر نقش تعیین‌کننده انتخاب مصالح در کاهش ردپای کربنی پروژه‌های عمرانی است. در چارچوب نظریه «زیرساخت‌های کم‌کربن»، هر مرحله از چرخه عمر آسفالت (از استخراج مواد تا بازیافت نهایی) دارای بار زیست‌محیطی است و هرگونه کاهش در مصرف منابع تجدیدنپذیر، کاهش دمای تولید یا استفاده از بازیافت، مستقیماً به بهبود شاخص‌های پایداری منجر می‌شود. استفاده از RAP منجر به حذف فرآیند استخراج و حمل سنگ‌دانه‌های خام شده و در نتیجه انرژی و سوخت فسیلی مصرفی را کاهش می‌دهد. همچنین، قیر زیستی، به‌عنوان محصولی با منشأ گیاهی، دارای چرخه زیستی کربن بسته است و می‌تواند در کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید قیر مؤثر باشد. این یافته‌ها در بستر سیاست‌های اقلیمی و اهداف توسعه پایدار، حائز اهمیت است و بیانگر آن است که تغییر در ترکیب مواد اولیه می‌تواند تأثیرات کلانی بر کاهش آلاینده‌های شهری و صنعتی داشته باشد. صرفه‌جویی در بلندمدت، حتی با هزینه اولیه بیشتری از مهم‌ترین چالش‌ها در پذیرش مصالح پایدار، هزینه‌های اولیه نسبتاً بالاتر برخی از ترکیب‌ها است؛ به‌ویژه در مورد قیر زیستی که هزینه فراوری و تأمین آن در برخی مناطق بیشتر از قیر سنتی است. اما تحلیل هزینه-فایده این پژوهش نشان داد که کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش دوام روسازی، و صرفه‌جویی در انرژی و زمان اجرا، جبران‌کننده هزینه‌های اولیه هستند. به‌طور خاص، استفاده از RAP و پلاستیک بازیافتی باعث کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی هزینه‌های تعمیر و ترمیم در طول عمر ۱۰ ساله پروژه شد. همچنین، کاهش زمان اجرا و مصرف سوخت، تأثیر مستقیمی در کاهش هزینه‌های غیرمستقیم و زیست‌محیطی پروژه داشت. از منظر اقتصاد کلان، این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که توجه به چرخه عمر کامل پروژه و هزینه‌های پنهان، می‌تواند در تصمیم‌گیری راهبردی دولت‌ها و شهرداری‌ها بسیار مؤثر باشد. در چارچوب نظریه اقتصاد چرخه‌ای مصالح بازیافتی و زیستی نه تنها هزینه نهایی پروژه را کاهش می‌دهند بلکه ارزش افزوده برای صنعت بازیافت و تولید داخلی نیز ایجاد می‌کنند. با وجود یافته‌های مثبت، پیاده‌سازی گسترده مصالح پایدار در آسفالت‌سازی با چالش‌هایی نیز همراه است. مهم‌ترین آن‌ها شامل نبود استانداردهای دقیق برای طراحی مخلوط‌های نوین، عدم آشنایی برخی پیمانکاران با فناوری‌های سبز، مقاومت نهادهای اجرایی در برابر تغییر و هزینه‌های بالای اولیه برای تأمین تجهیزات جدید است.

بر اساس نظریه پذیرش نوآوری^۲ پذیرش فناوری‌های پایدار در صنعت راه‌سازی نیازمند ترکیبی از آموزش فنی، مشوق‌های اقتصادی و سیاست‌گذاری حمایتی است. در غیاب این مؤلفه‌ها، حتی بهترین راهکارهای فنی نیز ممکن است در مرحله اجرا با شکست مواجه شوند. تحلیل و تفسیر داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مصالح پایدار، چنانچه با رویکردی مهندسی و تحلیل محور انتخاب شوند، می‌توانند هم‌زمان سه بعد فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی را ارتقاء دهند. این نتایج ضرورت بازنگری در سیاست‌های عمرانی کشور را برجسته می‌سازد.

۸- نتیجه‌گیری

رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش تقاضا برای زیرساخت‌های حمل‌ونقل، موجب مصرف گسترده منابع طبیعی و تولید آلاینده‌های متعدد در صنعت راه‌سازی شده است. در این میان، تولید و اجرای آسفالت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای پروژه‌های عمرانی، سهم قابل توجهی در تخریب زیست‌محیطی و مصرف انرژی دارد. بنابراین، توجه به راهکارهای پایدار در تولید آسفالت،

