Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.1, No.2; 2023.pp: 65-78

Research paper

(Received July 13, 2023 Accepted Sep. 11, 2023)

Evaluating environmental performance of construction and demolition waste management in Tehran city using the life cycle assessment (LCA)

Mohsen Esfahanizadeh*[1], Mohammad Hossein Bagherzadeh Kouhbanani [2]

[1] *Master, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran*
[2] *PhD student at Department of Architectural Science, Toronto Metropolitan University, Toronto, Ontario, Canada.*

Abstract

Rapid urbanization has increased construction and demolition waste (CDW), exacerbating issues around CDW collection, transportation, and disposal in cities lacking efficient management programs. This study applies life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental performance of current CDW management in Tehran and identify critical aspects for improvement. Using Impact 2002+, LCA was conducted for the base case (19.4% recycling), and two alternative scenarios combining landfilling, source separation, sorting, and varying percentages of CDW recycling. The life cycle inventory used primary data from field studies and secondary data from ecoinvent 3.7 and literature. Results demonstrate recycling benefits through avoided impacts from non-renewable energy, global warming, non-carcinogens, and respiratory inorganics and organics versus landfilling. Hence, findings can motivate improved CDW management based on environmental and technical factors, not just economic and political ones. Producers may be compelled to reduce waste sources, while recyclers and stakeholders are encouraged to continuously enhance C&D waste systems across Iran. Additionally, this study provides data to support other LCAs on CDW. Overall, applying LCA reveals critical ways to advance CDW management in Tehran toward a more sustainable system.

Keywords: construction and demolition waste, waste management, life cycle assessment, recycling

* *Corresponding Author: Mohsen Esfahanizadeh*
Email: esfahanizadeh.mohsen@gmail.com
Phone: 09188712443

Doi:10.48306/jumee.2023.406828.1012

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه: https://jumee.kgut.ac.ir

سال اول/شماره دوم/تابستان ۱۴۰۲/صفحه ۶۵-۷۸

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۶/۲۲

بررسی عملکرد زیست‌محیطی مدیریت پسماند ساخت و تخریب در شهر تهران با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)

محسن اصفهانی‌زاده*[۱]، محمدحسین باقرزاده کوهبنانی[۲]

۱- *کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران*

۲- *دانشجوی دکترا در گروه علوم معماری، دانشگاه متروپولیتن تورنتو، تورنتو، انتاریو، کانادا .*

چکیده

رشد سریع شهرنشینی منجر به افزایش نرخ تولید پسماند ساخت و تخریب شده است. در این شرایط، فقدان یا ناکارآمدی برنامه و چشم‌انداز برای مدیریت پسماند ساخت و تخریب، منجر به تشدید مشکلات شهری مربوط به جمع‌آوری، حمل ونقل و دفع پسماند ساخت و تخریب شده است. هدف این مطالعه، استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات به منظور ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی سیستم مدیریت کنونی پسماند ساخت و تخریب و شناسایی ابعاد مهم و اقدامات احتمالی بهبود عملکرد در شهر تهران است. ارزیابی چرخه حیات به روش Impact 2002+ برای سناریوی پایه (۱۹/۴٪ بازیافت) و دو سناریوی بهبود انجام شده است. این سناریوها شامل ترکیبی از روش‌های دفن، تفکیک از مبداء و بازیافت مقادیر متفاوت است. فهرست چرخه حیات با استفاده از داده‌های اولیه از مطالعات میدانی و داده‌های ثانویه از پایگاه داده ecoinvent 3.7 و مطالعات مشابه تکمیل شده است. نتایج پژوهش نشان‌دهنده مزایای بازیافت پسماند ساخت و تخریب در کاهش پتانسیل اثرات انرژی‌های تجدیدناپذیر، گرمایش جهانی، غیرسرطان‌زاها و غیرآلی‌ها و آلی‌های تنفسی است. بنابراین، نتایج پژوهش می‌تواند در فرآیندهای تصمیم‌گیری، جنبه‌های زیست‌محیطی و فنی را در کنار عوامل اقتصادی و سیاسی قرار دهد و همچنین تولیدکنندگان را تشویق به کاهش مصرف منابع و شرکت‌های بازیافت و سازمان‌های مربوطه را تشویق کند تا به طور مستمر عملکرد سیستم‌های مدیریت پسماند ساخت و تخریب را بهبود بخشند. همچنین داده‌ها جمع‌آوری شده می‌تواند در سایر مطالعات ارزیابی چرخه حیات پسماند ساخت و تخریب مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پسماند ساخت و تخریب، مدیریت پسماند، ارزیابی چرخه حیات، بازیافت.

* نویسنده مسئول: محسن اصفهانی‌زاده

ایمیل: esfahanizadeh.mohsen@gmail.com

شماره تماس: ۰۹۱۸۸۷۱۲۴۴۳

Doi:10.48306/jumee.2023.406828.1012

۱- مقدمه

پسماند تولیدی در صنعت ساخت و ساز، تحت عنوان پسماند ساخت و تخریب[1] (CDW) بیشترین حجم پسماند شهری را به خود اختصاص می‌دهد [۱, ۲]. نرخ تولید CDW، به دلیل رشد روزافزون جمعیت و گسترش شهرنشینی در سراسر جهان، به طور چشمگیری افزایش یافته است. میزان شهرنشینی در سال ۲۰۱۶ به ۵۴.۳ درصد رسیده است و در حال حاضر به ۵۵ درصد در سطح جهانی رسیده است [۳]. به موجب رشد جمعیت در مناطق شهری، و جایگزین کردن ساختمان‌های قدیمی و کم‌مرتبه با ساختمان‌های بلندمرتبه، تولید پسماند ساخت و تخریب، به شکل قابل‌توجهی، افزایش یافته است [۴]. جریان تولید CDW حاصل ساخت، تخریب و نوسازی ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها، زیرساخت‌ها و پاکسازی یا نوسازی شهرهای آسیب‌دیده از بلایایی طبیعی مانند زلزله است [۵] و به عنوان مخلوطی از جریان‌های مختلف، از جمله پسماند غیرخطرناک، خطرناک و بی‌اثر تعریف شده است [۶].

ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت پسماند امری حیاتی در راستای تلاش برای بهبود عملکرد مدیریت پسماند ساخت و تخریب است. کاهش از مبداء، بازیافت و استفاده مجدد، استراتژی‌های رایج در مدیریت CDW هستند که از بین آنها، روش بازیافت از باقی روش‌ها کارآمدتر برآورد شده است [۷]. در سال ۲۰۱۶ میلادی، در ایالات متحده امریکا، حدود ۶۰۰ میلیون تن پسماند ساخت و تخریب، بیش از دو برابر پسماند جامد شهری، تولید شده که بیش از ۷۵ درصد از آن بازیافت و مورد استفاده مجدد قرار گرفته است [۸]. بخش بزرگی (۳۶ درصد) از کل پسماند تولیدی در کشورهای اتحادیه اروپا شامل CDW است، که بیشتر کشورها به هدف بازیافت ۷۵ درصد تا سال ۲۰۲۰ دست یافته‌اند [۹].

تولید CDW در کشورهای در حال توسعه به دلیل رشد شتابان شهرنشینی بیش از سایر کشورهاست. این امر موجب شده است که استانداردها و دستورالعمل‌های مختلفی به منظور مدیریت CDW وضع شود [۵]. برقراری تعادلی مناسب میان نرخ تولید CDW و نرخ بازیافت در اکثر کشورهای در حال توسعه چشم‌انداز مدیریت پسماند ساخت و تخریب است. اثربخشی سیاست‌ها در مدیریت CDW در بسیاری از کشورها را می‌توان محدودیت آنها دانست. در کشور ایران، مدیریت پسماند ساخت و تخریب به دلیل گسترش سریع شهرنشینی و توسعه صنعت ساخت و ساز، به یکی از نگرانی‌های اصلی حوزه شهری تبدیل شده است. با این حال، مدیریت CDW مورد توجه مناسبی قرار نگرفته است. از همین رو، طراحی یک سیستم مدیریت CDW به امری ضروری بدل گشته است. در دسترس بودن داده‌ها و اطلاعات دقیق و قابل اعتماد در مورد وضعیت سازه‌ها و شرایط فعلی مدیریت CDW، یک نیاز اساسی برای اجرای موثر هر طرح مدیریت پسماند است. داده‌های قابل دسترس از میزان تولید CDW در اکثر شهرهای ایران پراکنده و غیرموثق است. اطلاعات واقعی و دقیقی در ارتباط با روش‌های دفع و حمل CDW که توصیف مناسبی از وضعیت فعلی مدیریت پسماند ساخت و تخریب باشد، وجود ندارد. لذا بررسی کمی و کیفی عملکرد روش‌ها و سیاست‌های مدیریت پسماند ساخت و تخریب، به خصوص در شهرهای بزرگ ایران، نیازی اساسی برای بهبود وضع موجود است.

تولید پسماند ساخت و تخریب می تواند همراه با اثرات زیست‌محیطی (مانند تغییرات اقلیمی، اثرات منفی بر روی اکولوژی، استفاده از منابع انرژی و کاهش منابع طبیعی، و آلودگی هوا، آب و صوتی)، اقتصادی (از بین رفتن شهرت بین‌المللی و گردشگری)، بهداشت عمومی و اجتماعی (به عنوان مثال اثرات سو بر سلامت انسان، اشغال اراضی، انتشار آفات و اثرات آن بر ایمنی شغلی) باشد. در مقیاس جهانی، بخش ساخت و ساز در آلودگی هوا (۲۳ درصد)، آلودگی آب (۴۰ درصد)، تغییرات اقلیمی (۵۰ درصد) و دفن پسماند (۵۰ درصد) نقش دارد. اکثر اجزای ترکیب CDW را می‌توان بازیافت یا استفاده مجدد کرد، اما فقدان زیرساخت و محدودیت‌های تکنولوژیکی در نهایت منجر به دفن پسماند شده و باعث افزایش اثرات زیست‌محیطی می‌شود [۱۰]. روزادو و همکاران، عوامل مهم نرخ پایین بازیافت CDW را شناسایی کرده‌اند: هزینه‌های پایین دفن پسماند، در دسترس بودن آسان مصالح، سنگدانه‌های ارزان‌قیمت، کیفیت پایین سنگدانه‌های بازیافتی و شیوه‌های دسته‌بندی ناکارآمد در مبداء [۸].

ارزیابی چرخه حیات[2] (LCA)، یکی از بهترین ابزارها برای برآورد کمی و قابل‌اعتماد اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های مدیریت CDW است [۱۱, ۱۲]. به طور کلی، مطالعات LCA در مورد CDW به بررسی اثرات زیست‌محیطی پایان عمر سازه‌ها [۱۳, ۱۴]

[1] Construction and demolition waste
[2] Life Cycle Assessment

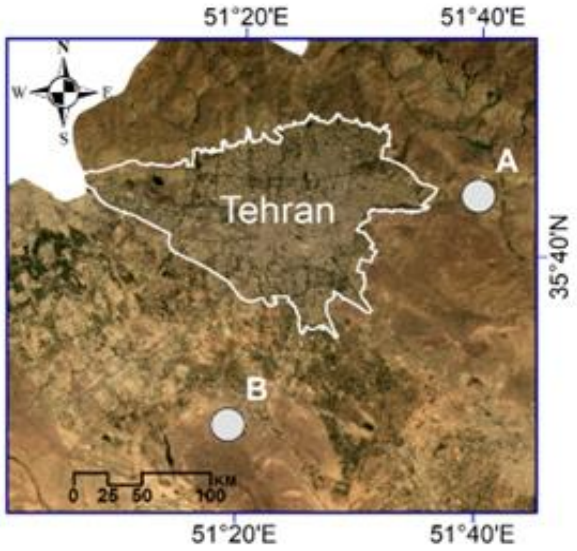
مقایسه مزایا و معایب سنگدانه‌های بازیافتی در مقابل سنگدانه‌های طبیعی [۱۵-۱۸]، برآورد بار زیست‌محیطی فرآیندهای بازیافت [۱۷, ۱۹] و تجزیه و تحلیل عملکرد زیست‌محیطی سیستم‌های مدیریت CDW تقسیم می‌شوند [۱۱, ۲۰].

