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

محمدصالح انتظاری [۱]، رشید تن زاده [۲*]، فریدون مقدس نژاد [۳]

[۱] کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
[۲*] پسا دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
[۳] استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در ساخت انواع رویه‌های روسازی راه از جمله رویه های مسلح پیوسته، سادهٔ درزدار، مسلح درزدار، پیش‌ساخته و بلوک‌های بازیافتی به طور گسترده‌ای از بتن استفاده شده‌است. هزینه‌های بالای ساخت ونگهداری، مصرف بالای انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح و همچنین تاثیرات منفی محیط کاری بر کارگران و جامعه محلی از مهم‌ترین چالش‌های دست‌اندرکاران صنعت روسازی راه‌هاست. با کاربرد شاخص‌های ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، شاخص پایداری چرخه عمر قابل تعیین است. در این مقاله، با مروری بر تاریخچهٔ شکل‌گیری ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر[۱]، مراحل مختلف اجرای آن براساس استانداردهای موجود، معرفی شده‌است. سپس تحقیق‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی، مورد بررسی قرار گرفت. این چهارچوب دربرگیرندهٔ فرآیندهایی است که باید در مراحل چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شوند. اعمال این چهارچوب در تحلیل، مانع حذف فرآیندهای مختلف چرخهٔ عمر از تحلیل پایداری شده و میتوان نتایج را با درصد اطمینان بالاتری پذیرفت.

کلمات کلیدی: ارزیابی پایداری چرخه عمر، مدیریت روسازی بتنی، ارزیابی اقتصادی چرخه عمر، ارزیابی اجتماعی چرخه عمر، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه عمر

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

Mohammad Saleh Entezari, Rashid Tanzadeh, Fereidoon Moghaddas Nejad

Concrete is widely used in the construction of road pavement and in various types such as continuously reinforced, jointed plain, jointed reinforced, precast, and eco-block concrete pavement. The different risks in pavement industry include huge costs of construction and maintenance, substantial energy consumption, significant pollution emissions in the material production process, and the negative impacts of work-zones on workers and local community. The widespread impacts in the different life-cycle stages are evaluated using economic, environmental, and social life-cycle assessment tools, the accumulation of which form the criteria of life-cycle sustainability assessment (LCSA). In the present article, the history on the formation of LCSA is first reviewed. Next, the different steps required for performing an LCSA is introduced based on available standards. After that, published articles on concrete pavement LCSA have been reviewed. The previous studies were scrutinized and compared from various aspects: pillars of the analysis, life cycle stages, the unit processes in each stage, the types of analyzed pavements, utilized tools, life cycle inventory, and midpoint and endpoint impact categories of the analysis. The review showed lack of consideration for the use phase (۲۵٪ of studies) and end-of-life stage (۲۰٪). The factors taken into account in the use phase were roughness-induced increase of fuel consumption (۱۰٪) and vehicle operation costs (۱۰٪), and work-zones giving rise to traffic delays (۱۵٪), or increased fuel consumption (۱۰٪). Pavement albedo, carbonation, and lighting were only considered in ۱ analysis. $CO^{۲}$ was the item with the highest frequency in life-cycle inventory (۱۱ references). In the end, aside from suggestions for future research, a framework was devised for the scope definition step of analysis. The framework, which is exclusive to concrete pavements, covers all the processes which should be analyzed in the different life-cycle stages. With the implementation of this framework, omission of unit processes is prevented and thus the obtained results are more reliable.

Keywords: Life cycle sustainability assessment, pavement management, Environmental Life Cycle Analysis, social life cycle assessment, Life-cycle cost analysis

[۱] Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)

۱– مقدمه

بتن یکی از پرمصرف ترین مصالح در ساخت راه‌ها است. ضدحریق بودن، عمر طولانی و هزینه‌های پایین حمل‌ونقل، از دلایل اصلی کاربرد بتن بوده است. رویه‌های بتنی را می‌توان در دو دستهٔ درجاریز و پیش‌ساخته طبقه‌بندی نمود. در رویه‌های درجاریز، بتن‌ریزی در محل پروژه انجام می‌شود. یکی از انواع این رویه‌ها، رویهٔ بتنی مسلح پیوسته (CRCP[۲]) است. از مزایای این رویه بتنی که در آن از شبکهٔ آرماتور استفاده شد است عبارتند از: عمر مفید بالا، قابلیت استفاده در مناطق پر ترافیک و نیاز بسیار کم به اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات در طول چرخه عمر. رویهٔ بتنی سادهٔ درزدار (JPCP[۳]) و رویهٔ بتنی مسلح درزدار (JRCP[۴]) دو نوع دیگر از رویه‌های بتنی هستند که در آن‌ها به ازای هر ۳ الی ۶ متر درزهایی در نظر گرفته می‌شود تا از پدیدهٔ پیچیدگی و تابیدگی بتن جلوگیری شود [۱]. در این رویه‌ها از میلگردهای دوخت عرضی برای اتصال دال‌های مجاور به یکدیگر و از داول‌ها در جهت طول برای انتقال بار به دال‌های مجاور استفاده می‌شود. تفاوت آن‌ها در بکارگیری شبکهٔ آرماتور در دال‌های بتنی و مسلح‌نمودن آن‌ها است.

از طرفی، در رویه‌های غیر درجاریز، محل بتن‌ریزی و موقعیت نهایی اجرا متفاوتند. یکی از انواع این رویه‌ها، رویهٔ بتنی پیش‌ساخته (PCP[۵]) است که ساخت یا تعمیر آن دارای سرعت بالا بوده، عمل‌آوری آن در شرایط مناسب‌تر انجام‌شده و در نتیجه مرغوب‌تر است، در شرایط آب‌وهوایی مختلف می‌توان آن را اجرا نمود، امکان تولید انبوه و انبارسازی پیش از شروع پروژه را دارد و همچنین معضل گسیختگی زودهنگام بتن در نتیجهٔ روش‌های غلط اجرا در آن مرتفع شده‌است [۲]. از انواع دیگر این دسته، روسازی با بلوک‌های بتنی بازیافتی است. اجزای تشکیل‌دهندهٔ این بلوک‌ها عبارتند از: پسماند بازیافت‌شدهٔ ریزدانه و درشت‌دانه، شیشهٔ بازیافت‌شدهٔ ریزدانه، سیمان، ماسه رودخانه‌ای، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه، خاکستر بادی و غیره. این اجزا با درصدهای مختلفی در فرآیندهای تولید با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت برای ایجاد زیرساخت‌های راه، مورد استفاده قرار گرفته شده است [۳].

امروزه در نظرگرفتن شاخص پایداری در صنایع مختلف به یک اصل مهم تبدیل شده است. کاربرد ابزارهای تحلیل پایداری مورد توجه دست اندرکاران صنایع مختلف از جمله ساختمان‌سازی، راهسازی، بازیافت بتن، تولید سیمان، تولید کودهای شیمیایی و جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی قرار گرفته است [۴]. از جمله مخاطرات صنعت روسازی راه عبارتند از: هزینه‌های چشمگیر ساخت و نگهداری، مصرف مقدار قابل توجه انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح و همچنین تاثیرات منفی اجتماعی بر کارگران و اجتماع محلی ناشی از محیط کاری خطرناک. این تاثیرات گستردهٔ اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی موجود در صنعت روسازی، ارزیابی پایداری روسازی در مراحل چرخه عمر را لازم نموده است [۵].

الالول و همکاران در سال ۲۰۲۱ روش‌های تحلیل هزینه‌های چرخهٔ عمر را برای روسازی‌های دارای مواد بازیافتی یا طبیعی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مرور کردند [۶]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۹، با تمرکز بر به‌کارگیری پسماندهایی از جمله شیشه، سرباره، لاستیک، تراشه‌ها و بامپوش‌های آسفالتی در روسازی، مطالعات منتشرشده در زمینهٔ ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی چرخهٔ عمر را تحلیل کردند [۷]. آذری‌جعفری و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ ارزیابی مداخلات زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی و بتنی در چرخهٔ عمر را مرور کردند [۸]. بررسی مطالعات مروری نشان داد که علیرغم بررسی‌های انجام‌شده بر روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر به‌صورت کلی، پژوهش جامعی در حوزهٔ ارزیابی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی منتشر نشده‌است. در مطالعات منتشرشده در زمینهٔ ارزیابی چرخهٔ عمر، تمرکز بر یک نوع روسازی مشخص قرار نگرفته است.

در این راستا، مقاله حاضر با هدف بررسی و تحلیل مطالعات پیشین صرفا برای رویه‌های بتنی، شناسایی دستاوردها و نواقص تحقیقاتی موجود و همچنین ارائه

---

[۲] Continuously Reinforced Concrete Pavement
[۳] Jointed Plain Concrete Pavement
[۴] Jointed reinforced Concrete Pavement
[۵] Precast Concrete Pavement

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده، نگارش شده است. ابتدا مفهوم پایداری چرخهٔ عمر به‌صورت کلی تعریف شده است سپس کاربرد آن در صنعت روسازی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم به شرح روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخهٔ عمر و مراحل مختلف آن پرداخته شده است. بخش چهارم در برگیرندهٔ مرور ادبیات موجود در زمینهٔ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی است. در بخش پنجم به بررسی و مقایسهٔ روش‌های تحلیل مطالعات پیشین، ابزارهای استفاده‌شده در آن‌ها، تبیین نواقص تحقیقاتی و ارائهٔ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است. همچنین، در این بخش چهارچوبی در راستای تعریف گسترهٔ تحلیل پایداری پیشنهاد شده است که به صورت اختصاصی برای رویه‌های بتنی قابل استفاده است. در بخش آخر، نتایج و یافته‌های تحقیق بیان شده است.

۲- مفهوم پایداری[۶] چرخهٔ عمر

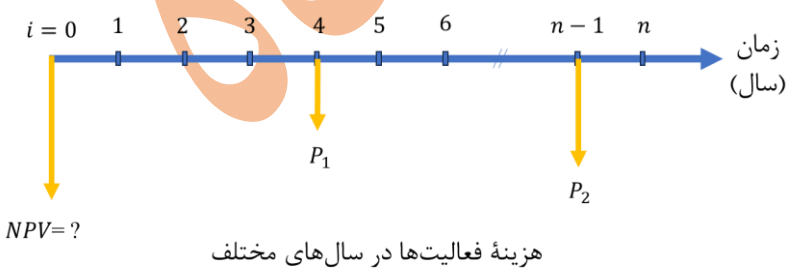
بر اساس گزارش سازمان ملل متحد در سال ۱۹۸۷ با عنوان "آیندهٔ مشترک ما"، پایداری دربرگیرندهٔ سه رکن اقتصاد، محیط زیست و جامعه است [۹]. در این راستا، ارزیابی چندبعدی پایداری چرخه عمر به سه بخش ارزیابی اقتصادی چرخه عمر (C-LCA)، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه عمر (E-LCA) و ارزیابی اجتماعی چرخه عمر (S-LCA) تقسیم شده است [۱۰]. ارزیابی اقتصادی چرخه عمر، قدیمی‌ترین ابزار در تحلیل پایداری است. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده معرفی شده است و در راستای کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. این ابزار با نگاهی کلان، به ارزیابی هزینه‌های یک خدمت یا محصول در تمام مراحل چرخه عمر آن می‌پردازد و تنها به هزینه اولیهٔ آن محدود نشده است [۶].

در راستای استفاده از ارزیابی هزینه چرخه عمر(LCCA) در مقایسه چند محصول یا فرآیند تولید، ابتدا باید دورهٔ تحلیل (بازهٔ 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 مطرح شده استفاده کرد. ارزش خالص فعلی (NPV[۷]) و هزینهٔ معادل یکنواخت سالیانه (EUAC[۸]) 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 مبدا تبدیل می‌کند. شاخص هزینهٔ معادل یکنواخت سالیانه، هزینه‌های اعلام‌شده برای سال‌های مختلف را به صورت یکنواخت و مساوی بر تمام سال‌های دورهٔ تحلیل پخش می‌نماید. این پارامتر در حالت تخصیص سالانه بودجه، مناسب تر است [۱۲]. باتوجه به ارزش متغیر پول در سال‌های مختلف، مقایسهٔ مستقیم هزینه‌های پروژه‌ها در نقاط زمانی مختلف از چرخهٔ عمرشان امکان ناپذیر 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 مبدا تنزیل پیدا می‌کند. در استفاده از هر یک از دو شاخص اقتصادی معرفی‌شده، پارامتر نرخ تنزیل مورد استفاده قرار گرفته شده است [۱۳]. متغیر ارزش خالص فعلی در رابطهٔ ۱ و متغیر هزینهٔ معادل یکنواخت سالیانه در رابطهٔ ۲ معرفی شده‌است.

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

$$EUAC = NPV \cdot [\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n-1}] \quad (2)$$

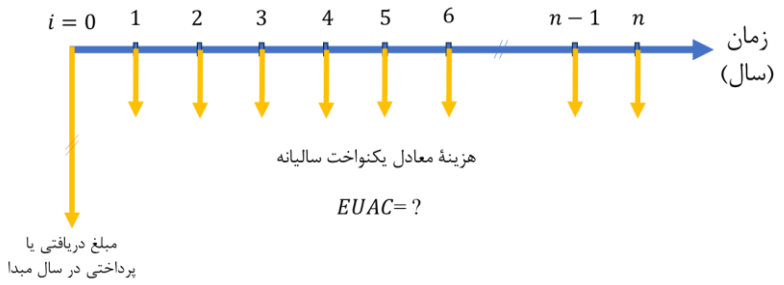
که در آن‌ها FC هزینهٔ مربوط به یک فعالیت در نمودار زمانی، n فاصلهٔ زمانی فعالیت تا سال مبدا و i نرخ تنزیل است. نمودرهای مربوط به متغیر ارزش خالص فعلی و هزینهٔ معادل یکنواخت سالیانه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌است.



