

Life cycle assessment of writing paper production process Mazandaran Wood & Paper Industries

A. H. Dadashi¹, S. H. Sharifi Pajaie^{2*}, Gh. Asadpour³

1- M.Sc. Graduate, Wood and Paper Science Department, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran

2- Corresponding Author, Assist. Prof., Wood, and Paper Science Department, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran, Email:

h.p.sharifi@sanru.ac.ir

3- Associate Professor, Department of wood and paper industry. Sari Agriculture Science and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: Febreoury 2026

Accepted: January 2025

Abstract

Problem definition and objectives: The paper production industry is one of the largest industries in the world. It accounts for 2% of the world's industrial pollution emissions. Solutions aimed at reducing damage and waste are needed to achieve sustainability and reduce the negative impacts of continuous paper production. Life cycle assessment is a tool for assessing the energy consumption and environmental impacts of a product, process or service, from raw material extraction to production, transportation, use, disposal and recycling. The aim of this study is to assess the life cycle of the writing paper production process in the Mazandaran Wood and Paper Industries Company based on the international ReCiPe 2016 method and using Simapro software to investigate the environmental impacts of writing paper production in the Mazandaran Wood and Paper Industries Company and to determine the points with the highest share of pollution emissions in the writing paper production process.

Methodology: In this study, the necessary information was collected through communication with the Mazandaran Wood and Paper Industries Company factory and in direct and indirect ways. In this study, a gate-to-gate life cycle assessment of writing paper was conducted from the beginning to the end of the writing paper production line. The final data from the inventory analysis phase and the impact assessment phase, which included midpoint categories indicators (climate change, ozone depletion, ionizing radiation, human health ozone formation, fine particle formation, terrestrial ecosystem ozone formation, land acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, human carcinogenic toxicity, human non-carcinogenic toxicity, land use or utilization, mineral resource depletion, fossil resource depletion, water consumption) and endpoint categories indicators (damage assessment, normalization and weighting) were examined and evaluated.

Results: The findings from the assessment show us that in the LCI section, carbon dioxide emissions from fossil fuels (313 kg) and suspended solid particles (625 kg) have a higher share than other items. In examining the midpoint categories indicators, the findings also show that based on the share of emissions in 18 impact categories, electricity consumption (39.3%) in the scarcity of fossil resources (0.152) and wood pulp (89.8%) in the scarcity of mineral resources

(8.85×10^{-4}) have the highest share of impact. The examination of the endpoint categories indicators (including damage assessment, normalization, and weighting) also shows that based on the three damage categories (human health, ecosystems, and resources) in the damage assessment, electricity consumption (39%) and wood pulp (29.6%) have the highest share in the resource category (0.153). Also, in normalization, electricity consumption (2.93×10^{-5}) and wood pulp (2.85×10^{-5}) have the highest share of impact on human health (1.19×10^{-4}). In weighting, writing paper (60) and wood pulp (6.22) have the highest share of impact in the ecosystems category (5.85).

Conclusion: In general, the results of the study showed that electricity consumption and wood pulp have the highest share of environmental impacts in a writing paper production process.

Keywords: LCA, environment, carbon dioxide, midpoint categories indicators, endpoint categories indicators

ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ تحریرکارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران

امیرحسین داداشی^۱، سید حسن شریفی پاچایی^۲، قاسم اسدپور^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: h.p.sharifi@sanru.ac.ir
 ۳- دانشیار، گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: بهمن ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: صنعت تولید کاغذ یکی از صنایع بزرگ در جهان می‌باشد. به طوری که ۲٪ از سهم انتشارات آلودگی صنعتی در جهان را در بر می‌گیرد. راه‌حلهایی با هدف کاهش میزان آسیب و ضایعات برای دستیابی به پایداری و کاهش آثار منفی تولید مداوم کاغذ مورد نیاز است. ارزیابی چرخه حیات (Life cycle assessment) ابزاری برای ارزیابی مصرف انرژی و آثار زیست محیطی یک محصول، فرایند یا خدمات است که از استخراج مواد خام تا تولید، حمل و نقل، استفاده، دفع و بازیافت را در بر می‌گیرد. هدف از این پژوهش ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ تحریر در کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران بر اساس روش بین‌المللی ReCiPe 2016 و با استفاده از نرم افزار Simapro برای بررسی میزان اثرات زیست محیطی تولید کاغذ تحریر در کارخانه چوب و کاغذ مازندران و تعیین نقاط با سهم بیشتر انتشار آلودگی در فرایند تولید کاغذ تحریر می‌باشد.

مواد و روشها: در این پژوهش اطلاعات لازم از طریق ارتباط با کارخانه شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران و به اشکال مستقیم و غیر مستقیم جمع آوری شد. در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات کاغذ تحریر به صورت دروازه به دروازه، از ابتدا تا انتهای خط تولید کاغذ تحریر انجام شد. داده‌های نهایی حاصل از مرحله تجزیه و تحلیل موجودی و مرحله ارزیابی تاثیر که شامل شاخص‌های نقطه میانی (Midpoint categories indicators) (تغییر آب و هوا، تخریب لایه ازن، تابش یونیزه، تشکیل ازن سلامت انسان، تشکیل ذرات ریز، تشکیل ازن اکوسیستم‌های زمینی، اسیدی شدن زمین، اوتروفیکاسیون آب شیرین، اوتروفیکاسیون دریایی، سمیت زیست محیطی زمینی، سمیت زیست محیطی آب شیرین، سمیت زیست محیطی دریایی، سمیت سرطان‌زا در انسان، سمیت غیر سرطان‌زا در انسان، کاربری یا استفاده از زمین، کمبود منابع معدنی، کمبود منابع فسیلی، مصرف آب) و شاخص‌های نقطه پایانی (endpoint categories indicators) (ارزیابی خسارت، عادی سازی و وزن‌دهی) می‌باشد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