هدف این مطالعه، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سیستم کنونی مدیریت پسماند ساخت و ساز در شهر تهران است. در این پژوهش، به کمک شیوه ارزیابی چرخه حیات، سناریوهای جایگزین مدیریت و همچنین وضعیت فعلی، به منظور بهبود عملکرد بررسی شده است. سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران و شرکت‌های خصوصی، مسئولیت مدیریت CDW را از جمع‌آوری در شهر تا انتقال به مراکز بازیافت و دفن برعهده دارند. داده‌ها و اطلاعات اولیه از طریق مقامات (سازمان مدیریت پسماند و شرکت‌های خصوصی)، بازدید میدانی از مراکز بازیافت و تحقیقات مرتبط جمع‌آوری شده است. مطالعات ارزیابی چرخه حیات اندکی در ارتباط با مدیریت CDW، در سطح مدیریت در ایران، وجود دارد. روش‌شناسی کاربردی می‌تواند به عنوان نقطه شروعی برای مطالعات آینده در این زمینه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

به منظور انجام ارزیابی دقیق اثرات چرخه حیات یک سیستم مدیریت پسماند ساخت و تخریب، به طور کلی اولین گام تعیین مرزهای منطقه مورد مطالعه است. منطقه مورد مطالعه انتخاب شده در پژوهش حاضر تهران، پایتخت ایران است. شهر تهران در مدار ۳۵ درجه شمالی و ۵۱ درجه شرقی، با مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع، واقع شده است. در حال حاضر، پیمانکاران خصوصی عمده CDW تولید شده را از تمامی سایت‌های ساخت و ساز و تخریب جمع‌آوری و به مراکز دفن و بازیافت منتقل می‌کنند. شکل یک محدوده شهر تهران و محل تاسیسات بازیافت و دفع را نشان می دهد.



شکل ۱- محدوده شهر تهران و محل مراکز دفع و بازیافت CDW
(A : مرکز دفع پسماند ساختمانی تهران، B : مرکز فرآوری پسماند آرادکوه)

شهرداری‌ها در ایران، به دلیل نبود مقررات و دستورالعمل‌های مناسب و سیستم نظارت ضعیف، با چالش‌های متعددی در ارتباط با شیوه‌های فعلی مدیریت CDW و نظارت بر پیمانکاران فرعی، که مسئول جمع‌آوری CDW تولید شده از مبداء تا دفن پسماند، فرآیندهای بازیافت و دفع هستند، مواجه شده‌اند. در شهر تهران، زیرساخت‌های قانونی و مدیریتی پسماند ساخت و تخریب، مرکز دفع پسماند

ساختمانی تهران است که توسط شهرداری مورد استفاده قرار می‌گیرد و شامل مرکز تفکیک، تأسیسات بازیافت و/یا محل دفن بی‌اثر است مرکز دفع پسماند ساختمانی تهران، اصلی‌ترین مرکز بازیافت و دفن CDW در ایران است که در ۴۰ کیلومتری شمال شرقی مرکز شهر واقع شده است. جریان پسماند ورودی به این مرکز ۲۱۰۰۰ تن در روز است، در حالی که میانگین تولید روزانه ۳۴۰۰۰ تن است. در حال حاضر، این مرکز تنها ۶۶۰۰ تن CDW تولید شده در یک روز را بازیافت می‌کند و انواع مختلفی از سنگدانه‌ها (در اندازه‌های مختلف) را از پسماندهای معدنی جمع‌آوری شده تولید می‌کند و راندمان تاسیسات بازیافت ۸۵ درصد برآورد شده است؛ یعنی از ۶۶۰۰ تن بخش معدنی پسماند ساخت و تخریب، حدود ۵۶۰۰ تن سنگدانه تولید می‌شود. این سنگدانه‌ها برای پر کردن کانال‌های خطوط لوله، ساخت بلوک‌های بتنی، ساخت آجرهای توخالی و توپر، بتن برای تأسیسات زیربنایی، لایه‌های زیربنایی و غیره استفاده می‌شوند. به طور کلی، بخش غیرمعدنی پسماند ساخت و تخریب، شامل پلاستیک، کاغذ و مقوا ، چوب، شیشه و فلزات به شیوه ناصحیح تلنبار شده و هیچ گونه مدیریتی صورت نمی‌گیرد. لذا استفاده از پیکربندی های مختلف بازیافت و همچنین محل‌های دفن بهداشتی برای بخش غیرمعدنی CDW امری ضروری است. روزانه به طور متوسط حدود ۳۰۰۰ تن از CDW به مرکز فرآوری پسماند آرادکوه منتقل شده و از آن به عنوان آستر در محل‌های دفن بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مرکز در ۳۸ کیلومتری جنوب مرکز شهر قرار دارد. مابقی CDW، ۱۰۰۰۰ تن در روز، در محل‌های غیرقانونی یا معادن تعیین شده، تخلیه و تلنبار می‌شود. میانگین فاصله این محل‌ها از مرکز شهر تهران، ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

۲-۲- ارزیابی چرخه حیات (LCA)

ارزیابی چرخه حیات یک رویکرد علمی و مورد پذیرش برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی یک محصول یا سیستم است. اثرات زیست‌محیطی، یک سیستم یا محصول را از گهواره تا گور در نظر می‌گیرد و مراحل چرخه حیات از استخراج مواد خام، ساخت، حمل و نقل به منظور طریق استفاده و پایان عمر تا دفع نهایی را بررسی می کند [۲۱]. طبق استاندارد ISO 14040، مراحل LCA شامل چهار فاز است: (۱) تعریف هدف و دامنه، (۲) فهرست چرخه حیات[3] (LCI)، (۳) ارزیابی اثر چرخه حیات (LCIA) و (۴) تفسیر. با این حال، استانداردهای ISO به زبان نسبتاً مبهمی تعریف شده‌اند و بررسی اینکه آیا LCA مطابق با استاندارد تهیه شده است یا خیر، دشوار است.

۱-۲-۲- تعریف هدف و دامنه

به منظور ارزیابی چرخه حیات، در مرحله اول، مفروضات و محدودیت‌های روش‌شناختی باید به وضوح توصیف و تعیین شوند. این موارد شامل تعریف واحد عملکردی[4]، مرزهای اولیه سیستم، معیارهای تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم و تعیین سناریوهاست [۶]. هدف کلی این مطالعه ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی مدیریت پسماند ساخت و تخریب در شهر تهران با در نظر گرفتن سناریوی کنونی (سناریوی موردی) و سناریوی جایگزین است.

در این پژوهش، واحد عملکردی مدیریت ۳۴۰۰۰ تن CDW در روز تعریف شده است؛ که میزان و نحوه مدیریت CDW از طریق گزارش‌های سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران به دست آمده است [۲۲]. در ایران مطالعات اندکی به منظور شناسایی میزان و ترکیب CDW صورت گرفته است. به همین منظور، نمونه‌های پسماند از مکان‌های مختلف جمع‌آوری می‌شوند و در نتیجه تغییراتی در ترکیب آنها ایجاد می‌شود. جدول یک ترکیب و مقادیر CDW را در شهر تهران نشان می‌دهد.