هزینهٔ فعالیت‌ها در سال‌های مختلف

شکل ۱: محاسبهٔ متغیر ارزش خالص فعلی برای هزینهٔ فعالیت‌های انجام‌شده در سال‌های مختلف (به‌عنوان مثال، دو فعالیت در دو سال مختلف)

[۶] Sustainability
[۷] Net Present Worth
[۸] Equivalent Uniform Annual Cost



شکل ۲: هزینهٔ معادل یکنواخت سالیانه به ازای مبلغ پرداخت‌شده در سال مبدا (یا سایر سال‌ها)

ارزیابی چرخه عمر یا ارزیابی زیست محیطی چرخه عمر (LCA یا E-LCA) برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ معرفی شد. سپس در سال ۱۹۹۷ در قالب استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ منتشر و سپس در سال ۲۰۰۶ بروزرسانی شد [۱۱]. طبق تعریف این استاندارد، LCA ابزاری است که برای ارزیابی جنبه‌ها و تاثیرات زیست‌محیطی یک محصول در تمام چرخهٔ عمر آن استفاده شده است. بر این اساس، LCA شامل چهار مرحله است: ۱- تعریف هدف و گستره[۹]، ۲- تحلیل موجودی چرخه عمر[۱۰]، ۳- ارزیابی تاثیرات چرخه عمر[۱۱] و ۴- تفسیر نتایج[۱۲]. تصمیم‌گیران با به خدمت گرفتن LCA، مراحلی از چرخهٔ عمر که بیشترین تاثیرات زیست‌محیطی را داشته است، شناسایی و به اصلاح آن‌ها می‌پردازند. در نتیجه، اتلاف مواد خام، مصرف انرژی، تولید زباله، هزینه دفع پسماند و مخاطرات سلامتی کاهش یافته و این در حالی است که بهره‌وری فرآیند افزایش یافته است [۱۴]. امروزه از LCA به طور گسترده ای 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 [۳]. تحلیل زیست‌محیطی چرخه عمر به سه روش قابل انجام است:

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

۲- تحلیل ورودی-خروجی: روش پیشرفته‌تری است که تمامی زنجیرهٔ تامین یک محصول را شامل می شود. در این روش از انبوه اطلاعات گردآوری‌شده طی یک سال در اقتصاد یک کشور در راستای ارزیابی مداخلات زیست محیطی یک محصول استفاده می‌شود. در این روش که بر اساس روش "ورودی-خروجی‌های اقتصادی" است، ورودی‌ها و خروجی‌های زیست‌محیطی محصولات از جداول موجود در پایگاه‌های داده بازخوانی شده است. داده‌های ارائه‌شده در این پایگاه‌های داده برحسب مقادیر متوسط آن صنعت بوده و این ممکن است باعث ایجاد خطا در تحلیل شود.

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

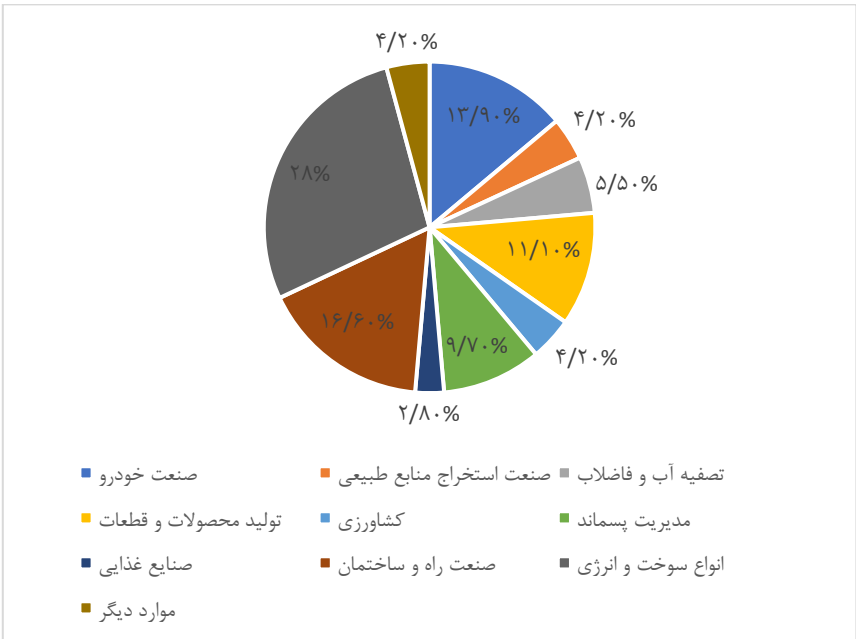
آخرین بخش در تحلیل پایداری یعنی ارزیابی اجتماعی چرخهٔ عمر (S-LCA)، روشی است در راستای گردآوری، تحلیل و اطلاع‌رسانی تاثیرات اجتماعی مربوط به یک محصول یا خدمت. هدف نهایی از این ارزیابی، راهنمایی تصمیم‌گیران در راستای انتخاب محصول یا خدمت مطلوب بر اساس تاثیر آن بر زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان و جامعه است. برخلاف ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی، بسیاری از شاخص‌های تاثیرات اجتماعی، کیفی است. این ماهیت کیفی، سنجش آن‌ها را دشوار نموده‌است. یکی از سخت ترین مراحل در انجام تحلیل اجتماعی چرخهٔ عمر، جمع آوری داده است. روش ارزیابی اجتماعی چرخهٔ عمر، برای نخستین بار در نشریهٔ برنامه زیست‌محیطی سازمان ملل متحد و جامعهٔ شیمی و سم‌شناسی زیست‌محیطی با عنوان به‌سوی ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر، معرفی گردید[۱۶].

ارزیابی پایداری چرخه عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی است که این سه بخش را به یکدیگر متصل نموده است. این مفهوم نسبتا جدید بوده و هنوز به نحوی جامع مورد استفاده قرار نگرفته است. در اکثر تحلیل‌ها از ارزیابی اجتماعی چرخهٔ عمر چشم‌پوشی شده است و تنها به ارزیابی چرخه عمر و ارزیابی هزینه چرخه عمر (LCA و LCCA) پرداخته می‌شود [۱۷]. ارزیابی شاخص پایداری چرخه عمر یک پروژه (LCSA) در

[۹] Goal and scope definition
[۱۰] Life Cycle Inventory Analysis (LCIA)
[۱۱] Life Cycle Impact Assessment
[۱۲] Interpretation of results

مواردی از جمله: تعریف مرزهای یکپارچه برای سیستم‌ها، توسعهٔ پایگاه‌های منسجم داده برای بررسی از منظر اجتماعی و اقتصادی، تعریف طبقه‌بندی‌های یکپارچه در راستای تحلیل تاثیرات با هدف مقایسه‌پذیری مطالعات مختلف، توسعهٔ 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 گردد و ادغام نتایج هر سه رکن در قالب تحلیلی یکپارچه امکان‌پذیر شود [۱۸].

از میان پژوهش‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی شاخص پایداری چرخه عمر یک پروژه (LCSA)، ٪۳۲ در راستای ارزیابی محصول، ٪۲۳ در راستای ارزیابی فرآیندها و ٪۱۴ هم با هدف ارزیابی خدمات انجام شده است [۱۸]. همچنین در این پژوهش‌ها موضوعات مختلفی مطرح گردیده که سهم هر یک در شکل ۳ مشخص شده‌است. بر این اساس بیشترین تحلیل‌ها در زمینهٔ انواع سوخت و انرژی انجام شده‌است (٪۲۸). همچنین دیگر صنایعی که بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند، به ترتیب عبارتند از: راه و ساختمان (٪۱۶/۶)، خودرو (٪۱۳/۹)، تولید محصولات و قطعات (٪۱۱/۱)، پسماند (٪۹/۷)، تصفیهٔ آب‌وفاضلاب (٪۵/۵)، کشاورزی (٪۴/۲)، استخراج منابع طبیعی (٪۴/۲)، دیگر موارد (٪۴/۲) و صنایع غذایی (٪۲/۸) [۱۸].



شکل ۳: سهم صنایع مختلف در مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ ارزیابی پایداری پرخهٔ عمر

۲-۱- پایداری چرخهٔ عمر در روسازی راه‌ها

کاربرد شاخص پایداری در صنعت روسازی راه، مورد توجه مدیران و دست اندرکاران کشورها قرار گرفته است [۵]. اولین مرحلهٔ چرخهٔ 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 مصنوعی در کارخانه، حمل و فرآوری آن است. استخراج منابع طبیعی با فعالیت در موقعیت‌هایی مانند معادن آغاز شده و فرآوری مواد با استفاده از ماشین‌آلات درکارخانجات انجام خواهد شد. استفاده از مصالح ساختمانی و راهسازی دست دوم که ظرفیت زیادی برای دفن آن‌ها در مدفن‌ها هم وجود ندارد، یک روش جایگزین به جای استفاده از منابع طبیعی است. دومین مرحله چرخه عمر روسازی یعنی مرحله ساخت، شامل انتقال مصالح به 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 چرخهٔ عمر روسازی، بهره‌برداری و استفاده است که در آن شرایط کاربران راه و وسایل نقلیهٔ آن‌ها مد نظر قرار گرفته می‌شود. وضعیت نامطلوب رویهٔ راه منجر به افزایش استهلاک وسایل نقلیه، رشد مصرف سوخت و افزایش احتمال بروز تصادفات شده و متضررشدن کاربران راه را به دنبال داشته است. 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 افتاده و عمر خدمت‌دهی روسازی افزایش می‌یابد. مرحلهٔ پایانی عبارت است از پایان عمر که شامل مواردی از جمله تخریب روسازی، حمل، فرآوری پسماند و در نهایت بازیافت یا انتقال به محل دفن است [۱۹].

یکی از ویژگی‌های صنعت روسازی راه، استفاده گسترده آن در اکثر کشورهای دنیا است. 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 شده‌است [۲۰]. همچنین در ایالات متحدهٔ آمریکا حدود ۶/۵ میلیون کیلومتر راه موجود است و سالانه بیش از از ۹ میلیارد تن-کیلومتر مسافر و بار توسط روسازی راهها پشتیبانی شده است. این

مقیاس‌های کلان، به تامین مالی مناسبی نیاز دارد. هم اکنون بودجه‌ای بالغ بر ۴۰۰ میلیارد دلار در سراسر جهان، در راستای ساخت و نگهداری روسازی راه‌ها هزینه شده است. اما بودجه های در نظر گرفته شده با مبالغ قابل هزینه، فاصله معناداری دارد [۲۱]. در واقع بودجهٔ های پایین، متولیان راه در کشورهای مختلف را در راستای تامین مالی پروژه‌های راه به چالش کشانده و انتظار است این چالش در ۱۰ تا ۲۰ سال آینده، بحرانی تر شود. در نتیجه استفاده از ابزار ارزیابی هزینه چرخه عمر (LCCA) در راستای امکان‌سنجی اقتصادی گزینه‌های مختلف در بلند مدت و تعیین روسازی با هزینهٔ بهینه، ضرورت داشته است[۲۲].

ابزار LCCA ، هزینه‌های مربوط به روسازی راه را در همه مراحل چرخهٔ عمر آن مورد بررسی قرار داده است. روسازی‌ها با نزدیک‌شدن به مراحل پایانی عمر خود، دچار خرابی‌های مختلفی شده، در نتیجه تقاضا در راستای نگهداری و ترمیم آنها افزایش یافته است. به این علت، تقریبا نیمی از بوجهٔ سالانهٔ زیرساخت‌های راه، صرف عملیات ترمیم و نگهداری شده است [۲۱، ۲۳]. 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 (به عنوان مثال نرخ رشد سالانهٔ ترافیک برابر با مقدار ۴٪ قرار داده می‌شود). اما معمولا در تعیین مقادیر متغیرهای ورودی برای LCCA، مقداری عدم قطعیت وجود دارد. زمانی که در تحلیل پروژه ای، نیاز به پیش بینی مقادیر ورودی باشد، عدم قطعیت به علت هایی همچون: الف) غیر مترقبه بودن وقایع، ب) تمایز در ساخت‌وساز مناطق مختلف و عدم همخوانی داده‌های آن‌ها، پ) وجود عوامل انسانی که تخمین یا مدلسازی آن‌ها پیچیده‌است و ت) فقدان داده‌های مورد نیاز، ایجاد شده است. در این راستا می‌توان از رویکرد احتمالاتی در ارزیابی هزینهٔ چرخهٔ عمر روسازی استفاده نمود [۲۳].

در گام بعد، ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی روسازی راه مطرح شده است. مصرف قابل توجه سوخت در ماشین‌آلات، حمل‌ونقل، اجرای فرآیندهایی آلاینده ساز مانند فرآیندهای خردایش و تولید مصالح، از مهم ترین دلایل تاثیرات منفی پروژه های ساخت راه بر سلامت انسان و محیط زیست است. به‌طور کلی ۱۴٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در جهان از حوزهٔ حمل‌ونقل است نشأت گرفته که ۷۲٪ آن در چرخهٔ عمر راه‌ها ایجاد شده است [۲۵]. از این مقدار، تا یک چهارم آن مربوط به فرآیندهای تولید مصالح، انتقال، احداث روسازی، نگهداری، ترمیم و نهایتا بازیافت است [۲۶]. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، اولین مرحله در چرخهٔ عمر روسازی، یعنی استخراج مصالح طبیعی، انتقال آن‌ها و سپس تولید مصالح، دارای بالاترین میزان انتشار کربن در مقایسه با سایر مراحل است [۲۶، ۲۷، ۲۸] . بر اساس مطالعات انجام شده که در آن بخش‌هایی از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی تحلیل شده‌است، حدود ۹۰٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده ناشی از مرحلهٔ استخراج و تولید مصالح بوده‌است که شامل سیمان، سنگدانه، فولاد، خاکستر بادی، آب و افزودنی‌ها می‌شود[۲۹]. از میان این مصالح، در رویه‌های غیر مسلح، تولید سیمان با ایجاد ۱۶۲/۵ کیلوگرم CO_2 به ازای هر ۱ تن، بیشترین میزان گازهای گلخانه‌ای را وارد محیط زیست می‌نماید. گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در فرآیند تولید سیمان از دو عامل تجزیهٔ سنگ آهک و مصرف انرژی نشات می‌گیرد. در رویه‌های مسلح، بالاتر از تولید سیمان، تولید فولاد با نرخ ۱۵،۲۹۹ کیلوگرم CO_2 به ازای هر ۱ تن، بیشترین سهم تولید گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده‌است. استفاده از مصالح بازیافتی یا جایگزین نمودن بخشی از سیمان مورد نیاز با دیگر مصالح و به‌کارگیری ماشین‌آلات با مصرف انرژی پایین ازجمله راه‌حل‌های پیشنهادی در راستای کاهش آلایندگی های ایجاد شده در این مرحله هستند.

