



Sharif University of Technology

<https://sjce.journals.sharif.edu>



Research Note

Economic, Environmental, and Social Assessment of Concrete Pavement Life Cycle: A Literature Review

Mohammad Saleh Entezari, Rashid Tanzadeh* and Fereidoon Moghaddas Nejad

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* corresponding author:(rashidtanzadeh@aut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 February 2024

Revised: 27 July 2024

Accepted: 30 July 2024

Keywords:

Life cycle sustainability
pavement management,
physical modeling,
environmental life cycle
analysis,
social life cycle assessment,
life-cycle cost analysis.

Abstract

Concrete is extensively utilized in road pavement construction, including continuously reinforced, jointed plain, jointed reinforced, precast, and eco-block concrete pavements. However, the pavement industry faces significant challenges, such as high construction and maintenance costs, substantial energy consumption, pollution emissions during material production, and adverse impacts of work zones on workers and communities. These multifaceted impacts are evaluated through economic, environmental, and social life-cycle assessment (LCA) tools, forming the basis of life-cycle sustainability assessment (LCSA). This article reviews the historical development of LCSA and outlines its methodological steps based on existing standards. A critical review of concrete pavement LCSA studies examines their scope, including analysis pillars, life-cycle stages, unit processes, pavement types, tools, life-cycle inventory (LCI), and impact categories. Key gaps are identified: only 25% of studies address the use phase, while a mere 20% consider the end-of-life stage. Within the use phase, common focuses include roughness-induced fuel consumption (10% of studies), vehicle operation costs (10%), and work zone impacts (traffic delays: 15%; increased fuel consumption: 10%). Notably, pavement albedo, carbonation, and lighting effects were analyzed in only one study, while CO₂ was the most frequent LCI item (11 references). To address these limitations, the study proposes a standardized framework for scope definition in concrete pavement LCSA, ensuring comprehensive inclusion of unit processes across all life-cycle stages to enhance result reliability. The article concludes with recommendations for future research to advance LCSA methodologies.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:

Entezari, M.S., Tanzadeh, R. and Moghaddas Nejad, F. 2025. Economic, Environmental, and Social Assessment of Concrete Pavement Life Cycle: A Literature Review, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.110-129
<https://doi.org/10.24200/J30.2024.63847.3301>



ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی: مرور ادبیات

محمد صالح انتظاری، رشید تن‌زاده* و فریدون مقدس‌نژاد

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (rashidtanzadeh@aut.ac.ir)

چکیده

در ساخت انواع رویه‌های روسازی راه، از جمله رویه‌های مسلح پیوسته، ساده‌ی درزدار، مسلح درزدار، پیش‌ساخته، و بلوک‌های بازیافتی به‌طور گسترده‌ای از بتن استفاده شده است. هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری، مصرف بالای انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح، و همچنین آثار منفی محیط کاری در کارگران، و جامعه‌ی محلی از مهم‌ترین چالش‌های دست‌اندرکاران صنعت روسازی راه‌ها هستند. با کاربرد شاخص‌های ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی، شاخص پایداری چرخه‌ی عمر قابل تعیین است. در این مقاله، با مروری بر تاریخچه‌ی شکل‌گیری ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر، مراحل مختلف اجرای آن براساس استانداردهای موجود معرفی شده است. همچنین پژوهش‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی بررسی شده است. این چهارچوب دربرگیرنده‌ی فرآیندهایی است که باید در مراحل چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شوند. اعمال چهارچوب مذکور در تحلیل، مانع حذف فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر از تحلیل پایداری می‌شود و می‌توان نتایج را با درصد اطمینان بالاتری پذیرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹

واژگان کلیدی:

ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر، مدیریت روسازی بتنی، ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر، ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر.

۱. مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در ساخت راه‌هاست. ضدحریق بودن، عمر طولانی، و هزینه‌های پایین حمل‌ونقل، از دلایل اصلی کاربرد بتن بوده است. رویه‌های بتنی را می‌توان در دو دسته‌ی درجاریز و پیش‌ساخته طبقه‌بندی کرد. در رویه‌های درجاریز، بتن‌ریزی در محل پروژه انجام می‌شود. یکی از انواع رویه‌های درجاریز، رویه‌ی بتنی مسلح پیوسته (CRCP) است. از مزایای رویه‌ی بتنی CRCP، که در آن از شبکه‌ی آرماتور استفاده شده است، عبارت‌اند از: عمر مفید بالا، قابلیت استفاده در مناطق پر ترافیک، و نیاز بسیار کم به اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات در طول چرخه‌ی عمر (LCSA)^۱. رویه‌ی بتنی ساده‌ی درزدار (JPCP)^۲ و رویه‌ی بتنی مسلح درزدار (JRCP)^۳ دو نوع دیگر از رویه‌های بتنی هستند، که در آن‌ها به ازاها ۳ الی ۶ متر درزهایی در نظر گرفته می‌شود تا از پدیده‌ی پیچیدگی و تابیدگی بتن جلوگیری شود.^{۱۱} در رویه‌های درجاریز از میلگردهای دوخت عرضی برای اتصال دال‌های مجاور به یکدیگر و از دال‌ها در جهت طول برای انتقال بار به دال‌های مجاور استفاده می‌شود. تفاوت آن‌ها در به‌کارگیری شبکه‌ی آرماتور در دال‌های بتنی و مسلح‌ساختن آن‌هاست.

از طرفی، در رویه‌های غیردرجاریز، محل بتن‌ریزی و موقعیت نهایی اجرا متفاوت

اند؛ که یکی از انواع آن‌ها، رویه‌ی بتنی پیش‌ساخته (PCP)^۵ است، که ساخت یا تعمیر آن سرعت بالایی دارد، عمل‌آوری آن در شرایط مناسب‌تر انجام می‌شود، و در نتیجه مرغوب‌تر است. همچنین، در شرایط آب‌وهوایی مختلف می‌توان آن را اجرا کرد، امکان تولید انبوه و انبارسازی پیش از شروع پروژه را دارد و همچنین معضل گسیختگی زود هنگام بتن در نتیجه‌ی روش‌های غلط اجرا در آن مرتفع شده است.^{۱۲} از انواع دیگر رویه‌های غیردرجاریز، روسازی با بلوک‌های بتنی بازیافتی است. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بلوک‌های اخیر، عبارت‌اند از: پسماند بازیافت‌شده‌ی ریزدانه و درشت‌دانه، شیشه‌ی بازیافت‌شده‌ی ریزدانه، سیمان، ماسه‌ی رودخانه‌ای، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه، خاکستر بادی، و غیره. اجزاء مذکور با درصد‌های مختلفی در فرآیندهای تولید با یکدیگر ترکیب و در نهایت، برای ایجاد زیرساخت‌های راه استفاده می‌شوند.^{۱۳}

امروزه در نظر گرفتن شاخص پایداری در صنایع مختلف به یک اصل مهم تبدیل شده است. کاربرد ابزارهای تحلیل پایداری مورد توجه دست‌اندرکاران صنایع مختلف، از جمله: ساختمان‌سازی، راه‌سازی، بازیافت بتن، تولید سیمان، تولید کودهای شیمیایی، و جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی قرار گرفته است.^{۱۴} از جمله مخاطرات صنعت روسازی راه عبارت‌اند از: هزینه‌های چشمگیر ساخت و نگهداری، مصرف مقدار قابل توجه انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید

⁴ Jointed reinforced Concrete Pavement

⁵ Precast Concrete Pavement

¹ Continuously Reinforced Concrete Pavement

² Life Cycle Sustainability Assessment

³ Jointed Plain Concrete Pavement

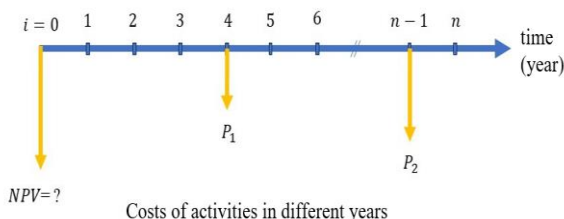
در راستای استفاده از ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCCA) در مقایسه‌ی چند محصول یا فرآیند تولید، ابتدا باید دوره‌ی تحلیل (بازه‌ی زمانی که طی آن راهبردهای پیشنهادی با یکدیگر مقایسه می‌شوند)، هزینه‌های مربوط به هر راهبرد، و زمان پرداخت آن‌ها تعیین شود. در گام بعدی می‌توان از شاخص‌های اقتصادی مختلف در راستای ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مطرح‌شده استفاده کرد. ارزش خالص فعلی (NPW)^۵ و هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه (EUAC)^۶ از رایج‌ترین شاخص‌های اقتصادی هستند. ارزش خالص فعلی، شاخصی است که جریان‌های ورودی و خروجی نقدینگی در آینده را به ارزش پولی خالص آن‌ها در سال مبدأ تبدیل می‌کند. شاخص هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه، هزینه‌های اعلام‌شده برای سال‌های مختلف را به صورت یکنواخت و مساوی بر تمام سال‌های دوره‌ی تحلیل پخش می‌کند. این پارامتر در حالت تخصیص سالانه‌ی بودجه، مناسب‌تر است.^[۱۲] با توجه به ارزش متغیر پول در سال‌های مختلف، مقایسه‌ی مستقیم هزینه‌های پروژه‌ها در نقاط زمانی مختلف از چرخه‌ی عمرشان ناممکن است. در نتیجه، متغیری با عنوان نرخ تنزیل تعریف شده است، که با استفاده از آن، مقدار هزینه‌ها در سال‌های مختلف به ارزش فعلی‌شان در سال مبدأ تنزیل پیدا می‌کند. در استفاده از هر یک از دو شاخص اقتصادی معرفی‌شده، پارامتر نرخ تنزیل استفاده شده است.^[۱۳] متغیر ارزش خالص فعلی در رابطه‌ی ۱ و متغیر هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه در رابطه‌ی ۲ معرفی شده است:

$$NPV = FC \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (۱)$$

$$EUAC = NPV \cdot \left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (۲)$$

که در آن‌ها، FC هزینه‌ی مربوط به یک فعالیت در نمودار زمانی، n فاصله‌ی زمانی فعالیت تا سال مبدأ، و i نرخ تنزیل هستند. نمودارهای مربوط به متغیر ارزش خالص فعلی و هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

ارزیابی چرخه‌ی عمر یا ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (LCA یا E-LCA) برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ معرفی شده است. سپس در سال ۱۹۹۷، در قالب استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ منتشر و سپس در سال ۲۰۰۶ به روزرسانی شده



شکل ۱. محاسبه‌ی متغیر ارزش خالص فعلی برای هزینه‌ی فعالیت‌های انجام‌شده در سال‌های مختلف (به عنوان مثال، دو فعالیت در دو سال مختلف).

مصلح، و همچنین آثار منفی اجتماعی در کارگران و اجتماع محلی ناشی از محیط کاری خطرناک. آثار گسترده‌ی اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی موجود در صنعت روسازی، ارزیابی پایداری روسازی در مراحل چرخه‌ی عمر را لازم ساخته است.^[۱۵]

الاول^۱ و همکاران (۲۰۲۱)، روش‌های تحلیل هزینه‌های چرخه‌ی عمر را برای روسازی‌های دارای مواد بازیافتی یا طبیعی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مرور کرده‌اند.^[۱۶] لی^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، با تمرکز بر به کارگیری پسماندهایی، از جمله: شیشه، سرباره، لاستیک، تراشه‌ها، و بام‌پوش‌های آسفالتی در روسازی، مطالعات منتشرشده در زمینه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی چرخه‌ی عمر را تحلیل کرده‌اند.^[۱۷] آذری جعفری و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ارزیابی مداخلات زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی و بتنی در چرخه‌ی عمر را مرور کرده‌اند.^[۱۸] بررسی مطالعات مروری نشان داده است که علی‌رغم بررسی‌های انجام‌شده بر روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر به صورت کلی، پژوهش جامعی در حوزه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی منتشر نشده است. در مطالعات منتشرشده در زمینه‌ی ارزیابی چرخه‌ی عمر، تمرکز بر یک نوع روسازی مشخص قرار نگرفته است.

در این راستا، نوشتار حاضر با هدف بررسی و تحلیل مطالعات پیشین، فقط برای رویه‌های بتنی، شناسایی دستاوردها و نواقص تحقیقاتی موجود و همچنین ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده، نگارش شده است. ابتدا مفهوم پایداری چرخه‌ی عمر به صورت کلی تعریف شده است. سپس کاربرد آن در صنعت روسازی بررسی شده است. در بخش سوم، به شرح روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر و مراحل مختلف آن پرداخته شده است. بخش چهارم، در برگیرنده‌ی مرور ادبیات موجود در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی بوده و در بخش پنجم، به بررسی و مقایسه‌ی روش‌های تحلیل مطالعات پیشین، ابزارهای استفاده‌شده در آن‌ها، تبیین نواقص مطالعاتی، و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است. همچنین، در آن، چهارچوبی در راستای تعریف گستره‌ی تحلیل پایداری پیشنهاد شده است، که به صورت اختصاصی برای رویه‌های بتنی قابل استفاده است. در بخش آخر، نتایج و یافته‌های پژوهش بیان شده است.

