

ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی گرم (مطالعه موردی: مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی)

سعید حسامی*، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سیده فائزه حسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۳/۱۱ - پذیرش: ۹۶/۰۶/۱۹

چکیده

راه‌ها و زیرساخت‌های حمل و نقلی از سرمایه‌های ملی هستند و نقش مهمی در توسعه رفاهی و اجتماعی یک کشور دارند. در طول فرایند ساخت، نگهداری و در مجموع چرخه عمر راه‌ها، حجم قابل ملاحظه‌ای از مصالح طبیعی به همراه مقادیر زیادی از سوخت‌های فسیلی و برق به عنوان منبع تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند که دارای اثرهای مخربی بر محیط‌زیست می‌باشند. لذا، لازم است تا با استفاده از ابزارهای مدیریتی، استفاده از منابع طبیعی، مصارف انرژی و تأثیرات بر محیط طبیعی را به شیوه‌ی بهینه‌ای مدیریت نمود. در این راستا، در این مطالعه، ارزیابی چرخه عمر به عنوان ابزاری برای کمی کردن و سنجش مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی در برخی مراحل چرخه عمر روسازی آسفالتی به کار گرفته شد. این ارزیابی در چهار بخش استخراج و تولید مواد اولیه مورد استفاده در ساخت روسازی، تولید مخلوط آسفالت گرم، حمل مصالح و اجرای روسازی، به تفکیک برق و سوخت مصرفی و با در نظرگیری ترکیب برق ایران انجام گرفت. میزان مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای تولیدی در هر یک از مراحل، بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده و مطالعات گذشته، محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که از میان مراحل مورد بررسی، مرحله تولید مخلوط آسفالت گرم در کارخانه آسفالت، با سهم ۴۸٪، بیشترین نقش را در گرمایش جهانی دارد. همچنین، نتایج تحلیل حساسیت مسافت حمل نشان داد که تغییرات مسافت حمل مصالح می‌تواند نقش مؤثری در نتایج ارزیابی چرخه عمر داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: زیرساخت‌های حمل و نقل، منابع انرژی، مخلوط آسفالت گرم، گرمایش جهانی

۱. مقدمه

زیرساخت‌های راه در کشور شامل روسازی‌های آسفالتی است که طبق آمار سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای (۱۳۹۴) طول این شبکه راه‌ها به ۲۰۰ هزار کیلومتر می‌رسد. این شبکه عظیم، علاوه بر توسعه و

زیرساخت‌های راه نقش اساسی در جابجایی افراد و کالاها دارند و میزان توسعه و پیشرفت کشورها ارتباط نزدیکی با میزان توسعه راه‌ها دارد. بخش عمده

حقیقت ابزاری برای ارزیابی و مدیریت عملکرد زیست محیطی است که می‌تواند در کنار سایر روش‌های مدیریتی توسعه پایدار، مانند روش تحلیل هزینه‌های چرخه عمر^۲ (LCC)، به عنوان ابزار راهنمای تصمیم‌گیری در صنایع و سیاست‌گذاری‌ها و همچنین شناسایی و بهبود مراحل حساس و تأثیرگذار در عملکرد زیست محیطی محصولات به‌کارگرفته شود. این روش‌ها، در حقیقت ابزارهایی هستند که با بررسی جزئی فرایندها در طول چرخه عمر یک محصول، عملکرد آن را از حیث پایداری اقتصادی و زیست محیطی مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌دهند.

سازمان بین‌المللی استاندارد^۳ نیز اصول و چارچوب این روش را در نشریه شماره ۱۴۰۴۰ و همچنین الزامات و راهنمایی‌های این روش را در شماره ۱۴۰۴۴ منتشر کرده است. مطابق استاندارد ۱۴۰۴۰ (۱۹۹۷)، یک ارزیابی چرخه عمر شامل چهار مرحله تعریف هدف و دامنه کاربرد^۴، تجزیه و تحلیل موجودی^۵، ارزیابی اثرها^۶ و تفسیر^۷ می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این استانداردها اصول کلی نحوه انجام ارزیابی را ارائه می‌دهند. ولی اطلاعات اندکی برای یک محصول یا سیستم خاص ارائه می‌کنند. لذا، بسیاری از اجزای پروژه با توجه به نیاز و هدف تعیین می‌شود. در این مطالعه نیز ارزیابی چرخه عمر روسازی آسفالتی مطابق چارچوب ارائه شده در استانداردهای فوق و با هدف شناسایی سهم هر یک از مراحل چرخه عمر روسازی آسفالتی در تولید آلاینده‌ها و مصارف انرژی انجام می‌گیرد.

گسترش، نیازمند عملیات تعمیر و نگهداری سالانه می‌باشد. سالانه حجم قابل ملاحظه‌ای از مخلوط آسفالتی به منظور احداث راه‌های جدید و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری در کشورهای مختلف دنیا تولید می‌شود (بوت و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس آمار سازمان راهداری (۱۳۹۴)، مقدار آسفالت پخش شده در سال ۱۳۹۴ در ایران، برای مجموعه عملیات احداث راه‌های جدید و تعمیر و نگهداری راه‌های موجود، در حدود ۱۵ میلیون تن بوده است. این مقدار قابل ملاحظه از مخلوط آسفالتی، علاوه بر اینکه شامل مصالح طبیعی با ارزشی مانند قیر و سنگدانه است، دارای مصارف قابل توجهی از سوخت‌های فسیلی و برق است که به دلیل تولید آلاینده‌ها، اثرهای مخربی بر محیط‌زیست دارند.

مصرف کنترل نشده و قابل ملاحظه‌ی سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر، منجر به وارد شدن صدمات جبران ناپذیری به محیط‌زیست شده است که از عوامل اصلی مؤثر در پدیده‌ی گرمایش جهانی، تخلیه اوزن و سایر آسیب‌های زیست محیطی می‌باشد. این مسائل، مشکلات پیچیده‌ای را برای سلامتی نسل‌های اخیر نیز ایجاد کرده است و انتظار می‌رود که دولت‌ها، سازمان‌ها و صنایع، نظارت بیشتری بر مصارف انرژی و آلودگی‌های تولیدی داشته باشند. لذا، استفاده از ابزارها و روش‌های مدیریتی می‌تواند نقش مؤثر و راه‌گشایی در این راستا داشته باشد.