آخرین مرحله ارزیابی در راستای احداث پروژه های راه، ارزیابی تاثیرات اجتماعی آن بوده است. این مفهوم به تازگی معرفی شده و تا به امروز دارای روش استاندارد و یکپارچه‌ای نیست. روش اجرای این ارزیابی، مشابه با دو رکن دیگر پایداری با چهار مرحلهٔ تعریف هدف و گستره، ارزیابی موجودی، ارزیابی تاثیرات چرخهٔ عمر و نهایتا تفسیر نتایج، قابل انجام است. از تمایزات روش ارزیابی پایداری اجتماعی، معرفی ذینفعان (افراد یا گروه های دارای منافع و سود در انجام پروژه) است که در مرحلهٔ تعریف هدف و گستره انجام می‌شود. پس از تعریف ذینفعان، یک روند سلسله‌مراتبی برای مقایسهٔ منافع بدست‌آمده توسط ذینفعان یا مضرات تحمیل‌شده به آن‌ها اجرا می‌شود. در این

روند، دسته‌های تاثیرگذاری در نهایت به شاخص‌های اجتماعی تبدیل می‌شود. در مرحلهٔ بعد نیاز است مرحلهٔ ارزیابی تاثیرات چرخهٔ 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 پرنمودن پرسش‌نامه یا انجام مصاحبه، اطلاعات مربوط به دسته‌های تاثیرگذاری از ذینفعان پروژه، از جمله کارگران و کارفرمایان، دریافت و سپس به متغیرهای کمی تبدیل شود. در نهایت با اجراشدن مرحلهٔ تفسیر نتایج، رویکردی که منجر به بالاترین سطح از منافع برای ذینفعان می‌شود تعیین می‌گردد. [۳۰].

۳– روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخهٔ عمر

تحلیل پایداری چرخهٔ عمر از چهار مرحله تشکیل شده‌است: تعریف هدف و گستره، تحلیل موجودی چرخهٔ عمر، تحلیل تاثیرات چرخهٔ عمر و نهایتا تفسیر نتایج. در ادامه هر یک از این مراحل توضیح داده شده‌است.

۳–۱– تعریف هدف و گستره

ابتدا هدف از مطالعه‌ای که در حال انجام است بیان می‌گردد. در ادامه باید به پرسش‌های زیر پاسخ داده‌شود:

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

همچنین باید شرحی از عناوین زیر بیان شود:

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

۳–۲– تحلیل موجودی چرخه عمر

هر یک از ارکان پایداری، از اجزایی تشکیل شده‌اند و در هر پروژه، اجزای متفاوتی تاثیرگذار هستند. در این مرحله با مطالعهٔ هر یک از مراحل چرخهٔ عمر روسازی، اجزای موثر شناسایی شده و فهرستی از آن‌ها تهیه می‌گردد. در ادامه به معرفی اجزای مختلف ارکان پایداری پرداخته شده‌است.

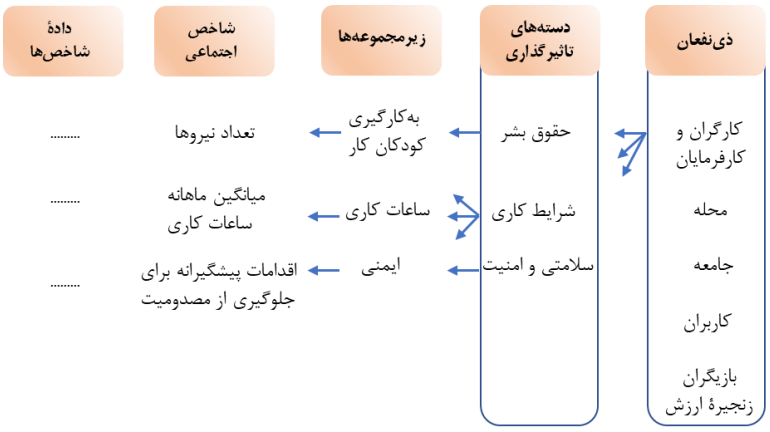
- **جنبهٔ زیست‌محیطی:** میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیهٔ منابع و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی صوتی و نوری) عواملی هستند که باید در این رکن مورد بررسی قرار گیرند [۱۶، ۳۲]. مولفه‌های مختلف موجودی چرخهٔ عمر در تحلیل جنبهٔ زیست‌محیطی در جدول ۱ بیان شده‌است.

جدول۱: موجودی چرخهٔ عمر در تحلیل جنبهٔ زیست‌محیطی (بر مبنای [۳۲] و [۱۶])

مصرف		تولید آلاینده				
انرژی	روی (Pb)	کربن دی‌اکسید (CO_2)	ترکیبات عالی فرّار (VOC)	PM-۱۰[۱۳]	گوگرد (P[۱۴])	کربن مونوکسید (CO)
منابع اولیه	کلروفلئوروکربن (CFC[۱۵])	اکسیدهای ازت (NOx)	کادمیم (Cd)	گوگرد دی‌اکسید (SO_2)	هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه (PAH[۱۶])	جیوه (Hg)

[۱۳] particulate matter ۱۰
[۱۴] Phosphorus
[۱۵] chlorofluorocarbon
[۱۶] Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

- **جنبهٔ اقتصادی:** تمامی هزینه‌های پروژه از مرحلهٔ طراحی تا مرحلهٔ پایان عمر باید در نظر گرفته شوند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ادارات راهداری (مانند هزینه‌های استخراج مصالح، ساخت و تعمیر و نگهداری روسازی) و همچنین هزینه‌های کاربران راه (مانند استهلاک خودرو) می‌شود [۳۳].
- **جنبهٔ اجتماعی:** تعیین اجزای این رکن که از آن ها به عنوان شاخص‌های اجتماعی نام برده شده است، نیازمند سه مرحله است. در مرحله اول باید ذینفعان تعیین شوند. عموماً ۵ دستهٔ کارگران و کارفرمایان، محله، جامعه (در سطح کلان و ملی)، کاربران و نهایتا بازیگران زنجیرهٔ ارزش به عنوان ذینفعان پروژه در نظر گرفته می‌شوند [۳۴]. مرحله ی دوم، تعریف دسته‌های تاثیرگذار بر هر گروه از ذینفعان است. چند مورد از دسته‌های تاثیرگذار پیشنهادشده توسط برنامهٔ زیست‌محیطی سازمان ملل در راهنمای ارزیابی اجتماعی چرخهٔ عمر عبارتند از: حقوق بشر، شرایط کاری، سلامتی و امنیت. سپس برای هر دسته تاثیرگذاری، باید زیرمجموعه‌هایی تعریف شود. با تعریف‌شدن زیرمجموعه‌ها، می‌توان شاخص‌های اجتماعی را در مراحل مختلف چرخهٔ عمر ایجاد نمود. این شاخص‌های اجتماعی همان موجودی چرخهٔ عمر هستند [۳۵]. شکل ۴ نشان دهندهٔ اجرای روند سلسله مراتبی فوق برای گروه اول ذینفعان، یعنی کارگران و کارفرمایان است.



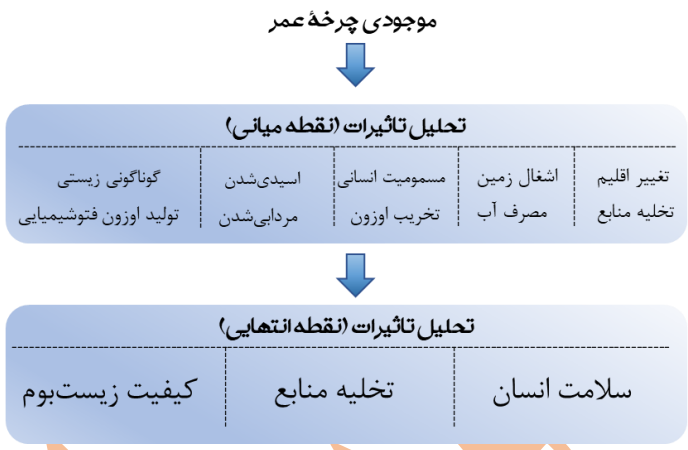
شکل ۴: اجرای روند سلسله‌مراتبی تحلیل اجتماعی چرخهٔ عمر برای گروه "کارگران و کارفرمایان" از مجموعهٔ ذینفعان [۳۵]

۳-۳- تحلیل تاثیرات چرخه عمر

در این مرحله، پس از تکمیل طبقه‌بندی اجزای چرخهٔ عمر، از روش‌های مختلف مدلسازی برای اندازه‌گیری کمّی تاثیرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی آن‌ها استفاده شده است.

- **جنبهٔ زیست‌محیطی:** هدف از این مرحله بررسی جامع تاثیرات زیست‌محیطی ناشی از موجودی چرخهٔ عمر است. برای این منظور باید آن‌ها را به گروه‌های تاثیرگذاری تبدیل و سپس به اندازه‌گیری مقادیر مربوط به هر گروه پرداخت. این فرآیند دارای سه مرحله ۱) انتخاب گروه‌های تاثیرگذاری، ۲) تخصیص هر یک از اجزای موجودی چرخهٔ عمر به گروه تاثیرگذاری مربوط به آن و ۳) مدلسازی شاخص‌های گروه‌های تاثیرگذاری، بوده است. همچنین گام‌های نرمالسازی، وزن‌دهی و دسته‌بندی نیز می‌توانند به صورت اختیاری توسط محققین اجرا شوند. گروه‌های تاثیرگذاری را می‌توان تا نقطهٔ میانی یا نقطهٔ انتهایی ادامه داد. در رویکرد نقطه‌میانی، معضلات زیست‌محیطی به‌صورت جزئی و دقیق بیان می‌شوند. اما در گروه‌های تاثیرگذاری نقطهٔ انتهایی، تمامی معضلات با رویکردی کلان به سه دستهٔ سلامتی انسان، تخلیهٔ منابع و کیفیت اکوسیستم تقسیم می‌شوند (در برخی منابع "تغییر اقلیم" نیز در تاثیرات

نقطه‌نهایی آورده شده‌است) [۷]. شکل ۵، نشان‌دهندهٔ گروه‌های تاثیرگذاری در نقطهٔ میانی و نقطهٔ انتهایی است.



شکل ۵: گروه‌های تاثیرگذاری در نقطه مربوط به تحلیل تاثیرات جنبهٔ زیست‌محیطی [۳۶]

- **جنبهٔ اجتماعی:** در این مرحله، چهارچوب‌هایی برای امتیازدهی به شاخص‌های اجتماعی (که در مرحلهٔ قبل، یعنی تحلیل موجودی چرخهٔ عمر تعریف شدند) در نظر گرفته شده است. این شاخص‌ها به دو نوع کمّی و نیمه‌کیفی تقسیم شده است. سپس این شاخص‌ها بر اساس امتیازهای دریافت‌شده، تبدیل به تاثیرات اجتماعی می‌شوند. تا به امروز هیچ روش و چهارچوب یکدست و مشخصی برای تحلیل تاثیرات اجتماعی ارائه نشده‌است. اما در برخی روش‌های پیشنهادی، این امتیازدهی به صورت نسبی انجام شده‌است؛ بدین صورت که میزان شاخص‌ها در پروژه با مقادیر متوسط در کشور مقایسه و سپس امتیازهایی به هر شاخص تخصیص داده شده‌است [۳۷].
- **جنبهٔ اقتصادی:** جنبه اقتصادی در تحلیل تاثیرات مطرح نمی‌شود. چرا که تحلیل موجودی چرخهٔ عمر خود مقادیر هزینه‌ها را به‌طور کامل محاسبه می‌نماید و شامل تاثیرات چرخهٔ عمر نیز بوده است [۳۸].

۳-۴- تفسیر نتایج

این مرحله به بیان نتایج حاصل از مراحل ارزیابی موجودی و ارزیابی تاثیرات اختصاص دارد. بخش تفسیر باید بر اساس یک تحلیل یکپارچه، پایدارترین گزینهٔ انتخابی را از میان سایر گزینه‌های موجود معرفی نماید. همچنین پیشنهاد می‌شود موارد زیر در این بخش پوشش داده شود:

- موازنه ای میان عواید اقتصادی و معضلات زیست‌محیطی و اجتماعی (در صورت وجود)
- شناسایی مراحل چرخهٔ عمر یا شاخص‌های بحرانی
- تاثیر کیفیت داده‌های مورد استفاده بر نتایج [۱۶]

۴- مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی

در این بخش، مقاله های منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر رویهٔ های بتنی مرور شده‌است. بخش اول، شامل مقاله هایی است که دربرگیرنده سه بخش زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی هستند. مائو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی رویه‌های بتنی درزدار، درزدار مسلح و مسلح پیوسته پرداختند [۲۱]. آنها دو مرحلهٔ استخراج مصالح و همچنین ساخت روسازی را با استفاده از روش ورودی-خروجی اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، CRCP در هر سه رکن پایین‌ترین هزینه‌ها را دارد که این موضوع طبیعتا ناشی از ضخامت کم آن است. از سوی دیگر، JRCP بالاترین هزینه‌ها را داشته است. سپس در سال ۲۰۱۵، چویی و همکاران علاوه بر بررسی مراحل استخراج مصالح و ساخت روسازی، مرحلهٔ نگهداری و ترمیم را نیز برای سه نوع رویهٔ بتنی مشخص‌شده مورد بررسی قراردادند [۳۹]. در این تحقیق نیز CRCP دارای پایین‌ترین هزینه‌ها در هر سه بخش است. در تحقیق های اشاره شده، تحلیل بعد اجتماعی با در نظرگرفتن میزان انتقال بار بر اساس مسافت انجام شده‌است؛ شاخصی که به‌تنهایی نمی‌تواند تحلیل اجتماعی را پوشش دهد.