۲. مفهوم پایداری^۳ چرخه‌ی عمر

براساس گزارش سازمان ملل متحد در سال ۱۹۸۷ با عنوان "آینده‌ی مشترک ما"، پایداری دربرگیرنده‌ی سه رکن اقتصاد، محیط‌زیست، و جامعه است.^[۱۹] در این راستا، ارزیابی چندبعدی پایداری چرخه‌ی عمر به سه بخش ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر (C-LCA)^۴، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (E-LCA)^۵، و ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر (S-LCA)^۶ تقسیم شده است.^[۱۰] ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر، قدیمی‌ترین ابزار در تحلیل پایداری است. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده معرفی و در راستای کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز استفاده شده است.^[۱۱] این ابزار با نگاهی کلان، به ارزیابی هزینه‌های یک خدمت یا محصول در تمام مراحل چرخه‌ی عمر آن پرداخته و فقط به هزینه‌ی اولیه‌ی آن محدود نشده است.^[۱۶]

^۵ Environment- Life Cycle Assessment

^۶ Social- Life Cycle Assessment

^۷ Net Present Worth

^۸ Equivalent Uniform Annual Cost

^۱ Alaloul

^۲ Li

^۳ Sustainability

^۴ Cost- Life Cycle Assessment

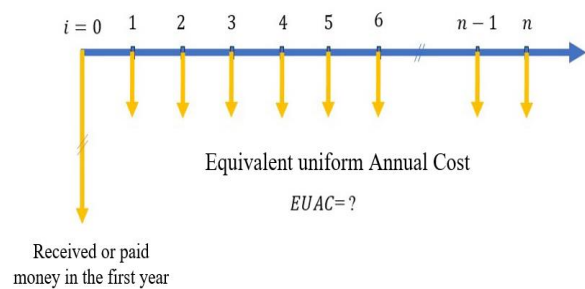
تصمیم‌گیران در راستای انتخاب محصول یا خدمت مطلوب براساس تأثیر آن در زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان، و جامعه است. برخلاف ارزیابی آثار زیست‌محیطی، بسیاری از شاخص‌های آثار اجتماعی، کیفی است، که سنجش آن‌ها را دشوار کرده است. یکی از سخت‌ترین مراحل در انجام تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر، جمع‌آوری داده‌هاست. روش ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر، برای نخستین بار در نشریه‌ی برنامه‌ی زیست‌محیطی سازمان ملل متحد و جامعه‌ی شیمی و سم‌شناسی زیست‌محیطی با عنوان "به‌سوی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر" معرفی شده است.^[۱۶]

ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی است که سه بخش مذکور را به یکدیگر متصل می‌کند. این مفهوم نسبتاً جدید بوده و هنوز به‌نحو جامع استفاده نشده است. در بیشتر تحلیل‌ها از ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر چشم‌پوشی می‌شود و فقط به ارزیابی چرخه‌ی عمر و ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCA و LCCA) پرداخته می‌شود.^[۱۷] ارزیابی شاخص پایداری چرخه‌ی عمر یک پروژه (LCSA) در مواردی از جمله: تعریف مرزهای یکپارچه برای سیستم‌ها، توسعه‌ی پایگاه‌های منسجم داده‌ها برای بررسی‌های اجتماعی و اقتصادی، تعریف طبقه‌بندی‌های یکپارچه در راستای تحلیل آثار با هدف مقایسه‌پذیری مطالعات مختلف، توسعه‌ی روش‌هایی در راستای پیاده‌سازی تحلیل عدم قطعیت و راهبردهای اطلاع‌رسانی، قابلیت توسعه و گسترش داشته است. همچنین لازم است تا مطالعات موردی بیشتری انجام شود تا درک بهتری از ارتباط میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی ایجاد شود و ادغام نتایج هر سه رکن در قالب تحلیلی یکپارچه امکان‌پذیر شود.^[۱۸]

از میان پژوهش‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی شاخص پایداری چرخه‌ی عمر یک پروژه (LCSA)، ۳۲٪ در راستای ارزیابی محصول، ۲۳٪ در راستای ارزیابی فرآیندها، و ۱۴٪ هم با هدف ارزیابی خدمات انجام شده‌اند.^[۱۸] همچنین در پژوهش‌های مذکور، موضوعات مختلفی مطرح شده است، که سهم هر یک در شکل ۳ مشاهده می‌شود. بر این اساس، بیشترین تحلیل‌ها در زمینه‌ی انواع سوخت و انرژی انجام شده‌اند (۲۸٪). همچنین دیگر صنایعی که بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند، به ترتیب عبارت‌اند از: راه و ساختمان (۱۶٪/۹)، خودرو (۱۳٪/۹)، تولید محصولات و قطعات (۱۱٪/۱)، پسماند (۹٪/۷)، تصفیه‌ی آب‌وفاضلاب (۵٪/۵)، کشاورزی (۴٪/۲)، استخراج منابع طبیعی (۴٪/۲)، دیگر موارد (۴٪/۲)، و صنایع غذایی (۲٪/۸).^[۱۸]

۱.۲. پایداری چرخه‌ی عمر در روسازی راه‌ها

کاربرد شاخص پایداری در صنعت روسازی راه، موردتوجه مدیران و دست‌اندرکاران کشورها قرار گرفته است.^[۱۵] اولین مرحله‌ی چرخه‌ی عمر روسازی، استخراج مواد خام، حمل به کارخانه، و سپس تولید محصول است. همچنین در صورت استفاده از مصالح مصنوعی، این مراحل شامل: تولید مصالح در موقعیت‌هایی مانند معادن آغاز می‌شود و فرآوری مواد با استفاده از ماشین‌آلات کارخانجات را در پی خواهد داشت. استفاده از مصالح ساختمانی و راه‌سازی دست دوم، که ظرفیت زیادی برای دفن آن‌ها در مدفن‌ها هم وجود مصنوعی در کارخانه، حمل، و فرآوری آن است. استخراج منابع طبیعی با فعالیت ندارد، یک روش جایگزین به جای استفاده از منابع طبیعی است. دومین مرحله‌ی چرخه‌ی عمر روسازی، یعنی: مرحله‌ی ساخت، شامل انتقال مصالح به



شکل ۲. هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه
به ازاء مبلغ پرداخت‌شده در سال مبدأ (یا سایر سال‌ها).

است.^[۱۹] طبق تعریف استاندارد اخیر، LCA ابزاری است که برای ارزیابی جنبه‌ها و آثار زیست‌محیطی یک محصول در تمام چرخه‌ی عمر آن استفاده شده است. بر این اساس، LCA شامل چهار مرحله است: ۱) تعریف هدف و گستره، ۲) تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر (LCIA)، ۳) ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر، ۴) تفسیر نتایج. تصمیم‌گیران با به خدمت‌گرفتن LCA، مرحله‌ی از چرخه‌ی عمر که بیشترین آثار زیست‌محیطی را دارد، شناسایی و به اصلاح آن‌ها می‌پردازند. در نتیجه، اتلاف مواد خام، مصرف انرژی، تولید زباله، هزینه‌ی دفع پسماند، و مخاطرات سلامتی کاهش یافته و این در حالی بوده است که بهره‌وری فرآیند افزایش یافته است.^[۱۴] امروزه از LCA به‌طور گسترده‌ای در راستای برچسب‌گذاری زیست‌محیطی محصولات، برنامه‌ریزی راهبردی، فرهنگ‌سازی، آموزش و جلب رضایت مشتری، توسعه یا بهبود فرآیند، و طراحی محصول در کشورهای مختلف جهان استفاده شده است.^[۲] تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر به سه روش انجام‌پذیر است:

۱- **تحلیل فرآیندی**، که در آن پروژه یا محصول تحت مطالعه، به فرآیندهای واحد تقسیم و در گام بعدی، ورودی‌ها و خروجی‌های زیست‌محیطی بیشتر فرآیندهای موجود در مرزهای سیستم تحلیل می‌شوند. پیچیدگی اجرای تحلیل در محصولاتی با فرآیندهای بسیار زیاد و همچنین عدم امکان واردکردن تمامی فرآیندها در تحلیل، از معایب روش تحلیل فرآیندی است.

۲- **تحلیل ورودی-خروجی**، روش پیشرفته‌تری است که شامل تمامی زنجیره‌ی تأمین یک محصول است و در آن از انبوه اطلاعات گردآوری‌شده طی یک سال در اقتصاد یک کشور در راستای ارزیابی مداخلات زیست‌محیطی یک محصول استفاده می‌شود. در روش مذکور، که براساس روش "ورودی-خروجی‌های اقتصادی" است، ورودی‌ها و خروجی‌های زیست‌محیطی محصولات از جدول‌های موجود در پایگاه‌های داده بازخوانی می‌شود. داده‌های ارائه‌شده در پایگاه‌های مذکور داده برحسب مقادیر متوسط آن صنعت است، که ممکن است باعث ایجاد خطا در تحلیل شود.

۳- **تحلیل ترکیبی**، از ادغام دو روش تحلیل فرآیندی و روش تحلیل ورودی-خروجی، ایجاد شده است.^[۱۵]

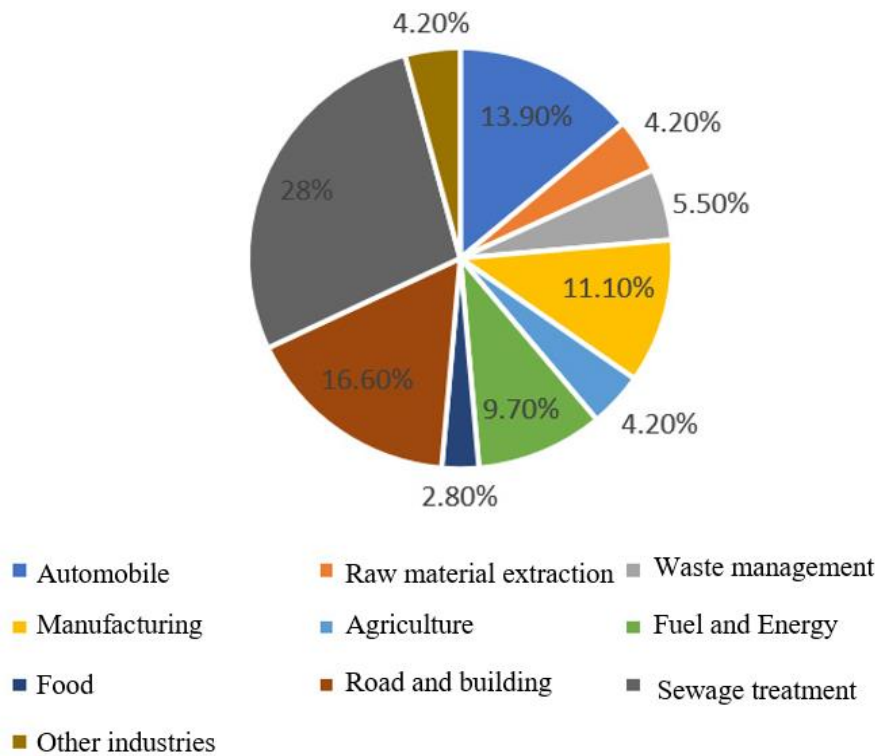
آخرین بخش در تحلیل پایداری، یعنی ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر (S-LCA)، روشی است در راستای گردآوری، تحلیل و اطلاع‌رسانی آثار اجتماعی مربوط به یک محصول یا خدمت. هدف نهایی از ارزیابی S-LCA، راهنمایی

³ Life Cycle Impact Assessment

⁴ Interpretation of results

¹ Goal and scope definition

² Life Cycle Inventory Analysis



شکل ۳. سهم صنایع مختلف در مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر.

چرخه‌ی عمر (LCCA) در راستای امکان‌سنجی اقتصادی گزینه‌های مختلف در بلندمدت و تعیین روسازی با هزینه‌ی بهینه، ضرورت داشته است.^[۲۲]

ابزار LCCA، هزینه‌های مربوط به روسازی راه را در تمامی مراحل چرخه‌ی عمر آن بررسی کرده است. روسازی‌ها با نزدیک شدن به مراحل پایانی عمر خود، دچار خرابی‌های مختلفی می‌شوند؛ در نتیجه، تقاضا در راستای نگهداری و ترمیم آن‌ها افزایش یافته است. به این علت، تقریباً نیمی از بودجه‌ی سالانه‌ی زیرساخت‌های راه، صرف عملیات ترمیم و نگهداری شده است.^[۲۳ و ۲۴] از LCCA در راستای ارزیابی توجیه اقتصادی پروژه‌های احداث روسازی استفاده شده است.^[۲۴] این تحلیل با به‌کارگیری رویکرد قطعی یا احتمالی انجام شده است. در رویکرد قطعی، مقادیر ثابت و گسسته‌ای برای متغیرها در نظر گرفته می‌شود (به‌عنوان مثال، نرخ رشد سالانه‌ی ترافیک برابر با مقدار ۴٪ قرار داده می‌شود). اما معمولاً در تعیین مقادیر متغیرهای ورودی برای LCCA، مقداری عدم قطعیت وجود دارد. زمانی که در تحلیل پروژه‌ای، نیاز به پیش‌بینی مقادیر ورودی باشد، عدم قطعیت به‌علت‌هایی همچون: الف) غیرمترقبه بودن وقایع، ب) تمایز در ساخت‌وساز مناطق مختلف و عدم همخوانی داده‌های آن‌ها، پ) وجود عوامل انسانی که تخمین یا مدل‌سازی آن‌ها پیچیده است، و ت) فقدان داده‌های موردنیاز، ایجاد شده است. در این راستا، می‌توان از رویکرد احتمالاتی در ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر روسازی استفاده کرد.^[۲۳]

در گام بعد، ارزیابی آثار زیست‌محیطی روسازی راه مطرح شده است. مصرف قابل‌توجه سوخت در ماشین‌آلات، حمل‌ونقل، اجرای فرآیندهای آلاینده‌ساز، مانند فرآیندهای خردایش و تولید مصالح، از مهم‌ترین دلایل آثار منفی پروژه‌های ساخت راه در سلامت انسان و محیط‌زیست است. به‌طور کلی، ۱۴٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در جهان از حوزه‌ی حمل‌ونقل نشأت گرفته است، که ۷۲٪ آن در چرخه‌ی عمر راه‌ها ایجاد شده است.^[۲۵] از این مقدار، تا