[3] Life Cycle Inventory
[4] Functional Unit

جدول ۱- ترکیبات پسماند ساخت و تخریب شهر تهران [۲۳]

ترکیب پسماند ساخت و تخریب	درصد	میزان (تن در روز)
بتن	19	6460
آجر	18	6120
ترکیب ماسه و سیمان	30	10200
خاک و سنگ	14	4760
گچ	4.2	1428
آسفالت	1.3	442
کاشی و موزائیک	9.8	3332
فلزات	0.7	238
چوب	0.5	170
شیشه	1	340
مقوا	1	340
پلاستیک	0.5	170
مقدار کل	100	34000

تجزیه وتحلیل سناریوها به منظور تعیین سناریوهای بهینه مدیریت پسماند ساخت و تخریب انجام می‌شود. دو دسته‌بندی کلی برای تعیین سناریوها در مطالعات قبلی LCA وجود دارد که عبارتند از: (الف) مقایسه بین وضعیت کنونی مدیریت، اهداف تعریف شده در برنامه مدیریت CDW، چشم‌اندازهای ایده‌آل (حداکثر بازیافت و حداکثر بازیابی انرژی) و سناریوی ضعیف‌تر (یعنی دفن پسماند) و (ب) مقایسه بین تاسیسات/ سیستم‌های مختلف بازیافت [۵, ۲۴].

در سناریوی کنونی[5] مدیریت CDW شهر تهران، روزانه ۶۶۰۰ تن (۱۹.۴٪) از پسماند تولیدی بازیافت و به سنگدانه تبدیل می‌شود و مابقی به محل‌های دفن (تلنبار و دفن پسماند بی‌اثر) انتقال می‌یابند.

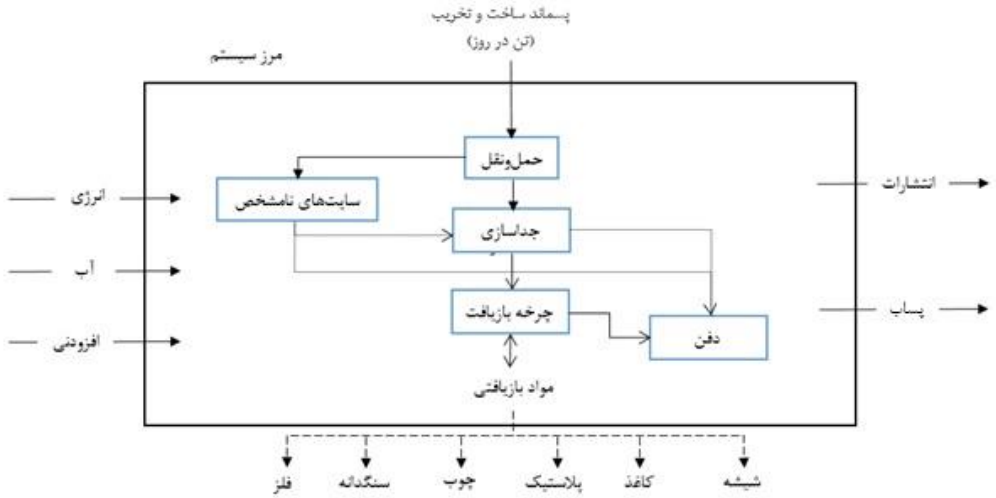
سناریوهای مدیریت جایگزین، براساس نقش بازیافت بخش معدنی و تفکیک از مبدا بخش غیرمعدنی (شیشه، پلاستیک، مقوا، چوب و فلزات) پسماند ساخت و تخریب تعریف شده‌اند. در اولین سناریوی جایگزین[6]، ظرفیت روزانه بازیافت بخش معدنی ۱۰۰۰۰ تن افزایش می‌یابد و این میزان به سنگدانه تبدیل می‌شوند. راندمان بازیافت ۸۵ درصد در نظر گرفته شده است. در سناریوی جایگزین دوم[7]، علاوه بر افزایش میزان بازیافت، پسماند شیشه، پلاستیک، مقوا، چوب و فلزات در مبداء تفکیک شده (به عبارتی ۳.۷ درصد از کل حجم پسماند) و بازیابی می‌شوند.

مرز سیستم شامل کلیه فرآیندهای مدیریت و پردازش می‌شود؛ از ورود پسماند به سیستم مدیریت تا زمانی که سیستم را به عنوان یک انتشار (جامد، مایع یا گاز) یا به عنوان یک ماده ثانویه ترک می‌کند [۲۰]. در این مطالعه، موارد چند کارکردی[8] با گسترش مرز

[5] Present Scenario
[6] Alternative Scenario 1
[7] Alternative Scenario 2
[8] multi-functionality

سیستم و شامل شدن اجتناب از تولید مواد اولیه به دلیل بازیابی مواد از پسماند حل شده است [۱۲]. فرآیندها و فعالیت‌های سیستم شامل موارد زیر است:

- تخلیه، جابجایی و بارگذاری CDW در سایت‌های ساخت‌وساز و تأسیسات بازیافت/محل‌های دفن زباله؛
- فرآیند بازیافت CDW، از جمله جداسازی و تولید سنگدانه؛
- دفع نهایی CDW؛
- اجتناب از تولید سنگدانه‌های طبیعی؛
- اجتناب از تولید بخش غیرمعدنی CDW و
- حمل و نقل CDW به تاسیسات بازیافت و یا محل دفن پسماند.



شکل ۲- مرز سیستم مدیریت پسماند ساخت و تخریب در شهر تهران

در این پژوهش از آخرین نسخه نرم‌افزار OpenLCA 1.11.0 استفاده شده است. این نرم افزار براساس رویکرد انتسابی، تمامی اثرات بالقوه زیست‌محیطی را در طول چرخه حیات یک سیستم توصیف می‌کند. در این رویکرد، از داده‌های تاریخی، مبتنی بر واقعیت و قابل اندازه‌گیری با عدم قطعیت شناخته شده استفاده شده و شامل تمام فرآیندهایی است که به شکل قابل‌توجهی در سیستم مورد مطالعه دخیل هستند. داده‌های اولیه مورد استفاده برای تکمیل فهرست چرخه حیات از وب سایت MOMRA، از طریق بازدیدهای میدانی و گزارش‌های منتشرشده به دست آمده است. همچنین از روش Impact 2002 + v.2.15 برای تعیین دسته اثرات چرخه حیات CDW و نرمال‌سازی میزان کمی اثرات (در دسته‌های میانی و پایانی) بهره گرفته شده است.