شی و همکاران در سال ۲۰۱۹، پایداری چرخهٔ عمر رویه بتنی ساده و رویه حاوی بتن بازیافتی را مورد ارزیابی قراردادند [۴۰]. آن‌ها چهار مرحله از چرخهٔ عمر روسازی را با استفاده از ورودی-خروجی اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور تحلیل بعد اجتماعی، تاثیرگذاری هر نوع روسازی بر ابتلای افراد به سرطان تعیین شده‌است. این

تحقیق نشان داد که رویه RCA-PCC[۱۷] در مرحلهٔ تولید مصالح و ساخت بسیار پایدارتر از رویه PCC است. اما در مرحله بهره‌برداری، پایداری رویه بازیافتی مقداری کمتر است. باتوجه به فقدان روش‌های یکپارچه‌سازی نتایج، امکان تصمیم‌گیری دقیق برای انتخاب روسازی پایدارتر فراهم نشده‌است.

بخش دوم، شامل مقاله هایی است که چرخهٔ عمر روسازی بتنی را از منظر دو رکن زیست‌محیطی و اقتصادی مورد مطالعه قرار داده است. موگا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی درزدار و مسلح پیوسته حاوی خاکستر بادی و سرباره پرداختند [۴۱]. این تحقیق با در نظر گرفتن سه مرحلهٔ استخراج، ساخت و نگهداری و با استفاده از روش ورودی-خروجی اقتصادی انجام شده‌است. نتایج مربوط به ارزیابی هزینه‌های اقتصادی نشان داد، علیرغم اینکه هزینه‌های مرحله نگهداری CRCP ٪۸۰ کمتر از JPCP است، مجموع هزینه‌های مراحل چرخهٔ عمر رویه CRCP، ٪۴۶ بالاتر از رویه JPCP است. همچنین JPCP کاهشی ۴۲ الی ۶۷ درصدی را نسبت به CRCP در انتشار گازهای گلخانه‌ای در پی داشت. علت تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای توسط JPCP عدم استفاده از آرماتورهای فولادی بود. در این مطالعه، از شاخص‌های اندازه‌گیری بعد زیست‌محیطی، تنها گرمایش جهانی و مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌است.

هان ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، مراحل استخراج، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری روسازی بتنی ساده را مورد مطالعه قراردادند [۴۲]. در این راستا، آن‌ها نرم افزارها و مدل‌های SimaPro ۷, Mobile ۶,۲, NONROAD, KyUCP را مورد استفاده قرار دادند. این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی عملیات نگهداری و ترمیم رویه بتنی (به روش ارائه‌شده در آیین‌نامه) با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌نویسی پویا، می‌تواند باعث کاهش حدود ۵ درصدی انرژی و گازهای گلخانه‌ای رویه‌های بتنی شود. حیدری و همکاران در سال ۲۰۲۰ از مدل TOPSIS[۱۸] و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل چرخهٔ عمر روسازی بتنی با در نظر گرفتن تمامی مراحل چرخهٔ عمر آن استفاده نمودند [۴۳]. بر اساس نتایج مطالعه موردی، دو رویهٔ JRCP و JPCP با ضخامت‌های ۲۵ سانتی متر عملکردهای نزدیکی از منظر میزان آلایندگی داشتند و JPCP با اختلافی ۰/۲ درصدی عملکرد مطلوب‌تری داشت. همچنین از نظر مصرف انرژی نیز در عملکردی نزدیک، JPCP با برتری ۰/۱۴ درصدی، بازدهی بیشتری داشت. از آنجایی که در این پژوهش از روش تصمیم‌گیری چندشاخصی TOPSIS برای انتخاب گزینه‌ای که برآیند عملکرد آن از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی بهتر بوده استفاده شده، بررسی معناداری اختلاف برای دو مقدار گزارش‌شده برای رویه‌ها انجام نشده‌است. در مقایسهٔ هزینه‌های اقتصادی چرخهٔ عمر، اختلاف میان این دو رویه بیشتر شده و JRCP با ٪۷/۵ اختلاف نسبت به JPCP، نیازمند سرمایه‌گذاری بالاتری بود. انتظار می‌رود این افزایش هزینه‌ها ناشی از تولید آرماتور فولادی در مرحلهٔ احداث JRCP بوده باشد؛ چرا که سایر هزینه‌های تحلیل‌شده، شامل هزینه‌های تعمیرات خودروها (بر مبنای میزان ناهمواری راه) و هزینهٔ زمان سفر از گروه هزینه‌های کاربران و هزینه‌های سناریوهای نگهداری و پایان عمر از دستهٔ هزینه‌های متولیان راه دارای اختلافات کمی در این دو نوع رویه بوده‌است. همچنین، JPCP نسبت به CRCP با ضخامت ۲۰ الی ۳۰ سانتی متر نیز برتری داشته و در هزینه‌های اقتصادی و میزان آلایندگی به ترتیب ٪۱۵/۲۴ و ٪۰/۵ کاهش داشت. نتایج مطالعهٔ موردی نشان داد که میزان کربن منتشرشده و میزان مصرف انرژی باید به‌عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب پایدارترین رویهٔ راه مورد بررسی قرار گرفته شوند.

بخش سوم، شامل مقاله هایی است که تنها شامل بعد زیست‌محیطی در تحلیل چرخهٔ عمر روسازی است. پارک و همکاران در سال ۲۰۰۳، ساخت جاده با انواع روسازی از روسازی‌های صلب را مورد بررسی قرار دادند [۴۴]. آن‌ها ضمن در نظر گرفتن تمام مراحل چرخهٔ عمر روسازی به‌جز مرحلهٔ بهره‌برداری بیان داشتند که عمدهٔ انرژی مصرف‌شده در مرحلهٔ تولید مصالح مصرف شده است. سپس مرحلهٔ ترمیم و نگهداری بیشترین سهم مصرف انرژی را دارد. مراحل ساخت و تخریب نیز در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. سهم بیشتر در مصرف انرژی معادل انتشار آلاینده‌های بیشتر است.

زاپاتا و گامباتس در سال ۲۰۰۵، مراحل استخراج و تولید مصالح و ساخت روسازی مسلح پیوسته را مورد بررسی قرار دادند [۴۵]. این تحقیق نشان داد که استخراج مصالح

[۱۷] Recycled concrete aggregates - Portland Cement Concrete

[۱۸] Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

و احداث روسازی تنها ۶٪ از سهم انرژی مصرفی را در بر گرفته است. این در حالی است که ۹۴٪ از سهم انرژی مصرف شده به مرحلهٔ تولید مصالح (تولید سیمان ۶۱٪ ، تولید فولاد ۳۲٪ و تولید بتن ۱٪) اختصاص یافته است. همچنین در صورتی که درصد وزنی سیمان در بتن از ۱۲٪ به ۸٪ کاهش یافته و خاکستر بادی جایگزین این ۴٪ شود، مصرف انرژی ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند. کاکور و تاتاری در سال ۲۰۱۱ مراحل استخراج و ساخت (شامل حمل‌ونقل مصالح) از یک روسازی بتنی مسلح پیوسته را ارزیابی نمودند [۴۶]. نتایج نشان داد که با ایجاد ۱ کیلومتر CRCP، در حدود ۳ میلیون کیلوگرم کربن دی‌اکسید انتشار یافته که تقریبا همهٔ آن به مرحلهٔ استخراج و تولید مصالح (سیمان) مرتبط است (در این مقاله، مشخصات رویه مشخص نشده بود). این تحلیل با استفاده از مدل Hybrid Eco-LCA انجام شد. همچنین تحلیل حساسیت مونت کارلو نشان داد که جایگزین شدن خاکستر بادی با سیمان، تاثیر زیادی در کاهش میزان کربن دی‌اکسید داشته است. لویجس و همکاران در تحقیقی به ارزیابی روسازی‌های بتنی درزدار در سیستم‌های اجرایی مختلف پرداختند [۴۷]. این تحقیق در مقایسه با سایر مقاله های موجود در ادبیات موضوع، دارای کامل‌ترین فهرست از فرایندهای چرخهٔ عمر بتن است. طبق نتایج، بهینه‌سازی بتن با ۳۰٪ خاکستر بادی، استفاده از سنگدانه‌های سفید و استفاده از ظرفیت کربناسیون بتن پس از پایان عمر، تا ۷۰٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است. به منظور اجرای تحلیل از ابزار CMLCA استفاده شده‌است.

تحقیقی با موضوع CRCP توسط جولین و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شد [۴۸]. این پژوهش از معدود تحقیقاتی بوده است که در آن اجرای روکش‌های آسفالتی بر رویه‌های بتنی در مرحلهٔ ترمیم و نگهداری، مطرح شده است. یکی از اهداف این مقاله ارزیابی پایداری دو سناریوی نگهداری مختلف برای CRCP از نظر زیست‌محیطی بوده‌است. بر اساس نتایج این مقاله، در ترمیم و نگهداری ۳۰ سالهٔ CRCP، جایگزین نمودن طرح اول (شامل تراش و اجرای روکش آسفالتی) با طرح دوم (اجرای روکش‌های آسفالتی با زمانبندی متفاوت)، کاهش ۳۰٪ مصرف انرژی و کاهش ۳۵٪ گرمایش جهانی را به دنبال داشته است. اناستاسیو و همکاران به ارزیابی روسازی بتنی در مراحل استخراج، ساخت و پایان عمر پرداختند [۴۹]. سه نوع رویه شامل (۱) بتن با سیمان پوزولانی، (۲) بتن با یک ملات آبی تازه و (۳) بتن پوزولانی با خاکستر بادی در نظر گرفته شده است. رویه نوع ۱ دارای بیشترین، رویه نوع ۳ دارای حد متوسط و رویه نوع ۲ دارای کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه ای بوده است. در سال ۲۰۱۶، حسین و همکاران، مرحلهٔ استخراج و تولید مصالح را برای روسازی‌های احداث‌شده با بلوک‌های بازیافتی تحلیل نمودند [۳]. طبق نتایج تحلیل از روش ارزیابی تاثیرات IMPACT[۱۹] +۲۰۰۲، تولید بلوک‌های بازیافتی در مقایسه با تولید بلوک‌های با مصالح طبیعی، ۳۰٪ انرژی کمتری مصرف نموده و حدود ۲۰٪ گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر نموده است.

در سال ۲۰۱۹، مارتینز-آرکوئلز و همکاران ضمن استفاده از روش ارزیابی تاثیرات IMPACT۲۰۰۲+ و نرم‌افزار SimaPro ، به مقایسهٔ چرخهٔ عمر روسازی بتنی ساده و روسازی حاوی بتن بازیافتی پرداختند [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 فرآیندها در تحلیل است با توجه به مصرف سوخت، بیشترین تاثیر را در تحلیل زیست‌محیطی داشته است. فاصله حمل یکی از عوامل تاثیرگذار در این تحلیل است؛ به حالتیکه اگر فاصله انتقال مصالح بتن بازیافتی کمتر از ۳۰ کیلومتر باشد، استفاده از آن‌ها توصیه شده است. در سال ۲۰۲۲ پلسکن و همکاران به تحلیل مرحلهٔ نگهداری روسازی بتنی ساده با روکش آسفالتی پرداختند [۵۰]. سه سناریوی عنوان شده 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 شماره گذاری، دارای کمترین تا بیشترین تاثیرات مخرب بر سلامتی انسان، گرمایش جهانی و تخریب لایه اوزون بوده است.

بخش چهارم، شامل مقاله هایی است که تنها بعد اقتصادی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. وو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی مرحلهٔ ترمیم و نگهداری روسازی بتنی درزدار پرداختند [۵۱]. دو راهبرد متفاوت نگهداری برای آزادراهی در چین مورد

[۱۹] Impact Assessment of Chemical Toxics

بررسی قرار گرفته‌است. هزینه‌های کاربران در هر دو راهبرد تقریبا یکسان است. با این حال هزینه‌های اداره راه در راهبرد ب تقریبا ۲۰٪ بیشتر از راهبرد الف 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، دارای عدم قطعیت بالاتری است. در نتیجه راهبرد ب، با هزینه‌هایی پایین‌تر، در تحلیل مبتنی بر ریسک انتخاب شده است. یه‌پز و همکاران در سال ۲۰۱۶ ، مرحلهٔ ترمیم و نگهداری روسازی بتنی ساده را مورد مطالعه قرار دادند [۵۲]. در این تحقیق، برنامهٔ ترمیم و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) یک روسازی بتنی با به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری، بهینه‌سازی شده‌است.

لی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به مطالعهٔ مراحل استخراج، ساخت و نگهداری روسازی‌های بتنی درزدار و مسلح پیوسته پرداختند [۵۳]. در پروژه مورد بررسی، استفاده از JPCP در حدود ۱۵٪ هزینه پایین‌تری از CRCP داشته است. اکبریان و همکاران در سال ۲۰۱۷ مراحل بهره‌برداری و نگهداری روسازی بتنی ساده را مورد تحلیل قرار دادند [۵۴]. اجرای روکش‌های بتنی در مرحلهٔ ترمیم و نگهداری روسازی مطرح شده‌است. روش محاسبهٔ هزینه‌های اولیه، تاخیرات ترافیکی ناشی از ترمیم و استهلاک خودرو ارائه و در یک مثال عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین اندازه‌گیری استهلاک خودرو به عنوان یکی از موثرترین مولفه‌های چرخهٔ عمر روسازی معرفی شده است. مطالعهٔ موردی برای یک رویهٔ بتنی ساده با ضخامت ۱۵ سانتی متر و دورهٔ نگهداری ۲۰ ساله شامل عملیات پرکردن ترک‌ها و درزها (به میزان ۱٪)، لکه‌گیری تمام‌عمق (۷٪) و جزئی (۱٪)، تراش الماسه (۲۳٪) و بازسازی (۳٪) انجام شد. تبدیل هزینه‌های چرخهٔ عمر به ارزش خالص فعلی نشان داد که هزینه‌های عمر ۳۴ سالهٔ روسازی مطرح‌شده در سال مبدا برابر با حدود ۴/۲ میلیون دلار بوده که به ترتیب از زیاد به کم، از این عوامل نشات گرفته‌است: احداث روسازی، استهلاک ناشی از ناهمواری، نگهداری‌وتعمیرات، تاخیرات ترافیکی. به دی‌پندله در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی روسازی بتنی درزدار با درنظرگرفتن مراحل استخراج، احداث و نگهداری پرداخت [۵۵]. در این تحقیق، احداث و ترمیم و نگهداری یک روسازی بتنی با ۸ هزار و ۳۶۰ متر مربع مساحت بررسی شده‌است. لایه‌های مختلف این روسازی عبارتند از رویه بتنی درزدار به ضخامت ۱۷۵ میلی‌متر، اساس دانه‌ای به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و بستر. بر این اساس هزینه ساخت و پنج بار تعمیر و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) معادل ۳۸۵ هزار دلار (در دوره عملکردی ۹۰ ساله) بوده است.