موقعیت پروژه، و استفاده از ماشین‌آلات و نیروی انسانی است. بهره‌گیری از ماشین‌آلات جهت احداث روسازی مستلزم مصرف مقدار قابل توجه سوخت است. سومین مرحله از چرخه‌ی عمر روسازی، بهره‌برداری و استفاده است، که در آن شرایط کاربران راه و وسائط نقلیه‌ی آن‌ها مد نظر قرار گرفته می‌شود. وضعیت نامطلوب رویه‌ی راه منجر به افزایش استهلاک وسائط نقلیه، رشد مصرف سوخت، و افزایش احتمال بروز تصادف‌ها، و نیز متضرر شدن کاربران راه می‌شود. چهارمین مرحله یا همان مدیریت راه، عملیات نگهداری، تعمیرات و بازسازی روسازی توسط متولیان راه است. عملیات نگهداری روسازی در دو نوع پیشگیرانه (مانند درزگیری و لکه‌گیری) و اساسی (مانند بازسازی) اجرا می‌شود. با اجرای به‌موقع عملیات نگهداری، اضمحلال روسازی به تعویق می‌افتد و عمر خدمت‌دهی روسازی افزایش می‌یابد. مرحله‌ی پایانی عبارت است از: پایان عمر که شامل مواردی از جمله: تخریب روسازی، حمل، فرآوری پسماند، و درنهایت بازیافت یا انتقال به محل دفن است.^[۱۹]

یکی از ویژگی‌های صنعت روسازی راه، استفاده گسترده‌ی آن در بیشتر کشورهای دنیاست. به‌عنوان مثال، در کشور کلمبیا فقط از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹، حدود ۴۰ هزار کیلومتر راه، بازسازی و حدود ۳ هزار کیلومتر راه جدید احداث شده است.^[۲۰] همچنین در ایالات متحده‌ی آمریکا، حدود ۶/۵ میلیون کیلومتر راه موجود بوده و سالانه بیش از ۹ میلیارد تن - کیلومتر مسافر و بار توسط روسازی راه‌ها پشتیبانی شده است. این مقیاس‌های کلان، به تأمین مالی مناسبی نیاز دارد. هم‌اکنون بودجه‌ای بالغ بر ۴۰۰ میلیارد دلار در سراسر جهان، در راستای ساخت و نگهداری روسازی راه‌ها هزینه شده است. اما بودجه‌های در نظر گرفته‌شده با مبالغ قابل هزینه، فاصله‌ی معناداری دارد.^[۲۱] در واقع بودجه‌های پایین، متولیان راه در کشورهای مختلف را در راستای تأمین مالی پروژه‌های راه به چالش کشانده است و انتظار می‌رود که چالش اخیر در ۱۰ تا ۲۰ سال آینده، بحرانی‌تر شود. در نتیجه، استفاده از ابزار ارزیابی هزینه‌ی

۳. روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر

تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر از ۴ مرحله تشکیل شده است: تعریف هدف و گستره، تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر، تحلیل آثار چرخه‌ی عمر، و نهایتاً تفسیر نتایج. در ادامه، هر یک از این مراحل توضیح داده شده است.

۱.۳. تعریف هدف و گستره

ابتدا هدف از مطالعه‌ای که در حال انجام است، بیان می‌شود. در ادامه، باید به این پرسش‌ها پاسخ داده شود:

- آیا تحلیل، شامل تمامی ارکان اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی می‌شود یا برخی از حوزه‌ها حذف شده‌اند؟
- آیا تمامی مراحل چرخه‌ی عمر روسازی (استخراج و تولید مصالح، ساخت، بهره‌برداری، نگهداری، ترمیم، و بازیافت) در مطالعه مشاهده شده است؟
- مخاطبین تحلیل انجام‌شده چه کسانی هستند؟
- چه ابزارها، روش‌ها، و نرم‌افزارهایی در مطالعه استفاده شده‌اند؟

همچنین باید شرحی از این عناوین بیان شود:

- سیستم‌های در نظر گرفته‌شده و کاربرد آن‌ها و تعریف "واحد عملکردی" بر همین مبنا. واحد عملکردی، واحدی است که نتایج تحلیل چرخه‌ی عمر مربوط به آن است؛ مثلاً ساخت، استفاده، و نگهداری ۱ کیلومتر جاده به مدت ۲۵ سال. هر واحد عملکردی از "فرآیندهای واحد" تشکیل شده است.
- فرضیه‌های مهمی که در نظر گرفته شده‌اند.
- محدودیت‌های مطالعه.^[۳۱]

۲.۳. تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر

هر یک از ارکان پایداری، از اجزایی تشکیل شده‌اند و در هر پروژه، اجزاء متفاوتی مؤثر هستند. در این مرحله با مطالعه‌ی هر یک از مراحل چرخه‌ی عمر روسازی، اجزاء مؤثر شناسایی و فهرستی از آن‌ها تهیه می‌شود. در ادامه، به معرفی اجزاء مختلف ارکان پایداری پرداخته شده است.

- **جنبه‌ی زیست‌محیطی:** میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیه‌ی منابع، و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی‌های صوتی و نوری) عواملی هستند که باید در این رکن بررسی شوند.^{[۱۶] و [۳۲]} مؤلفه‌های مختلف موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل جنبه‌ی زیست‌محیطی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.
- **جنبه‌ی اقتصادی:** تمامی هزینه‌های پروژه از مرحله‌ی طراحی تا مرحله‌ی پایان عمر باید در نظر گرفته شوند؛ که شامل: هزینه‌های اداره‌های راهداری

یک چهارم آن مربوط به فرآیندهای تولید مصالح، انتقال، احداث روسازی، نگهداری، ترمیم، و نهایتاً بازیافت است.^[۲۶] براساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، اولین مرحله در چرخه‌ی عمر روسازی، یعنی استخراج مصالح طبیعی، انتقال آن‌ها و سپس تولید مصالح، بالاترین میزان انتشار کربن را در مقایسه با سایر مراحل داشته است.^{[۲۶] - [۲۸]} براساس نوشتار ما^۱ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲۹] که در آن بخش‌هایی از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی تحلیل شده است، حدود ۹۰٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده ناشی از مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح بوده است، که شامل: سیمان، سنگدانه، فولاد، خاکستر بادی، آب، و افزودنی‌ها می‌شود. از میان این مصالح، در رویه‌های غیرمسلح، تولید سیمان با ایجاد ۱۶۲/۵ کیلوگرم CO_۲ به ازاء هر ۱ تن، بیشترین میزان گازهای گلخانه‌ای را وارد محیط‌زیست می‌کند. گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در فرآیند تولید سیمان از دو عامل تجزیه‌ی سنگ آهک و مصرف انرژی نشأت می‌گیرد. در رویه‌های مسلح، بالاتر از تولید سیمان، تولید فولاد با نرخ ۱۵/۲۹۹ کیلوگرم CO_۲ به ازاء هر ۱ تن، بیشترین سهم تولید گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. استفاده از مصالح بازیافتی یا جایگزین‌ساختن بخشی از سیمان موردنیاز با دیگر مصالح و به‌کارگیری ماشین‌آلات با مصرف انرژی پایین، از جمله راه‌حل‌های پیشنهادی در راستای کاهش آلاینده‌ی‌های ایجادشده در این مرحله هستند.

آخرین مرحله‌ی ارزیابی در راستای احداث پروژه‌های راه، ارزیابی آثار اجتماعی آن است. این مفهوم به تازگی معرفی شده و تا به امروز، روش استاندارد و یکپارچه‌ای نداشته است. روش اجرای ارزیابی آثار اجتماعی، مشابه با دو رکن دیگر پایداری با چهار مرحله‌ی تعریف هدف و گستره، ارزیابی موجودی، ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر، و نهایتاً تفسیر نتایج انجام‌پذیر است. از تمایزهای روش ارزیابی پایداری اجتماعی، معرفی ذی‌نفعان (افراد یا گروه‌های دارای منافع و سود در انجام پروژه) است، که در مرحله‌ی تعریف هدف و گستره انجام می‌شود. پس از تعریف ذی‌نفعان، یک روند سلسله‌مراتبی برای مقایسه‌ی منافع به‌دست‌آمده توسط ذی‌نفعان یا مضرات تحمیل‌شده به آن‌ها اجرا می‌شود. در این روند، دسته‌های تأثیرگذاری درنهایت به شاخص‌های اجتماعی تبدیل می‌شود. در مرحله‌ی بعد نیاز است مرحله‌ی ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر از طریق امتیازدهی به شاخص‌ها انجام شود. از آنجایی که ارزیابی شاخص‌های اجتماعی در برخی مواقع مستلزم ارزیابی متغیرهای کیفی است، نیاز است تا با پُرکردن پرسش‌نامه یا انجام مصاحبه، اطلاعات مربوط به دسته‌های تأثیرگذاری از ذی‌نفعان پروژه، از جمله کارگران و کارفرمایان، دریافت و سپس به متغیرهای کمی تبدیل شوند. درنهایت با اجراشدن مرحله‌ی تفسیر نتایج، رویکردی که منجر به بالاترین سطح از منافع برای ذی‌نفعان می‌شود، تعیین خواهد شد.^[۳۰]

جدول ۱. موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل جنبه‌ی زیست‌محیطی (بر مبنای برخی مطالعات^{[۱۶] و [۳۲]}).

Consumption		Released Emissions				
Energy	Carbon-monoxide	Sulfur	PM-10	VOC	Carbon-dioxide	Lead
Natural Resources	Hg	PAH	Sulfur dioxide	Cd	Nitrogen-oxide	Chlorofluoro-carbons

^۱ Ma

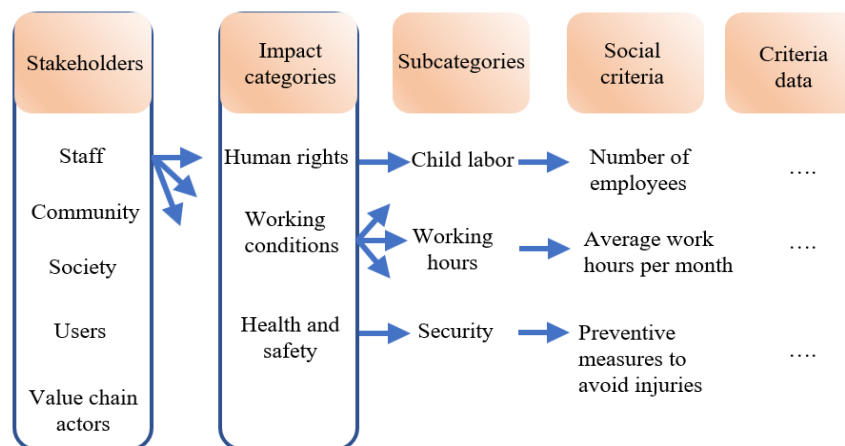
- **جنبه‌ی زیست‌محیطی:** هدف از این مرحله بررسی جامع آثار زیست‌محیطی ناشی از موجودی چرخه‌ی عمر است. برای این منظور، باید آن‌ها را به گروه‌های تأثیرگذاری تبدیل و سپس به اندازه‌گیری مقادیر مربوط به هر گروه پرداخت. این فرآیند دارای سه مرحله‌ی: (۱) انتخاب گروه‌های تأثیرگذاری، (۲) تخصیص هر یک از اجزاء موجودی چرخه‌ی عمر به گروه تأثیرگذاری مربوط به آن، و (۳) مدل‌سازی شاخص‌های گروه‌های تأثیرگذاری بوده است. همچنین گام‌های نرمال‌سازی، وزن‌دهی، و دسته‌بندی نیز می‌توانند به صورت اختیاری توسط پژوهشگران اجرا شوند. گروه‌های تأثیرگذاری را می‌توان تا نقطه‌ی میانی یا نقطه‌ی انتهایی ادامه داد. در رویکرد نقطه‌ی میانی، معضلات زیست‌محیطی به‌صورت جزئی و دقیق بیان می‌شوند. اما در گروه‌های تأثیرگذاری نقطه‌ی انتهایی، تمامی معضلات با رویکردی کلان به سه دسته‌ی: سلامتی انسان، تخلیه‌ی منابع، و کیفیت اکوسیستم تقسیم می‌شوند (در برخی منابع "تغییر اقلیم" نیز در آثار نقطه‌ی نهایی ارائه شده است).^[۱۷] در شکل ۵، گروه‌های تأثیرگذاری در نقطه‌های میانی و انتهایی مشاهده می‌شوند.
- **جنبه‌ی اجتماعی:** در این مرحله، چهارچوب‌هایی برای امتیازدهی به شاخص‌های اجتماعی (که در مرحله‌ی قبل، یعنی تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر تعریف شده‌اند) در نظر گرفته شده است. شاخص‌های اجتماعی به دو نوع کمی و نیمه‌کمی تقسیم شده‌اند. سپس آن‌ها براساس امتیازهای دریافت‌شده، تبدیل به آثار اجتماعی می‌شوند. تا به امروز هیچ روش و چهارچوب یک‌دست

(مانند هزینه‌های استخراج مصالح، ساخت و تعمیر و نگهداری روسازی)، و همچنین هزینه‌های کاربران راه (مانند استهلاک خودرو) می‌شود.^[۳۳]

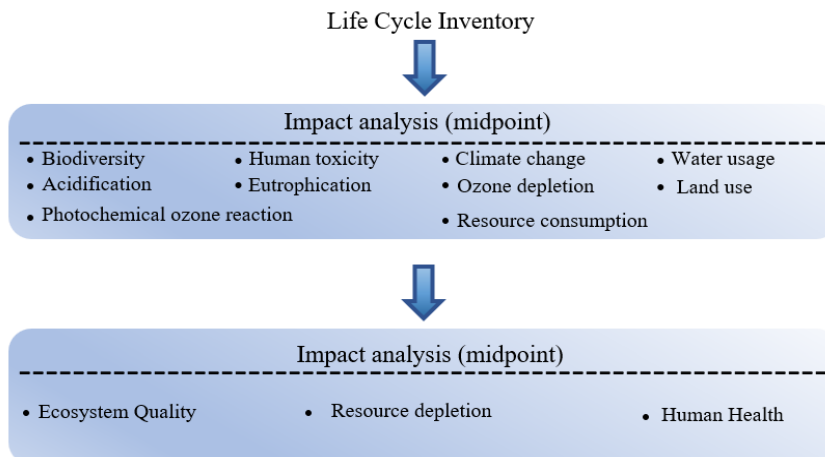
- **جنبه‌ی اجتماعی،** از اجزاء آن به‌عنوان شاخص‌های اجتماعی نام برده می‌شود، نیازمند سه مرحله است: در مرحله‌ی اول، باید ذی‌نفعان تعیین شوند. عموماً ۵ دسته‌ی کارگران و کارفرمایان، محله، جامعه (در سطح کلان و ملی)، کاربران، و نهایتاً بازیگران زنجیره‌ی ارزش به عنوان ذی‌نفعان پروژه در نظر گرفته می‌شوند.^[۳۴] مرحله‌ی دوم، تعریف دسته‌های تأثیرگذار در هر گروه از ذی‌نفعان است. چند مورد از دسته‌های تأثیرگذار پیشنهادی توسط برنامه‌ی زیست‌محیطی سازمان ملل در راهنمای ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر، عبارت‌اند از: حقوق بشر، شرایط کاری، سلامتی و امنیت. سپس برای هر دسته‌ی تأثیرگذاری باید زیرمجموعه‌هایی تعریف شود؛ که با تعریف آن‌ها می‌توان شاخص‌های اجتماعی را در مراحل مختلف چرخه‌ی عمر ایجاد کرد. شاخص‌های اجتماعی همان موجودی چرخه‌ی عمر هستند.^[۳۵] در شکل ۴، اجرای روند سلسله‌مراتبی ذکرشده برای گروه اول ذی‌نفعان، یعنی کارگران و کارفرمایان مشاهده می‌شود.