ارزیابی چرخه عمر^۱ (LCA)، یک روش برای اندازه‌گیری اثرهای زیست محیطی محصولات و فرایندها در بخش‌های مختلف چرخه عمرشان است. در این روش، اثرهای مختلف زیست محیطی مانند مصارف انرژی، تولید گازهای گلخانه‌ای و اسیدی شدن، می‌تواند در مراحل مختلف چرخه عمر، از مرحله استخراج مواد خام تا مرحله انتهایی عمرشان یعنی دفن یا بازیافت، مورد بررسی قرار گیرد. این روش در

^۱ - Life cycle assessment

^۲ - Life cycle cost

^۳ - International Organization for Standardization

^۴ - Goal and scope definition

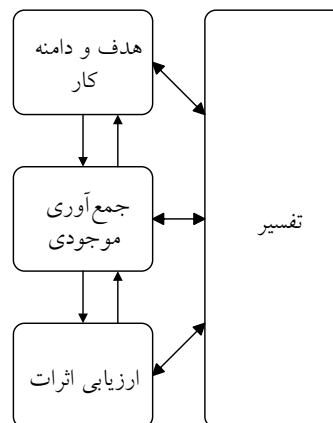
^۵ - Inventory analysis

^۶ - Impact assessment

^۷ - Interpretation

انرژی، روسازی بتنی مصرف انرژی بیشتری خواهد داشت (استریبل، ۲۰۰۱).

بررسی اثرهای زیست‌محیطی کاربرد ضایعات صنعتی مانند خرده لاستیک، خرده شیشه و خاکستر ذغال سنگ در روسازی، از دیگر مباحث مورد توجه روش ارزیابی چرخه عمر بوده و مطالعات متعددی به بررسی آنها پرداخته‌اند (چوی و همکاران، ۲۰۰۸؛ لی و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج مطالعه‌ای که با هدف شناسایی عملکرد زیست‌محیطی کاربرد خرده لاستیک، خرده شیشه و آسفالت بازیافتی RAP^۲ در روسازی انجام شد نشان داد که استفاده از آسفالت بازیافتی و خرده لاستیک می‌تواند تا ۲۳٪ از بار زیست‌محیطی بکاهد. در حالی که استفاده از خرده شیشه می‌تواند باعث افزایش آن تا حدود ۱۹٪ نسبت به نمونه مرجع شود (چوی و همکاران، ۲۰۰۸). در مطالعه دیگری، تأثیر کاربرد درصد‌های مختلفی از مصالح RAP، بر میزان مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. در این پروژه، مصالح روسازی موجود به وسیله ماشین آسیاب^۳ برداشت شده و مصالح بازیافتی پس از الک و آماده شدن، در مخلوط جدید به کار گرفته شد. در این مطالعه، فازهای تولید مصالح، ساخت و نگهداری، بهره‌برداری و بهسازی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مصرف انرژی برای مخلوط شامل ۳۰٪ مصالح RAP، برابر ۸۴٪ و تولید گازهای گلخانه‌ای برابر ۸۰٪ مخلوط‌های عادی شامل مصالح سنگی خواهد بود (لی و همکاران، ۲۰۱۱). عملکرد زیست‌محیطی آسفالت‌های حفاظتی و مقایسه آن با روکش‌های اصلاحی نیز در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده از آنها نشان داد که روش‌های پیشگیرانه و حفاظتی نقش مؤثری در بهبود عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر



شکل ۱. مراحل ارزیابی چرخه عمر مطابق با استاندارد

۱۴۰۴۰

در حوزه روسازی‌های راه، نخستین مطالعات ارزیابی چرخه عمر در اواخر دهه ۱۹۹۰ صورت گرفت. دامنه اولیه عمده این مطالعات مقایسه چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی و بتنی بوده که با هدف شناسایی روش سازگارتر با محیط‌زیست صورت می‌گرفت (هکنین و ماکلا، ۱۹۹۶؛ استریبل، ۲۰۰۱). در مطالعه‌ای که تمامی مراحل چرخه عمر، به‌جز انتهای عمر، برای دو روسازی آسفالتی و بتنی در کشور فنلاند مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج به دست آمده نشان داد که مجموع انتشار گاز CO₂ در کل چرخه عمر برای روسازی بتنی در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد بیش از روسازی آسفالتی است (هکنین و ماکلا، ۱۹۹۶). در مطالعه دیگری که در آن روسازی‌های آسفالتی سرد و روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار برای شرایط کشور سوئد مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند، تمامی مراحل چرخه عمر، به‌جز پایان عمر، از نظر تأثیرات زیست‌محیطی مختلف شامل مصرف انرژی، آلودگی‌های آب و هوا، تولید پسماند و مصرف منابع طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این مطالعه به انرژی اولیه در مواد^۱ وابسته بوده و در صورت در نظرگیری این انرژی، روسازی‌های آسفالتی مصرف انرژی بیشتری داشته و در صورت نظر از این

^۲ - Reclaimed asphalt pavement

^۳ - Milling machine

^۱ - Feedstock energy

مراحل تولید مواد اولیه^۱، ساخت مخلوط و اجرای روسازی^۲، مرحله بهره برداری^۳ از راه و انتهای عمر^۴ روسازی می‌باشد. این نمودار کلیه مراحل چرخه عمر روسازی را نشان می‌دهد. اما می‌توان در مطالعات LCA، بسته به هدف و دامنه کار، تنها برخی از مراحل را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد. در این مطالعه نیز دو مرحله نخست چرخه عمر روسازی آسفالتی، مطابق با روش کار پیشنهادی استاندارد ۱۴۰۴۰ از نظر تولید آلاینده‌ها و مصارف انرژی به تفکیک برق و سوخت مصرفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، ترکیب برق ایران به منظور استفاده در نتایج ارزیابی، در بندهای بعد مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۱ هدف و دامنه کار

اولین گام در روش ارزیابی چرخه عمر، تعیین هدف مطالعه و مشخص کردن محدوده مورد ارزیابی است. هدف از این ارزیابی، بررسی عملکرد زیست محیطی روسازی در دو مرحله تولید مواد، ساخت و اجرای قشرهای آسفالتی روسازی است که در چهار بخش تولید مصالح اولیه، ساخت مخلوط آسفالتی، حمل و اجرا به منظور مشخص نمودن سهم هر یک از این مراحل در عملکرد زیست محیطی مخلوط آسفالتی می‌باشد. انرژی مصرفی و گرمایش جهانی به عنوان مهم‌ترین اثرات در این مراحل مورد مطالعه قرار خواهند گرفت (متیوز و همکاران، ۲۰۱۵).