نتایج: در این پژوهش اطلاعات لازم از طریق ارتباط با کارخانه شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران و به اشکال مستقیم و غیر مستقیم جمع آوری شد. در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات کاغذ تحریر به صورت دروازه به دروازه، از ابتدا تا انتهای خط تولید کاغذ تحریر انجام شد. داده‌های نهایی حاصل از مرحله تجزیه و تحلیل موجودی و مرحله ارزیابی تاثیر که شامل شاخص‌های نقطه میانی (Midpoint categories indicators) (تغییر آب و هوا، تخریب لایه ازن، تابش یونیزه، تشکیل ازن سلامت انسان، تشکیل ذرات ریز، تشکیل ازن اکوسیستم‌های زمینی، اسیدی شدن زمین، اوتروفیکاسیون آب شیرین، اوتروفیکاسیون دریایی، سمیت زیست محیطی زمینی، سمیت زیست محیطی آب شیرین، سمیت زیست محیطی دریایی، سمیت سرطان‌زا در انسان، سمیت غیر سرطان‌زا در انسان، کاربری یا استفاده از زمین، کمبود منابع معدنی، کمبود منابع فسیلی، مصرف آب) و شاخص‌های نقطه پایانی (endpoint categories indicators) (ارزیابی خسارت، عادی سازی و وزن‌دهی) می‌باشد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج مطالعه نشان داد مصرف برق و خمیر چوب بیشترین سهم از اثرات زیست محیطی را در یک فرایند تولید کاغذ تحریر دارا می‌باشند.

واژه های کلیدی: LCA، محیط زیست، کربن دی اکسید، شاخص‌های میانی، شاخص‌های نقطه پایانی

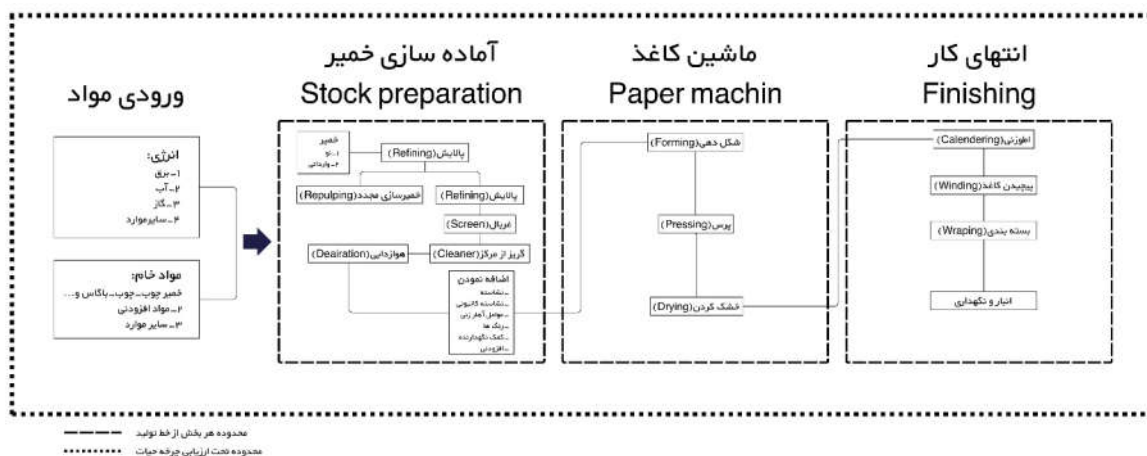
مقدمه

مهم‌ترین شاخص زندگی انسان و همه‌ی گروه‌های گیاهی و جانوری محیط‌زیست است [۱]. صنعت تولید کاغذ یکی از صنایع بزرگ در جهان می‌باشد. به طوری که ۲٪ از سهم انتشارات آلودگی صنعتی در جهان را در بر می‌گیرد [۲]. میزان چوب ورودی به این صنعت در حدود ۴۰٪ از کل الوارهای برش شده تجاری در جهان می‌باشد و سالانه مسبب تخریب بیش از ۳۰ میلیون هکتار جنگل می‌گردد. این صنعت یکی از مصرف‌کنندگان قابل توجه آب است. به طوری که فقط برای تولید یک برگ کاغذ سایز A4 به ۱۰ لیتر آب نیاز خواهیم داشت. صنعت کاغذ پنجمین صنعت مصرف‌کننده انرژی در جهان می‌باشد و ۴٪ از کل انرژی جهان را مصرف می‌کند. برای تولید ۱ تن کاغذ حاصل از خمیر بکر تخمین زده می‌شود حدود ۲۵۳ گالن بنزین سوزانده و مصرف گردد. در ازای هر کیلوگرم کاغذ تولید شده، ۳/۳ کیلوگرم کربن دی اکسید به جو انتشار می‌یابد. انتشار فلزات سنگین و دیوکسین از ترکیبات کلر حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی، متان، اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد نیز برخی از نمونه‌های آلودگی صنعت کاغذ به شمار می‌آیند. در آلودگی منابع آبی نیز دی اکسید کلر یکی از آن‌ها به شمار می‌رود. ورود این ماده به منابع آبی خطر گسترش انواع بیماری را در آب آشامیدنی دوچندان نموده و بروز انواع بیماری‌های جسمانی و تکاملی را در افراد به خصوص کودکان سبب می‌شود. در میزان انتشار زباله تخمین زده می‌شود فقط در ایالات متحده ۴۰٪ از کل ضایعات تولید شده کاغذ باشد. در سال ۲۰۲۱ نیز ۴۰/۳٪ از کل ۸۴ میلیون تن زباله بسته بندی جمع آوری شده در اتحادیه اروپا کاغذ و مقوا بوده است [۳، ۴]. استراتژی‌های طراحی زیست محیطی برای کاهش اثرات زیست محیطی یک محصول بسیار مهم هستند [۵]. راه حل‌هایی با هدف