۳.۳. تحلیل آثار چرخه‌ی عمر

در این مرحله، پس از تکمیل طبقه‌بندی اجزاء چرخه‌ی عمر، از روش‌های مختلف مدل‌سازی برای اندازه‌گیری کمی آثار زیست‌محیطی، اجتماعی، و اقتصادی آن‌ها استفاده شده است.



شکل ۴. اجرای روند سلسله‌مراتبی تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر برای گروه "کارگران و کارفرمایان" از مجموعه‌ی ذی‌نفعان.^[۳۵]



شکل ۵. گروه‌های تأثیرگذاری در نقطه‌ی مربوط به تحلیل آثار جنبه‌ی زیست‌محیطی.^[۳۶]

یکپارچه‌سازی نتایج، امکان تصمیم‌گیری دقیق برای انتخاب روسازی پایدارتر فراهم نشده است.

بخش دوم، شامل نوشتارهایی است که چرخه‌ی عمر روسازی بتنی را از منظر دو رکن زیست‌محیطی و اقتصادی مطالعه کرده‌اند. موگا^۵ و همکاران (۲۰۰۹)، به ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی در زردار و مسلح پیوسته‌ی حاوی خاکستر بادی و سرباره پرداخته و با در نظر گرفتن سه مرحله‌ی استخراج، ساخت، و نگهداری و با استفاده از روش ورودی- خروجی اقتصادی انجام داده‌اند.^[۴۱] نتایج مربوط به ارزیابی هزینه‌های اقتصادی نشان داد علی‌رغم اینکه هزینه‌های مرحله‌ی نگهداری CRCP، ۸۰٪ کمتر از JPCP است، مجموع هزینه‌های مراحل چرخه‌ی عمر رویه‌ی CRCP، ۴۶٪ بالاتر از رویه‌ی JPCP است. همچنین JPCP کاهش ۴۲ الی ۶۷ درصدی را نسبت به CRCP در انتشار گازهای گلخانه‌ای در پی داشته است. علت تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای توسط JPCP، عدم استفاده از آرماتورهای فولادی بوده است. در مطالعه‌ی مذکور، از میان شاخص‌های اندازه‌گیری بعد زیست‌محیطی، فقط گرمایش جهانی و مصرف انرژی در نظر گرفته شده است.

ژانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، مراحل استخراج، ساخت، بهره‌برداری، و نگهداری روسازی بتنی ساده را مطالعه کرده و در این راستا، نرم‌افزارها و مدل‌های SimaPro 7, Mobile 6.2, NONROAD, KyUCP را استفاده کرده‌اند. پژوهش اخیر نشان داد که بهینه‌سازی عملیات نگهداری و ترمیم رویه‌ی بتنی (به روش ارائه‌شده در آیین‌نامه) با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی پویا، می‌تواند باعث کاهش حدود ۵ درصدی انرژی و گازهای گلخانه‌ای رویه‌های بتنی شود. حیدری و همکاران (۲۰۲۰) از مدل TOPSIS^۷ و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی بتنی با در نظر گرفتن تمامی مراحل چرخه‌ی عمر آن استفاده کرده‌اند.^[۴۲] براساس نتایج مطالعه‌ی موردی، دو رویه‌ی JRCP و JPCP با ضخامت‌های ۲۵ سانتی‌متر، عملکردهای نزدیکی از منظر میزان آلاینده‌ی داشته و JPCP با اختلافی ۰/۲ درصدی، عملکردی مطلوب‌تری ارائه کرده است. همچنین از نظر مصرف انرژی نیز در عملکردی نزدیک، JPCP با برتری ۰/۱۴ درصدی، بازدهی بیشتری داشته است. از آنجایی که در پژوهش اخیر، از روش تصمیم‌گیری چندشاخصی TOPSIS برای انتخاب گزینه‌ای که برآیند عملکرد آن از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی بهتر بوده است، استفاده شده است؛ بررسی معناداری اختلاف برای دو مقدار گزارش‌شده برای رویه‌ها انجام نشده است. در مقایسه‌ی هزینه‌های اقتصادی چرخه‌ی عمر، اختلاف میان دو رویه‌ی مذکور بیشتر شده و JRCP با ۷/۵٪ اختلاف نسبت به JPCP، نیازمند سرمایه‌گذاری بالاتری بوده است. انتظار می‌رود افزایش هزینه‌های مذکور ناشی از تولید آرماتور فولادی در مرحله‌ی احداث JRCP بوده باشد؛ چرا که سایر هزینه‌های تحلیل‌شده، شامل هزینه‌های تعمیرات خودروها (بر مبنای میزان ناهمواری راه) و هزینه‌ی زمان سفر از گروه هزینه‌های کاربران و هزینه‌های سناریوهای نگهداری و پایان عمر از دسته‌ی هزینه‌های متولیان راه دارای اختلافات کمی در دو رویه‌ی مذکور بوده است. به‌علاوه، JPCP نسبت به CRCP با ضخامت ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر نیز برتری داشته و در هزینه‌های اقتصادی و میزان آلاینده‌ی به ترتیب ۱۵/۲۴ و ۰/۵

و مشخصی برای تحلیل آثار اجتماعی ارائه نشده است. اما در برخی روش‌های پیشنهادی، این امتیازدهی به‌صورت نسبی انجام شده است؛ بدین صورت که میزان شاخص‌ها در پروژه با مقادیر متوسط در کشور مقایسه و سپس امتیازهایی به هر شاخص تخصیص داده شده است.^[۳۷]

• **جنبه‌ی اقتصادی:** جنبه‌ی اقتصادی در تحلیل آثار مطرح نمی‌شود. چرا که تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر خود مقادیر هزینه‌ها را کاملاً محاسبه می‌کند و شامل آثار چرخه‌ی عمر نیز است.^[۳۸]

۴.۳. تفسیر نتایج

این مرحله به بیان نتایج حاصل از مراحل ارزیابی موجودی و ارزیابی آثار اختصاص دارد. بخش تفسیر باید براساس یک تحلیل یکپارچه، پایدارترین گزینه‌ی انتخابی را از میان سایر گزینه‌های موجود معرفی کند. همچنین پیشنهاد می‌شود این موارد در بخش حاضر پوشش داده شود:

- موازنه‌ای میان عواید اقتصادی و معضلات زیست‌محیطی و اجتماعی (در صورت وجود)؛

- شناسایی مراحل چرخه‌ی عمر یا شاخص‌های بحرانی؛

- تأثیر کیفیت داده‌های استفاده‌شده در نتایج.^[۱۶]

۴. مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی

در بخش حاضر، نوشتارهای منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی مرور شده است. بخش اول، شامل نوشتارهایی است که دربرگیرنده‌ی سه بخش: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی هستند. مائو و همکاران (۲۰۱۲)،^[۴۱] در بررسی رویه‌های بتنی در زردار، در زردار مسلح، و مسلح پیوسته، دو مرحله‌ی استخراج مصالح و همچنین ساخت روسازی را با استفاده از روش ورودی- خروجی اقتصادی مطالعه کرده‌اند. براساس نتایج، CRCP در هر سه رکن پایین‌ترین هزینه‌ها را دارد، که این موضوع طبیعتاً ناشی از ضخامت کم آن است. از سوی دیگر، JRCP بالاترین هزینه‌ها را داشته است. سپس چویی^۱ و همکاران (۲۰۱۵)، علاوه بر بررسی مراحل استخراج مصالح و ساخت روسازی، مرحله‌ی نگهداری و ترمیم را نیز برای سه نوع رویه‌ی بتنی مشخص‌شده بررسی کرده‌اند؛^[۳۹] و در آن نیز CRCP، پایین‌ترین هزینه‌ها را در هر سه بخش داشته است. در مطالعات اشاره‌شده، تحلیل بعد اجتماعی با در نظر گرفتن میزان انتقال بار براساس مسافت انجام شده است؛ شاخصی که به‌تنهایی نمی‌تواند تحلیل اجتماعی را پوشش دهد.

شی^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی ساده و حاوی بتن بازیافتی را ارزیابی و چهار مرحله از چرخه‌ی عمر روسازی را با استفاده از ورودی- خروجی اقتصادی بررسی کرده‌اند.^[۴۰] به‌منظور تحلیل بعد اجتماعی، تأثیرگذاری هر نوع روسازی در ابتلای افراد به سرطان تعیین شده است. پژوهش اخیر نشان داد که رویه‌ی RCA-PCC^۳ در مرحله‌ی تولید مصالح و ساخت بسیار پایدارتر از رویه‌ی PCC^۴ بوده است. اما در مرحله‌ی بهره‌برداری، پایداری رویه‌ی بازیافتی مقداری کمتر بوده است. با توجه به فقدان روش‌های

⁵ Muga

⁶ Zhang

⁷ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

¹ Choi

² Shi

³ Recycled Concrete Aggregates - Portland Cement Concrete

⁴ Portland Cement Concrete

درصد کاهش داشته است. نتایج مطالعه‌ی موردی نشان داده است که میزان کربن منتشرشده و میزان مصرف انرژی باید به‌عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب پایدارترین رویه‌ی راه بررسی شوند.

بخش سوم، شامل نوشتارهایی است که فقط شامل بُعد زیست‌محیطی در تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی هستند. پارک و همکاران (۲۰۰۳)، ساخت جاده با انواع روسازی از روسازی‌های صلب را بررسی کرده و ضمن در نظر گرفتن تمام مراحل چرخه‌ی عمر روسازی به جز مرحله‌ی بهره‌برداری بیان کرده‌اند که عمده‌ی انرژی مصرف‌شده در مرحله‌ی تولید مصالح مصرف شده است.^[۴۴] سپس مرحله‌ی ترمیم و نگهداری بیشترین سهم مصرف انرژی را داشته است. مراحل ساخت و تخریب نیز در جایگاه‌های بعدی قرار داشته‌اند. سهم بیشتر در مصرف انرژی معادل انتشار آلاینده‌های بیشتر بوده است.

زاپاتا و گامباتس^۱ (۲۰۰۵)، مراحل استخراج و تولید مصالح و ساخت روسازی مسلح پیوسته را بررسی کرده و نشان داده‌اند که استخراج مصالح و احداث روسازی فقط ۶٪ از سهم انرژی مصرفی را در بر گرفته است. این در حالی است که ۹۴٪ از سهم انرژی مصرف‌شده به مرحله‌ی تولید مصالح (تولید سیمان ۶۱٪، تولید فولاد ۳۲٪، و تولید بتن ۱٪) اختصاص یافته است.^[۴۵] همچنین در صورتی که درصد وزنی سیمان در بتن از ۱۲ به ۸ درصد کاهش یابد و خاکستر بادی جایگزین ۴٪ مذکور شود، مصرف انرژی ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند. کاکور و تاتاری^۲ (۲۰۱۱)، مراحل استخراج و ساخت (شامل حمل و نقل مصالح) از یک روسازی بتنی مسلح پیوسته را ارزیابی کردند و دریافتند که با ایجاد ۱ کیلومتر CRCP، در حدود ۳ میلیون کیلوگرم CO₂ انتشار یافته است، که تقریباً همه‌ی آن به مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح (سیمان) مرتبط بوده است (در نوشتار مذکور، مشخصات رویه مشخص نشده است).^[۴۶] تحلیل اخیر با استفاده از مدل Hybrid Eco-LCA انجام شده است. همچنین تحلیل حساسیت مونت کارلو نشان داد که جایگزین شدن خاکستر بادی با سیمان، تأثیر زیادی در کاهش میزان CO₂ داشته است. لویجس (۲۰۱۱)، در پژوهشی به ارزیابی روسازی‌های بتنی درزدار در سیستم‌های اجرایی مختلف پرداخته و در مقایسه با سایر نوشتارهای موجود در ادبیات موضوع، کامل‌ترین فهرست از فرایندهای چرخه‌ی عمر بتن را داشته است.^[۴۷] طبق نتایج به‌دست‌آمده، بهینه‌سازی بتن با ۳۰٪ خاکستر بادی، استفاده از سنگ‌دانه‌های سفید و استفاده از ظرفیت کرناسیون بتن پس از پایان عمر، تا ۷۰٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است. به منظور اجرای تحلیل از ابزار CMLCA استفاده شده است.