واحد عملکردی مورد مطالعه یک کیلومتر خط از جاده به عرض ۳/۶۵ متر و محل اجرای پروژه، شهر قائمشهر می‌باشد. سایر مشخصات واحد عملکردی مورد مطالعه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

روسازی‌های آسفالتی دارند (چهویت و گیل‌هاوس، ۲۰۱۰؛ چان و همکاران، ۲۰۱۱).

چراغی و برهانی (۱۳۹۵) روسازی‌های مختلف را از لحاظ تأثیر در آلودگی هوا مورد بررسی قرار داده و از روش‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب روش سازگارتر از حیث عملکرد زیست محیطی استفاده کردند. از میان گزینه‌های مورد بررسی که شامل آسفالت قیری، آسفالت متخلخل، بتن غلتکی و بتن اسفنجی بوده است، بتن اسفنجی به عنوان مناسب‌ترین گزینه و آسفالت قیری به عنوان نامناسب‌ترین گزینه مشخص شدند.

مطابق با مطالعات بررسی شده، تا کنون در پروژه‌های متعددی از ابزار ارزیابی چرخه عمر با هدف سنجش و مطالعه جنبه‌های مختلف روسازی و زیرساخت‌های راه استفاده کرده‌اند. اغلب این مطالعات انجام شده براساس شرایط تولید، اجرا و با توجه به ترکیب برق کشورهای اروپایی و آمریکایی بوده است و مطالعه‌ای در این خصوص با در نظرگیری شرایط تولید و اجرای روسازی‌ها در ایران صورت نگرفته است و بررسی زیست محیطی صورت گرفته توسط چراغی و برهانی (۱۳۹۵)، به صورت کیفی ارجحیت گزینه‌های مختلف را مورد مطالعه قرار داده است. لذا، در این مطالعه، مراحل تولید و اجرای روسازی آسفالتی با هدف بررسی عملکرد زیست بخش‌های نخست چرخه عمر قشرهای آسفالتی روسازی‌ها در ایران به صورت کمی، به وسیله ارزیابی چرخه عمر، مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. روش تحقیق

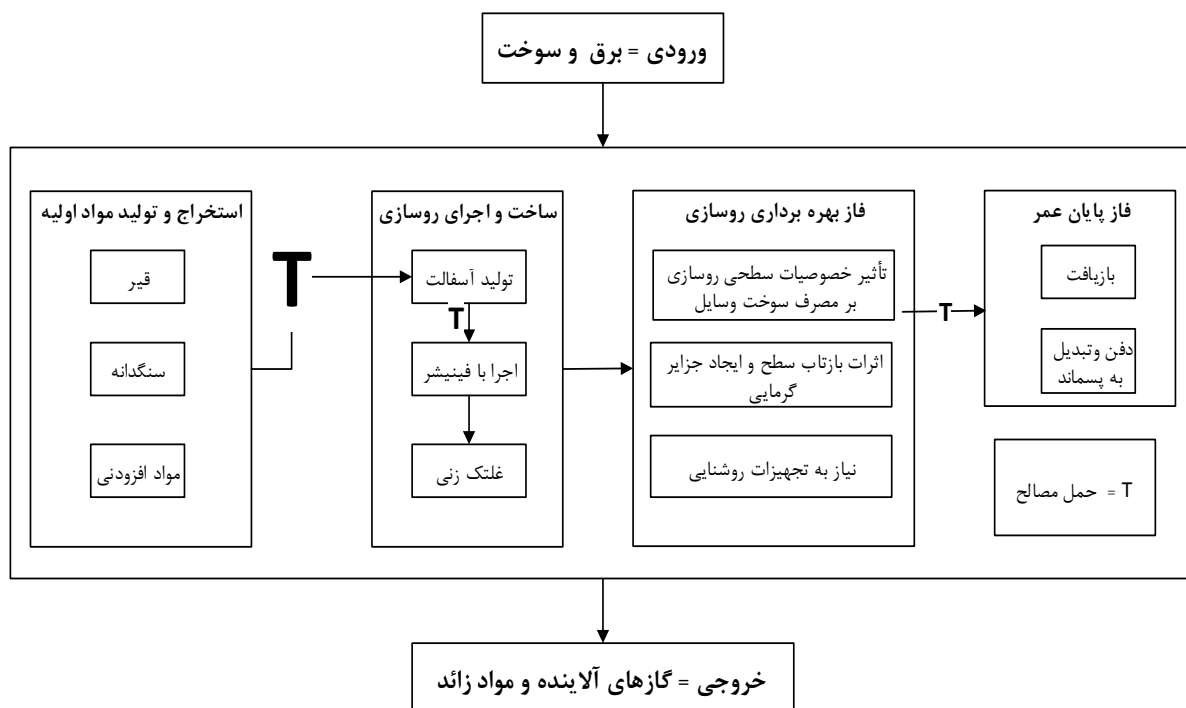
لازمه اولیه‌ی ارزیابی چرخه عمر هر محصول، مدل کردن و ایجاد مجموعه فرایندهایی از چرخه عمر محصول مورد مطالعه می‌باشد. چرخه عمر کامل روسازی‌های آسفالتی نیز با توجه به شکل ۲ شامل

¹- Material production Phase

²- Construction, maintenance and preservation phase

³- Use phase

⁴- End of life



شکل ۲. مدل چرخه عمر کامل روسازی‌های آسفالتی

جدول ۱. مشخصات واحد عملکردی مورد مطالعه

سنگدانه	قیر	مخلوط آسفالتی	واحد عملکردی
سنگ	قیر با	۹۴/۵ درصد سنگ	مسیر به طول یک کیلومتر، عرض
شکسته کوهی	درجه نفوذ ۶۰/۷۰	شکسته و ۴/۵ درصد قیر	۳/۶۵ متر و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر

(بوت و همکاران، ۲۰۱۲). در حالی که این مقدار برای ترکیب برق ایران مطابق با جدول ۳، ۱۴۷/۷ گرم می‌باشد (براندر و همکاران، ۲۰۱۱). در نتیجه، به ازای مقدار برق مصرفی مشابه در این دو کشور هم نتایج ارزیابی به مقدار قابل ملاحظه‌ای متفاوت خواهد بود. ترکیب برق مورد استفاده در ایران با توجه به آمار ارائه شده توسط سازمان جهانی انرژی^۱، مطابق جدول ۳ گردآوری شده و میزان آلاینده‌های تولیدی در تولید هر مگاژول برق ایران، در ارزیابی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۱-۱-۲. ترکیب برق مورد استفاده ایران

برق به عنوان یک منبع ثانویه در تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد که آلاینده مستقیم ندارد و بسته به نوع و سهم هر یک از منابعی که در تولید برق هر کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقادیر آلاینده‌ها برای آن تخمین زده می‌شود. لذا، لازم است که تفاوت‌های روش‌های تولید برق هر کشور در مطالعات چرخه عمر وارد شود. به عنوان مثال، ترکیب برق کشور سوئد به طور عمده از منابع پاک مانند انرژی باد و هسته‌ای تولید می‌شوند که میزان آلاینده‌های آن‌ها بسیار ناچیز است و مقدار کربن دی‌اکسید محاسبه شده به ازای تولید هر مگاژول برق تولیدی این کشور، ۹/۱۸۱ گرم است

^۱ - International Energy Agency

ارزیابی عملکرد زیست محیطی چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی گرم
(مطالعه موردی: مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی)

جدول ۲. آلاینده‌های تولیدی در ترکیب برق ایران (براندر و همکاران، ۲۰۱۱)

آلاینده‌های تولیدی به ازای تولید هر مگاژول برق ایران (gr/MJ)		
CH ₄	N ₂ O	CO ₂
۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۴۱	۱۷۴/۷

جدول ۳. ترکیب برق ایران (بوت و همکاران، ۲۰۱۲؛ آمار EIA، ۲۰۱۴)

منبع	سهم منبع (%)	راندمان (%)	مقدار انرژی مصرفی در تولید واحد برق
گاز	۷۱/۵	۴۰	۱/۷۸۸
نفت	۲۱/۷	۴۰	۰/۵۴۳
برقآبی	۵/۱	۹۰	۰/۰۵۷
اتمی	۱/۶	۳۳	۰/۰۴۸
باد	۰/۱	۳۵	۰/۰۰۲۸
جمع	۱۰۰	۴۱	۲/۴۴

جدول ۴. ضرایب نشر گازهای گلخانه‌ای (راهنمای IPCC، ۲۰۰۶)

ضریب انتشار (kg/TJ)			نوع سوخت	مورد
CH ₄	N ₂ O	CO ₂		
۳	۰/۶	۶۴۲۰۰	گاز طبیعی	تجهیزات ثابت در صنعت انرژی ^۱
۳	۰/۶	۷۴۱۰۰	سوخت دیزل	تجهیزات ثابت در صنعت انرژی
۲۸/۶	۴/۱۵	۷۴۱۰۰	سوخت دیزل	تجهیزات متحرک غیر جاده‌ای ^۲
۳/۹	۳/۹	۷۴۱۰۰	سوخت دیزل	تجهیزات متحرک جاده‌ای ^۳

جدول ۵. ارزش حرارتی و چگالی رایج سوخت‌ها و برق (راهنمای آمار IEA، ۲۰۰۵)

مشخصات	واحد	برق	گاز طبیعی	نفت گاز/ دیزل	نفت کوره
ارزش حرارتی	MJ/kg MJ/kWh	۳/۶	۳۵/۷۳	۴۳/۳۸	۴۲/۲
چگالی	kg/m ³		۰/۷۶	۸۴۳/۹	۹۴۰

^۱- Default emission factors for stationary combustion in the energy industries

^۲- Default emission factors for off-road mobile sources and machinery

^۳- Default emission factors for road transport

۲-۱-۲. روش محاسبه آلاینده‌ها

به منظور محاسبه میزان گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌ها، از دستورالعمل‌های 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories که مشتمل بر روش‌های معمول و پذیرفته شده به منظور تخمین میزان موجودی گازهای گلخانه‌ای بر حسب منابع انشار و جذب آنها می‌باشد، استفاده شد (راهنمای IPCC، ۲۰۰۶). این دستورالعمل‌ها شامل پنج فصل می‌باشد که فصول ۲ و ۳ جهت محاسبه میزان گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن سوخت‌های مختلف در تجهیزات ثابت و متحرک، مطابق جدول ۴ مورد استفاده قرار گرفت

۲-۲. تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر روسازی

یکی از مراحل مهم و مؤثر بر نتایج ارزیابی چرخه عمر، مرحله جمع‌آوری داده‌های چرخه عمر است. این داده‌ها بسته به نوع هدف و دامنه کار تعیین شده در مرحله قبل، جمع‌آوری می‌شوند. در این مطالعه نیز داده‌ها و اطلاعات مربوط به بخش‌های تولید مصالح اولیه، تولید مخلوط آسفالتی، حمل و اجرا، جمع‌آوری و مورد ارزیابی قرار گرفتند. اندازه‌گیری مصارف انرژی در معدن سنگ و کارخانه آسفالت با استفاده از جمع‌آوری داده‌های محلی و داده‌های مربوط به تولید قیر و حمل مصالح نیز با استفاده از مطالعات قبلی انجام شد.

جهت تبدیل مقدار سوخت مصرفی اندازه‌گیری شده به انرژی مصرفی، از ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف مطابق جدول ۵ استفاده شد. ارزش گرمایی یک سوخت، مقدار گرمایی است که از سوختن کامل یک واحد جرم از آن سوخت آزاد می‌گردد (راهنمای آمار IEA، ۲۰۰۵).

۲-۲-۱. تولید مصالح اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در ساخت روسازی آسفالتی عمدتاً شامل قیر، مصالح سنگی و مواد افزودنی است.