ضرورتی انکارناپذیر برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، کاهش آثار اقلیمی و افزایش کارایی اقتصادی پروژه‌های راه‌سازی به‌شمار می‌رود. مطالعه حاضر با هدف بررسی امکان‌سنجی و ارزیابی جامع کاربرد مصالح پایدار و دوستدار محیط زیست در تولید آسفالت انجام شده است. در این راستا، ترکیبات مختلفی از آسفالت شامل آسفالت بازیافتی (RAP)، پلاستیک‌های بازیافتی و قیر زیستی تولید و از نظر فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی تحلیل و مقایسه شدند. یافته‌های پژوهش نشان داد که استفاده هوشمندانه و مهندسی‌شده از این مصالح می‌تواند به‌طور هم‌زمان مزایای عملکردی، زیست‌محیطی و اقتصادی را برای پروژه‌های آسفالت‌سازی به همراه داشته باشد. از منظر فنی و مکانیکی، نمونه‌هایی که در آن‌ها از RAP تا سقف ۳۰ درصد استفاده شد، مقاومت فشاری، چگالی و دوام مناسبی از خود نشان دادند و در برخی موارد حتی عملکرد بهتری نسبت به آسفالت سنتی داشتند. پلاستیک‌های بازیافتی نیز با ایجاد خاصیت الاستیسیته در ساختار آسفالت، مقاومت آن را در برابر ترک‌خوردگی و تغییر شکل حرارتی بهبود بخشیدند. همچنین، قیرهای زیستی به‌عنوان جایگزین قیر نفتی، توانستند ویژگی‌های چسبندگی، روانی و آب‌پذیری مناسبی ایجاد کنند. نکته حائز اهمیت در این بخش، آن بود که دستیابی به خواص مطلوب، نیازمند طراحی دقیق نسبت ترکیب مصالح و در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و بارگذاری منطقه است. در بعد زیست‌محیطی، ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که مصالح پایدار به‌طور میانگین می‌توانند تا ۳۵٪ از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO₂-eq) و ۳۰٪ از مصرف انرژی اولیه بکاهند. ترکیب RAP با فناوری آسفالت گرم با دمای پایین (WMA) در این زمینه بهترین عملکرد را از خود نشان داد. همچنین، استفاده از قیر زیستی و مواد بازیافتی موجب کاهش وابستگی به منابع تجدیدناپذیر نفتی و کاهش بار آلودگی ناشی از استخراج و فرآوری مواد اولیه گردید. نتایج این تحلیل‌ها مؤید آن است که تولید آسفالت با مصالح پایدار نه تنها سازگار با محیط زیست است، بلکه نقش مؤثری در تحقق اهداف اقلیمی مندرج در توافق‌نامه‌های بین‌المللی دارد.

در بُعد اقتصادی نیز، تحلیل هزینه-فایده نشان داد که هرچند برخی ترکیبات مانند قیر زیستی در مرحله اولیه ممکن است هزینه بیشتری داشته باشند، اما در مجموع با کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش دوام روسازی، کاهش مصرف سوخت و صرفه‌جویی در انرژی، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر هستند. به‌ویژه استفاده از RAP و پلاستیک‌های بازیافتی موجب کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی در هزینه‌های تعمیر و ترمیم در بازه ۱۰ ساله گردید. همچنین، کاهش زمان اجرای پروژه و صرفه‌جویی در هزینه‌های انسانی و تجهیزاتی از دیگر مزایای اقتصادی مصالح پایدار بود. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت به سمت استفاده از مصالح پایدار در صنعت آسفالت‌سازی، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت برای آینده صنعت راه‌سازی محسوب می‌شود. با این حال، تحقق این هدف نیازمند رفع موانع و چالش‌هایی نظیر:

عدم تدوین استانداردهای جامع برای طراحی و اجرای مخلوط‌های آسفالت پایدار؛ فقدان زیرساخت‌های مناسب برای فرآوری، بازیافت و تأمین مصالح دوستدار محیط زیست؛ مقاومت نهادی و اجرایی در برابر تغییر فناوری و نوآوری؛

و کمبود آگاهی و آموزش در میان پیمانکاران و تصمیم‌گیران پروژه‌های عمرانی است.

نتیجه‌گیری نهایی این پژوهش آن است که مصالح پایدار، با برخورداری از ویژگی‌های فنی مناسب، کاهش آثار زیست‌محیطی و ایجاد صرفه‌جویی‌های اقتصادی قابل توجه، ظرفیت آن را دارند که به‌عنوان انتخاب نخست در طراحی و اجرای پروژه‌های نوین آسفالت‌سازی مطرح شوند. استفاده از این مصالح، گامی بلند در مسیر توسعه زیرساخت‌های مقاوم، هوشمند و سبز است که می‌تواند هم‌زمان به حفظ محیط زیست، کاهش هزینه‌ها و ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان بینجامد.