جولین^۳ و همکاران (۲۰۱۴)، پژوهشی با موضوع CRCP انجام داده‌اند، که از معدود مطالعاتی بوده است که در آن اجرای روکش‌های آسفالتی بر رویه‌های بتنی در مرحله‌ی ترمیم و نگهداری مطرح شده است.^[۴۸] یکی از اهداف نوشتار اخیر، ارزیابی پایداری دو سناریوی نگهداری مختلف برای CRCP از نظر زیست‌محیطی بوده و براساس نتایج آن، در ترمیم و نگهداری ۳۰ ساله‌ی CRCP، جایگزین‌ساختن طرح اول (شامل تراش و اجرای روکش آسفالتی) با طرح دوم (اجرای روکش‌های آسفالتی با زمان‌بندی متفاوت)، کاهش ۳۰

درصدی مصرف انرژی و کاهش ۳۵ درصدی گرمایش جهانی را به دنبال داشته است. اناستاسیو^۴ و همکاران (۲۰۱۵)، در ارزیابی روسازی بتنی در مراحل استخراج، ساخت و پایان عمر آن، سه نوع رویه، شامل: (۱) بتن با سیمان پوزولانی، (۲) بتن با یک ملات آبی تازه، و (۳) بتن پوزولانی با خاکستر بادی را در نظر گرفته‌اند.^[۴۹] رویه‌ی نوع ۱ دارای بیشترین، رویه‌ی نوع ۳ دارای حد متوسط، و رویه‌ی نوع ۲ دارای کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده است. حسین و همکاران (۲۰۱۶)، مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح را برای روسازی‌های احداث‌شده با بلوک‌های بازیافتی تحلیل کرده‌اند.^[۴] طبق نتایج تحلیل از روش ارزیابی آثار IMPACT^۵ 2002، تولید بلوک‌های بازیافتی در مقایسه با تولید بلوک‌های با مصالح طبیعی، ۳۰٪ انرژی کمتری مصرف و حدود ۲۰٪ گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر کرده است.

مارتینز-آرکولز^۶ و همکاران (۲۰۱۹)، ضمن استفاده از روش ارزیابی آثار IMPACT2002+ و نرم‌افزار SimaPro، به مقایسه‌ی چرخه‌ی عمر روسازی بتنی ساده و روسازی حاوی بتن بازیافتی پرداخته‌اند.^[۲۰] کاربرد بتن بازیافتی به جای مصالح طبیعی در تولید بتن جدید، تا ۲۳٪ باعث کاهش مخاطرات سلامتی انسان و تا ۱۰٪ باعث صرفه‌جویی در مصرف منابع شده است. استخراج سنگ آهک و حمل آن، بحرانی‌ترین فرایندها در تحلیل بوده است. با توجه به مصرف سوخت، بیشترین تأثیر را در تحلیل زیست‌محیطی داشته است. فاصله‌ی حمل یکی از عوامل تأثیرگذار در این تحلیل است؛ به حالتی که اگر فاصله‌ی انتقال مصالح بتن بازیافتی کمتر از ۳۰ کیلومتر باشد، استفاده از آن‌ها توصیه شده است. پلسکن^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، به تحلیل مرحله‌ی نگهداری روسازی بتنی ساده با روکش آسفالتی پرداخته‌اند.^[۵۱] سه سناریوی عنوان‌شده، شامل: (۱) تراش و اجرای روکش آسفالتی، (۲) تعمیر خرابی‌های موجود و اجرای روکش‌های آسفالتی، و (۳) جایگزینی کامل روسازی با مصالح جدید است. براساس نتایج تحلیل نرم‌افزار GaBi، این سه سناریو به ترتیب شماره‌گذاری، دارای کمترین تا بیشترین آثار مخرب در سلامتی انسان، گرمایش جهانی، و تخریب لایه‌ی اوزون بوده‌اند.

بخش چهارم، شامل نوشتارهایی است که فقط بُعد اقتصادی در آن‌ها بررسی شده است. وو^۸ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی بتنی درزدار پرداخته‌اند.^[۵۱] دو راهبرد متفاوت نگهداری برای آزادراهی در چین بررسی شده است. هزینه‌های کاربران در هر دو راهبرد تقریباً یکسان بوده است. با این حال هزینه‌های اداره‌ی راه در راهبرد (ب)، تقریباً ۲۰٪ بیشتر از راهبرد (الف) بوده است. در نتیجه، با به‌کارگیری تحلیل قطعی، راهبرد (الف) انتخاب شده است. اما پس از اجرای تحلیل احتمالاتی مشخص شد که راهبرد (الف) که ارزان‌تر بود، عدم قطعیت بالاتری داشته است. در نتیجه راهبرد (ب)، با هزینه‌هایی پایین‌تر، در تحلیل مبتنی بر ریسک انتخاب شده است. یه‌پز^۹ و همکاران (۲۰۱۶)، مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی بتنی ساده را مطالعه و در آن، برنامه‌ی ترمیم و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) یک روسازی بتنی با به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری را بهینه‌سازی کرده‌اند.

لی و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ی مراحل استخراج، ساخت و نگهداری

⁶ Martinez-Arguelles

⁷ Pleşcan

⁸ Wu

⁹ Yepes

¹ Zapata & Gambatese

² Kucukvar & Tatari

³ Jullien

⁴ Anastasiou

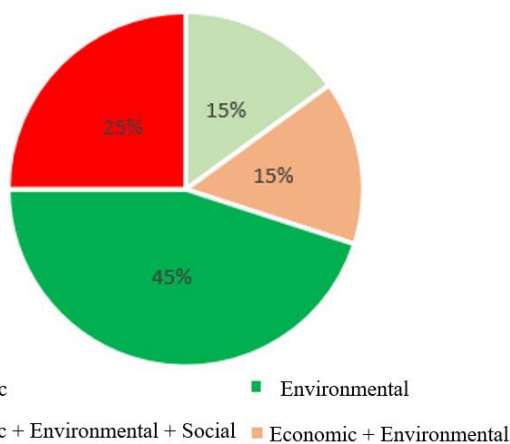
⁵ Impact Assessment of Chemical Toxics

• با توجه به ستون سوم جدول، که نشانگر رویه‌های بتنی بررسی شده در مطالعات مختلف است، CRCP و JPCP که به ترتیب در ۴۰ (۸ مرجع) و ۳۵ (۷ مرجع) درصد نوشتارها بررسی شده‌اند، بیشترین فراوانی در تحلیل‌های انجام شده را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بلوک‌های بازبافتی با فقط یک تحلیل، کمترین تعداد ارزیابی‌ها را داشته‌اند. همچنین، هیچ تحلیلی در راستای ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته ثبت نشده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت CRCP و JPCP بیشترین توجه را از سمت پژوهشگران داشته و همچنین ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته باید در پژوهش‌های آتی بررسی شود.

• با توجه به ستون چهارم، از میان ۲۰ پژوهش انتشار یافته در زمینه ارزیابی پایداری چرخه عمر رویه‌های بتنی، ۷۵٪ شامل ارزیابی زیست‌محیطی (۱۵ مرجع)، ۵۵٪ شامل ارزیابی اقتصادی (۱۱ مرجع)، و نهایتاً ۱۵٪ دارای ارزیابی اجتماعی (۳ مرجع) بوده‌اند. بر این اساس، بدیهی است که ارزیابی اجتماعی رویه‌های بتنی نیازمند توجه بیشتری در پژوهش‌های آینده است.

• برخی پژوهش‌ها حاوی تحلیل‌های ۳ رکنی (ارکان زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی)، ۲ رکنی (ارکان زیست‌محیطی و اقتصادی) و تک‌رکنی (زیست‌محیطی یا اقتصادی) بوده‌اند. شکل ۶، بیانگر سهم هر یک از انواع تحلیل‌های مذکور در ادبیات موضوع است. حدود نیمی از نوشتارها (۴۵٪) فقط با در نظر گرفتن رکن زیست‌محیطی انجام شده است. سپس، تحلیل‌های مبتنی بر رکن اقتصادی، بیشترین سهم (۲۵٪) را در میان ادبیات مروری داشته‌اند. تحلیل‌های مبتنی بر ۲ رکن (محیطی و اقتصادی) و ۳ رکن (محیطی، اقتصادی و اجتماعی) هر یک با سهم یکسان (۱۵٪) در جایگاه بعدی قرار گرفته‌اند.

• در ستون ۵، مراحل از چرخه عمر رویه‌ی بتنی که در تحلیل وارد شده‌اند، مشخص شده است. سهم هر یک از ۵ مرحله‌ی چرخه عمر رویه‌های بتنی در تحلیل‌های انجام شده بدین شرح است: تولید مصالح در ۸۰٪ از نوشتارها (۱۶ مرجع)، ساخت در ۷۰٪ از نوشتارها (۱۴ مرجع)، نگهداری و تعمیرات در ۶۵٪ از نوشتارها (۱۳ مرجع)، بهره‌برداری در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع)، و پایان عمر در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع). بر این اساس مشخص است که پژوهشگران به ساد سازی مراحل مختلف چرخه عمر رویه‌ی بتنی از جمله بهره‌برداری و پایان عمر پرداخته‌اند. به منظور اجرای تحلیل‌های واقع‌گرایانه، لازم است این مراحل در پژوهش‌های آینده وارد شوند.



شکل ۶. ارزیابی نوشتارهای انتشار یافته در زمینه ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی بر اساس تعداد ارکان بررسی شده.

روسازی‌های بتنی در زردار، و مسلح پیوسته پرداخته‌اند و در آن، از JPCP در حدود ۱۵٪، هزینه‌ی پایین‌تری از CRCP داشته است. اکبریان و همکاران (۲۰۱۷)، مراحل بهره‌برداری و نگهداری روسازی بتنی ساده را تحلیل کرده و اجرای روکش‌های بتنی در مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی مطرح شده است. روش محاسبه‌ی هزینه‌های اولیه، تأخیرهای ترافیکی ناشی از ترمیم و استهلاک خودرو ارائه و در یک مثال عددی ارزیابی شده است. همچنین اندازه‌گیری استهلاک خودرو، به عنوان یکی از مؤثرترین مؤلفه‌های چرخه عمر روسازی معرفی شده است. مطالعه‌ی موردی برای یک رویه‌ی بتنی ساده با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و دوره‌ی نگهداری ۲۰ ساله، شامل: عملیات پرکردن ترک‌ها و درزها (به میزان ۱٪)، لکه‌گیری تمام عمق (۷٪)، جزئی (۱٪)، تراش الماسه (۲۳٪)، و بازسازی (۳٪) انجام شده است. تبدیل هزینه‌های چرخه عمر به ارزش خالص فعلی نشان داد که هزینه‌های عمر ۳۴ ساله‌ی روسازی مطرح شده در سال مبدأ برابر با حدود ۴/۲ میلیون دلار بوده است، که به ترتیب از زیاد به کم، از این عوامل نشأت گرفته است: احداث روسازی، استهلاک ناشی از ناهمواری، نگهداری و تعمیرات، تأخیرات ترافیکی. دی‌پندله^۱ (۲۰۱۸) به ارزیابی روسازی بتنی در زردار با در نظر گرفتن مراحل استخراج، احداث و نگهداری پرداخته و در آن، احداث و ترمیم و نگهداری یک روسازی بتنی با ۸۳۶۰ مترمربع مساحت بررسی شده است. لایه‌های مختلف این روسازی عبارت بوده‌اند از: رویه‌ی بتنی در زردار به ضخامت ۱۷۵ میلی‌متر، اساس دانه‌ای به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، و بستر. بر این اساس هزینه‌ی ساخت و ۵ بار تعمیر و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) معادل ۳۸۵ هزار دلار (در دوره‌ی عملکردی ۹۰ ساله) بوده است.

۵. بحث و بررسی

در بخش حاضر، نوشتارهای بررسی شده در بخش مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی، با توجه به روش‌ها و جزئیات تحلیل موضوع بررسی شده و ابزارهای استفاده شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند، تا ضمن تعیین روند انجام پژوهش، در راستای انجام پژوهش‌های آینده، راهبردهای مناسب پیشنهاد شود. در جدول ۲، منابع موجود در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه عمر رویه‌های بتنی با توجه به نوع رویه‌های بررسی شده (ستون ۳)، ارکان ارزیابی شده از پایداری (ستون ۴)، مراحل در نظر گرفته شده از چرخه عمر (ستون ۵)، روش تحلیل (ستون ۶) و ابزارهای استفاده شده (ستون ۷) مقایسه شده‌اند. با بررسی منابع پژوهشی ارائه شده در جدول ۲، این نتایج به دست آمده است:

• تا به امروز هیچ مطالعه‌ای با در نظر گرفتن هر ۳ رکن پایداری و هر ۵ مرحله‌ی چرخه عمر برای روسازی‌های بتنی انجام نشده است. به علاوه، مرحله‌ی یکپارچه سازی نتایج به جهت انتخاب بهترین روسازی از منظرهای: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی در هیچ یک از منابع موجود بررسی نشده است.

• در مطالعاتی که هر ۳ رکن پایداری در نظر گرفته شده است، یگانه روش تحلیل بررسی شده، روش ورودی- خروجی اقتصادی بوده است. هیچ مطالعه‌ای با روش فرآیندی یا هیبریدی (ترکیب روش‌های فرآیندی و ورودی- خروجی اقتصادی) با در نظر گرفتن هر ۳ رکن پایداری به منظور ارزیابی پایداری بتن انجام نشده است.

همچنین با نگاه آماری دقیق‌تر به جدول ۲ می‌توان دریافت:

¹ Diependaele

برای تحلیل پایداری در مطالعات می‌توان به محاسبه‌گرهای آنلاین CMU (EIO-LCA Feature)^۱ و CMCLA^۲ و همچنین نرم‌افزار Ecorce اشاره داشت. در بیشتر پژوهش‌ها از مراحل بهره‌برداری و پایان عمر در تحلیل پایداری چشم‌پوشی شده است. در ادامه، با بررسی دقیق تحلیل‌هایی که در آن‌ها مراحل بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات و همچنین پایان عمر در نظر گرفته شده است، فرآیندهای واحد مربوط به این مراحل برشمرده شده است.