کاهش میزان آسیب و ضایعات برای دستیابی به پایداری و کاهش آثار منفی تولید مداوم کاغذ مورد نیاز است [۶]. ارزیابی چرخه حیات (Life cycle assessment) ابزاری برای ارزیابی مصرف انرژی و آثار زیست محیطی یک محصول، فرآیند یا خدمات است که از استخراج مواد خام تا تولید، حمل و نقل، استفاده، دفع و بازیافت را در بر می‌گیرد [۷]. در چند دهه گذشته LCA به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند سیاست، اقتصاد، محیط زیست، مهندسی، انرژی و ... استفاده می‌شود [۸، ۹]. ارزیابی چرخه حیات دارای انواع مختلف می‌باشد که از مهمترین آن می‌توان به ارزیابی چرخه حیات به روش دروازه به دروازه (Gate-to-Gate) اشاره نمود که از ابتدا تا انتهای خط تولید یک محصول را در بر می‌گیرد [۱۰]. هدف کلی از این پژوهش ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ تحریر در کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران به روش دروازه به دروازه، بر اساس روش بین‌المللی ReCiPe 2016 [۱۱] و با استفاده از نرم افزار Simapro برای بررسی میزان اثرات زیست محیطی تولید کاغذ تحریر در کارخانه چوب و کاغذ مازندران و تعیین نقاط با سهم بیشتر انتشار آلاینده‌گی در فرایند تولید کاغذ تحریر می‌باشد. با فرض بر اینکه در اثرات زیست محیطی یک تن کاغذ تحریر: ۱- سهم آلودگی هوا بیشتر از آلودگی آب و خاک است، ۲- بالاترین سهم گرمایش جهانی در تولید کاغذ تحریر مربوط به مصرف الکتریسیته می‌باشد و ۳- بالاترین سهم در تخریب محیط‌زیست در فرآیند تولید کاغذ مرتبط با تولید خمیر می‌باشد، و همچنین با توجه به به وضعیت زیست محیطی کشور و قرارگیری کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران در یکی از نواحی مهم زیست‌محیطی خاورمیانه و جهان، سهم بالای صنعت کاغذ در تأثیرات مخرب بر محیط زیست و همچنین اهمیت نقش کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران در تأمین

ارتقاء سازگاری با محیط زیست انجام شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا به حال ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ تحریر در این کارخانه انجام نشده است. لذا اهمیت مطالعه نسبت به تحقیقات قبلی این است که برای اولین بار ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ در تحریر در صنایع چوب و کاغذ مازندران انجام می‌شود.

کاغذ کشور لازم است تا پژوهشی در زمینه ارزیابی چرخه حیات حیطه تولید کاغذ تحریر در این کارخانه انجام گردد تا سهم آلاینده‌ها در این چرخه به دست آید. با این اهداف که ۱- بررسی میزان اثرات زیست محیطی تولید کاغذ تحریر در کارخانه چوب و کاغذ مازندران، ۲- تعیین نقاط با سهم بیشتر انتشار آلاینده‌ها در فرایند تولید کاغذ تحریر و ۳- ارائه پیشنهاداتی در راستای بهبود توسعه با رویکرد



شکل ۱ دیاگرام ابتدا تا انتهای خط تولید کاغذ تحریر. محدوده مورد مطالعه بر اساس روش دروازه به دروازه

مواد و روش‌ها

اطلاعات روش‌های مختلفی از جمله مشاهده، مصاحبه، مطالعه اسنادی و کتابخانه‌ای و پایگاه‌های داده مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش اطلاعات لازم از طریق ارتباط با کارخانه شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران و به اشکال مستقیم و غیر مستقیم جمع آوری شد. برای جمع آوری