- [1].Al-Hasan SJ, Balamuralikrishnan R, Altarawneh M. Eco-friendly asphalt approach for the development of sustainable roads. *Journal of Human, Earth, and Future*. 2020 Sep 1;1(3):97-111.
- [2].Yaro NS, Sutanto MH, Baloo L, Habib NZ, Usman A, Yousafzai AK, Ahmad A, Birniwa AH, Jagaba AH, Noor A. A comprehensive overview of the utilization of recycled waste materials and technologies in asphalt pavements: towards environmental and sustainable low-carbon roads. *Processes*. 2023 Jul 13;11(7):2095.
- [3].Yaro NS, Sutanto MH, Baloo L, Habib NZ, Usman A, Yousafzai AK, Ahmad A, Birniwa AH, Jagaba AH, Noor A. A comprehensive overview of the utilization of recycled waste materials and technologies in asphalt pavements: towards environmental and sustainable low-carbon roads. *Processes*. 2023 Jul 13;11(7):2095.
- [4].Marconi M, Landi D, Bocci E, Pietroni G, Mosconi EM. Single use personal protective equipment reinforced asphalt. *Procedia Cirp*. 2023 Jan 1;116:107-12.
- [5].Şaka Ş. *The use of waste plastics in asphalt mixtures* (Master's thesis, Abdullah Gül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [6]. Herez MH, Alnomani HN, Kamil RA. Investigating potential application of warm mix asphalt technology in Iraq. In *AIP Conference Proceedings* 2023 Sep 13 (Vol. 2845, No. 1). AIP Publishing.
- [7].Kazemi M, Parikhah Zarmehr S, Yazdani H, Fini E. Review and perspectives of end-of-life tires applications for fuel and products. *Energy & Fuels*. 2023 Jul 14;37(15):10758-74.
- [8].Yao H, Zeng J, Liu J, Wang Y, Li X, Dai Q, You Z. Perspectives on the Application of Waste Materials in Asphalt Based on Molecular Dynamics Simulations: A Review. *Energy & Fuels*. 2024 Jul 24;38(16):14839-65.
- [9].Gettu NA. Influence of Ground Tire Rubber on Stone Mastic Asphalt Mixtures and Preliminary Sustainability Studies on Rubber-modified Asphalt Pavements. University of Missouri-Columbia. 2021 Dec.
- [10].Tabakovic A. Is this the end of the road for bio-inspired road construction materials?. *RILEM Technical Letters*. 2022 Sep 23;7:79-87.
- [11]. Saeed MH. *Performance Evaluation of Asphalt Mixtures under dry and wet mixing containing Sustainable Silicon Waste Material* (Doctoral dissertation, (SCEE), NUST).
- [12].Bhavinlal K, Venudharan V. Exploring production and performance of popular bio-oil modified asphalts: a state-of-the-art research review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024 Oct;9(10):403.
- [13].Usman A, Sutanto MH, Napiah MB, Yaro NS. Response surface methodology optimization in asphalt mixtures: a review. *IntechOpen*; 2021 Apr 22.
- [14].Sua-iam G, Makul N. Potential future direction of the sustainable production of Precast concrete with recycled concrete aggregate: A critical review. *Engineered Science*. 2024 Jan 3;28:1075.
- [15]. Al-Haydari IS, Al-Haidari HS, Mohammed-Noor Khudhur H, Waleed Jummah N, Abd Al-Hamza M. Durability and aging characteristics of sustainable paving mixture. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2021 Jan 1;34(8):1865-73.
- [16].Jagaba AH, Kutty SR, Salih GH, Noor A, bin Md Hafiz MF, Yaro NS, Saeed AA, Lawal IM, Birniwa AH, Kilaco AU. Palm oil clinker as a waste by-product: utilization and circular economy potential. *IntechOpen*; 2021 Jun 8.
- [17].Ahmed KA, Abdulqudos AN. Recycling Plastic Waste into Eco-Friendly Concrete: A State of the Art Review. *Journal OF Civil Engineering*. 2024;5(02):63-78.
- [18].Yu HY, Deng GS, Wang DY, Zhang ZY, Oeser M. Warm asphalt rubber: A sustainable way for waste tire rubber recycling. *Journal of Central South University*. 2020 Nov;27(11):3477-98.
- [19]. Usman A, Sutanto MH, Napiah MB, Yaro NS. Response surface methodology optimization in asphalt mixtures: a review. *IntechOpen*; 2021 Apr 22.
- [20]. Alam MM, Ahmad K, Alam M. Exploring the Utilization of Municipal Solid Waste in Sustainable Construction Materials: A Review. *Current World Environment*. 2024;19(2):545.
- [21]. Aldagari S, Kabir SF, Lamanna A, Fini EH. Functionalized waste plastic granules to enhance sustainability of bituminous composites. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022 Aug 1;183:106353.

- [22]. Oldham D, Rajib A, Dandamudi KP, Liu Y, Deng S, Fini EH. Transesterification of waste cooking oil to produce a sustainable rejuvenator for aged asphalt. Resources, Conservation and Recycling. 2021 May 1;168:105297.
- [23].Chakravarthi S, Kumar GR, Shankar S. Applications of Cement in Pavement Engineering. Cement Industry-Optimization, Characterization and Sustainable Application. 2020 Nov 26.
- [24].Xing C, Jiang W, Wang M, Zhao K, Li Z. Minireview on the rejuvenation of aged styrene–butadiene–styrene (SBS) modified bitumen: state-of-the-art and outlook. Energy & Fuels. 2023 May 19;37(11):7634-47.
- [25].Elqattan AA, Elrayies GM. Developing a novel solar-driven cool pavement to improve the urban microclimate. Sustainable Cities and Society. 2021 Jan 1;64:102554.
- [26]. Buhari R. *The performance of warm mix asphalt incorporating asphalt binder improved with amine nano-tio2 additives* (Doctoral dissertation, Universiti Tun Hussein On