ستون هفتم در جدول ۲، نشان‌دهنده‌ی استفاده‌ی محدود از نرم‌افزارهای تجاری رایج در زمینه‌ی ارزیابی پایداری است. به‌منظور ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر، نرم‌افزار SimaPro در ۲ مرجع و نرم‌افزار GaBi در ۱ مرجع استفاده شده است. در هیچ‌یک از پژوهش‌ها، از ابزار قدرتمند OpenLCA استفاده نشده است. همچنین به‌منظور ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر، فقط در یکی از مراجع، نرم‌افزار RealCost استفاده شده است. از دیگر ابزارهای استفاده‌شده

جدول ۲. بررسی و مقایسه‌ی مطالعات انجام‌شده با موضوع: ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر انواع روسازی‌های بتنی.

Category	Reference	Pavement types	Pillars			Evaluated stages of life cycle					Analysis Method	Analysis tools / standards	
			Env.	Eco.	Soc.	Material	Const.	Use	Rehab.	EOL		Environmental	Economic
Three-pillar analysis	[21]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	-	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[39]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	★	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[40]	PCC, RCA-PCC	✓	✓	✓	★	★	★	-	★	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature), TRACI	
Two-pillar analysis	[41]	JPCP - CRCP	✓	✓	-	★	★	-	★	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[42]	PCC	✓	✓	-	★	★	★	★	-	Hybrid	SimaPro 7, Mobile 6.2, NONROAD, KyUCP	-
	[43]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	-	★	★	★	★	?	Hybrid	TOPSIS, Monte Carlo Simulation	
Single-pillar analysis (Environmental)	[44]	Road construction	✓	-	-	★	★	-	★	★	Hybrid	-	-
	[45]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	Process	-	-
	[46]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	Hybrid	Hybrid Eco-LCA model	-
	[47]	JPCP in 12 different systems	✓	-	-	★	★	★	★	★	Hybrid	CMCLA	-
	[48]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	★	-	Hybrid	ECORCE	-
	[49]	Modified PCC	✓	-	-	★	★	-	-	★	Hybrid	-	-
	[3]	Eco-block, Natural block	✓	-	-	★	-	-	-	-	Hybrid	IMPACT2002+	-
	[20]	PCC, RCA-PCC	✓	-	-	★	-	-	-	-	Hybrid	SimaPro, IMPACT2002+	-
	[50]	PCC	✓	-	-	-	-	-	★	-	Hybrid	GaBi	-
Single-pillar analysis (Economic)	[51]	JPCP	-	✓	-	-	-	-	★	-	Hybrid	-	-
	[52]	PCC	-	✓	-	-	-	-	★	-	Hybrid	-	-
	[53]	JPCP - CRCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	Hybrid	-	RealCost
	[54]	PCC	-	✓	-	-	-	★	★	-	Hybrid	-	-
	[55]	JPCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	Hybrid	-	-
Total (Percentage)		-	15 (75%)	11 (55%)	3 (15%)	16 (80%)	14 (70%)	5 (25%)	13 (60%)	4 (20%)	-	-	-

² Chain Management by Life Cycle Assessment

¹ Carnegie Mellon University (Environmental Input-Output – Life Cycle Analysis)

اقلیمی می‌شود. کاهش واداشت تابشی به پدیده‌ی گرمایش جهانی منجر می‌شود.^[۴۶]

• **پدیده‌ی جزیره‌ی گرمایش شهری:** عبارت است از گرم شدن محیط به علت جذب اشعه‌ی نور خورشید و آزادسازی گرما. روسازی راه با جذب گرما، محیط اطراف را گرم می‌کند. در نتیجه، با تغییر نیازهای سرمایش و گرمایش ساختمان‌های اطراف، در انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد. پیدایش پدیده‌ی جزیره‌ی گرمایش شهری منجر به افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه تولید آلاینده‌های بیشتر شده است. همچنین این پدیده، بیماری‌هایی را برای مردم ساکن در آن منطقه به وجود خواهد آورد.^[۵۶]

• **کربناسیون:** با تولید سیمان، مقدار زیادی CO_2 وارد محیط شده است. از سوی دیگر، فرآیند هیدراسیون سیمان در روند تولید بتن، مقدار قابل توجهی کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)_2) تولید می‌کند. در طول چرخه‌ی عمر رویه‌ی بتنی، کربن دی‌اکسید موجود در اتمسفر به سطح متخلخل بتن نفوذ می‌کند و با کلسیم هیدروکسید در مجاورت آب واکنش شیمیایی می‌دهد؛ که از طریق آن، CO_2 موجود در اتمسفر مصرف می‌شود. در واقع بتن بخشی از CO_2 تولیدشده در فرآیند تولیدش را جذب و جبران می‌کند. به این فرآیند شیمیایی کربناسیون اطلاق می‌شود و حاصل آن کلسیم کربنات (CaCO_3) است.^[۵۶] این فرآیند منجر به کاهش آلودگی‌های موجود در طبیعت شده است.

• **تولید شیرابه:** یکی از انواع مصالح بازیافتی که امروزه به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در ساخت روسازی بتنی استفاده می‌شود، سنگ‌دانه‌های بتنی بازیافتی (RCA)^۱ است. وجود فلزات سنگین، از جمله: کروم (Cr) و کادمیم (Cd) و ترکیب‌های شیمیایی از جمله سولفات در بتن باعث شده است که با نفوذ آب، شیرابه‌ای قلیایی به وجود آید و به داخل زمین نفوذ کند.^[۵۷] شیرابه‌ی مذکور می‌تواند منجر به آلودگی زیست‌محیطی قابل توجهی بر خاک و آب‌های زیرزمینی شود.

سناریوهای نگهداری و تعمیرات رویه‌های بتنی، از جمله نوع و جزئیات عملیات، زمان‌بندی اجرا و معیار برنامه‌ریزی در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

فرآیندهای واحدی که در مرحله‌ی بهره‌برداری از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شده‌اند، در جدول ۳ معرفی شده‌اند. با توجه به جدول اخیر، ناهمواری مسیر می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت (از منظر محیطی) و افزایش هزینه‌های نگهداری خودرو (از دید اقتصادی) شود، که هر یک از این عوامل در ۴۰٪ پژوهش‌های مرتبط بررسی شده‌اند.

با توجه به اینکه سطوح مختلف ناهمواری منجر به بروز استهلاک با شدت‌های مختلف در خودروها می‌شود و از آنجایی که مدل دقیقی در پژوهش‌های بررسی‌شده برای تعیین میزان استهلاک براساس مقادیر مختلف ناهمواری مشاهده نشده است، پیشنهاد می‌شود مدلی برای محاسبه‌ی میزان استهلاک براساس شاخص‌های ناهمواری توسعه یابد و در تحلیل‌های پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی استفاده شود. از طرفی، وجود مناطق کارگاهی می‌تواند منجر به تأخیرهای ترافیکی (از منظر اقتصادی) یا افزایش مصرف سوخت وسائط نقلیه (از منظر محیطی) شود، که هر یک از دو عامل مذکور به ترتیب در ۶۰ و ۴۰ درصد از مطالعاتی که مرحله‌ی بهره‌برداری در آن‌ها وارد شده است، در نظر گرفته شده‌اند.

آلبدو، کربناسیون (که دو پدیده‌ی قابل توجه در مرحله‌ی بهره‌برداری هستند و تعریف آن‌ها در پاراگراف بعدی ارائه شده است) و تأمین روشنایی روسازی، فقط در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند و سایر تحلیل‌های موجود، فاقد فرآیندهای مذکور هستند. فقدان هر یک از مراحل اخیر در تحلیل، منجر به خطا در نتیجه‌گیری شده است و در نتیجه لازم است در پژوهش‌های آینده، به آن‌ها توجه شود. برخی از فرآیندهای مرحله‌ی تعمیر و نگهداری توضیح داده شده است.

• **آلبدو:** این فرآیند از به وقوع پیوستن دو پدیده‌ی واداشت تابشی و جزیره‌ی گرمایش شهری به وجود می‌آید.

• **واداشت تابشی:** عبارت است از توانایی روسازی برای بازتاب اشعه‌ی دریافت‌شده به بیرون از اتمسفر زمین. این پدیده باعث خنک‌شدن شرایط

جدول ۳. عوامل بررسی‌شده در تحلیل مرحله‌ی بهره‌برداری از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	First Factor: Road roughness		Second Factor: Work zones		Other factors
	Fuel usage	Vehicle costs	Traffic delays	Fuel usage	
	(Environmental)	(Economic)	(Environmental)	(Economic)	
[40]	-	✓	-	-	-
[42]	✓	-	✓	✓	-
[43]	-	✓	✓	-	-
[57]	-	-	-	✓	Albedo, carbonation, and pavement illumination
[54]	✓	-	✓	-	-
Total (Percentage)	2 (40%)	2 (40%)	3 (60%)	2 (40%)	-

^۱ Recycled Concrete Aggregate

جدول ۴. سناریوهای نگهداری و تعمیرات بررسی شده در تحلیل مرحله‌ی نگهداری و تعمیرات از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Maintenance and rehabilitation operations											Explanations
	Crack sealing	Patching	Reconstruction	Diamond grinding	Joint filling	Mill & overlay	Overlay	Grouting	Grooving	Dowel treatment	Shoulder repair	
[39]	-	-	✓ JRPC: every 15 years, JPCP every 20 years, and CRCP, every 30 years	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[41]	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	Scheduling was based on Michigan DoT's M&R plan.
[42]	✓ In years 11 and 31	-	✓ In the 20 th year of the 40-year period	-	✓ In years 11 and 31	-	✓	-	-	-	-	-
[43]	-	-	-	-	-	✓ 2.5-cm milling and 10-15 cm overlay	✓ 15-cm	-	-	-	-	Overlay was considered to be either stabilized or unstabilized.
[44]	-	-	✓ Every 20 years	-	-	✓ Every 7 years	-	-	-	-	-	-
[47]	-	-	✓ Every 10 years, after the 20 th year	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	-	-	-	-	-	✓ 2.5-cm overlay	✓ Every 3 to 5 years for half width or every 11 years for the whole width	-	-	-	-	-
[50]	-	-	-	-	-	✓ 9-cm overlay	-	-	-	-	-	-
[51]	✓	✓	-	✓	✓	-	✓ Slurry seal	-	-	-	-	Preventive maintenance performed annually and major maintenance performed in years 11 and 18
[52]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Scheduling based on: 1- the correlation of maintenance and PCI and 2- the increase in pavement life after each M&R operation
[53]	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
[54]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓ Micro-surfacing, chip seal, and fog seal	-	-	-	✓	All operations concentrated in the 20 th year of the 35-year period
[55]	✓ Every 10 years	-	✓ In 50 th year	-	✓ Every 5 years, after the 15 th year	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	6 (46%)	4 (31%)	8 (62%)	4 (31%)	5 (38%)	4 (31%)	5 (38%)	1 (8%)	1 (8%)	1 (8%)	1 (8%)	-

در جدول معرفی شده‌اند. پژوهشگران گاز گلخانه‌ای CO_2 را در عمده مطالعات (۸۴٪) به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های موجودی چرخه عمر در نظر گرفته‌اند. به‌علاوه، مصرف انرژی در ۷۷٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از موجودی‌های چرخه عمر در نظر گرفته شده است. پس از CO_2 ، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت‌اند از: CH_4 ، SO_2 و NO_x که هر یک در ۳۱٪ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی ارزیابی شده‌اند. همچنین کمترین فراوانی مربوط به NH_3 بوده است، که فقط در ۸٪ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است.

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی در مرحله‌ی تحلیل آثار چرخه عمر رویه‌های بتنی در جدول ۷ ارائه شده‌اند. دسته‌های تحلیل‌شده در پژوهش‌های پیشین به ترتیب بیشترین فراوانی، عبارت‌اند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸۹٪)، تخلیه‌ی لایه‌ی اوزون (۴۴٪)، مردابی شدن (۴۴٪)، انتشار مواد سمی (۳۳٪)، مصرف آب (۳۳٪)، اسیدی شدن (۳۳٪)، انتشار مواد آلی/غیرآلی مضر برای تنفس (۲۲٪)، انتشار مواد ایجادکننده‌ی سرطان یا بیماری‌های غیر از سرطان (۲۲٪)، اشغال زمین (۲۲٪)، سمیت زیست‌محیطی (۲۲٪)، مسمومیت انسانی (۱۱٪)، استخراج مواد معدنی (۱۱٪)، تشعشعات یونی (۱۱٪)، ایجاد ریزگرد (۱۱٪) و مصرف انرژی غیرتجدیدپذیر (۱۱٪).

*در این پژوهش‌ها، سهم هر یک از وسایل نقلیه در حمل‌ونقل مواد نیز مشخص و در مرحله‌ی تحلیل تأثیرات ارزیابی شده‌است.

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی پایانی در نظر گرفته‌شده در تحلیل‌های زیست‌محیطی پیشین در جدول ۸ ارائه شده‌اند. تخلیه‌ی منابع در ۷۵٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، تغییر اقلیم در ۵۰٪، سلامتی انسان در ۵۰٪ و کیفیت زیست‌بوم در ۲۵٪ از مراجع مذکور ارزیابی شده‌اند.