شکل ۲ روش‌های جمع‌آوری اطلاعات

جدول ۱ توضیح روش‌های جمع‌آوری اطلاعات

روش	توضیحات
مشاهده	با توجه به محدودیت در مشاهده خط تولید، عملیات مشاهده در مناطق اطراف کارخانه صورت گرفته و ناحیه جغرافیایی بررسی شد. مواردی مانند محوطه کارخانه و بخشهای مختلف آن، سکونت و فعالیت‌های انسانی در نواحی اطراف کارخانه، پوشش جنگلی و طبیعی در نواحی اطراف و همچنین مسیرها و آمد و شدها مورد توجه و بررسی قرار گرفتند. از آنجا که موقعیت کارخانه در کنار مسیر ساری به سمنان قرار داشته و از طرفی مجاور رودخانه تجن قرار میگیرد، بررسی موقعیت اطراف کارخانه جهت دستیابی به اطلاعات هرچه بهتر پیرامون آن امری کاملاً بدیهی می‌باشد.
مصاحبه و پرسشنامه	بخش مهمی از اطلاعات لازم برای پژوهش که از طریق مشاهده مهیا و یا امکان پذیر نبود از طریق ارتباط و مصاحبه با مهندسین، کارشناسان، پرسنل و سایر پل‌های ارتباطی کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران حاصل شد. اطلاعات مربوط به مصرف مواد اولیه و انرژی از داده‌های ثبت شده در واحد تحقیق و توسعه و کنترل کیفیت کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران طی سال ۱۴۰۳ دریافت شد، که طی آن ارتباطات منظم به صورت مصاحبه و در قالب انواع تماس و مکاتبات برقرار و تمامی داده‌های پایه شامل تمام ورودی‌های لازم جهت تولید یک تن کاغذ تحریر از قبیل مواد تشکیل دهنده و انرژی در قالب پرسشنامه جمع آوری، بایگانی و به صورت جداول داده آماده‌سازی گردید. به طور کلی داده‌ها شامل انواع انرژی و ورودی‌های مواد اولیه نظیر چوب و مواد افزودنی می‌باشد.
مطالعه اسنادی و کتابخانه ای	بخشی از اطلاعات که دسترسی به آن از طریق مشاهده و مصاحبه امکان پذیر نبود، از طریق اطلاعات و آمار موجود در بایگانی‌ها و منابع جمع‌آوری و دسته‌بندی گردید. اطلاعاتی نظیر تجهیزات خط تولید، سال ساخت، شرکت‌های سازنده، کدها و استانداردهای مرتبط با خط تولید و موجودی‌های بازار بین المللی جهت رسیدن به نتایج صحیح تر گردآوری و مورد بررسی قرار گرفت.
پایگاه‌های داده	جهت ارزیابی چرخه حیات کاغذ تحریر در نرم افزار، دسترسی به اطلاعات پایه از طریق پایگاه‌های داده لازمی پردازش صحیح اطلاعات جهت دستیابی به نتایج دقیق می‌باشد. به منظور پردازش صحیح اطلاعات جهت خروجی با کیفیت و دقت بالا و تطابق هر چه بیشتر با استاندارد بین‌المللی از برخی پایگاه‌های داده پشتیبان در سیما پرو نظیر Ecoinvent استفاده گردید. اکثر مجموعه داده‌ها بر اساس موارد موجود در Ecoinvent 2 و ۳ می‌باشد. برخی از اقلام مورد استفاده در شبکه بر اساس داده‌های استاندارد موجود در بازارهای اروپا (عمدتاً غرب اروپا و مناطق صنعتی فدراسیون آلمان)، ایالات متحده، چین و بخش‌هایی از منطقه CIS جمع آوری و تجزیه و تحلیل شده اند. برای دستیابی به برخی نمونه‌ها که اطلاعات آنها در پایگاه‌های اطلاعاتی موجود نبود، از منابع موجود در گوگل پتنت و برخی وب سایت‌های اروپایی، چینی و ایرانی استفاده شد. همچنین برای دسترسی سریعتر به نتایج و داده‌ها از هوش مصنوعی Microsoft copilot با سطح جستجوی دشوار استفاده شد.
ارزیابی چرخه حیات	برای ارزیابی چرخه حیات در این مطالعه از نرم افزار Sima pro نسخه ۹,۰۰,۴۸ استفاده شده است. نوع ارزیابی چرخه حیات مورد استفاده در این مطالعه دروازه به دروازه (Gate-to-gate) می‌باشد که طی آن ارزیابی چرخه حیات با توجه به تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها از ابتدا تا انتهای خط تولید و در امتداد آن انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. در مجموع محدوده و مرز مطالعه در این پژوهش بر ابتدا تا انتهای خط تولید کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران متمرکز می‌باشد. در این پژوهش، ارزیابی اثرات زیست محیطی بر اساس روش جهانی ReCiPe2016 انجام شد. این روش یکی از کامل ترین و به روز ترین روش ارزیابی چرخه حیات در دنیا می‌باشد. که خروجی‌های دقیق تری را جهت بررسی ارائه و برخلاف بسیاری از روش‌های دیگر، دامنه بین المللی را به شکل جامع تری پوشش می‌دهد. لذا بکارگیری آن در منطقه ای مانند ایران دارای محدودیت‌های داده و محاسبات نخواهد بود و داده‌های انرژی نظیر برق، گاز و آب را در منطقه ایران پوشش می‌دهد.

روش ارزیابی چرخه حیات

در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات کاغذ تحریر به صورت دروازه به دروازه، از ابتدا تا انتهای خط تولید کاغذ تحریر انجام شد. ارزیابی چرخه حیات دروازه به دروازه به یک فرآیند ارزش افزوده در کل زنجیره تولید نگاه می‌کند. برای مثال تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها را از ابتدا تا انتهای یک خط تولید و در

طی آن مورد بررسی قرار می‌دهد. ماژول‌های دروازه به دروازه نیز ممکن است بعداً در زنجیره تولید مناسب خود به یکدیگر متصل شوند تا ارزیابی کامل تر را تشکیل دهند [۱۲]. در مطالعه ارزیابی چرخه حیات چهار مرحله وجود دارد: ۱-مرحله تعریف هدف و محدوده ۲-مرحله تجزیه و تحلیل موجودی (Life cycle inventory) ۳-مرحله ارزیابی

خسارت، عادی سازی و وزن دهی) می باشد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

مراحل انجام ارزیابی چرخه حیات به شرح زیر می باشد:

تعریف هدف و محدوده: هدف و دامنه در ارزیابی یک چرخه حیات باید تعریف واضح داشته و سازگار با کاربرد مورد نظر باشد. چرخه حیات دارای ماهیت تکراری می باشد. به همین دلیل ممکن است محدوده کاربرد حین پژوهش تصحیح گردد. با هدف بررسی میزان اثرات زیست محیطی تولید کاغذ تحریر در کارخانه چوب و کاغذ مازندران و تعیین نقاط با سهم بیشتر انتشار آلاینده‌گی در فرایند تولید کاغذ تحریر، این مطالعه در کارخانه چوب و کاغذ مازندران واقع در ساری انجام شده. جهت ارزیابی دقیق‌تر ابتدا تا انتهای خط تولید در این کارخانه به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شد.

تجزیه و تحلیل موجودی (Life cycle inventory)

تجزیه و تحلیل موجودی یا سیاهه چرخه حیات شامل ایجاد فهرستی از جریان‌ات ورودی و خروجی به طبیعت برای یک سامانه محصول است این فرآیند کمی سازی داده های مواد خام و انرژی مورد نیاز، انتشار به هوا، انتشار به زمین، انتشار به آب، استفاده از منابع و سایر انتشارات در طول چرخه حیات یک محصول یا فرآیند را بر عهده دارد. برای توسعه موجودی، مدل جریان معمولاً با یک نمودار جریان نشان داده می شود و شامل فعالیت هایی است که قرار است در زنجیره تأمین مربوطه ارزیابی شوند و تصویر واضحی از مرزهای سامانه فنی ارائه می دهد. به طور کلی، هرچه نمودار جریان دقیق تر و پیچیده تر باشد، مطالعه و نتایج دقیق تر است. داده های ورودی و خروجی مورد نیاز برای ساخت مدل برای تمام فعالیت های درون مرز سیستم، از جمله از زنجیره تأمین جمع آوری می شود. در این مطالعه تمام داده های لازم شامل مواد مورد استفاده در تولید یک تن کاغذ تحریر، داده های انرژی، دستگاه های بکاررفته در خط تولید و سایر موارد مرتبط با محدوده مورد مطالعه جمع آوری، کمی سازی و مورد بررسی قرار گرفت.