در این مطالعه، از مواد افزودنی صرف‌نظر شده و قیر و سنگدانه به عنوان اجزای مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. قیر یکی از فرآورده‌های حاصل از پالایش نفت خام است و با توجه به پیچیده بودن فرایند پالایش، توزیع انرژی مصرفی و آلاینده‌های تولیدی در پالایشگاه میان قیر و سایر فرآورده‌های تولیدی مسئله‌ای پیچیده و با اهمیت است. مطالعات متعددی چرخه عمر تولید قیر را از حیث مصارف انرژی و تولید آلودگی مورد ارزیابی قرار داده‌اند که از میان آن‌ها می‌توان به مطالعات استریپل (۲۰۰۱) و همچنین گزارش‌های انجمن قیر اروپا (۲۰۱۴) اشاره کرد. مقدار مصرف سوخت و برق در فرایند تولید قیر، در مطالعه استریپل (۲۰۰۱) به تفکیک سوخت و برق مصرفی ارائه شده‌اند و به همین دلیل مطابق جدول ۶، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تخمین آلاینده‌های تولیدی ناشی از احتراق سوخت دیزل، با استفاده از جدول ۴ و آلاینده‌های ناشی از مصرف برق، با توجه به ترکیب برق ایران و مطابق با جدول ۶ انجام شد.

موجودی چرخه عمر سنگدانه نیز بر اساس تولید سنگ شکسته از صخره‌سنگ‌های کوهی در معدن چلاو واقع در ۳۰ کیلومتری شهر آمل و در جاده هراز مورد استفاده قرار گرفت. در چرخه تولید مصالح سنگی در این معدن، ابتدا مصالح کوهی به روش حفاری و با استفاده از بیل و پیکور استخراج گشته و سپس به وسیله لودر به محل سنگ‌شکن حمل می‌شوند تا به وسیله تجهیزات سنگ‌شکن به ابعاد مورد نظر تبدیل شوند. تجهیزات مورد استفاده در این واحد شامل بیل، پیکور و لودر از نوع کوماتسو و کمپرسی ولوو بوده که سوخت مورد استفاده تمامی آن‌ها گازوئیل بوده است. عمده مصارف برق این واحد نیز در تجهیزات سنگ‌شکن، نوارهای نقاله و سرندها بوده که به ازای تن سنگ شکسته تولیدی مصارف آن مطابق با جدول ۷ نرمال گردیده است.

ارزیابی عملکرد زیست محیطی چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی گرم
(مطالعه موردی: مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی)

جدول ۶. مصارف انرژی و آلاینده‌های تولیدی چرخه عمر قیر (استریل، ۲۰۰۱)

آلاینده‌های تولیدی به ازای هر تن قیر (gr/ton)			انرژی مصرفی به ازای هر تن قیر (MJ/ton)	سوخت مصرفی
CH ₄	N ₂ O	CO ₂		
۳/۱۸	۰/۶۴	۷۸۵۴۶	۱۰۶۰	سوخت دیزل
۰/۱۵	۱/۰۳۳۲	۴۴۰۲۴/۴	۲۵۲	برق

جدول ۷. مصارف انرژی و آلاینده‌های تولیدی چرخه عمر مصالح سنگی در معدن شن و ماسه چلاو آمل

آلاینده‌های تولیدی به ازای هر تن سنگدانه (gr/ton)			انرژی مصرفی به ازای هر تن سنگدانه (MJ/ton)	سوخت مصرفی
CH ₄	N ₂ O	CO ₂		
۰/۱۰۸۶	۰/۰۲۱۷	۲۶۸۲/۴۲	۳۶/۲	سوخت دیزل
۰/۰۰۰۳۷۶	۰/۰۳۷۵	۱۶۰۲	۹/۱۷	برق

جدول ۸. مصارف انرژی و آلاینده‌های تولیدی برای تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت شهرداری قائمشهر

آلاینده‌های تولیدی به ازای هر تن آسفالت (gr/ton)			انرژی مصرفی به ازای تولید هر تن آسفالت (MJ/ton)	سوخت مصرفی
CH ₄	N ₂ O	CO ₂		
۰/۶۱۵	۶۳۶	۱۳۱۶۶/۵۲	۲۰۵/۰۸۶	گاز طبیعی
۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۱۴۰۶/۳۳۵	۸/۰۵	برق

جدول ۹. فواصل حمل مورد استفاده

مقدار مصالح (تن)	فاصله حمل (کیلومتر)	تا	از	مصالح
۷۲/۲۷	۶۸۰	کارخانه آسفالت	پالایشگاه	قیر
۱۲۴۱/۷۳	۰	کارخانه آسفالت	معدن	سنگدانه
۱۳۱۴	۲۰	محل اجرای پروژه	کارخانه آسفالت	آسفالت



شکل ۳. مسیر حمل قیر از شرکت نفت جی به کارخانه آسفالت شهرداری قائمشهر

۲-۳-۳. حمل مصالح

حمل مصالح اولیه به کارخانه آسفالت و حمل مخلوط آسفالتی از کارخانه آسفالت به محل اجرای پروژه از دیگر بخش‌های مؤثر بر نتایج چرخه عمر است. برای حمل مصالح، کامیون با ظرفیت ۱۴ تن در نظر گرفته شده که میزان مصرف انرژی آن به ازای هر کیلومتر ۱۱/۹ مگاژول است. فواصل حمل با توجه به شرایط پروژه و مطابق جدول ۹ در نظر گرفته شده است. مسافت حمل قیر با توجه به تأمین آن از شرکت پالایش نفت جی واقع در اصفهان، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد و برای حمل مصالح سنگی نیز این فاصله صفر در نظر گرفته شده است، زیرا مصالح سنگی مورد استفاده در کارخانه آسفالت شهرداری قائمشهر از معدن سنگ شهرداری تأمین می‌شود که در مجاورت کارخانه آسفالت قرار دارد.