بررسی منابع انتشاریافته در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی نشان داد که چهارچوب واحدی در راستای مرحله‌ی تعریف گستره‌ی تحلیل وجود ندارد؛ به‌گونه‌ای که هر یک از پژوهشگران، فرآیندهای مختلفی را در تحلیل اعمال کرده و یا فرآیندهایی را در نظر نگرفته‌اند. این در حالی است که حذف فرآیندهای واحد از گستره‌ی تحلیل می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود. بر این اساس، چهارچوبی برای مرحله‌ی "تعریف گستره‌ی تحلیل" در بخش کنونی

مطابق با جدول اخیر، عملیات در نظر گرفته‌شده در برنامه‌ریزی‌های نگهداری و تعمیرات عبارت‌اند از: بازسازی (۶۳٪) از نوشتارها شامل مرحله‌ی نگهداری و تعمیرات، درگیری (۴۶٪)، پرکردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیارانداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪) و بهسازی شانه‌ها (۸٪). همچنین سایر نکات قابل توجه در جدول بدین شرح است:

- به انواع روکش‌های حفاظتی اسلاری سیل، میکروسرفسینگ، چپ‌سیل، و فگ‌سیل در برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات رویه‌های بتنی توجه شده است.
- داول‌ها یا میلگردهای دوخت قرارگرفته در درزها، سازوکار انتقال بار میان دال‌های بتنی را فراهم می‌کنند. زمانی که میلگردهای دوخت مذکور دچار پوسیدگی می‌شوند، نیاز به ترمیم و جایگزینی آن‌ها وجود دارد. این عملیات در ۸٪ از نوشتارها، وارد تحلیل پایداری چرخه عمر شده است. به‌منظور جلوگیری از پوسیدگی میلگردهای دوخت می‌توان از پوشش پوکسی روی میلگردها استفاده کرد.
- لکه‌گیری می‌تواند در عمق‌های مختلفی اجرا شود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده، عمق لکه‌گیری در محاسبات در نظر گرفته نشده است.

فرآیندهای واحد در نظر گرفته‌شده در مرحله‌ی پایان عمر از چرخه عمر رویه‌های بتنی در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول مذکور، یکی از عواملی که در تحلیل اقتصادی باید در نظر گرفته شود، ارزش اسقاط است، که فقط در ۲۵٪ از تحلیل‌ها، شامل مرحله‌ی پایان عمر در نظر گرفته شده است. ۳ فرآیند واحد دیگر، که در مرحله‌ی پایان عمر باید در نظر گرفته شوند، عبارت‌اند از: تخریب، دفن در مدفن و بازیافت که این عوامل همگی در ۷۵٪ از مطالعات شامل مرحله‌ی پایان عمر وارد شده‌اند. نرخ‌های بازیافت بتن و فولاد نیز در مطالعات، مقادیر مختلفی داشته‌اند، که در جدول اخیر مشاهده می‌شوند.

موجودی چرخه عمر در تحلیل‌های انجام‌شده برای ارزیابی زیست‌محیطی رویه‌های بتنی در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق با جدول ۶، انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ و انتشار گازهای آلاینده‌ی هوا در ۳۱٪ از پژوهش‌های منتشرشده شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند. انواع گازهای در نظر گرفته‌شده در هر یک از دو دسته‌ی مذکور نیز همراه تعداد مطالعات مرتبط

جدول ۵. عوامل بررسی‌شده در مرحله‌ی پایان عمر از چرخه عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Economic Analysis Economic or Environmental Analysis			
	Scrap Value	Demolition	Landfill	Recycling
[40]	✓	-	-	-
[44]	-	✓	✓	✓ Rate of 35%
[47]	-	✓	✓	✓ Rates of 50% for concrete and 70% for steel
[49]	-	✓	✓	✓ Rate of 80% for concrete
Total (Percentage)	1 (25%)	3 (75%)	3 (75%)	3 (75%)

جدول ۶. موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Greenhouse Gas Emissions					Air-polluting Gas Emissions							Energy use
	CO2	CH4	HFC	PFC	N2O	CO	NH3	NOx	PM10	PM2.5	SO2	VOC	
[21]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[39]	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓
[40]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[41]	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓
[42]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[43]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[44]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
[45]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[46]	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
[47]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[49]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	11 (84%)	4 (31%)	3 (23%)	3 (23%)	2 (15%)	3 (23%)	1 (8%)	4 (31%)	2 (15%)	2 (15%)	4 (31%)	2 (15%)	10 (77%)
Total (Percentage)	11 (84%)					4 (31%)					10 (77%)		

جدول ۷. دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی وارد شده در مرحله‌ی ارزیابی آثار تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

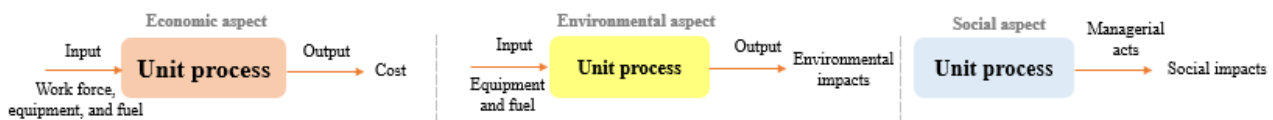
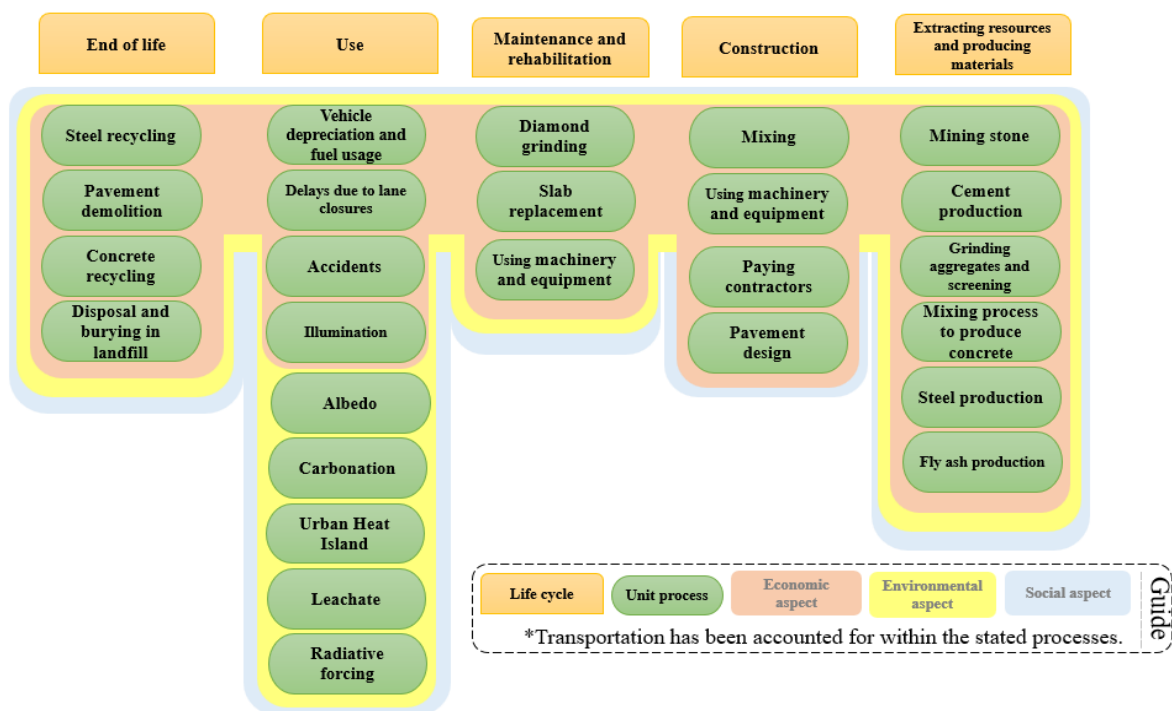
Reference	Global warming potential	Hazardous Waste	Toxic release	Water use	Ozone Layer depletion	Acidification (water or air)	Eutrophication (water or air)	Human toxicity	Minerals extraction	Respiratory organics/inorganics	Ionizing radiation	Carcinogens / Noncarcinogens	Land occupation	Particulate air	Ecotoxicity	Non-renewable energy usage
[21]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[39]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[40]	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-
[41]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[49]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[3]	✓	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓
[20]	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
[50]	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	8 (89%)	2 (22%)	3 (33%)	3 (33%)	4 (44%)	3 (33%)	4 (44%)	1 (11%)	1 (11%)	2 (22%)	1 (11%)	2 (22%)	2 (22%)	1 (11%)	2 (22%)	1 (11%)

اختصاصی پیشنهادی برای تعریف گستره‌ی تحلیل که در شکل ۷ مشاهده می‌شوند، با گردآوری فرآیندهای مختلف ارائه‌شده در ادبیات موضوع ایجاد شده است. با توجه به چهارچوب پیشنهادی:

معرفی شده است، که فرآیندهای واحد تعریف‌شده در آن اختصاص به رویه‌های بتنی دارد. باتوجه به ادبیات موضوع، بررسی این فرآیندها برای تحلیل کامل پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی ضروری هستند. چهارچوب

جدول ۸. دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی پایانی وارد شده در مرحله‌ی تحلیل آثار ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Endpoint impact categories			
	Climate change	Ecosystem Quality	Human Health	Resource depletion
[46]	-	-	-	✓
[49]	-	-	-	✓
[20]	✓	✓	✓	✓
[51]	-	✓	-	✓
Total (Percentage)	2 (50%)	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)



شکل ۷. فرآیندهای واحد در روش پیشنهادی برای ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی و مرزهای سیستم در روش پیشنهادی برای ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

روشنایی، کربناسیون، جزایر گرمایش شهری، تولید شیرابه، و واداشت تابشی باشد.

۵. در نهایت، مرحله‌ی پایان عمر لازم است فرآیندهای واحد بازیافت فولاد، تخریب روسازی، بازیافت بتن و دفن در محل دفن پسماند را داشته باشد.

۶. نتیجه‌گیری

ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی در راستای تحلیل مراحل مختلف چرخه‌ی عمر یک محصول از سه دیدگاه: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی است. در تحلیل اقتصادی چرخه‌ی عمر (LCCA)، هزینه‌های کاربران و متولیان محصول تعیین شده است. در تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (LCA)، میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیه‌ی منابع و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی‌های

۱. مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح باید شامل: فرآیندهای واحد استخراج سنگ، تولید سیمان، فولاد و خاکستر بادی، سنگ‌شکنی، سرنده، و نهایتاً اختلاط مواد اولیه بتن باشد.

۲. مرحله‌ی ساخت باید شامل: فرآیندهای اختلاط بتن، به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات جهت اجرای روسازی، پرداختی شرکت‌های پیمانکاری، و طراحی فنی روسازی باشد.

۳. فرآیندهای واحد برای مرحله‌ی ترمیم و نگهداری، لازم است شامل: به‌کارگیری تجهیزات برای سایر عملیات نگهداری پیشگیرانه یا اساسی، مانند: لکه‌گیری، درزگیری، روکش تراش با صفحات الماسه، جایگزینی دال، و همچنین عملیات بازسازی باشد.

۴. فرآیندهای واحد مرحله‌ی بهره‌برداری باید در برگیرنده‌ی استهلاک خودروها، تأخیر زمانی ناشی از بستن خطوط عبوری، تصادف‌ها، تأمین

است که انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، انتشار گازهای آلاینده‌ی هوا در ۳۱٪ و مصرف انرژی در ۷۱٪ از مطالعات در نظر گرفته شده‌اند. در پژوهش‌های منتشرشده، پژوهشگران بیشترین توجه را به گاز CO₂ به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های موجودی چرخه‌ی عمر داشته‌اند (۱۱ مرجع). پس از CO₂، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت بوده‌اند از: CH₄، SO₂، و NO_x، که به هر یک از آن‌ها در ۳۱٪ از پژوهش‌ها توجه شده است.

- بررسی دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی در پژوهش‌های پیشین نشان داد که ۳ دسته‌ای که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت‌اند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸ مطالعه)، تخلیه‌ی لایه‌ی اوزون (۴ مطالعه)، و مردابی‌شدن (۴ مطالعه).

- در آن دسته از تحلیل‌های زیست‌محیطی که اثرگذاری نقطه‌ی نهایی بررسی شده است (۴ مطالعه): تخلیه‌ی منابع در ۷۵٪ از تحلیل‌ها، تغییر اقلیم در ۵۰٪، سلامتی انسان در ۵۰٪، و کیفیت زیست‌بوم در ۲۵٪ از مطالعات مذکور ارزیابی شده‌اند.

آن دسته از موضوعاتی که تا به امروز، مطالعه‌ی جامعی در مورد آن‌ها انجام نشده است، شناسایی شده‌اند. خلا‌های مطالعاتی مذکور بدین شرح هستند:

- ✓ به‌کارگیری روش هیبریدی ارزیابی پایداری در تحلیل‌های سه رکنی،
- ✓ استفاده از نرم‌افزار قدرتمند OpenLCA به‌منظور تحلیل زیست‌محیطی،
- ✓ ادغام نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت مستقل رکن و یکپارچه‌سازی در قالب یک شاخص مشترک،
- ✓ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته،
- ✓ توسعه‌ی مدلی برای محاسبه‌ی استهلاک وسائط نقلیه براساس میزان ناهمواری و به‌کارگیری آن در ارزیابی پایداری مرحله‌ی بهره‌برداری،
- ✓ اجرای تحلیلی مبتنی بر هر ۳ رکن پایداری با درنظرگرفتن تمامی ۵ مرحله‌ی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

همچنین کاربرد نرم‌افزارهای قدرتمند محاسبه‌ی آثار زیست‌محیطی و اقتصادی از جمله: SimaPro و Gabi، نیازمند توسعه و گسترش بیشتری در مطالعات آینده هستند. ارزیابی پایداری رویه‌ی Eco-block که فقط در یک پژوهش بررسی شده است، نیز نیازمند پژوهش‌های گسترده‌تری توسط پژوهشگران است. همچنین مرور ادبیات پیشین، ناهماهنگی‌های موجود در فرآیندهای گستره‌ی تحلیل را نشان داده است. به‌عبارت دیگر، پژوهشگران در پژوهش‌های مختلف، فرآیندهای متفاوتی را به‌صورت سلیقه‌ای از تحلیل حذف یا به تحلیل اعمال کرده‌اند. این امر باعث غیرواقعی‌بودن نتایج و عدم مقایسه‌پذیری نتایج پژوهش‌های مختلف با یکدیگر شده است. این در حالی است که با درنظرگرفتن تمامی مراحل و فرآیندهای موجود در تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی، نتایجی جامع و قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. در راستای رفع مشکل اخیر، چهارچوبی برای مرحله‌ی تعریف گستره پیشنهاد شده است، که شامل فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر برای رویه‌های بتنی بوده است و می‌تواند به‌صورت یکپارچه در مطالعات ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر استفاده شود. با توجه به چهارچوب پیشنهادی برای تعریف گستره، از حذف فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر و غیرواقعی‌بودن نتایج به‌دست‌آمده جلوگیری خواهد شد.