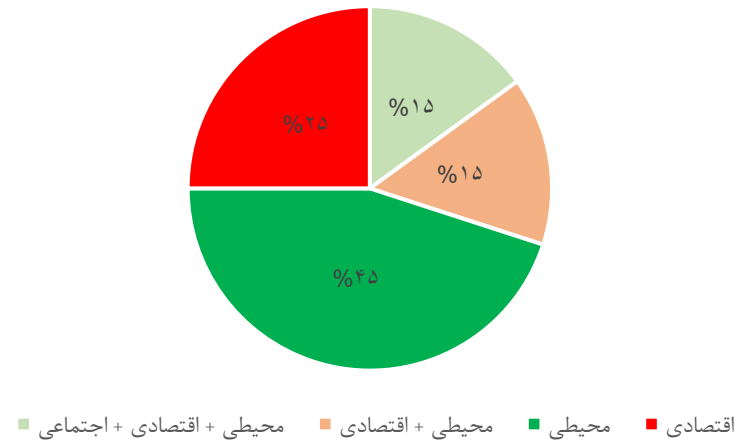
۵- بحث و بررسی

در این بخش، مقاله های بررسی شده در بخش مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی، باتوجه به روش‌ها و جزئیات تحلیل، موضوع مورد بررسی و ابزارهای به‌کارگرفته‌شده، با یکدیگر مقایسه شده‌است تا ضمن تعیین روند انجام تحقیق، در راستای انجام تحقیق های آینده، راهبردهای مناسب پیشنهاد شود. در جدول ۲، منابع موجود در زمینهٔ ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی با توجه به نوع رویه‌های بررسی‌شده (ستون ۳)، ارکان ارزیابی‌شده از پایداری (ستون ۴)، مراحل در نظر گرفته‌شده از چرخهٔ عمر (ستون ۵)، روش تحلیل (ستون ۶) و ابزارهای به‌کارگرفته‌شده (ستون ۷) مقایسه شده است. با بررسی منابع تحقیقاتی بیان شده در جدول ۲ ، نتایج زیر حاصل شده است :

- تا به امروز هیچ مطالعه‌ای با در نظر گرفتن هر ۳ رکن پایداری و هر ۵ مرحلهٔ چرخهٔ عمر برای روسازی‌های بتنی انجام نشده‌است. بعلاوه، مرحلهٔ یکپارچه‌سازی نتایج به جهت انتخاب بهترین روسازی از منظر زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در هیچ یک از منابع موجود، مورد بررسی قرار نگرفته است.
- در مطالعاتی که هر ۳ رکن پایداری در نظر گرفته شده‌است، تنها روش تحلیل مورد بررسی، روش ورودی-خروجی اقتصادی بوده‌است. 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 نشده‌است.

همچنین با نگاه آماری دقیق‌تر به جدول ۲ می‌توان دریافت:

- با توجه به ستون سوم جدول که نشان‌دهندهٔ رویه‌های بتنی بررسی‌شده در مطالعات مختلف است، CRCP و JPCP که به ترتیب در ۴۰٪ (۸ مرجع) و ۳۵٪ (۷ مرجع) مقالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند، بیشترین فراوانی در تحلیل‌های انجام‌شده را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بلوک‌های بازیافتی با تنها یک تحلیل، کمترین تعداد ارزیابی‌ها را داشته است. 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 محققین داشته و همچنین ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته باید در پژوهش‌های آتی بررسی شود.
- باتوجه به ستون چهارم، از میان بیست تحقیق انتشار یافته در زمینهٔ ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی، ۷۵٪ شامل ارزیابی زیست‌محیطی (۱۵ مرجع)، ۵۵٪ شامل ارزیابی اقتصادی (۱۱ مرجع) و نهایتا 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 این تحلیل‌ها در ادبیات موضوع است. حدود نیمی از مقاله ها (۴۵٪) تنها با در نظرگرفتن رکن زیست‌محیطی انجام شده‌است. سپس، تحلیل‌های مبتنی بر رکن اقتصادی دارای بیشترین سهم (۲۵٪) در میان ادبیات مروری بوده است. 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.



شکل ۶: ارزیابی مقاله های انتشار یافته در زمینهٔ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی بر اساس تعداد ارکان مورد بررسی

- در ستون ۵، مراحلی از چرخهٔ عمر رویه بتنی که در تحلیل وارد شده‌اند، مشخص گردیده‌است. سهم هر یک از ۵ مرحلهٔ چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی در تحلیل‌های انجام‌شده بدین شرح است: تولید مصالح در ۸۰٪ از مقالات (۱۶ مرجع) ، ساخت در ۷۰٪ از مقالات (۱۴ مرجع) ، نگهداری و تعمیرات در ۶۵٪ از مقالات (۱۳ مرجع) ، بهره‌برداری در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع) و پایان عمر در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع). بر این اساس مشخص است که محققین به ساده‌سازی مراحل مختلف چرخهٔ عمر رویه بتنی از جمله بهره‌برداری و پایان عمر پرداخته‌اند. به‌منظور اجرای تحلیل‌های واقع‌گرایانه، لازم است این مراحل در پژوهش‌های آینده وارد شوند.

ستون هفتم درجدول ۲، نشان‌دهندهٔ استفادهٔ محدود از نرم‌افزارهای تجاری رایج در زمینهٔ ارزیابی پایداری است. به منظور ارزیابی زیست‌محیطی چرخهٔ عمر، نرم‌افزار SimaPro در ۲ مرجع و نرم‌افزار GaBi در ۱ مرجع مورد استفاده قرار گرفته است. در هیچ یک از پژوهش‌ها از ابزار قدرتمند OpenLCA استفاده نشده‌است. همچنین به‌منظور ارزیابی اقتصادی چرخهٔ عمر تنها در یکی از مراجع، نرم‌افزار RealCost مورد استفاده قرار گرفته‌است. از دیگر ابزارهای استفاده‌شده برای تحلیل پایداری در مطالعات می‌توان به محاسبه‌گرهای آنلاین CMU (EIO-LCA Feature)[۲۰] و CMCLA[۲۱] و همچنین نرم‌افزار Ecorce اشاره داشت. در اکثر پژوهش‌ها از مراحل بهره‌برداری و پایان

[۲۰] Carnegie Mellon University (Environmental Input-Output – Life Cycle Analysis)

[۲۱] Chain Management by Life Cycle Assessment

عمر در تحلیل پایداری چشم‌پوشی شده‌است. در ادامه با بررسی دقیق تحلیل‌هایی که در آن‌ها مراحل بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات و همچنین پایان عمر در نظر گرفته شده، فرآیندهای واحد مربوط به این مراحل برشمرده شده‌است. فرآیندهای واحدی که در مرحلهٔ بهره‌برداری از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شده‌اند، در جدول ۳ معرفی شده‌اند. باتوجه به جدول، 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، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. باتوجه 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 بر اساس مقادیر مختلف ناهمواری دیده نشد، پیشنهاد می‌شود مدلی برای محاسبهٔ میزان استهلاک براساس شاخص‌های ناهمواری توسعه داده شده و در تحلیل‌های پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی مورد استفاده قرار بگیرد. از طرفی وجود مناطق کارگاهی می‌تواند منجر تاخیرات ترافیکی (از منظر اقتصادی) یا افزایش مصرف سوخت وسایل نقلیه (از منظر محیطی) شود که هر یک از این دو عامل به ترتیب در ۶۰٪ و ۴۰٪ از مطالعاتی که مرحله بهره‌برداری در آن‌ها وارد شده است، در نظر گرفته شده‌اند.

آلبدو، کربناسیون (که دو پدیدهٔ قابل توجه در مرحلهٔ بهره‌برداری هستند و تعریف آن‌ها در پاراگراف بعدی آورده شده‌است) و تامین روشنایی روسازی، تنها در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند و سایر تحلیل‌های موجود، فاقد این فرآیندها هستند. فقدان هر یک از این مراحل در تحلیل، منجر به خطا در نتیجه‌گیری شده و در نتیجه لازم است در پژوهش‌های آینده، مورد توجه قرار گیرند. برخی از فرآیندهای مرحلهٔ تعمیر و نگهداری توضیح داده شده‌است.

- آلبدو: این فرآیند از به‌وقوع پیوستن دو پدیدهٔ واداشت تابشی و جزیرهٔ گرمایش شهری بوجود می‌آید.
- واداشت تابشی: عبارتست از توانایی روسازی برای بازتاب اشعهٔ دریافت‌شده به بیرون از اتمسفر زمین. این پدیده باعث خنک‌شدن شرایط اقلیمی شده است. کاهش واداشت تابشی به پدیدهٔ گرمایش جهانی منجر می‌شود [۴۶].
- پدیدهٔ جزیره گرمایش شهری: عبارتست از گرم‌شدن محیط به‌علت جذب اشعهٔ نور خوشید و آزادسازی گرما. روسازی راه با جذب گرما، محیط اطراف را گرم می‌کند. درنتیجه با تغییر نیازهای سرمایش و گرمایش ساختمان‌های اطراف، بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تاثیر می‌گذارد. پیدایش پدیدهٔ جزیرهٔ 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 بوجود خواهد آورد [۵۶].

جدول ۲: برررسی و مقایسه مطالعات انجام‌شده با موضوع ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر انواع روسازی‌های بتنی

ویراستاری نشده

طبقه‌بندی	نویسندگان	انواع رویه‌های مورد بررسی	ارکان بررسی‌شده			مراحل بررسی‌شده از چرخهٔ عمر					روش تحلیل	ابزارها / استانداردهای تحلیل	
			محیطی	اقتصادی	اجتماعی	متریال	ساخت	بهره‌برداری	تعمیرات	پایان‌عمر		زیست‌محیطی	اقتصادی
تحلیل ۳ رکنی	[۲۱]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	-	-	ورودی-خروجی اقتصادی	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[۳۹]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	★	-	ورودی-خروجی اقتصادی	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[۴۰]	PCC, RCA-PCC	✓	✓	✓	★	★	★	-	★	ورودی-خروجی اقتصادی	CMU (EIO-LCA Feature), TRACI[۲۲]	
تحلیل ۲ رکنی	[۴۱]	JPCP - CRCP	✓	✓	-	★	★	-	★	-	ورودی-خروجی اقتصادی	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[۴۲]	PCC	✓	✓	-	★	★	★	★	-	هیبریدی	SimaPro ۷, Mobile ۶,۲, NONROAD, KyUCP	-
	[۴۳]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	-	★	★	★	★	?	هیبریدی	TOPSIS, Monte Carlo Simulation	
تحلیل تک‌رکنی (زیست‌محیطی)	[۴۴]	ساخت جاده (با انواع رویه‌ها از جمله رویه‌های صلب)	✓	-	-	★	★	-	★	★	هیبریدی	-	-
	[۴۵]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	فرآیندی	-	-
	[۴۶]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	هیبریدی	Hybrid Eco-LCA model	-
	[۴۷]	JPCP در ۱۲ سیستم اجرایی متفاوت	✓	-	-	★	★	★	★	★	هیبریدی	CMCLA	-
	[۴۸]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	★	-	هیبریدی	ECORCE	-
	[۴۹]	Modified PCC	✓	-	-	★	★	-	-	★	هیبریدی	-	-
	[۳]	Eco-block, Natural block	✓	-	-	★	-	-	-	-	هیبریدی	IMPACT ۲۰۰۲+	-
	[۲۰]	PCC RCA-PCC	✓	-	-	★	-	-	-	-	هیبریدی	SimaPro, IMPACT۲۰۰۲+	-
	[۵۰]	PCC	✓	-	-	-	-	-	★	-	هیبریدی	GaBi	-
تحلیل تک‌رکنی (اقتصادی)	[۵۱]	JPCP	-	✓	-	-	-	-	★	-	هیبریدی	-	-
	[۵۲]	PCC	-	✓	-	-	-	-	★	-	هیبریدی	-	-
	[۵۳]	JPCP - CRCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	هیبریدی	-	RealCost
	[۵۴]	PCC	-	✓	-	-	-	★	★	-	هیبریدی	-	-
	[۵۵]	JPCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	هیبریدی	-	-
تعداد (درصد)		-	۱۵ (۷۵٪)	۱۱ (۵۵٪)	۳ (۱۵٪)	۱۶ (۸۰٪)	۱۴ (۷۰٪)	۵ (۲۵٪)	۱۳ (۶۰٪)	۴ (۲۰٪)	-	-	-

- 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 چرخهٔ عمر رویهٔ بتنی، کربن دی‌اکسید موجود در اتمسفر به سطح متخلخل بتن نفوذ نموده و با کلسیم هیدروکسید در مجاورت آب واکنش شیمیایی می‌دهد. از طریق این واکنش شیمیایی، کربن دی‌اکسید موجود در اتمسفر مصرف می‌شود. در واقع بتن بخشی از کربن دی‌اکسید تولید شده در فرآیند

[۲۲] Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts

تولیدش را جذب و جبران می‌نماید. به این فرآیند شیمیایی کربناسیون اتلاق می‌شود و حاصل آن کلسیم کربنات ($CaCO_3$) است [۵۶]. این فرآیند منجر به کاهش آلودگی‌های موجود در طبیعت شده است.