۲-۴-۲. اجرا

مرحله نهایی در نظر گرفته شده، اجرای مخلوط در محل پروژه است. مخلوط آسفالتی تولید شده در کارخانه آسفالت شهرداری قائمشهر، پس از حمل به محل اجرا، توسط فینیش در محل پروژه اجرا می‌شود و سپس به وسیله غلتک، به تعداد دفعات لازم برای رسیدن به میزان تراکم مورد نیاز تحت بار قرار می‌گیرد. سوخت مصرفی برای اجرا، بر اساس مشخصات غلتک و فینیشر داینپک و بر اساس ارزش حرارتی و چگالی سوخت دیزل، مطابق جدول ۱۰ محاسبه گردید.

۲-۳. جمع‌بندی موجودی‌های چرخه عمر

داده‌های جمع‌آوری شده برای بخش‌های مختلف چرخه عمر، برای یک واحد عملکردی تعیین شده تبدیل می‌شوند. وزن آسفالت مورد استفاده برای واحد عملکردی شامل یک کیلومتر مسیر آسفالتی به عرض ۳/۶۵ متر و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، ۱۳۱۴ تن خواهد

بود که از این مقدار، ۷۲/۲۷ تن مربوط به قیر و ۱۲۴۱/۷۳ تن مربوط به مصالح سنگی خواهد بود. مقادیر ارائه شده در جدول ۱۱ برای این واحد عملکردی ارائه شده‌اند.

۴. ارزیابی و تفسیر نتایج

در این مرحله، مقادیر و نتایج به‌دست آمده در مراحل قبل، مفهومی شده و شاخصی برای ارزیابی تأثیر زیست‌محیطی مورد نظر، در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، میزان انرژی مصرفی (تخلیه منابع فسیلی) و پتانسیل گرمایش جهانی^۱ به عنوان دو گروه تأثیر در مراحل مشخص شده، برای واحد عملکردی تعیین شده اندازه‌گیری و مقایسه شدند. پتانسیل گرمایش جهانی بر اساس پتانسیل هر یک از گازها که در جدول ۱۲ آمده است، محاسبه گردید. مقدار کربن دی‌اکسید معادل (CO₂ eq)^۲ ناشی از هر فعالیت، که شاخص اندازه‌گیری گرمایش جهانی است، مطابق جدول ۱۳ برای هر یک از مراحل چرخه عمر روسازی محاسبه گردید.

مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۱۳، از بین مراحل مورد بررسی، تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت از لحاظ مصرف انرژی و گرمایش جهانی بیشترین تأثیر را بر محیط‌زیست دارد. البته این مسئله متأثر از رطوبت سنگدانه مورد استفاده، دما و رطوبت محیط است. ولی با توجه به متوسط‌گیری از مصارف سوخت یک‌ساله، این عملکرد به صورت متوسط بررسی شده است.

پس از مرحله تولید مخلوط در کارخانه آسفالت، تولید قیر بیشترین نقش را در عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر قشر آسفالتی روسازی دارد. اگرچه قیر از نظر وزنی حدود ۵٪ قیر مخلوط در نظر گرفته شده را شامل می‌شود، ولی بیش از ۱۸٪ مصرف انرژی و ۲۲٪

¹ - Global warming potential

² - CO₂ equivalent

ارزیابی عملکرد زیست محیطی چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی گرم
(مطالعه موردی: مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی)

گرمایش جهانی از تولید این بخش ناشی می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده حساسیت این جزء در عملکرد زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. جمع بندی نتایج ارائه شده در جدول ۱۴ نشان می‌دهد که سوخت گاز با سهم ۶۰ درصدی و سوخت فسیلی مایع با سهم ۳۸/۹ درصدی، دارای بیشترین سهم در میان انواع منابع تولید انرژی می‌باشند و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در مراحل چرخه عمر مورد بررسی روسازی آسفالتی ناچیز و در حدود ۱٪ است.

جدول ۹. فواصل حمل مورد استفاده

مصلح	از	تا	فاصله حمل (کیلومتر)	مقدار مصلح (تن)
قیر	پالایشگاه	کارخانه آسفالت	۶۸۰	۷۲/۲۷
سنگدانه	معدن	کارخانه آسفالت	۰	۱۲۴۱/۷۳
آسفالت	کارخانه آسفالت	محل اجرای پروژه	۲۰	۱۳۱۴

جدول ۱۰. مشخصات مصرف انرژی تجهیزات اجرای روسازی (استریپل، ۲۰۰۱)

مشخصات	واحد	فینیش (Dynapac F16)	غلنگ (Dynapac cc421)
تعداد عبور		۱	۶
سرعت	m/h	۲۴۰	۴۰۰۰
نرخ مصرف سوخت	lit/h	۲۲	۱۸
عرض مؤثر	m	۶/۵	۱/۶۷۵
مجموع انرژی مصرفی	MJ/km	۳۳۵۶/۰۴	۲۹۶۵/۲۷

جدول ۱۱. جمع‌بندی مصارف انرژی و آلاینده‌های تولیدی برای واحد عملکردی

آلاینده‌های تولیدی (kg)			انرژی مصرفی کل به ازای یک کیلومتر روسازی (GJ)	نوع سوخت	
CH ₄	N ₂ O	CO ₂			
۰/۰۱۱	۰/۰۷۵	۳۱۸۱/۲۸۷	۱۸/۲۱	برق	تولید قیر
۰/۰۰۷	۰/۰۴۷	۱۹۸۹/۳۱	۱۱/۳۸۷	برق	تولید سنگدانه
۰/۰۰۶	۰/۰۴۳	۱۸۴۸/۳۳	۱۰/۵۸	برق	تولید آسفالت
۰/۰۰۲۴	۰/۱۶۵	۷۰۱۸/۹۳	۲/۴۴ × ۴۰/۱۷۷		مجموع برای برق مصرفی با در نظرگیری راندمان تولید برق
۰/۲۳	۰/۰۴۶	۵۶۷۶/۰۶	۷۶/۶	دیزل	تولید قیر
۰/۱۳۵	۰/۰۲۷	۳۳۳۰/۸	۴۴/۹۵	دیزل	تولید سنگدانه
۰/۸۰۸	۰/۱۶۲	۱۷۳۰۰/۶۲	۲۶۹/۴۸	گاز	تولید آسفالت
۰	۰	۰	۰	دیزل	حمل سنگدانه
۱/۳۹	۰/۲۰۲	۳۵۹۷/۷	۴۸/۵۵۲	دیزل	حمل قیر
۰/۶۴	۰/۰۹۳	۱۶۵۷/۷۷	۲۲/۳۷۲	دیزل	حمل آسفالت
۰/۰۹۶	۰/۰۱۴	۲۴۸/۶۸	۳/۳۵۶	دیزل	اجرای لایه
۰/۰۸۵	۰/۰۱۲	۲۱۹/۸۳	۲/۹۶۵	دیزل	غلنگ زنی
۳/۳۸۴	۰/۵۵۶	۳۲۰۳۱/۳۶	۴۶۸/۲۷۵		مجموع برای سوخت مصرفی
۳/۳۸۶۴	۰/۷۲۱	۳۹۰۵۰/۲۹	۵۶۶/۳		جمع کل