تاثیر (Life cycle impact assessment) ۴-مرحله تفسیر. تعریف دامنه یا محدوده (مرحله اول) شامل مرز سیستم و سطح جزئیات، در یک ارزیابی چرخه حیات به موضوع و استفاده مورد نظر در مطالعه بستگی دارد. عمق و وسعت ارزیابی چرخه حیات بسته به هدف خاص در ارزیابی چرخه حیات می تواند به شکل قابل توجهی متفاوت باشد. تجزیه و تحلیل موجودی چرخه حیات (مرحله دوم) فهرستی از داده های ورودی / خروجی با توجه به سیستم مورد مطالعه و برای دستیابی به اهداف مطالعه می باشد. این مرحله شامل گردآوری و تعیین کمیت ورودی ها و خروجی ها برای یک محصول در طول چرخه عمر آن است. ارزیابی تاثیر چرخه حیات (مرحله سوم) با هدف درک بزرگی و اهمیت اثرات زیست محیطی بالقوه برای یک سیستم محصول در طول چرخه عمر آن، اطلاعات اضافی را برای کمک به ارزیابی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل یک سیستم محصول به منظور درک بهتر اهمیت محیطی آن فراهم می کند. تفسیر چرخه حیات مرحله نهایی ارزیابی چرخه حیات می باشد که در آن نتایج تجزیه و تحلیل موجودی، ارزیابی اثرات یا هر دو به عنوان مبنایی برای نتیجه گیری، پیشنهاد و تصمیم گیری مطابق با تعریف هدف و محدوده خلاصه شده و مورد بحث قرار می گیرد [۱۳]. در این مطالعه ارزیابی چرخه حیات بر اساس روش بین المللی ReCiPe 2016 انجام شد. بر اساس این روش داده های نهایی حاصل از مرحله تجزیه و تحلیل موجودی و مرحله ارزیابی تاثیر که شامل شاخص های نقطه میانی (Midpoint categories indicators) (تغییر آب و هوا، تخریب لایه ازن، تابش یونیزه، تشکیل ازن سلامت انسان، تشکیل ذرات ریز، تشکیل ازن اکوسیستم های زمینی، اسیدی شدن زمین، اوتروفیکاسیون آب شیرین، اوتروفیکاسیون دریایی، سمیت زیست محیطی زمینی، سمیت زیست محیطی آب شیرین، سمیت زیست محیطی دریایی، سمیت سرطان زا در انسان، سمیت غیر سرطان زا در انسان، کاربری یا استفاده از زمین، کمبود منابع معدنی، کمبود منابع فسیلی، مصرف آب) و شاخص های نقطه پایانی (endpoint categories indicators) (ارزیابی

بلندپایه از تمام اثرات زیست محیطی در قالب داده می‌باشد که طی یک دوره حیات از محصول، فرآیند یا فناوری پدید آمده است. تعیین LCI در کاغذ تحریر بر اساس تولید یک تن کاغذ تحریر و مطابق استاندارد بین‌المللی ReCiPe 2016 و با استفاده از نرم افزار Simapro انجام گردید که در جدول ۱ قابل مشاهده است. یافته‌های حاصل از ارزیابی به ما نشان می‌دهد که در بخش مربوط به تجزیه و تحلیل موجودی انتشار دی اکسید کربن حاصل از سوخت فسیلی (۳۱۳ کیلوگرم) و ذرات جامد معلق (۶۲۵ کیلوگرم) نسبت به سایر موارد سهم بالاتری دارند. با افزایش جمعیت، امروزه تقاضا برای کاغذ هر سال افزایش می‌یابد. با این حال، صنایع خمیر و کاغذ یکی از بزرگترین انتشاردهنده‌های گازهای گلخانه‌ای از جمله دی اکسید کربن می‌باشند. انتشار دی اکسید کربن در فرآیند تولید کاغذ و در مراحل مختلف از زنجیره تأمین دچار تغییرات مورفولوژیکی و فضایی می‌شود. کل چرخه فرآیند از جنگل تا مصرف محصول نهایی در محدوده این تغییرات قرار می‌گیرد. به طور کلی انتشار کربن دی اکسید از ۳ مسیر اصلی می‌گذرد: سوخت‌های فسیلی، مصرف برق و مواد خمیر و کاغذ. Jiang و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای بیان نمودند که جنگل زدایی در مناطق استوایی جهت استفاده در صنایع خمیر و کاغذ زیان جهانی بالغ بر انتشار ۴/۸ میلیارد تن دی اکسید کربن به همراه داشته است [۱۴]. ذرات جامد معلق در صنایع خمیر و کاغذ شامل بقایای فیبری و مواد ریز حاصل از پوست و الیاف درخت، لجن، رسوبات و خاکستر هستند. تولید خمیر و کاغذ مقدار قابل توجهی از آلاینده‌ها را تولید می‌کند که با غلظت بالای مواد جامد معلق، BOD^3 و COD^3 مشخص می‌شود. حجم و بار آلودگی فاضلاب تولیدی به ترکیبات مختلف فرآیندهای واحد درگیر در تولید، نوع مواد خام و مواد شیمیایی مصرفی، انواع محصولات کاغذی و درجه بازیافت آب بستگی دارد. محمود و همکاران (۲۰۱۹) طی پژوهشی بیان نمودند که غلظت بالای مواد آلاینده انتشار یافته از کارخانه کاغذ به آب نظیر ذرات جامد معلق بر اکوسیستم‌های آبی و زمینی تأثیر می‌گذارد [۱۵].