- تولید شیرآبه: یکی از انواع مصالح بازیافتی که امروزه به جای سنگدانه‌های طبیعی در ساخت روسازی بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سنگدانه‌های بتنی بازیافتی (RCA[۲۳]) است. وجود فلزات سنگین از جمله کروم (Cr) و کادمیم (Cd) و ترکیبات شیمیایی از جمله سولفات در بتن باعث شده است که با نفوذ آب، شیرآبه‌ای قلیایی بوجود آمده و به داخل زمین نفوذ نماید [۵۷]. این شیرآبه می‌تواند منجر به آلودگی زیست‌محیطی قابل توجهی بر خاک و آب‌های زیرزمینی شود.

جدول ۳: عوامل مورد بررسی در تحلیل مرحلهٔ بهره‌برداری از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی

مرجع	عامل ۱: ناهمواری مسیر		عامل ۲: مناطق کارگاهی		سایر عوامل
	افزایش سوخت (محیطی)	هزینه‌های خودرو (اقتصادی)	تاخیرات ترافیکی (اقتصادی)	افزایش سوخت (محیطی)	
[۴۰]	–	✓	–	–	–
[۴۲]	✓	–	✓	✓	–
[۴۳]	–	✓	✓	–	–
[۵۷]	–	–	–	✓	آلبدو، کربناسیون و تامین روشنایی روسازی
[۵۴]	✓	–	✓	–	–
تعداد (درصد)	۲ (۴۰٪)	۲ (۴۰٪)	۳ (۶۰٪)	۲ (۴۰٪)	–

سناریوهای نگهداری و تعمیرات رویه‌های بتنی از جمله نوع و جزئیات عملیات، زمان‌بندی اجرا و معیار برنامه‌ریزی در جدول ۴ بیان شده‌اند. مطابق با جدول، عملیات در نظر گرفته‌شده در برنامه‌ریزی‌های نگهداری و تعمیرات عبارتند از: بازسازی (۶۳٪ از مقالات شامل مرحلهٔ نگهداری و تعمیرات)، درزگیری (۴۶٪)، پر کردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیار انداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪) و بهسازی شانه‌ها (۸٪). همچنین سایر نکات قابل توجه در جدول بدین شرح است:

- انواع روکش‌های حفاظتی اسلاری سیل، میکروسرفسینگ، چیپ‌سیل و فاگ‌سیل در برنامه‌ریزی نگهداری‌وتعمیرات رویه‌های بتنی مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- داول‌ها یا میلگردهای دوخت قرارگرفته در درزها، ساز وکار انتقال بار میان دال‌های بتنی را فراهم می‌نمایند. زمانی که این میلگردهای دوخت دچار پوسیدگی می‌شوند، نیاز به ترمیم و جایگزینی آن‌ها وجود دارد. این عملیات در ۸٪ از مقالات، وارد تحلیل پایداری چرخهٔ عمر شده‌است. 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 نشده‌است.

فرآیندهای واحد در نظر گرفته‌شده در مرحلهٔ پایان عمر از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی در جدول ۵ آورده شده‌است. مطابق جدول، یکی ازعوامل که در تحلیل اقتصادی باید در نظر گرفته شود، ارزش اسقاط است که تنها در ۲۵٪ از تحلیل‌های شامل مرحلهٔ پایان عمر در نظر گرفته شده‌است. ۳ فرآیند واحد دیگر که در مرحلهٔ پایان عمر باید در نظر گرفته شوند عبارتند از تخریب، دفن در مدفن و بازیافت که این عوامل همگی در ۷۵٪ از مطالعات شامل مرحلهٔ پایان عمر وارد شده‌اند. نرخ‌های بازیافت بتن و فولاد نیز در مطالعات مقادیر مختلفی داشته‌اند که در جدول قابل رویت هستند.

موجودی چرخهٔ عمر در تحلیل‌های انجام‌شده برای ارزیابی زیست‌محیطی رویه‌های بتنی در جدول ۶ نشان داده‌شده‌است. مطابق با جدول ۶، انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ و انتشار گازهای آلایندهٔ هوا در ۳۱٪ از پژوهش‌های منتشرشده شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌است. انواع گازهای در نظر گرفته‌شده در هر یک از این دو دسته نیز همراه تعداد مطالعات مرتبط در جدول معرفی شده‌است. محققین گاز گلخانه‌ای CO_2 را در عمدهٔ مطالعات (۸۴٪) به‌عنوان یکی از مولفه‌های موجودی چرخهٔ

[۲۳] Recycled Concrete Aggregate

عمر در نظر گرفته‌اند. بعلاوه، مصرف انرژی در ٪۷۷ از تحلیل‌های زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از موجودی‌های چرخهٔ عمر در نظر گرفته شده‌است. پس از CO_2، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند عبارتند از CH_4، SO_2 و NO_x که هر یک در ٪۳۱ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

همچنین کمترین فراوانی مربوط به NH_3 بوده‌است که تنها در ٪۸ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌است.

ویراستاری نشده

جدول ۴: سناریوهای نگهداری و تعمیرات بررسی شده در تحلیل مرحلهٔ نگهداری و تعمیرات از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی

مرجع	عملیات نگهداری و تعمیرات										توضیحات
	درزگیری ترک	لکه‌گیری	بازسازی	تراش الماسه	پرکردن درز بتن	تراش و روکش	اجرای روکش	ریختن گروت	شیار انداختن	ترمیم داول	بهسازی شانه‌ها	

[۳۹]	–	–	✓ (JRCP هر ۱۵ سال، JPCP هر ۲۰ سال و CRCP هر ۳۰ سال)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۴۱]	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	زمان‌بندی عملیات، مطابق برنامه نگهداری اجراشده توسط اداره راه ایالت میشیگان بوده‌است.
[۴۲]	✓ در سال‌های ۱۱ و ۳۱	–	✓ در سال بیستم از بازهٔ ۴۰ ساله	–	✓ در سال‌های ۱۱ و ۳۱	–	✓	–	–	–	–	–	–
[۴۳]	–	–	–	–	–	✓ تراش: ۲.۵ cm – روکش: ۱۵ / ۱۰ cm	✓ ۱۵ cm	–	–	–	–	–	روکش در دو حالت تثبیت‌شده و غیر تثبیت‌شده در نظر گرفته شده‌است.
[۴۴]	–	–	✓ هر ۲۰ سال	–	–	✓ هر ۷ سال	–	–	–	–	–	–	–
[۴۷]	–	–	✓ از سال بیستم، هر ۱۰ سال	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۴۸]	–	–	–	–	–	✓ ۲.۵ cm	✓ هر ۳ تا ۵ سال برای نصف عرض یا هر ۱۱ سال برای کل عرض	–	–	–	–	–	–
[۵۰]	–	–	–	–	–	✓ روکش: ۹ cm	–	–	–	–	–	–	–
[۵۱]	✓	✓	–	✓	✓	–	✓ اسلاری سیل	✓	✓	✓	✓	–	عملیات نت اساسی در سال‌های ۱۱ و ۱۸ از بازهٔ ۲۵ سال و عملیات نت پیشگیرانه به‌صورت سالانه در دیگر سال‌ها
[۵۲]	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	زمان‌بندی بر اساس رابطهٔ تاثیر عملیات نگهداری بر شاخص PCI و میزان افزایش عمر روسازی پس از اجرای هر عملیات
[۵۳]	✓	–	–	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–
[۵۴]	–	✓	✓	✓	✓	–	✓ میکروسرفسینگ چیپ‌سیل فاگ سیل	✓	✓	✓	✓	✓	همه عملیات در سال بیستم از بازهٔ ۳۵ ساله
[۵۵]	✓ هر ۱۰ سال	–	✓ در سال ۵۰	–	✓ هر ۵ سال از سال پانزدهم	–	–	–	–	–	–	–	–
تعداد (درصد)	۶ (۴۶٪)	۴ (۳۱٪)	۸ (۶۲٪)	۴ (۳۱٪)	۵ (۳۸٪)	۴ (۳۱٪)	۵ (۳۸٪)	۱ (۸٪)	۱ (۸٪)	۱ (۸٪)	۱ (۸٪)	–	–

جدول ۵: عوامل بررسی‌شده در مرحلهٔ پایان عمر از چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی

مرجع	تحلیل اقتصادی	تحلیل زیست‌محیطی یا اقتصادی		
	ارزش اسقاط	تخریب	دفن در مدفن	بازیافت
[۴۰]	✓	–	–	–
[۴۴]	–	✓	✓	✓ (نرخ ۳۵٪)
[۴۷]	–	✓	✓	✓ (نرخ ۵۰٪ برای بتن و ۷۰٪ برای فولاد)
[۴۹]	–	✓	✓	✓ (نرخ ۸۰٪ برای بتن)
تعداد (درصد)	۱ (۲۵٪)	۳ (۷۵٪)	۳ (۷۵٪)	۳ (۷۵٪)

جدول ۶: موجودی چرخهٔ عمر در تحلیل زیست‌محیطی چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی

مرجع	انتشار گازهای گلخانه‌ای								انتشار گازهای آلایندهٔ هوا							مصرف انرژی
	CO_2	CH_4	HFC	PFC	N_2O	CO	NH_3	NOx	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	VOC				
[۲۱]	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۳۹]	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۴۰]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓
[۴۱]	–	–	–	–	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓				✓
[۴۲]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۴۳]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۴۴]	✓	–	–	–	–	–	–	✓	–	–	✓	–				✓
[۴۵]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۴۶]	✓	✓	–	–	–	✓	–	✓	✓	✓	✓	–				✓
[۴۷]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				–
[۴۸]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				✓
[۴۹]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				–
[۵۰]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–				–
تعداد (درصد)	۱۱ (۸۴٪)	۴ (۳۱٪)	۳ (۲۳٪)	۳ (۲۳٪)	۲ (۱۵٪)	۳ (۲۳٪)	۱ (۸٪)	۴ (۳۱٪)	۲ (۱۵٪)	۲ (۱۵٪)	۴ (۳۱٪)	۲ (۱۵٪)				۱۰ (۷۷٪)
تعداد (درصد)			۱۱ (۸۴٪)						۴ (۳۱٪)							۱۰ (۷۷٪)

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌میانی در مرحلهٔ تحلیل تاثیرات چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی در جدول ۷ معرفی شده‌اند. دسته‌های تحلیل شده در پژوهش‌های پیشین به ترتیب بیشترین فراوانی عبارتند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸۹٪)، تخلیهٔ لایهٔ اوزون (۴۴٪)، مردابی‌شدن (۴۴٪)، انتشار مواد سمّی (۳۳٪)، مصرف آب (۳۳٪)، اسیدی‌شدن (۳۳٪)، انتشار مواد آلی/غیرآلی مضر برای تنفس (۲۲٪)، انتشار مواد ایجادکنندهٔ سرطان یا بیماری‌های غیر از سرطان (۲۲٪)، اشغال زمین (۲۲٪)، سمیّت زیست‌محیطی (۲۲٪)، مسمومیّت انسانی (۱۱٪)، استخراج مواد معدنی (۱۱٪)، تشعشات یونی (۱۱٪)، ایجاد ریزگرد (۱۱٪) و مصرف انرژی غیرتجدیدپذیر (۱۱٪).

جدول ۷: دسته‌های اثرگذاری نقطه‌میانی واردشده در مرحلهٔ ارزیابی تاثیرات برای تحلیل زیست‌محیطی چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی

مرجع	پتانسیل گرمایش جهانی[۲۴]	ایجاد پسماند خطرناک[۲۵]	انتشار مواد سمّی[۲۶]	مصرف آب	تخلیهٔ لایهٔ اوزون[۲۷]	اسیدی شدن[۲۸] (هوا یا آب)	مردابی شدن[۲۹] (هوا یا آب)	مسمومیت انسانی[۳۰]	استخراج مواد معدنی	مواد آلی/غیرآلی مضر برای تنفس[۳۱]	تشعشات یونی[۳۲]	سرطانزا/ غیرسرطانزا[۳۳]	اشغال زمین[۳۴]	ایجاد ریزگرد[۳۵]	سمیّت زیست‌محیطی[۳۶]	مصرف انرژی غیر تجدیدپذیر
[۲۱]*	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۳۹]	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۴۰]*	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	✓	✓	✓	✓	–
[۴۱]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۴۸]	✓	–	–	–	–	–	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۴۹]	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[۳]	✓	–	–	–	✓	✓	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	✓
[۲۰]	–	–	–	–	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	–
[۵۰]	✓	–	–	–	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	–	–	–
تعداد (درصد)	۸ (۸۹٪)	۲ (۲۲٪)	۳ (۳۳٪)	۳ (۳۳٪)	۴ (۴۴٪)	۳ (۳۳٪)	۴ (۴۴٪)	۱ (۱۱٪)	۱ (۱۱٪)	۲ (۲۲٪)	۱ (۱۱٪)	۲ (۲۲٪)	۲ (۲۲٪)	۱ (۱۱٪)	۲ (۲۲٪)	۱ (۱۱٪)

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

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌پایانی درنظرگرفته‌شده در تحلیل‌های زیست‌محیطی پیشین در جدول ۸ معرفی شده‌اند. تخلیهٔ منابع در ۷۵٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، تغییر اقلیم در ۵۰٪، سلامتی انسان در ۵۰٪ و کیفیت زیست‌بوم در ۲۵٪ از این مراجع ارزیابی شده‌اند.