فاصله معدن سنگ و کارخانه تولید آسفالت از صفر به ۵۰ کیلومتر، حجم انرژی مصرفی را از صفر به ۵۳ گیگاژول می‌رساند. در این مورد مطالعه شده، یعنی کارخانه آسفالت شهرداری قائمشهر، کارخانه آسفالت و معدن سنگ در مجاورت یکدیگر قرار دارند که این مسئله تأثیر مثبتی بر عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر روسازی داشته است. فاصله کارخانه آسفالت از محل اجرای پروژه نیز با توجه به حجم بالای آسفالت می‌تواند جابجایی زیادی را به همین شکل در نتایج چرخه عمر ایجاد کند. لذا، توجه به محل تأمین مصالح اولیه کارخانه آسفالت و همچنین محل کارخانه آسفالت برای پروژه می‌تواند اثر قابل توجهی بر نتایج چرخه عمر داشته باشد.

طبق مقادیر ارائه شده در جدول ۱۶، مشاهده می‌شود که تغییرات مسافت‌های حمل مصالح مطابق با جدول ۱۵، می‌تواند منجر به افزایش ۱۲۰ گیگاژولی در مجموع مصارف انرژی شود و سهم مرحله حمل مصالح را از ۱۲/۵ درصد به حدود ۲۸ درصد افزایش دهد. این مسئله نشان‌دهنده حساس بودن نتایج ارزیابی چرخه حیات به فواصل حمل مورد مطالعه است.

جدول ۱۲. پتانسیل گرمایش گازهای گلخانه‌ای (سولومون و همکاران، ۲۰۰۷)

ضریب پتانسیل گرمایش	فرمول شیمیایی	گاز گلخانه‌ای
۱	CO ₂	کربن دی‌اکسید
۲۹۸	N ₂ O	دی نیتروژن مونوکسید
۲۵	CH ₄	متان

مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۱۳، از بین مراحل مورد بررسی، تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت از لحاظ مصرف انرژی و گرمایش جهانی بیشترین تأثیر را بر محیط‌زیست دارد. البته این مسئله متأثر از رطوبت سنگدانه مورد استفاده، دما و رطوبت محیط است. ولی با توجه به متوسط‌گیری از مصارف سوخت یک‌ساله، این عملکرد به صورت متوسط بررسی شده است.

پس از مرحله تولید مخلوط در کارخانه آسفالت، تولید قیر بیشترین نقش را در عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر قشر آسفالتی روسازی دارد. اگرچه قیر از نظر وزنی حدود ۵٪ قیر مخلوط در نظر گرفته شده را شامل می‌شود، ولی بیش از ۱۸٪ مصرف انرژی و ۲۲٪ گرمایش جهانی از تولید این بخش ناشی می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده حساسیت این جزء در عملکرد زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی می‌باشد.

جمع بندی نتایج ارائه شده در جدول ۱۴ نشان می‌دهد که سوخت گاز با سهم ۶۰ درصدی و سوخت فسیلی مایع با سهم ۳۸/۹ درصدی، دارای بیشترین سهم در میان انواع منابع تولید انرژی می‌باشند و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در مراحل چرخه عمر مورد بررسی روسازی آسفالتی ناچیز و در حدود ۱٪ است.

۱-۴. تحلیل حساسیت تأثیر مسافت حمل بر مصارف انرژی

تغییر در مسافت حمل، تأثیر زیادی بر مصرف انرژی دارد. بخش عمده مخلوط آسفالتی شامل مصالح سنگی است که این حجم زیاد مصالح باید از معدن سنگ به محل تولید آسفالت منتقل شود. لذا، فاصله زیاد معدن سنگ و کارخانه تولید آسفالت می‌تواند باعث مصرف زیاد سوخت و تولید حجم زیادی از گازهای گلخانه‌ای شود. در مورد مطالعه شده، مطابق جدول ۱۵، افزایش

ارزیابی عملکرد زیست محیطی چرخه عمر روسازی های آسفالتی گرم
(مطالعه موردی: مصارف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی)

جدول ۱۳. سهم هر یک از مراحل چرخه عمر روسازی در عملکرد زیست محیطی روسازی

مرحله	سهم در مصرف انرژی (%)	CO ₂ eq. (ton)	سهم در گرمایش جهانی (%)
تولید قیر	۲۱/۳۸	۸/۸۹۹	۲۲/۶۱
تولید سنگدانه	۱۲/۸۴	۵/۳۴۴	۱۳/۵۸
حمل مصالح	۱۲/۵۲	۵/۳۹۳	۱۳/۷۲
تولید مخلوط آسفالتی	۵۲/۱۴	۱۹/۲۳۲	۴۸/۸۷
اجرا	۱/۱۲	۰/۴۸۲	۱/۲۲
جمع	۱۰۰	۳۹/۳۵	۱۰۰

جدول ۱۴. میزان مصرف هریک از منابع انرژی در مراحل مختلف چرخه عمر مورد بررسی

مرحله	گاز (MJ)	نفت و دیزل (MJ)	برقایی (MJ)	اتمی (MJ)	باد (MJ)
تولید قیر	۳۱/۷۷	۸۶/۲۴	۲/۲۷	۰/۷۱	۰
تولید سنگدانه	۱۹/۸۷	۵۰/۹۸	۱/۴۲	۰/۴۴	۰
حمل مصالح	۰	۷۰/۹۲	۰	۰	۰
تولید مخلوط آسفالتی	۲۸۷/۹۴	۵/۶	۱/۳۲	۰/۴۱	۰
اجرا	۰	۶/۳۲	۰	۰	۰
جمع	۳۳۹/۵۷	۲۲۰/۰۷	۵	۱/۵۷	۰
سهم (%)	۶۰	۳۸/۹	۰/۸۷	۰/۲۸	۰