ارزیابی تاثیر (Life cycle impact assessment):

تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر توسط ارزیابی تأثیر چرخه عمر دنبال می‌شود. هدف این مرحله ارزیابی اثرات بالقوه زیست محیطی و سلامت انسان حاصل از جریان های اولیه تعیین شده در تجزیه و تحلیل موجودی می‌باشد. استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 به مراحل اجباری زیر برای تکمیل LCIA نیاز دارند:

۱- تعیین و مشخص نمودن دسته های تأثیر که شامل دسته های زیر می‌باشد:

- مشخص نمودن شاخص‌های نقطه میانی (مشکل گرا)^۱

۲- تعیین و مشخص نمودن شاخص های دسته بندی مشخص نمودن شاخص‌های نقطه پایانی (آسیب گرا)^۲

تفسیر: تفسیر چرخه عمر یک تکنیک سیستماتیک برای شناسایی، کمی کردن، بررسی و ارزیابی اطلاعات حاصل از تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر و یا ارزیابی تأثیر چرخه عمر است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل موجودی و ارزیابی تأثیر در مرحله تفسیر خلاصه می‌شود. نتیجه مرحله تفسیر مجموعه‌ای از نتیجه گیری ها و توصیه ها برای مطالعه می‌باشد. مطابق ISO این تفسیر باید شامل موارد زیر باشد:

- شناسایی مسائل مهم بر اساس نتایج مراحل تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر و ارزیابی تأثیر چرخه عمر یک ارزیابی چرخه حیات - ارزیابی مطالعه با در نظر گرفتن بررسی‌های کامل بودن، حساسیت و سازگاری - نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و توصیه‌ها

هدف از مرحله تفسیر شناسایی جایگزینی است که کمترین تأثیر منفی زیست محیطی را بر روی منابع زمین، دریا و هوا داشته باشد

نتایج و بحث

بررسی تجزیه و تحلیل موجودی

تجزیه و تحلیل موجودی دومین مرحله از ارزیابی چرخه حیات می‌باشد. نتایج در این مرحله شامل فهرستی

³ Chemical Oxygen Demand

⁴ Biological Oxygen Demand

¹ Midpoint categories indicators

² Endpoint categories indicators

جدول ۲ (الف) - مقادیر LCI انتشارات به هوا در کاغذ تحریر

انتشارات به هوا	مقدار	واحد
کربن دی اکسید	۸۷/۲	کیلوگرم
کربن دی اکسید - سوخت فسیلی	۳۱۳	کیلوگرم
کربن مونواکسید	۶۴۲	گرم
کربن مونواکسید - سوخت فسیلی	۲/۷۴	کیلوگرم
گوگرد دی اکسید	۸۵۹	گرم
نیتروژن اکسید	۱/۹۷	کیلوگرم
نیتروژن دی اکسید	۱۸۷	گرم
نیتروژن - اتمسفر	۱۴۷	کیلوگرم
متان	۳۶۴	گرم
متان - سوخت فسیلی	۵۴۶	گرم
بنزن	۴/۴۲	گرم
تولوئن	۳/۷۹	گرم
کلر	۰/۵۲۳	گرم
سرب	۰/۳۱۳	گرم
آمونیاک	۲۴/۸	گرم
پنتان	۰/۷۴۵	گرم
بوتان	۱/۴	گرم
اتان	۴/۴۶	گرم
متانول	۱۴/۱	گرم

جدول ۲ (ب) - مقادیر LCI انتشارات به آب در کاغذ تحریر

انتشارات به آب	مقدار	واحد
BOD5, Biological Oxygen Demand	۱/۱۴	کیلوگرم
COD, Chemical Oxygen Demand	۱/۶۹	کیلوگرم
DOC, Dissolved Organic Carbon	۶۱۷	گرم
کلسیم	۶۸۳	گرم
کلراید	۷/۷	کیلوگرم
نیتروژن - اتمسفر	۴۰۰	کیلوگرم
فسفر	۱۶۰	کیلوگرم
سدیم	۲/۱۶	کیلوگرم
سولفات	۴۶/۳	گرم
TOC, Total Organic Carbon	۶۲۱	گرم
ذرات جامد معلق	۶۲۵	کیلوگرم
فسفات	۸۳۰۰۰۰	نانوگرم
لیتیوم	۱۹۴	گرم
منیزیم	۱۳۳	گرم
آهن	۱۸/۷	گرم
برم	۳۱/۶	گرم
نیتروژن - کل	۴۳/۲	گرم
روغن ها	۵/۴۱	گرم
آلومینیوم	۶/۳۱	گرم

تعیین شاخص‌های نقطه میانی

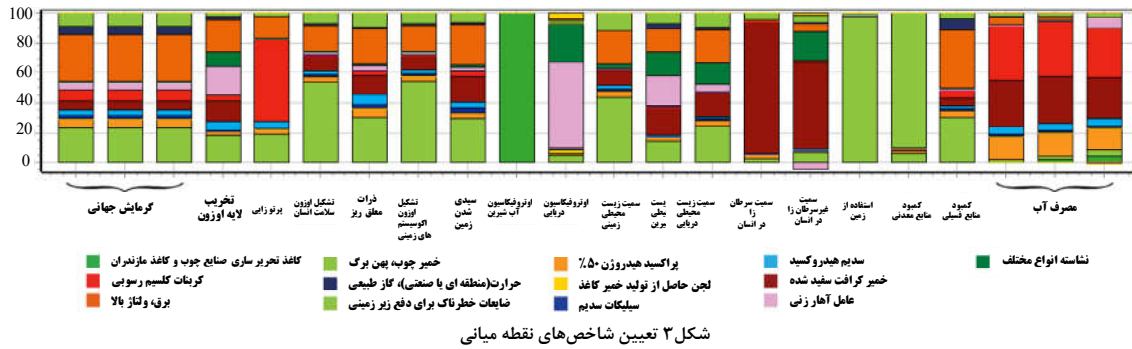
براساس ReCiPe 2016 تعیین شاخص‌های نقطه میانی ۱۸ طبقه اثر را دربر می‌گیرد که شامل تغییر آب و هوا، تخریب لایه ازن، تابش یونیزه، تشکیل ازن سلامت انسان، تشکیل ذرات ریز، تشکیل ازن اکوسیستم‌های زمینی، اسیدی شدن زمین، اوتروفیکاسیون آب شیرین^۱، اوتروفیکاسیون دریایی^۲، سمیت زیست محیطی زمینی، سمیت زیست محیطی آب شیرین، سمیت زیست محیطی دریایی، سمیت سرطان‌زا در انسان، سمیت غیر سرطان‌زا در انسان، کاربری یا استفاده از زمین، کمبود منابع معدنی، کمبود منابع فسیلی و مصرف آب می‌باشد. نتایج حاصل از تعیین شاخص‌های نقطه میانی گویای آن است که در یک فرایند تولید کاغذ تحریر، مصرف برق، خمیر چوب و کربنات کلسیم رسوبی (PCC) سهم قابل توجهی از انتشارات را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج حاصل از تعیین شاخص‌های نقطه میانی در جدول ۴ قابل مشاهده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد کمبود منابع فسیلی (۰/۱۵۲) و کمبود منابع معدنی ($8/85 \times 10^{-4}$) دارای بیشترین سهم اثر می‌باشند. صنعت کاغذ که همواره یکی از مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی در جهان به شمار می‌رود اخیراً بالغ بر ۱۲۵۵۷۰۹ تن ژول انرژی صرف تولید و عرضه محصولات سلولزی نموده است.