جدول ۸: دسته‌های اثرگذاری نقطه‌پایانی واردشده در مرحلهٔ تحلیل تاثیرات برای ارزیابی زیست‌محیطی چرخهٔ عمر رویه‌های بتن

مرجع	دسته‌های اثرگذاری نقطه‌پایانی			
	تغییر اقلیم	کیفیت زیست‌بوم	سلامتی انسان	تخلیه منابع
[۴۶]	–	–	–	✓
[۴۹]	–	–	–	✓
[۲۰]	✓	✓	✓	✓
[۵۱]	✓	–	✓	–
تعداد (درصد)	۲ (۵۰٪)	۱ (۲۵٪)	۲ (۵۰٪)	۳ (۷۵٪)

[۲۴] Global Warming Potential
[۲۵] Hazardous waste
[۲۶] Toxic release
[۲۷] Ozone layer depletion
[۲۸] Acidification
[۲۹] Eutrophication
[۳۰] Human toxicity
[۳۱] Respiratory inorganics / organics
[۳۲] Ionizing radiation
[۳۳] Carcinogens / Noncarcinogens
[۳۴] Land occupation
[۳۵] Particulate air
[۳۶] Ecotoxicity

بررسی منابع انتشار یافته در زمینهٔ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی نشان داد که چهارچوب واحدی در راستای مرحلهٔ تعریف گستره تحلیل وجود ندارد؛ به گونه‌ای که هر یک از محققین، فرآیندهای مختلفی را در تحلیل اعمال نموده و یا فرآیندهایی را در نظر نگرفته اند. این در حالی است که حذف فرآیندهای واحد از گسترهٔ تحلیل می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود. بر این اساس چهارچوبی برای مرحلهٔ "تعریف گسترهٔ تحلیل" در این بخش معرفی شده‌است که فرآیندهای واحد تعریف‌شده در آن اختصاص به رویه‌های بتنی دارد. باتوجه به ادبیات موضوع، بررسی این فرآیندها برای تحلیل کامل پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی ضروری هستند. چهارچوب اختصاصی که با گردآوری فرآیندهای مختلف ارائه‌شده در ادبیات موضوع، پیشنهادشده است، در راستای تعریف گسترهٔ تحلیل مطابق شکل ۷ نشان داده شده است. باتوجه به چهارچوب پیشنهادی:

۱. مرحلهٔ استخراج و تولید مصالح باید شامل فرآیندهای واحد استخراج سنگ، تولید سیمان، فولاد و خاکستر بادی، سنگ‌شکنی، سرند و نهایتا اختلاط مواد اولیه بتن باشد.

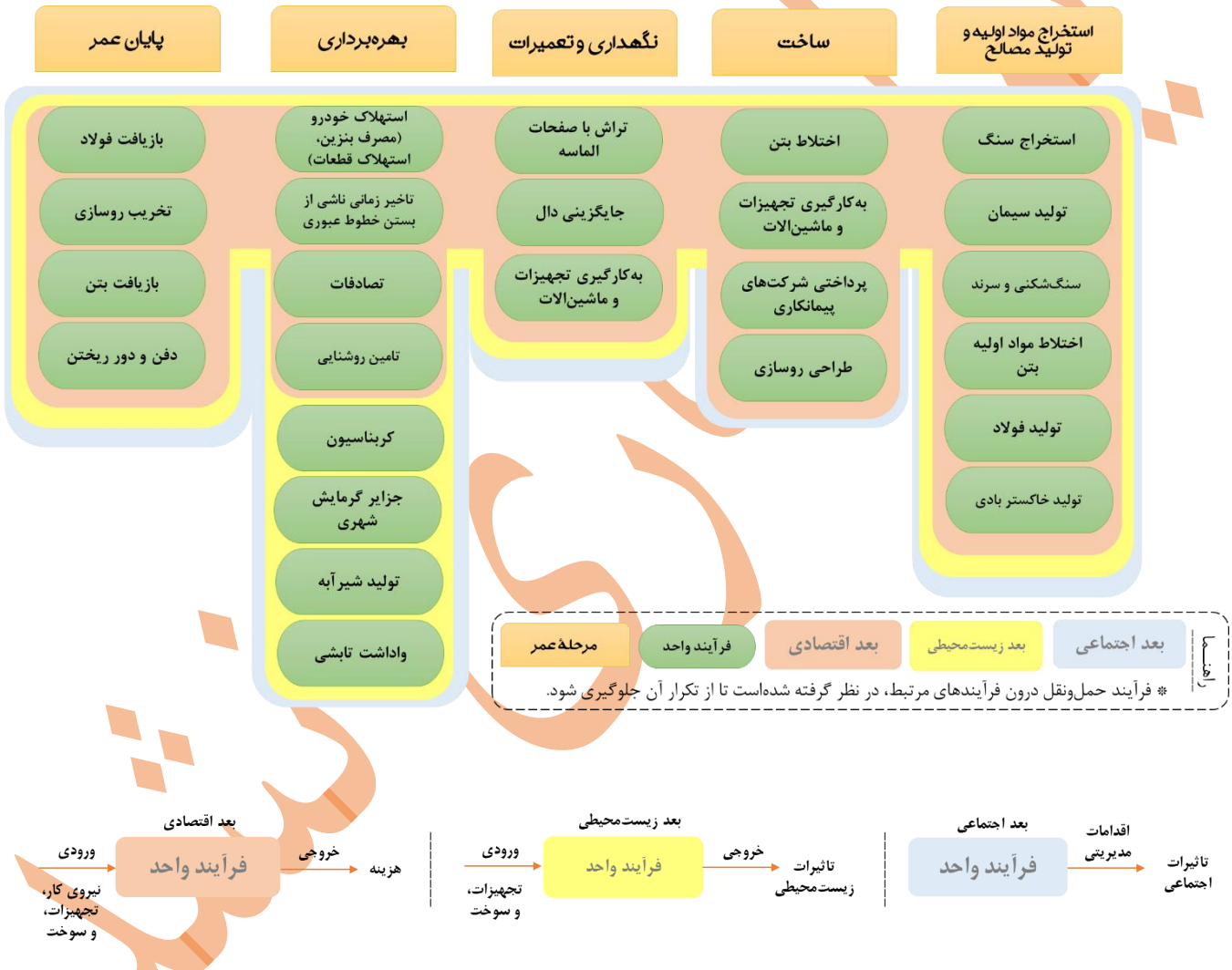
۲. مرحلهٔ ساخت می‌بایست شامل فرآیندهای اختلاط بتن، به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات جهت اجرای روسازی، پرداختی شرکت‌های پیمانکاری، و طراحی فنی روسازی باشد.

۳. فرآیندهای واحد برای مرحلهٔ ترمیم و نگهداری، لازم است شامل به کارگیری 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 مرحلهٔ بهره‌برداری باید دربرگیرندهٔ استهلاک خودروها، تاخیر زمانی ناشی از بستن خطوط عبوری، تصادفات، تامین روشنایی، کربناسیون، جزایر گرمایش شهری، تولید شیرآبه و واداشت تابشی باشد.

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

ویراستاری نشده



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

۶– نتیجه‌گیری

ارزیابی پایداری چرخه عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی است در راستای تحلیل مراحل مختلف چرخهٔ عمر یک محصول از سه دیدگاه زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی. در تحلیل اقتصادی چرخهٔ عمر (LCCA)، هزینه‌های کاربران و متولیان محصول، تعیین شده است. در تحلیل زیست‌محیطی چرخهٔ عمر (LCA)، میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیهٔ منابع و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی صوتی و نوری) بررسی شده است. نهایتا تحلیل اجتماعی چرخهٔ عمر (SLCA)، تاثیر محصول بر زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان، جامعه و دیگر ذینفعان را از طریق شاخص‌هایی مانند امنیت، سلامتی، وضعیت شغلی و غیره مورد سنجش قرار داده است. امروزه استفاده از شاخص پایداری در صنعت روسازی راه مورد توجه و اهمیت قرار گرفته است. هزینه‌های اقتصادی کلان، مصرف مقدار قابل توجه انرژی و تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح و ساخت، تاثیرات منفی اجتماعی بر کارگران و اجتماع محلی که ناشی از محیط کاری خطرناک است از دلایل اصلی این رویکرد بوده است. دست اندرکاران 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 می‌نماید تا گزینهٔ انتخابی، دارای کمترین تاثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی باشد. مراحل مختلف تحلیل چرخهٔ عمر روسازی عبارتند از: استخراج مواد اولیه / تولید مصالح، احداث روسازی، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات و پایان عمر.

محققین از سال ۲۰۰۹ میلادی تا به امروز به پژوهش در زمینه ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پرداختند. بررسی تحقیق های 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 زمینهٔ ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر رویه‌های بتنی، ارزیابی زیست‌محیطی دارای بیشترین سهم (۱۵ مرجع)، ارزیابی اقتصادی دارای سهم متوسط (۱۱ مرجع)

و نهایتا ارزیابی اجتماعی دارای کمترین سهم (۳ مرجع) است.

- از میان مراحل چرخهٔ عمر، بهره‌برداری تنها در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع) و پایان عمر تنها در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع) در نظر گرفته شده‌اند. حذف مراحل چرخهٔ عمر از تحلیل پایداری منجر به نتایج غیر واقعی در ارزیابی‌ها شده‌است.
- عوامل در نظر گرفته‌شده در ارزیابی مرحلهٔ بهره‌برداری شامل تاثیر ناهمواری مسیر بر افزایش مصرف سوخت (۲ مرجع) و افزایش هزینه‌های نگهداری خودرو (۲ مرجع) و همچنین تاثیر مناطق کارگاهی بر افزایش تاخیرات ترافیکی (۳ مرجع) یا افزایش مصرف سوخت وسایل نقلیه (۲ مرجع) بوده‌است. آلبدو، کربناسیون و تامین روشنایی روسازی، تنها در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.
- سناریوهای مختلف نگهداری و تعمیرات برای رویه‌های بتنی توسعه داده شده‌است که عملیات آن شامل بازسازی (۶۳٪ از مقالات شامل مرحلهٔ نگهداری و تعمیرات)، درزگیری (۴۶٪)، پر کردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیار انداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪) و بهسازی شانه‌ها (۸٪) بوده‌است.
- به‌منظور ارزیابی مرحلهٔ پایان عمر در تحلیل‌های اقتصادی، ارزش اسقاط مورد بررسی قرار گرفته‌است (۱ مطالعه). در تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، ۳ فرآیند واحد در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از تخریب، دفن در مدفن و بازیافت (۳ مطالعه).
- بررسی مطالعات منتشرشده از منظر موجودی چرخهٔ عمر نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، انتشار گازهای آلایندهٔ هوا در ۳۱٪ و مصرف انرژی در ۷۱٪ از مطالعات در نظر گرفته شده‌اند. در پژوهش‌های منتشرشده، محققین بیشترین توجه را به گاز CO_2 به‌عنوان یکی از مولفه‌های موجودی چرخهٔ عمر داشته اند (۱۱ مرجع). پس از CO_2، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های

انجام‌شده داشتند عبارتند از CH_4، SO_2 و NO_x که هر یک در ۳۱٪ از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند.

- بررسی دسته‌های اثرگذاری نقطه‌میانی در پژوهش‌های پیشین نشان داد که ۳ دسته‌ای که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشتند، عبارتند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸ مطالعه)، تخلیهٔ لایهٔ اوزون (۴ مطالعه) و مردابی‌شدن (۴ مطالعه).
- در آن دسته از تحلیل‌های زیست‌محیطی که اثرگذاری نقطه نهایی بررسی شده‌است (۴ مطالعه): تخلیهٔ منابع در ٪۷۵ از تحلیل‌ها، تغییر اقلیم در ٪۵۰، سلامتی انسان در ٪۵۰ و کیفیت زیست‌بوم در ٪۲۵ از این مطالعات ارزیابی شده‌اند.

آن دسته از موضوعاتی که تا به امروز، مطالعهٔ جامعی در مورد آنها انجام نشده است، شناسایی شدند. این خلأهای تحقیقاتی بدین شرح است:

- ✓ به‌کارگیری روش هیبریدی ارزیابی پایداری در تحلیل‌های سه رکنی،
- ✓ استفاده از نرم‌افزار قدرتمند OpenLCA به منظور تحلیل زیست‌محیطی،
- ✓ ادغام نتایج بدست‌آمده به‌صورت مستقل رکن و یکپارچه‌سازی در قالب یک شاخص مشترک،
- ✓ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته،
- ✓ توسعهٔ مدلی برای محاسبهٔ استهلاک وسایل نقلیه بر اساس میزان ناهمواری و به‌کارگیری آن در ارزیابی پایداری مرحلهٔ بهره برداری
- ✓ اجرای تحلیلی مبتنی بر هر ۳ رکن پایداری با در نظر گرفتن تمامی ۵ مرحلهٔ چرخه عمر رویه های بتنی.

همچنین کاربرد نرم‌افزارهای قدرتمند محاسبهٔ تاثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی از جمله SimaPro و Gabi، نیازمند توسعه و گسترش بیشتری در مطالعات آینده هستند. ارزیابی پایداری رویهٔ Eco-block که تنها در یک پژوهش مورد بررسی قرار گرفته نیز نیازمند پژوهش‌های گسترده‌تری توسط محققین است. همچنین مرور ادبیات پیشین، ناهماهنگی های موجود در فرآیندهای گسترهٔ تحلیل را نشان داد. به عبارت دیگر محققین در پژوهش‌های مختلف، فرآیندهای متفاوتی را بصورت سلیقه ای از تحلیل حذف نموده یا به تحلیل اعمال نمودند. این امر باعث غیرواقعی بودن نتایج و عدم مقایسه‌پذیری نتایج تحقیقات مختلف

با یکدیگر شده‌است. این در حالی است که با در نظر گرفتن تمامی مراحل و فرآیندهای موجود در تحلیل چرخه عمر روسازی، نتایجی جامع و قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. در راستای رفع این مشکل، چهارچوبی برای مرحلهٔ تعریف گستره پیشنهاد شده‌است که شامل فرآیندهای مختلف چرخهٔ عمر برای رویه‌های بتنی بوده است و می‌تواند به صورت یکپارچه در مطالعات ارزیابی پایداری چرخهٔ عمر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به چهارچوب پیشنهادی برای تعریف گستره، از حذف فرآیندهای مختلف چرخهٔ عمر و غیر واقعی بودن نتایج بدست‌آمده جلوگیری خواهد شد.

مراجع

[۱] European Concrete Paving Association (EUPAVE). (۲۰۲۰). Guide for Design of Jointed Concrete Pavements. Brussels.