۲-۲-۲- فهرست چرخه حیات (LCI)

دشوارترین بخش انجام LCA جمع‌آوری داده‌هاست. گرچه داده‌های ثانویه فراوانی در ادبیات پژوهش یا پایگاه‌های داده مانند Ecoinvent موجود است، با این حال معمولاً مشخص می‌شود که حداقل چند فرآیند یا مواد در دسترس نیستند [۲۵].

در این مطالعه، عمده بخش فهرست چرخه حیات از گزارش‌های رسمی یا بازدیدهای فنی از زیرساخت‌ها به دست آمده است. موارد باقیمانده، اثرات غیرمستقیم مربوط به مواد و انرژی مورد نیاز برای عملیات مدیریت CDW و اثرات اجتناب از تولید، از ادبیات پژوهش و پایگاه داده Ecoinvent نسخه 3.7 به دست آمده است.

فهرست بخش حمل ونقل براساس داده‌های اولیه، متناسب با فواصل تعیین شده، تکمیل و اثرات مستقیم و غیرمستقیم این بخش، با در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای و استهلاک خودرو برای کامیون‌های ۱۶ تا ۳۲ تن با سوخت EURO 4، از پایگاه داده

Ecoinvent استخراج شده است. داده‌های اولیه در مورد مصرف سوخت و روان‌کننده‌ها توسط لودرها برای تخلیه و بار پسماند و اثرات مستقیم و غیرمستقیم مربوط به این مصرف ها از پایگاه داده مشتق شده است.

اثرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از دفن پسماند بی‌اثر مبنی بر استفاده از انرژی برای بهره‌برداری است و انتشار شیرابه در نظر گرفته نشده است. پایه این فرض بر این اساس است که مواد زائد دفع شده در این نوع محل دفن پسماند دارای محتوای آلاینده کم بوده و تا حد بسیار زیادی از نظر شیمیایی بی‌اثر هستند. از سوی دیگر، انتشار آلاینده‌ها بخش غیرمعدنی پسماند براساس Ecoinvent v.3.7 در نظر گرفته شده است. با توجه به عدم پایش و داده‌های مربوط به میزان انتشار آلاینده‌ها در هوا، آب و خاک، بر اساس اقلیم شهر تهران، از اطلاعات این پایگاه داده استفاده شده است.

داده‌های مربوط به جداسازی و بازیافت بخش معدنی پسماند ساخت و تخریب از پایگاه داده و ادبیات پژوهش استخراج شده است. میزان مصرف انرژی و آب در بخش بازیافت، از بازدیدهای میدانی و تطبیق آنها با داده‌های پایگاه داده، به دست آمده است.

۳-۲-۲- ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)

طبق استاندارد ISO 14040/44، ارزیابی اثرات چرخه عمر برای درک و ارزیابی و اهمیت اثرات بالقوه زیست‌محیطی سیستم طراحی شده است. این بخش از ارزیابی چرخه حیات، معمولاً شامل عناصر ضروری (دسته‌بندی و تعیین خصوصیات اثرات) و عناصر اختیاری (نرمال‌سازی، گروه بندی و وزن‌دهی) است [۲۶]. در مطالعات قبلی ارزیابی چرخه حیات پسماند ساخت و تخریب، اکثراً به جای ایجاد روش‌های ارزیابی اثر، یک روش ارزیابی اثر توسعه‌یافته یا اصلاح‌شده را انتخاب کرده‌اند.

روش Impact 2002 + v.2.15، همانطور که در توضیح داده شد، برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مربوط به LCA استفاده می‌شود. در مطالعات گذشته، استفاده از Impact 2002 + v.2.15 در غیاب داده‌های محلی پیشنهاد شده است [۲۷]. با توجه به فقدان داده‌های اثرات مستقیم و غیرمستقیم زیست‌محیطی پسماند ساخت و تخریب برای LCIA در ایران، سناریوهای مختلف مدیریت پسماند با استفاده از دسته‌های اثر میانی و پایانی مقایسه و تجزیه وتحلیل شدند. دسته‌های میانی عبارتند از سرطان‌زاها، غیرسرطان‌زاها، غیرآلی‌های تنفسی، آلی‌های تنفسی، سمیت محیط زمینی، اسیدی شدن محیط زمینی، اشغال زمین، تخریب لایه ازون، گرمایش جهانی و انرژی‌های تجدیدناپذیر. دسته‌های پایانی شامل منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی، کیفیت اکوسیستم و سلامت انسان است [۲۸].

۳- نتایج و بحث

در سناریوی مدیریت کنونی، سهم دسته اثر انرژی‌های تجدیدناپذیر ۹۸.۸ درصد است، در حالی که سهم سایر دسته‌های میانی کمتر از ۱ درصد است (گرمایش جهانی ۰.۶ درصد، سمیت محیط زمینی ۰.۴ درصد، اشغال زمین ۰.۰۶ درصد و استخراج مواد معدنی ۰.۰۶ درصد). جدول زیر درصد مشارکت دسته اثر پایانی را نشان می دهد. براساس نتایج ارزیابی اثرات، مصرف منابع طبیعی بیشترین سهم (۹۸.۹۶ درصد)، پس از آن تغییرات اقلیمی (۰.۶ درصد) و کیفیت اکوسیستم (۰.۴۷ درصد) دارا هستند، در حالی که سلامت انسان کمترین سهم را در بین دسته‌های میانی دارد. در جدول زیر سهم هریک از دسته‌های میانی و پایانی برای سناریوی کنونی آورده شده است.