تعیین و مشخص نمودن شاخص‌های نقطه پایانی

مطابق ReCiPe 2016 شاخص‌های نقطه پایانی شامل ارزیابی خسارت، عادی‌سازی و وزن‌دهی می‌باشد که هر کدام شامل طبقه‌های اثر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و منابع می‌باشد. نتایج حاصل از تعیین و مشخص نمودن شاخص‌های نقطه پایانی که متشکل از ارزیابی خسارت، عادی‌سازی و وزن‌دهی می‌باشد گویای آن است که در بررسی ارزیابی خسارت دسته منابع (۰/۱۵۳) بیشترین اثر را دارا می‌باشد. در این دسته مصرف برق (۰/۳۹) و خمیرچوب ($2/29 \times 10^{-6}$) بالاترین سهم از خسارات وارده را شامل می‌شوند. در عادی‌سازی نیز دسته سلامت انسان ($1/19 \times 10^{-4}$) بیشترین میزان اثر را به خود اختصاص داده‌است. در این دسته مصرف برق ($2/93 \times 10^{-5}$) و خمیرچوب ($2/85 \times 10^{-5}$) بیشترین سهم از خسارات را دارند. بررسی‌ها در وزن‌دهی نیز گویای آن است که دسته اکوسیستم (۸۵/۵) بیشترین سهم اثر را دارد. در این دسته محصول کاغذ تحریر (۶۰) و خمیرچوب (۲۲/۶) بیشترین سهم از خسارات را دارا می‌باشند. در نتیجه به طور مجموع بیشترین سهم از خسارات متوجه مصرف برق و خمیر چوب می‌باشد. داده‌ها در جداول ۳، ۴، ۵ قابل مشاهده است.

¹ Freshwater eutrophication

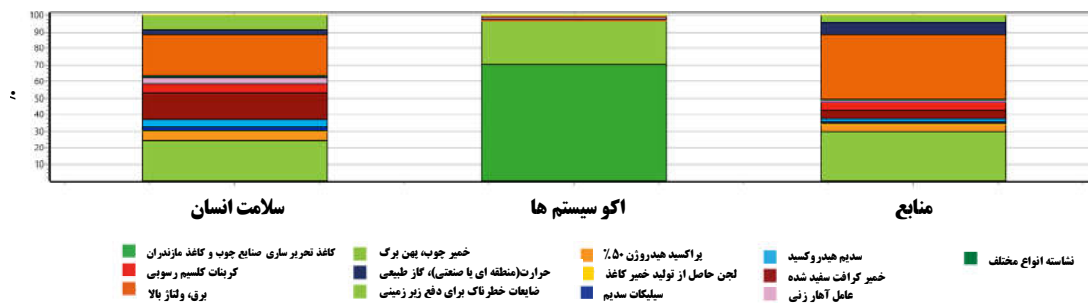
² Marine eutrophication



جدول ۳ تعیین شاخص‌های نقطه میانی کاغذ تحریر

دسته های اثر	واحد	مقدار کل	بیشترین سهم اثر (درصد)
تغییر آب و هوا (گرمایش جهانی، سلامت انسان)	DALY	$1/29 \times 10^{-6}$	مصرف برق
تغییر آب و هوا (گرمایش جهانی، اکوسیستم های زمینی)	Species.yr	$3/89 \times 10^{-9}$	مصرف برق
تغییر آب و هوا (گرم شدن کره زمین، اکوسیستم های آب شیرین)	Species.yr	$1/06 \times 10^{-13}$	مصرف برق
(به طور کلی ۳۱/۱٪)			
تخریب لایه ازن استراتوسفر	DALY	$5/56 \times 10^{-10}$	مصرف برق (۲۱/۶٪)
تشعشعات یونیزه	DALY	$1/04 \times 10^{-10}$	کربنات کلسیم رسوبی (PCC) (۵۴/۵٪)
تشکیل ازن	DALY	$4/08 \times 10^{-9}$	خمیر چوب (۵۳/۹٪)
تشکیل ذرات ریز	DALY	$1/22 \times 10^{-6}$	خمیر چوب (۳۰/۱٪)
تشکیل ازن، اکوسیستم های زمینی	Species.yr	6×10^{-10}	خمیر چوب (۵۴/۴٪)
اسیدی شدن زمین	Species.yr	$1/07 \times 10^{-9}$	خمیر چوب (۲۹/۲٪)
اوتروفیکاسیون آب شیرین	Species.yr	$1/07 \times 10^{-7}$	کاغذ تحریر (۱۰۰٪)
اوتروفیکاسیون دریایی	Species.yr	$1/88 \times 10^{-13}$	Sizing agent (۵۷/۱٪)
سمیت زیست محیطی زمینی	Species.yr	$3/2 \times 10^{-11}$	خمیر چوب (۴۳/۸٪)
سمیت زیست محیطی آب شیرین	Species.yr	$1/24 \times 10^{-12}$	Sizing agent (۲۰/۴٪)
سمیت زیست محیطی دریایی	Species.yr	$3/72 \times 10^{-13}$	خمیر چوب (۲۴/۷٪)
سمیت سرطان زا در انسان	DALY	$2/01 \times 10^{-7}$	خمیر کرافت رنگبری شده (۸۸٪/۱)
سمیت غیر سرطان زا در انسان	DALY	$4/9 \times 10^{-8}$	خمیر کرافت رنگبری شده (۵۸٪/۱)
کاربری زمین	Species.yr	$3/98 \times 10^{-8}$	خمیر چوب (۹۷/۵٪)
کمبود منابع معدنی	USD2013	$8/85 \times 10^{-4}$	خمیر چوب (۸۹/۸٪)
کمبود منابع فسیلی	USD2013	۰/۱۵۲	مصرف برق (۳۹/۳٪)
مصرف آب (سلامت انسان)	DALY	$6/02 \times 10^{-8}$	کربنات کلسیم رسوبی (PCC) (۳۶/۸٪)
مصرف آب (اکوسیستم زمینی)	Species.yr	$3/65 \times 10^{-10}$	کربنات کلسیم رسوبی (PCC) (۳۶/۹٪)
مصرف آب (اکوسیستم آبی)	Species.yr	$1/8 \times 10^{-14}$	کربنات کلسیم رسوبی (PCC) (۳۳٪)