صوتی و نوری) بررسی شده است. نهایتاً، تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر (SLCA)، تأثیر محصول در زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان، جامعه، و دیگر ذی‌نفعان را از طریق شاخص‌هایی، مانند: امنیت، سلامتی، وضعیت شغلی، و غیره مورد سنجش قرار داده است. امروزه به اهمیت استفاده از شاخص پایداری در صنعت روسازی راه توجه شده است. هزینه‌های اقتصادی کلان، مصرف مقدار قابل توجه انرژی و تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح و ساخت، آثار منفی اجتماعی در کارگران و اجتماع محلی، که ناشی از محیط کاری خطرناک است، از دلایل اصلی این رویکرد بوده است. دست‌اندرکاران و مدیران صنعت راه، در هنگام احداث روسازی یا انتخاب راهبردهای تعمیر و نگهداری، با گزینه‌های مختلفی مواجه هستند. شاخص پایداری، قابلیت امکان‌سنجش، و تعیین گزینه‌های مختلف را برای کارشناسان فراهم می‌کند، تا گزینه‌ی انتخابی، کمترین آثار اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی را داشته باشد. مراحل مختلف تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی عبارت‌اند از: استخراج مواد اولیه/تولید مصالح، احداث روسازی، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، و پایان عمر.

پژوهشگران از سال ۲۰۰۹ میلادی تا به امروز، به پژوهش در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پرداخته‌اند. بررسی مطالعات موجود نشان داده است که:

- از میان منابع منتشرشده، ۴۵٪ بر تحلیل زیست‌محیطی، ۲۵٪ بر تحلیل اقتصادی، ۱۵٪ بر تحلیل دو رکن اقتصادی و زیست‌محیطی، و ۱۵٪ بر تحلیل سه رکن: اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی تمرکز یافته است. همچنین در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی، ارزیابی زیست‌محیطی، بیشترین سهم (۱۵ مرجع)، ارزیابی اقتصادی، سهم متوسط (۱۱ مرجع)، و نهایتاً ارزیابی اجتماعی، کمترین سهم (۳ مرجع) را داشته‌اند.
- از میان مراحل چرخه‌ی عمر، بهره‌برداری فقط در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع) و پایان عمر فقط در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع) در نظر گرفته شده‌اند. حذف مراحل چرخه‌ی عمر از تحلیل پایداری منجر به نتایج غیرواقعی در ارزیابی‌ها شده است.
- عوامل در نظر گرفته‌شده در ارزیابی مرحله‌ی بهره‌برداری، شامل: تأثیر ناهمواری مسیر در افزایش مصرف سوخت (۲ مرجع) و افزایش هزینه‌های نگهداری خودرو (۲ مرجع) و همچنین تأثیر مناطق کارگاهی در افزایش تأخیرهای ترافیکی (۳ مرجع) یا افزایش مصرف سوخت وسائط نقلیه (۲ مرجع) بوده است. آلبود، کربناسیون، و تأمین روشنایی روسازی، فقط در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.
- سناریوهای مختلف نگهداری و تعمیرات برای رویه‌های بتنی توسعه داده شده‌اند، که عملیات آن شامل: بازسازی (۶۳٪ از نوشتارها شامل مرحله‌ی نگهداری و تعمیرات)، درزگیری (۴۶٪)، پرکردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیارانداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪)، و بهسازی شانه‌ها (۸٪) بوده است.
- به‌منظور ارزیابی مرحله‌ی پایان عمر در تحلیل‌های اقتصادی، ارزش اسقاط بررسی شده است (۱ مطالعه). در تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، ۳ فرآیند واحد در نظر گرفته شده‌اند، که عبارت‌اند از: تخریب، دفن در مدفن، و بازیافت (۳ مطالعه).
- بررسی مطالعات منتشرشده از منظر موجودی چرخه‌ی عمر نشان داده

References- منابع

- European Concrete Paving Association (EUPAVE). 2020. Guide for Design of Jointed Concrete Pavements. Brussels.
- Novak, J., Kohoutkova, A., Kristek, V., and Vodicka, J., 2017. Precast concrete pavement – systems and performance review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 236, No. 1, pp. 012030). IOP Publishing. 10.1088/1757-899X/236/1/012030
- Hossain, Md. U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., and Cheng, J.C.P., 2016. Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, pp.70-84.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0988-2>
- Xiaoyan, Z., Easa S.M., Yang, Z., Ji, T., and Jiang, Z., 2019. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Cleaner Production*, 213, pp.659-672.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227>
- Zheng, X., Easa, S.M., Ji, T., and Jiang, Z., 2020. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 264, pp.121466.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124976>
- Alaloul, W.S., Altaf, M., Musarat, Javed, M.F., and Mosavi, A., 2021. Systematic review of life cycle assessment and life cycle cost analysis for pavement and a case study. *Sustainability*, 13, 4377.
<https://doi.org/10.3390/su13084377>
- Li, J., Xiao, F., Zhanng, L., and Amirkhanian, S.N., 2019. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, pp.1182-1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>
- AzariJafari, H., Yahia, A., and Amor, M.B., 2016. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2187-2197.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>
- World Commission on Environment and Development (WCED), 1987. *Our Common Future (The Brundtland Report)*, 17(1), pp.1-91.
- Klopfner, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life-cycle Assessment*, 13(2), 89-95.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.115>
- Hamdar, Y., Chehab, G.R. and Srour, I., 2016. Life-Cycle Evaluation of Pavements: A Critical Review. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 9(6). <https://doi.org/10.25103/jestr.096.02>
- Diependaele, M., 2018. A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements. Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association.
- Guidelines for life cycle cost analysis*, Stanford University, 2005.
- International organization for standardization, 2006. *Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework*. ISO.
- Yang, Y., Heijungs, R., and Brandao, M., 2017. Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA. *Journal of Cleaner Production*, 150, pp.237-242.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.006>
- United Nations Environment Programme and Society for Environmental Toxicology and Chemistry (UNEP/SETAC), 2012. *Towards a life cycle sustainability assessment: making informed choices on products*. UNEP/SETAC, Paris, France.
- Zamgani, A., Pesonen, H.-L., and Swaar, T., 2013. From LCA to Life cycle sustainability assessment: concept, Practice and future directions. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), pp.1637-1641. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0648-3>
- Costa, D., Quinteiro, P., and Dias, A.C., 2019. A systematic review of life cycle sustainability assessment: current state, Methodological challenges, and implementation issues. *Science of the Total Environment*, 686, pp.774-787.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.435>
- Hoxha, E., Vignisdottir, H.R., Barbieri, D.M., Wang, F., Bohne, R.A., Kristensen, T., and Passer, A., 2021. Life cycle assessment of roads: exploring research trends and harmonization challenges. *science of the total environment*. 759, pp.143506.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506>
- Martinez-Arguelles, G., Acosta, M.P., Dugarte, M., and Fuentes, L., 2019. Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the northern region of colombia: case study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(5), pp.397-406.
<https://doi.org/10.1177/0361198119839955>
- Mao, Z., 2012. *Life-cycle assessment of highway pavement alternatives in aspects of economic,*

- environmental, and social performance* (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
22. Pittenger, D., Gransberg, D.D., Zaman, M., and Riemer, C., 2012. Stochastic life-cycle cost analysis for pavement preservation treatments. *Journal of Transportation Research Board*, 2292(1), pp.45-51. <https://doi.org/10.3141/2292-06>
23. Babashamsi, P., Yussof, N.I.M., Ceylan, H., Nor, N.G.M., and Jenatabadi, H.S., 2016. Evaluation of Pavement Life-cycle cost analysis: review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), pp.241-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004>
24. Hass, R., Tighe, S.L., and Falls, L.C., 2006. Determining return on long-life pavement investments. *Transportation Research Record*, 1974(1), pp.10-17. <https://doi.org/10.1177/0361198106197400102>
25. Giunta, M., 2020. Assessment of environmental impact of road construction: modelling and prediction of fine particulate matter emissions. *Building and Environment*, 176, pp.106865. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106865>
26. Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P., Xue, S., Yu, Q., and Li, Q., 2022. Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.06.001>
27. Bizarro, D.E.G., Steinmann, Z., Nieuwenhijse, I., Keijzer, E., and Hauck, M., 2021. Potential carbon footprint reduction for reclaimed asphalt pavement innovations: LCA Methodology, best available technology, and near future reduction potential. *Journal of Sustainability*. 13(3), pp.1382. <https://doi.org/10.3390/su13031382>
28. Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., and Wang, C., 2016. Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: a case study of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 13(3), pp.351. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030351>
29. Ma, F., Sha, A., Yang, P. and Huang, Y., 2016. The greenhouse gas emission from Portland cement concrete pavement construction in China. *International journal of environmental research and public health*, 13(7), pp.632. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>
30. Blaaw, S.A., Maina, J.W., and Grobler, L.J., 2021. Social life cycle inventory for pavements – A case study of South Africa. *Transportation Engineering*. 4, pp.100060. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100060>
31. Strippel, H., 2001. *Life cycle assessment of road - a Pilot study for inventory analysis*. Second Revised Edition, IVL-report B1210 E.
32. Natham, R., McNeil, S., and Van Dam, T.J., 2009. Integrating environmental perspectives into pavement management: adding the pavement life-cycle assessment tool for environmental and economic effects to the decision-making toolbox. *Journal of Transportation Research Board*, 2093(1), pp.40-49. <https://doi.org/10.3141/2093-05>
33. Santos, J. and Ferreira, A., 2012. Life-cycle cost analysis system for pavement management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, pp.331-340. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.618535>
34. UNEP/SETAC., 2013. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA). Life-cycle Initiative. UNEP/SETAC, Paris, France.
35. Benoît Norris, C., Traverzo, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T. and Russo Garrido, S., 2020. Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations.
36. Huang, Y., Bird, R., and Heidrich, O., 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), pp.283-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
37. Wang, S., Hsu, C., and Hu, A.H., 2016. An analytic framework for social life cycle impact assessment – part1: methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, pp.1514-1528. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1114-9>
38. Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Citroth, A., Brent, A.C., and Pagan, R., 2011. Environmental life cycle costing: a Code of Practice. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, pp.389-391. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0287-5>
39. Choi, K., Lee, H.W., and Mao, Z., 2015. Environmental, Economic, and social implications of highway concrete rehabilitation alternatives. *Journal of Construction Engineering and Management*. 142(2), pp.04015079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001063](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001063)
40. Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., and Graseley, Z., 2019. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 225, pp.414-425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.288>

41. Muga, H.E., Mukherjee, A., Mihelcic, J.R., and Kueber, M.J., 2009. An integrated assessment of continuously reinforced and jointed plane concrete pavements. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 7(1), pp.81-98.
<https://doi.org/10.1108/17260530910947277>
42. Zhang, H., Keoleian, G.A., Lepech, M.D., and Kendall, A., 2010. Life-cycle optimization of pavement overlay systems. *Journal of Infrastructure Systems*. 16(4), pp.310-322.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000042)
43. Heidari, M.R., Heravi, G. and Esmaeeli, A.N., 2020. Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, 254, pp.120046.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046>
44. Park, K., Hwang, Y., Seo, S. and Seo, H., 2003. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *Journal of construction engineering and management*, 129(1), pp.25-31.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(25))
45. Zapata, P. and Gambatese, J.A., 2005. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of infrastructure systems*, 11(1), pp.9-20.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9))
46. Kucukvar, M. and Tatari, O., 2012. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), pp.86-90.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.006>
47. Loijos, A.A.N., 2011. *Life cycle assessment of concrete pavements: impacts and opportunities* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
48. Jullien, A., Dauvergne, M. and Cerezo, V., 2014. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *Transportation research part D: transport and environment*, 29, pp.56-65. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006>
49. Anastasiou, E.K., Liapis, A. and Papayianni, I., 2015. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, pp.1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>
50. Pleşcan, C., Barta, M., Maxineasa, S.G. and Pleşcan, E.L., 2022. Life cycle assessment of concrete pavement rehabilitation: a Romanian case study. *Applied Sciences*, 12(4), pp.1769. DOI:10.3390/app12041769
51. Wu, D., Yuan, C. and Liu, H., 2017. A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), pp.11-25.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1030743>
52. Yepes, V., Torres-Machi, C., Chamorro, A. and Pellicer, E., 2016. Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(4), pp.540-550.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1120770>
53. Lee, E.B., Thomas, D.K. and Alleman, D., 2018. Incorporating road user costs into integrated life-cycle cost analyses for infrastructure sustainability: A case study on Sr-91 corridor improvement project (Ca). *Sustainability*, 10(1), pp.179. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su10010179>
54. Akbarian, M., Swei, O., Kirchain, R. and Gregory, J., 2017. Probabilistic characterization of life-cycle agency and user costs: case study of Minnesota. *Transportation Research Record*, 2639(1), pp.93-101. <https://doi.org/10.3141/2639-12>
55. Diependaele, M., 2018. *A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements*. Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association.
56. Rabehi, M., Mezghiche, B., and Guettala, S., 2013. Correlation between initial absorption of the cove concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Construction and Building Materials*, 45, pp.123-129.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074>
57. Głuchowski, A., Sas, W., Dzięcioł, J., Soból, E. and Szymański, A., 2018. Permeability and leaching properties of recycled concrete aggregate as an emerging material in civil engineering. *Applied Sciences*, 9(1), pp.81.
<https://doi.org/10.3390/app9010081>