جدول ۲- درصد اثرات زیست‌محیطی سناریوی وضعیت کنونی مدیریت CDW

دسته میانی	دسته پایانی	واحد	درصد مشارکت اثرات زیست‌محیطی	
			میانی	پایانی
سرطان‌زاها	سلامت انسان	kg C2H3Cl eq	< 0.01	< 0.01
غیرسرطان‌زاها		kg C2H3Cl eq	< 0.01	
غیرآلی‌های تنفسی		kg PM2.5 eq	< 0.01	
آلی‌های تنفسی		kg C2H4 eq	< 0.01	
زمینی سمیت محیط	کیفیت اکوسیستم	kg TEG soil	0.4	0.47

اسیدی شدن محیط زمینی		kg SO2 eq	0.01	
اشغال زمین		m2org.arable	0.06	
گرمایش جهانی	تغییرات اقلیمی	kg CO2 eq	0.6	0.6
انرژهای‌های تجدیدناپذیر	منابع طبیعی	MJ primary	98.9	98.96
استخراج مواد طبیعی		MJ surplus	0.06	

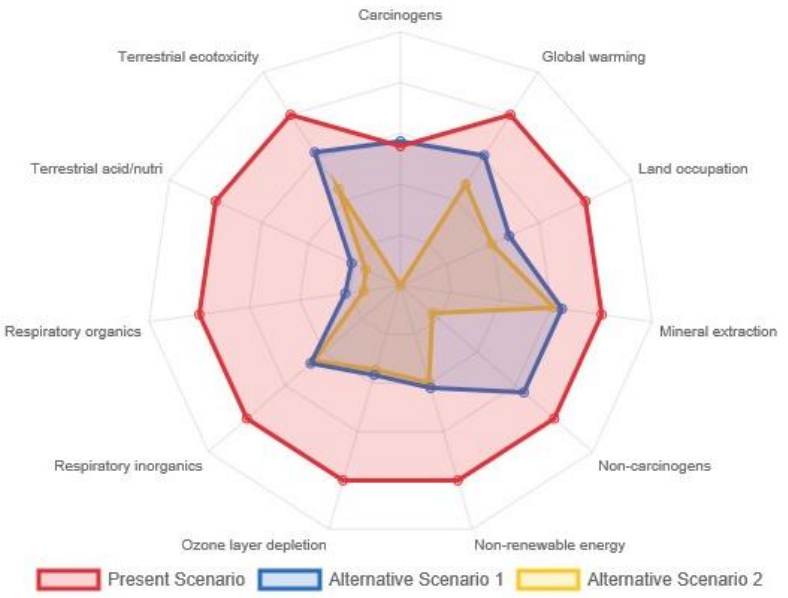
نتایج کمی دسته اثرهای پایانی نشان می‌دهد که حمل ونقل پسماند ساخت و تخریب و دفن پسماند مخلوط ماسه و سیمان (به دلیل درصد بالا) سهم عمده‌ای در دسته اثر سلامت انسان دارند، در حالی که در کیفیت اکوسیستم، دفن پسماند بی‌اثر و حمل ونقل نقش عمده را دارند. مانند دو مقوله ذکر شده، در دسته اثر تغییرات اقلیمی، حمل ونقل نقش اصلی را ایفا می‌کند. در دسته منابع طبیعی، سهم اصلی مربوط به دفن CDW است.

برای بهبود مدیریت پسماند ساخت و تخریب در شهر تهران، دو سناریوی جایگزین در مطالعه حاضر با هدف افزایش نرخ بازیافت و تفکیک از مبداء تعریف شد. نتایج ارزیابی اثر هر سه سناریو در جدول زیر به تفصیل آمده است. در بررسی نتاج، مقادیر منفی در دسته اثرات، نشان دهنده صرفه‌جویی در منابع طبیعی و انرژی است.

جدول ۳- نتایج دسته اثرات زیست‌محیطی سناریوهای وضعیت کنونی و جایگزین

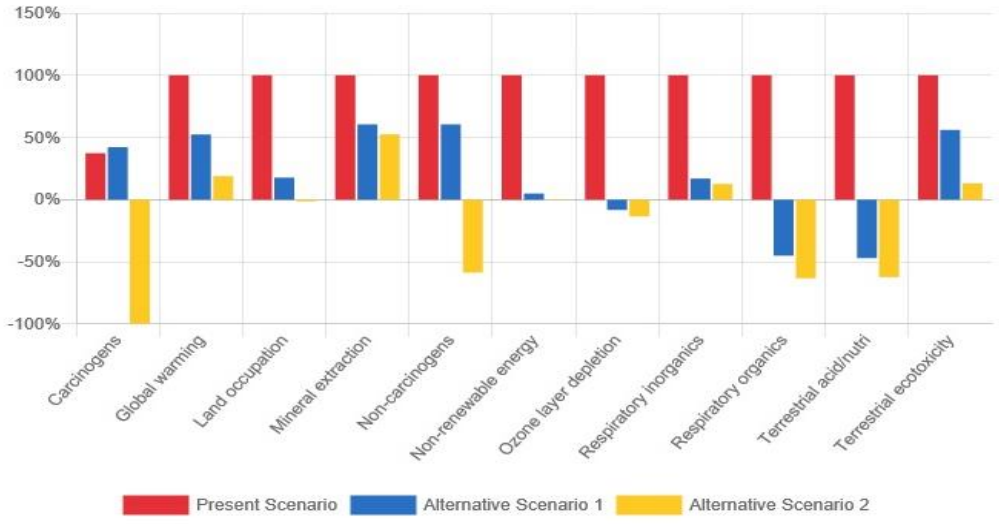
دسته اثر	واحد	سناریوی پایه	سناریوی جایگزین اول	سناریوی جایگزین دوم
سرطان‌زاها	kg C2H3Cl eq	3.24E+03	3.66E+03	-8.68E+03
گرمایش جهانی	kg CO2 eq	3.72E+05	1.95E+05	7.01E+04
اشغال زمین	m2org.arable	2.47E+04	4.38E+03	-3.23E+02
استخراج مواد طبیعی	MJ surplus	2.34E+03	1.42E+03	1.23E+03
غیرسرطان‌زاها	kg C2H3Cl eq	5.70E+03	3.45E+03	-3.34E+03
انرژهای‌های تجدیدناپذیر	MJ primary	4.31E+06	2.15E+05	-2.05E+04
تخریب لایه ازون	kg CFC-11 eq	4.52E-02	-3.73E-03	-6.12E-03
غیرآلی‌های تنفسی	kg PM2.5 eq	8.22E+02	1.39E+02	1.04E+02
آلی‌های تنفسی	kg C2H4 eq	1.24E+02	-5.59E+01	-7.85E+01
اسیدی شدن محیط زمینی	kg SO2 eq	6.76E+03	-3.17E+03	-4.21E+03
زمینی سمیت محیط	kg TEG soil	1.99E+07	1.12E+07	2.63E+06

به منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سناریوهای مختلف، سناریوهای مدیریت جایگزین با سناریوی کنونی مقایسه شد. شکل ۳ نتایج مقایسه سه سناریوی سیستم مدیریت پسماند ساخت و تخریب برای دسته‌های اثر انتخاب شده از روش Impact 2002 نشان می‌دهد. اهمیت قابل توجه بازیافت پسماند ساخت و تخریب و همچنین تفکیک از مبداء در مقایسه سناریوها در کاهش مصرف منابع و اثرات زیست‌محیطی دیده می‌شود.