جدول ۱۵. نتایج تحلیل حساسیت مسافت حمل

مرحله	مسافت اولیه حمل سنگدانه (km)	مسافت ثانویه (km)	افزایش مصرف انرژی (GJ)
مخلوط آسفالتی	۲۰	۴۰	۴۴/۷۴۴
قیر	۶۸۰	۱۰۰۰	۲۲/۸۴۸
مصالح سنگی	۰	۵۰	۵۳

جدول ۱۶. تغییر سهم مراحل مختلف چرخه عمر در اثر تغییرات مسافت حمل

مرحله	انرژی مصرفی اولیه (MJ)	سهم در مصرف انرژی (%)	انرژی مصرفی ثانویه (MJ)	سهم در مصرف انرژی (%)
تولید قیر	۱۲۱/۰۳	۲۱/۳۸	۱۲۱/۰۳	۱۷/۶۴
تولید سنگدانه	۷۲/۷۳	۱۲/۸۴	۷۲/۷۳	۱۰/۵۹
حمل مصالح	۷۰/۹۲۴	۱۲/۵۲	۱۹۱/۵۲	۲۷/۸۸
تولید مخلوط آسفالتی	۲۹۵/۳	۵۲/۱۴	۲۹۵/۳	۴۲/۹۹
اجرا	۶/۳۲۱	۱/۱۲	۶/۳۲	۰/۹
جمع	۵۶۶/۳	۱۰۰	۶۸۶/۹	۱۰۰

۵. نتیجه‌گیری

چرخه عمر داشته باشد. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به نقش قابل ملاحظه تولید قیر در مصرف انرژی و گرمایش اشاره کرد. برخلاف سهم اندک قیر در مخلوط آسفالتی نسبت به سنگدانه، نقش آن در مصرف انرژی و عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر بیش از سنگدانه است.

همچنین، نتایج به دست آمده از تحلیل مسافت حمل مصالح نشان داد که مسافت حمل مصالح سنگی و مخلوط آسفالتی تأثیر به‌سزایی بر نتایج چرخه عمر دارد. لذا، توجه به فاصله کارخانجات آسفالت از معدن سنگ در هنگام تأسیس کارخانجات آسفالت و فاصله کارخانه آسفالت مورد استفاده برای تولید مخلوط آسفالتی از محل اجرای پروژه، می‌تواند منجر به بهبود عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر روسازی‌های آسفالتی شود.

در این مطالعه، از روش ارزیابی چرخه عمر به عنوان ابزاری برای کمی‌سازی و سنجش عملکرد زیست‌محیطی روسازی آسفالتی استفاده شد. برای این منظور، ابتدا مدل و چارچوب کلی برای چرخه عمر این روسازی‌ها ارائه شد و ارزیابی چرخه عمر در مراحل ابتدایی چرخه عمر در چهار بخش ساخت مواد اولیه، حمل، تولید مخلوط آسفالتی و اجرا با هدف شناسایی سهم هر یک از مراحل در مصرف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی صورت گرفت.

نتایج به دست آمده از این ارزیابی نشان داد که تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت با سهم ۵۵ درصدی در مصرف انرژی و ۴۸ درصدی در گرمایش جهانی، بیشترین تأثیر را بر محیط‌زیست داشته و توجه و مدیریت در این بخش می‌تواند نتایج مؤثری بر کل

۶. مراجع

- سالنامه آماری سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای. ۱۳۹۴. معاونت برنامه‌ریزی دفتر فناوری اطلاعات و ارتباطات. چراغی، ع. و برهانی، ف. ۱۳۹۵. "ارزیابی اثرات آلودگی هوا در چهار روش روسازی به کمک چهار روش مرسوم تصمیم‌گیری چندمعیاره در ایران. فصلنامه مطالعات علوم محیط‌زیست، ۱(۱): ۵۹-۷۱.
- Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A. and Lovell, J. 2011. "Electricity-specific emission factors for grid electricity". Technical Paper, Ecometrica, <https://emissionfactors.com>.
- Butt, A. A., Mirzadeh, I., Toller, S. and Birgisson, B. 2012. "Life cycle assessment framework for asphalt pavements: Methods to calculate and allocate energy of binder and additives". Int. J. Pavement Eng., 15(4): 290-302.
- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T. and Lee, W. 2011. "Pavement preservation: A solution for sustainability". J. Transport. Res. Board, 2235: 36-42.
- Chevvoits, J. and Galehouse, L. 2010. "Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation process for asphalt concrete pavements". First International Conference on Pavement Preservation, Transportation Research Board, pp. 27-42.
- Chiu, C. T., Hsu, T. H. and Yang, W. F. 2008. "Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements". Conserv. Recyc. 52: 545-556.
- Haäkinen, T. and Maäkela", K. 1996. "Environmental impact of concrete and asphalt pavements, environmental adaption of concrete". Research Notes 1752, Technical Research Center of Finland.
- IEA. 2005. "Energy Statistics Manual". OECD/IEA.
- IEA. 2015. "Statistics". <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
- IPCC. 2006. "Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual". Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- ISO 14040. 1997. "Environmental Management- Life Cycle Assessment- Principles and Framework". International Organization for Standardization, Geneva.

- ISO 14044, 2006. "Environmental Management- Life Cycle Assessment- Requirements and Guidance". International Organization for Standardization, Geneva.
- Lee, N., Chou, C. P. and Chen, K. Y. 2012. "Benefits in energy savings and CO₂ reduction by using reclaimed asphalt pavement". Transportation Research Board, Annual Meeting, pp. 2-18.
- Life Cycle Inventory; Bitumen. 2012. European Bitumen Association.
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T. and Matthews, D. H. 2015. "Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter". LCAtextbook.com.
- Solomon, S., et al. 2007. "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing". Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report, Working Group 1, Chapter 2.
- Stripple, H. 2001. "Life cycle assessment of road: A pilot study for inventory analysis". Second Revised Edition, IVL Swedish Environmental Research Institute, Go'teborg, Sweden.