[۲] Novak, J., Kohoutkova, A., Kristek, V., and Vodicka, J., ۲۰۱۷. Precast concrete pavement – systems and performance review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. ۲۳۶, No. ۱, p. ۰۱۲۰۳۰). IOP Publishing. DOI: ۱۰,۱۰۸۸/۱۷۵۷-۸۹۹X/۲۴۵/۳/۰۳۲۰۱۸

[۳] Hossain, Md. U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., and Cheng, J.C.P., ۲۰۱۶. Evaluation of Environmental Friendliness of Concrete Paving Eco-blocks using LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment, 21*, pp.۷۰-۸۴. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳۶۷-۰۱۶-۱۱۷۵-۰

[۴] Xiaoyan, Z., Easa S.M., Yang, Z., Ji, T., and Jiang, Z., ۲۰۱۹. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Cleaner Production, 213*, pp.۶۵۹-۶۷۲. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۹,۰۲,۱۲۱

[۵] Zheng, X., Easa, S.M., Ji, T., and Jiang, Z., ۲۰۲۰. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production, 264*, p.۱۲۱۴۶۶. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۲۰,۱۲۴۹۷۶

[۶] Alaloul, W.S., Altaf, M., Musarat, Javed, M.F., and Mosavi, A., ۲۰۲۱. Systematic review of life cycle assessment and life cycle cost analysis for pavement and a case study. *Sustainability*, ۱۳, ۴۳۷۷. DOI: ۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۰۸۴۳۷۷

[۷] Li, J., Xiao, F., Zhanng, L, and Amirkhanian, S.N., ۲۰۱۹. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production, 233*, pp.۱۱۸۲-۱۲۰۶. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۹,۰۲,۱۲۱

[۸] AzariJafari, H., Yahia, A., and Amor, M.B., ۲۰۱۶. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production, 112*, ۲۱۸۷-۲۱۹۷. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۵,۱۰,۰۶۲

[۹] World Commission on Environment and Development (WCED), ۱۹۸۷. *Our Common Future (The Brundtland Report), 17*(۱), pp.۱-۹۱.

[۱۰] Klopffer, W., ۲۰۰۸. Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life-cycle Assessment, 13*(۲), ۸۹-۹۵. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳۶۷-۰۰۸-۰۰۰۹-۹

[۱۱] Hamdar, Y., Chehab, G.R. and Srour, I., ۲۰۱۶. Life-Cycle Evaluation of Pavements: A Critical Review. *Journal of Engineering Science & Technology Review, 9*(۶). DOI:۱۰,۲۵۱۰۳/jestr.۰۹۶,۰۲

[۱۲] Diependaele, M., ۲۰۱۸. A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements. *Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association*.

[۱۳] *Guidelines for life cycle cost analysis*, Stanford University (۲۰۰۵).

[۱۴] International Organization for Standardization, ۲۰۰۶. *Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework*. ISO.

[۱۵] Yang, Y., Heijungs, R., and Brandao, M., ۲۰۱۷. Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA.

[۱۶] United Nations Environment Programme and Society for Environmental Toxicology and Chemistry (UNEP/SETAC), ۲۰۱۲. *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making Informed Choices on Products*. UNEP/SETAC, Paris, France.

[۱۷] Zamgani, A., Pesonen, H.-L., and Swaar, T., ۲۰۱۳. From LCA to Life cycle Sustainability Assessment: Concept, Practice and future directions. *International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(۹), ۱۶۳۷-۱۶۴۱. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳۶۷-۰۱۳-۰۶۲۳-۸

[۱۸] Costa, D., Quinteiro, P., and Dias, A.C., ۲۰۱۹. A systematic Review of Life Cycle Sustainability Assessment: Current State, Methodological challenges, and implementation issues. *Science of the Total Environment, 686*, pp.۷۷۴-۷۸۷. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.scitotenv.۲۰۱۹,۰۵,۱۹۷

[۱۹] Hoxha, E., Vignisdottir, H.R., Barbieri, D.M., Wang, F., Bohne, R.A., Kristensen, T., and Passer, A., ۲۰۲۱. Life Cycle Assessment of roads: Exploring Research Trends and Harmonization Challenges. *Science of the Total Environment. 759*, p.۱۴۳۵۰۶. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.scitotenv.۲۰۲۰,۱۴۳۵۰۶

[۲۰] Martinez-Arguelles, G., Acosta, M.P., Dugarte, M., and Fuentes, L., ۲۰۱۹. 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*(۵), pp.۳۹۷-۴۰۶. DOI: ۱۰,۱۱۷۷/۰۳۶۱۱۹۸۱۱۹۸۴۱۸۰۸

[۲۱] Mao, Z., ۲۰۱۲. *Life-cycle assessment of highway pavement alternatives in aspects of economic, environmental, and social performance* (Doctoral dissertation, Texas A & M University).

[۲۲] Pittenger, D., Gransberg, D.D., Zaman, M., and Riemer, C., ۲۰۱۲. Stochastic life-cycle cost analysis for pavement preservation treatments. *Journal of Transportation Research Board, 2292*(۱), pp.۴۵-۵۱. DOI: ۱۰,۳۱۴۱/۲۲۸۴-۰۶

[۲۳] Babashamsi, P., Yussof, N.I.M., Ceylan, H., Nor, N.G.M., and Jenatabadi, H.S., ۲۰۱۶. Evaluation of Pavement Life-cycle Cost Analysis: Review and Analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology, 9*(۴), pp.۲۴۱-۲۵۴. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.ijprt.۲۰۱۶,۰۴,۰۰۹

[۲۴] Hass, R., Tighe, S.L., and Falls, L.C., ۲۰۰۶. Determining return on long-life pavement investments. *Transportation Research Record, 1974*(۱), pp.۱۰-۱۷. DOI: ۱۰,۳۱۴۱/۱۹۵۰-۰۲

[۲۵] Giunta, M., ۲۰۲۰. Assessment of environmental impact of road construction: modelling and prediction of fine particulate matter emissions. *Building and Environment, 176, p.106865.* DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.buildenv.۲۰۲۰,۱۰۷۰۵۱

[۲۶] Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P., Xue, S., Yu, Q., and Li, Q., ۲۰۲۲. Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jtte.۲۰۲۱,۰۷,۰۰۶

[۲۷] Bizarro, D.E.G., Steinmann, Z., Nieuwenhijse, I., Keijzer, E., and Hauck, M., ۲۰۲۱. Potential Carbon footprint reduction for reclaimed asphalt pavement innovations: LCA Methodology, best available technology, and near future reduction potential. *Journal of Sustainability. 13*(۳), p.۱۳۸۲. DOI: ۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۰۸۴۳۷۷

[۲۸] Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., and Wang, C., ۲۰۱۶. Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: a case study of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health. 13*(۳), p.۳۵۱. DOI: ۱۰,۳۳۹۰/ijerph۱۳۰۷۰۶۸۳

[۲۹] Ma, F., Sha, A., Yang, P. and Huang, Y., ۲۰۱۶. The greenhouse gas emission from Portland cement concrete pavement construction in China. *International journal of environmental research and public health, 13*(۷), p.۶۳۲. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/ijerph۱۳۰۷۰۶۳۲

[۳۰] Blaaw, S.A., Maina, J.W., and Grobler, L.J., ۲۰۲۱. Social life cycle inventory for pavements – A case study of South Africa. *Transportation Engineering. 4*, p.۱۰۰۰۶۰. DOI:۱۰,۱۰۱۶/j.treng.۲۰۲۱,۱۰۰۰۶۰

[۳۱] Stripple, H., ۲۰۰۱. *Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis.* Second Revised Edition, IVL-report B۱۲۱۰ E.

[۳۲] Natham, R., McNeil, S., and Van Dam, T.J., ۲۰۰۹. 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*(۱), pp.۴۰-۴۹. DOI: ۱۰,۳۱۴۱/۲۱۱۲-۰۶

overlay systems. *Journal of Infrastructure Systems. 16(4), pp.310-322.* DOI:۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)IS.۱۹۴۳-۵۵۵X.۰۰۰۰۰۴۲

[۴۳] Heidari, M.R., Heravi, G. and Esmaeeli, A.N., ۲۰۲۰. Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production, 254,* p.۱۲۰۰۴۶. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۲۰,۱۲۰۰۴۶

[۴۴] Park, K., Hwang, Y., Seo, S. and Seo, H., ۲۰۰۳. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *Journal of construction engineering and management, 129*(۱), pp.۲۵-۳۱. DOI: ۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۳)۱۲۹:۱(۲۵)

[۴۵] Zapata, P. and Gambatese, J.A., ۲۰۰۵. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of infrastructure systems, 11*(۱), pp.۹-۲۰. DOI: ۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۱۰۷۶-۰۳۴۲(۲۰۰۵)۱۱:۱(۹)

[۴۶] Kucukvar, M. and Tatari, O., ۲۰۱۲. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17*(۱), pp.۸۶-۹۰. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.trd.۲۰۱۲,۰۳,۰۰۱

[۴۷] Loijos, A.A.N., ۲۰۱۱. *Life cycle assessment of concrete pavements: impacts and opportunities* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)..

[۴۸] Jullien, A., Dauvergne, M. and Cerezo, V., ۲۰۱۴. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *Transportation research part D: transport and environment, 29,* pp.۵۶-۶۵. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.trd.۲۰۱۴,۰۱,۰۱۲

[۴۹] Anastasiou, E.K., Liapis, A. and Papayianni, I., ۲۰۱۵. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling, 101,* pp.۱-۸. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.resconrec.۲۰۱۵,۰۲,۰۰۹

[۵۰] Pleșcan, C., Barta, M., Maxineasa, S.G. and Pleșcan, E.L., ۲۰۲۲. Life cycle assessment of concrete pavement rehabilitation: a Romanian case study. *Applied Sciences, 12*(۴), p.۱۷۶۹. DOI:۱۰,۳۳۹۰/app۱۲۰۴۱۷۶۹

[۵۱] Wu, D., Yuan, C. and Liu, H., ۲۰۱۷. A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case. *International Journal*

[۳۳] Santos, J. and Ferreira, A., ۲۰۱۲. Life-cycle cost analysis system for pavement management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 48,* pp.۳۳۱-۳۴۰. DOI:۱۰,۱۰۸۰/۱۰۲۹۸۴۳۶,۲۰۱۱,۶۱۸۵۳۵

[۳۴] UNEP/SETAC., ۲۰۱۳. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA). Life-cycle Initiative. UNEP/SETAC, Paris, France.

[۳۵] Benoît Norris, C., Traverzo, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T. and Russo Garrido, S., ۲۰۲۰. Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations.

[۳۶] Huang, Y., Bird, R., and Heidrich, O., ۲۰۰۹. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production,* ۲۸۳-۲۹۶. *17*(۲), pp.۲۸۳-۲۹۶. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۰۹,۱۰,۰۱۶

[۳۷] Wang, S., Hsu, C., and Hu, A.H., ۲۰۱۶. An analytic framework for social life cycle impact assessment – part۱: methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment, 21,* pp.۱۵۱۴-۱۵۲۸. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳۶۷-۰۱۵-۱۰۱۴-y

[۳۸] Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Ciroth, A., Brent, A.C., and Pagan, R., ۲۰۱۱. Environmental life cycle costing: a Code of Practice. *International Journal of Life Cycle Assessment, 16,* pp.۳۸۹-۳۹۱. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳۶۷-۰۰۷-۰۳۸۳-۷

[۳۹] Choi, K., Lee, H.W., and Mao, Z., ۲۰۱۵. Environmental, Economic, and social implications of highway concrete rehabilitation alternatives. *Journal of Construction Engineering and Management. 142*(۲), p.۰۴۰۱۵۰۷۹. DOI:۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)CO.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۰۶۳

[۴۰] Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., and Graseley, Z., ۲۰۱۹. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production, 225,* pp.۴۱۴-۴۲۵. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۸,۱۱,۱۳۷

[۴۱] Muga, H.E., Mukherjee, A., Mihelcic, J.R., and Kueber, M.J., ۲۰۰۹. An integrated assessment of continuously reinforced and jointed plane concrete pavements. *Journal of Engineering, Design and Technology,* ۷(۱), pp.۸۱-۹۸. DOI:۱۰,۱۱۰۸/۱۷۲۶۰۵۳۰۹۱۰۹۴۷۲۷۷

[۴۲] Zhang, H., Keoleian, G.A., Lepech, M.D., and Kendall, A., ۲۰۱۰. Life-cycle optimization of pavement

of Pavement Engineering, *18*(۱), pp.۱۱-۲۵. DOI: ۱۰,۱۰۸۰/۱۰۲۹۸۴۳۶,۲۰۱۵,۱۰۳۰۷۴۳

[۵۲] Yepes, V., Torres-Machi, C., Chamorro, A. and Pellicer, E., ۲۰۱۶. Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm. *Journal of Civil Engineering and Management*, *22*(۴), pp.۵۴۰-۵۵۰. DOI: ۱۰,۳۸۴۶/۱۳۹۲۳۷۳۰,۲۰۱۵,۱۱۲۰۷۷۰

[۵۳] Lee, E.B., Thomas, D.K. and Alleman, D., ۲۰۱۸. Incorporating road user costs into integrated life-cycle cost analyses for infrastructure sustainability: A case study on Sr-۹۱ corridor improvement project (Ca). *Sustainability*, *10*(۱), p.۱۷۹. *Sustainability*. DOI: ۱۰,۳۳۹۰/su۱۰۰۳۰۷۲۱

[۵۴] Akbarian, M., Swei, O., Kirchain, R. and Gregory, J., ۲۰۱۷. Probabilistic characterization of life-cycle agency and user costs: case study of Minnesota. *Transportation Research Record*, *2639*(۱), pp.۹۳-۱۰۱. DOI: ۱۰,۳۱۴۱/۲۶۳۹-۱۲

[۵۵] *Diependaele, M., 2018. A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements. Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association*.

[۵۶] Rabehi, M., Mezghiche, B., and Guettala, S., ۲۰۱۳. Correlation between initial absorption of the cove concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Construction and Building Materials, 45, pp.123-129*. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۳,۰۶,۰۵۴

[۵۷] Głuchowski, A., Sas, W., Dzięcioł, J., Soból, E. and Szymański, A., ۲۰۱۸. Permeability and leaching properties of recycled concrete aggregate as an emerging material in civil engineering. *Applied Sciences*, *9*(۱), p.۸۱. DOI: ۱۰,۳۳۹۰/app۹۱۲۲۵۵۴