شکل ۳- مقایسه نسبی اثرات زیست‌محیطی سناریوهای کنونی و جایگزین

در تمامی دسته‌های اثر، به استثنای سرطان‌زاها، اثرات زیست‌محیطی کاهش یافته است. مقایسه بین سناریوی کنونی و سناریوی جایگزین اول برای تمامی دسته اثرات نشان می‌دهد که مزایای زیست‌محیطی افزایش پیدا کرده است؛ گرمایش جهانی (۴۸٪)، اشغال زمین (۸۲٪)، استخراج مواد معدنی (۴۱٪)، غیرسرطان‌زاها (۴۲٪)، انرژی‌های تجدیدناپذیر (۹۱٪)، تخریب لایه اوزون (۱۰۴٪)، غیرآلی-های تنفسی (۷۸٪)، آلی‌های تنفسی (۱۴۶٪)، اسیدی شدن محیط زمینی (۱۴۸٪) و سمیت محیط زمینی (۴۶٪) بهبود یافته است. به همین ترتیب، مقایسه بین سناریوی پایه و سناریوی جایگزین دوم مزایای زیست‌محیطی را نشان می‌دهد: گرمایش جهانی (۷۸٪)، اشغال زمین (۱۰۲٪)، استخراج مواد معدنی (۴۹٪)، غیرسرطان‌زاها (۱۵۴٪)، انرژی‌های تجدیدناپذیر (۹۹٪)، تخریب لایه اوزون (۱۰۹٪)، غیرآلی‌های تنفسی (۸۱٪)، آلی‌های تنفسی (۱۵۹٪)، اسیدی شدن محیط زمینی (۱۵۶٪) و سمیت محیط زمینی (۸۲٪). در دسته اثر سرطان‌زاها، در سناریوی جایگزین اول ۴ درصد پتانسیل آسیب افزایش یافته و در سناریوی جایگزین دوم ۱۴۲٪ کاهش پیدا کرده است. این امر به دلیل آن است با جلوگیری از تلنبار بخش غیرمعدنی پسماند ساخت و تخریب، از انتشار آلاینده‌ها جلوگیری شده است. شکل زیر نمودار نرمالایز شده اثرات زیست‌محیطی هر سه سناریو را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نتایج نرمالایز شده دسته اثرات زیست‌محیطی سناریوی وضعیت کنونی و سناریوهای جایگزین

در حال حاضر، تاسیسات بازیافت CDW، ۶۶۰۰ تن پسماند جمع‌آوری شده از شهر تهران را روزانه بازیافت می‌کند که این رقم معادل ۱۹.۴ درصد از کل (۳۴۰۰۰ تن) زباله تولیدی است. مواد بازیافتی شامل ماسه و سیمان مخلوط، بلوک‌های بتنی، کاشی، موزائیک، آسفالت و آجر سفالی، ۷۸.۱ درصد از پسماند ساخت و تخریب جمع‌آوری شده را تشکیل می‌دهند. سنگدانه‌های بازیافتی از این بخش پسماند ساخت و تخریب می‌تواند نقش اساسی در برآوردن نیازهای اولیه برای توسعه زیرساخت ایفا کند؛ به عنوان مثال جاده‌ها. پسماند بازیافت نشده شامل خاک (گل، خاک رس و سنگ)، بتن مسلح، گچ و دیوار خشک، فولاد (میله و براکت)، گچ، مقوا، پلاستیک و چوب، بخش کوچکی از کل پسماند ساخت و تخریب تولید شده را شامل می‌شوند. بر اساس ظرفیت بازیافت موجود، مواد بازیافتی از CDW ابتدا جدا می‌شوند، سپس مواد بازیافت مرتب شده از ایستگاه جداسازی عبور می‌کند، که با آهنربا محتوای فولاد باقی مانده را جدا می‌کنند و چگالنده قطعات کوچک و ریز را که برای تشکیل سنگدانه مناسب نیستند، جدا می‌کند. این دورریز، حدود ۱۵ درصد از پسماندهای بازیافتی را تشکیل می‌دهد و به پسماند بازیافت نشده در محل دفن زباله می‌پیوندند.

سنگدانه های بازیافتی حاصل از بازیافت می‌توانند جایگزین ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی شوند. بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه تولید شده ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر است که می تواند تا ۱۰۰٪ سنگدانه جدید مورد نیاز برای همه فعالیت‌ها مانند بالا بردن سطح سایت‌های ساخت و ساز، حفظ ساختار سایت و پر کردن مناطق حفاری شده به کار روند. همین سنگدانه‌ها همچنین می‌توانند جایگزین سنگدانه‌های طبیعی مورد نیاز برای پوشش شبکه‌های لوله شوند. سنگدانه‌های ۱۰-۲۰ میلی‌متر، می‌تواند با جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در ساخت دیوارهای داخلی، ساخت بتن، سیستم‌های فاضلاب بهداشتی و زهکشی آب و ساخت آجرهای توخالی شود. سنگدانه‌های بازیافتی ۵-۱۰ میلی‌متر، می‌تواند تا ۱۰۰٪ از سنگدانه‌های جدید مورد استفاده در لایه‌های زیرین راه‌سازی را جایگزین کند. در نهایت، کوچکترین اندازه (۰/۵ میلی‌متر) سنگدانه‌ها می‌تواند جایگزین ۱۰۰٪ سنگدانه‌های طبیعی در ساخت جاده‌های موقت مزرعه به بازار و به عنوان بستر برای لوله‌های آب و لوله‌کشی و فاضلاب شود.

۴- نتیجه‌گیری

شهرهای بزرگ در منطقه خاورمیانه مقدار زیادی پسماند ساخت و تخریب تولید می‌کنند. در شهر تهران، به عنوان یکی از بزرگترین شهرها و پایتخت ایران، در حال حاضر، روزانه بیش از ۳۴۰۰۰ تن، از ۲۲ منطقه شهرداری، پسماند ساخت و تخریب جمع‌آوری می‌شود. برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، کل شهر در حال انجام فعالیت‌های گسترده ساخت و ساز و تخریب است. مطالعه حاضر اثرات زیست‌محیطی بالقوه سیستم مدیریت پسماند ساخت و تخریب فعلی (و برنامه ریزی‌شده) شهر تهران را با استفاده از روش Impact 2002 + LCIA ارزیابی کرد. نتایج ارزیابی نشان داد که بازیافت پسماند ساخت و تخریب به طور قابل توجهی از اثرات بالقوه دسته اثرهای انرژی‌های تجدیدناپذیر، گرمایش جهانی، غیرسرطان‌زاها، غیرآلی‌های تنفسی و آلی‌های تنفسی، استخراج مواد معدنی و تخریب لایه ازون جلوگیری می‌کند. این مطالعه همچنین نشان داد که بازیافت بخش معدنی به طور قابل توجهی از تأثیرات «غیرسرطان‌زا» و «مواد معدنی تنفسی» تولید شده توسط دفن پسماند بر سلامت انسان جلوگیری می‌کند. علاوه بر اثرات اجتناب‌شده مستقیم دفن زباله، تبدیل پسماند ساخت و تخریب به دانه‌های با اندازه‌های مختلف (۰ تا ۵۰ میلی‌متر) می‌تواند جایگزین ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی در فعالیت‌ها ساخت و ساز شود. همچنین براساس نتایج ارزیابی اثرات، تفکیک از مبداء می‌تواند تا حد قابل‌توجهی از آسیب‌های احتمالی بر سلامت انسان و اکوسیستم جلوگیری کند. این نتایج مسئولین در شهر تهران را تشویق می‌کند تا فعالانه در تفکیک از مبداء، جابجایی و ذخیره‌سازی پسماند ساخت و تخریب برای افزایش اثربخشی مواد بازیافت مشارکت کنند. با حمایت شهرداری‌ها، نرخ بازیافت می‌تواند به طور موثری تا ۱۰۰ درصد ارتقا یابد. به منظور دستیابی به مزایای زیست‌محیطی استفاده مجدد و بازیافت پسماند ساخت و تخریب، نتایج مطالعه حاضر باید در هر مرحله توسعه (افزایش ظرفیت، تغییر فرآیند و شیوه‌های مدیریت) تاسیسات موجود و احتمالی تأیید شود.

۵- منابع و مراجع

1. Pacheco-Torgal, F., 1 - Introduction to advances in construction and demolition waste, in Advances in Construction and Demolition Waste Recycling, F. Pacheco-Torgal, et al., Editors. 2020, Woodhead Publishing. p. 1-10. https://doi.org/10.1533/9780857097729.1
2. Yazdanbakhsh, A., A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies. Waste Management, 2018. 77: p. 401-412. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.024
3. Aslam, M.S., B. Huang, and L. Cui, Review of construction and demolition waste management in China and USA. Journal of Environmental Management, 2020. 264: p. 110445. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445
4. Iodice, S., et al., Sustainability assessment of Construction and Demolition Waste management applied to an Italian case. Waste Management, 2021. 128: p. 83-98. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.031
5. Chau, C.K., et al., Evaluation of the impacts of end-of-life management strategies for deconstruction of a high-rise concrete framed office building. Applied Energy, 2017. 185: p. 1595-1603. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.019
6. Duan, H., et al., Construction debris becomes growing concern of growing cities. Waste Management, 2019. 83: p. 1-5. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044
7. Li, J., et al., Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China. Journal of Cleaner Production, 2020. 263: p. 121371. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121371
8. Rosado, L.P., et al., Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. Waste Management, 2019. 85: p. 477-489. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011
9. Haider, H., et al. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste Management in Riyadh, Saudi Arabia. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022. 19, DOI: 10.3390/ijerph19127382.
10. Quéheille, E., et al., A Life Cycle Assessment model of End-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. Journal of Cleaner Production :۳۳۹ .۲۰۲۲ ,p. 130694. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130694
11. Butera, S., T.H. Christensen, and T.F. Astrup, Life cycle assessment of construction and demolition waste management. Waste Management, 2015. 44: p. 196-205. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011
12. Ferronato, N., et al., Environmental assessment of construction and demolition waste recycling in Bolivia: Focus on transportation distances and selective collection rates. Waste Management & Research, 2021. 40(6): p. 793-805. https://doi.org/10.1177/0734242X211029170

13. Epa, U.J.U.S.E.P.A., Office of Land and D. Emergency: Washington, USA, Advancing sustainable materials management: 2014 fact sheet. 2015.
14. Vitale, P., et al., Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. Waste Management, 2017. 60: p. 311-321. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.002
15. Colangelo, F., et al., Life cycle assessment of recycled concretes :A case study in southern Italy. Science of The Total Environment, 2018. 615: p. 1506-1517. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107
16. Penteado, C.S.G. and L.P. Rosado, Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. Waste Management & Research, 2016. 34(10): p. 1026-1035. https://doi.org/10.1177/0734242X16657605
17. Mercante, I.T., et al., Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. The International Journal of Life Cycle Assessment :(۲)۱۷ .۲۰۱۲ ,p. 232-241. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0350-2
18. Wang, T., et al., Estimating the environmental costs and benefits of demolition waste using life cycle assessment and willingness-to-pay: A case study in Shenzhen. Journal of Cleaner Production, 2018. 172: p. 14-26. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.168
19. Lockrey, S., et al., Concrete recycling life cycle flows and performance from construction and demolition waste in Hanoi. Journal of Cleaner Production, 2018. 179: p. 593-604. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.271
20. Borghi, G., S. Pantini, and L. Rigamonti, Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). Journal of Cleaner Production, 2018. 184: p. 815-825. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.287
21. Csiszar, S.A. and D.E. Meyer, LCA in Relation to Risk Assessment, in Encyclopedia of Sustainable Technologies, M.A. Abraham, Editor. 2017, Elsevier: Oxford. p. 243-251.
22. pasmandiran.ir, News channel, 2021, [Persian].
23. Asgari, A., et al., Quality and quantity of construction and demolition waste in Tehran. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2017. 15(1): p. 14. https://doi.org/10.1186/s40201-017-0276-0
24. Qiao ,L., et al., Life cycle assessment of three typical recycled products from construction and demolition waste. Journal of Cleaner Production, 2022. 376: p. 134139 . https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134139
25. Dahlbo, H., et al., Construction and demolition waste management–a holistic evaluation of environmental performance. Journal of Cleaner Production, 2015. 107: p. 333-341. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.073
26. Organization, I.S., ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. 1997.

27. Council, C.I.J.C., Kowloon, Report on strategy for management and reduction of construction and demolition waste in Hong Kong. 2017: p. 9-30.
28. Akhtar, A. and A.K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, 2018. 186: p. 262-281. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085