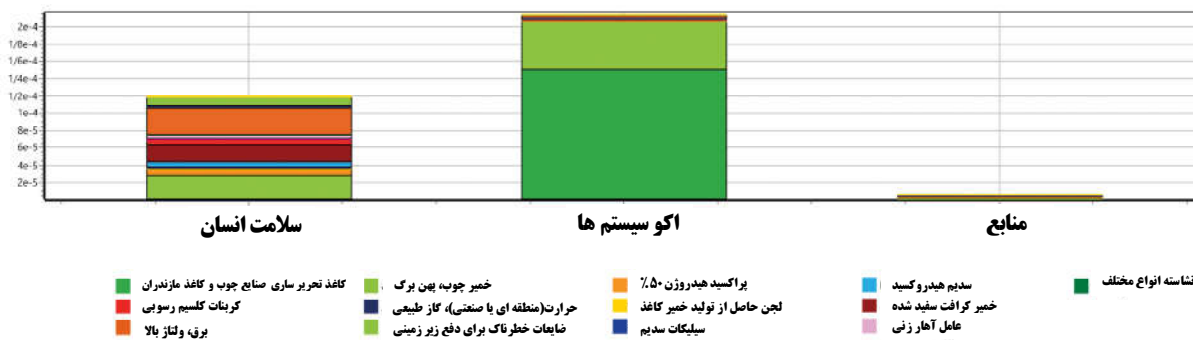
ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ.. ۲۳۲



شکل ۴ ارزیابی خسارت کاغذ تحریر

جدول ۴ ارزیابی خسارت کاغذ تحریر

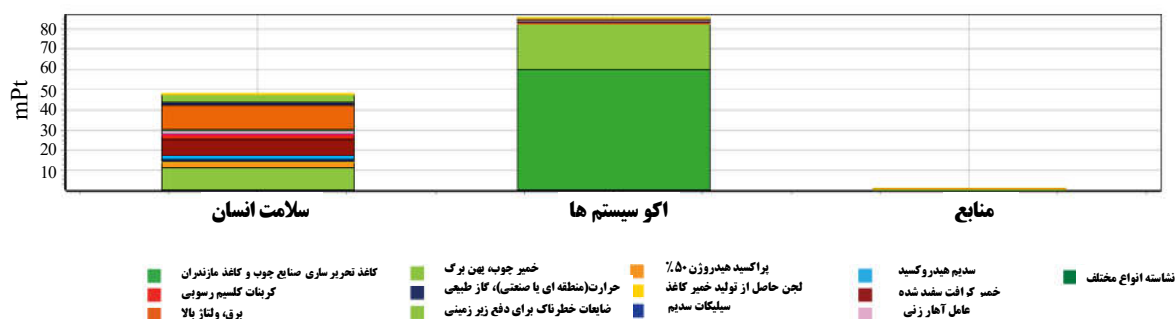
دسته خسارت	واحد	کل	بیشترین سهم اثر (درصد)
سلامت انسان	DALY	$2/83 \times 10^{-6}$	مصرف برق (۲۴/۶٪)، خمیرچوب (۲۴٪)
اکوسیستم ها	Species.yr	$1/53 \times 10^{-7}$	کاغذ تحریر (۷۰/۱٪)، خمیرچوب (۲۶/۴٪)
منابع	USD2013	۰/۱۵۳	مصرف برق (۳۹٪)، خمیرچوب (۲۹/۶٪)



شکل ۵ عادی سازی تولید کاغذ تحریر

جدول ۵ عادی سازی تولید کاغذ تحریر

دسته خسارت	کل	بیشترین سهم اثر (مقدار)
سلامت انسان	$1/19 \times 10^{-4}$	مصرف برق ($2/93 \times 10^{-5}$), خمیرچوب ($2/85 \times 10^{-5}$)
اکوسیستم ها	$2/14 \times 10^{-4}$	کاغذ تحریر (۰/۰۰۰۱۵), خمیر چوب ($5/64 \times 10^{-5}$)
منابع	$5/45 \times 10^{-6}$	مصرف برق ($2/13 \times 10^{-6}$), خمیرچوب ($1/61 \times 10^{-6}$)



شکل ۶ وزن دهی تولید کاغذ تحریر

جدول ۶ وزن دهی تولید کاغذ تحریر

دسته خسارت	واحد	کل	بیشترین سهم اثر (مقدار)
سلامت انسان	mPt	۴۷/۶	مصرف برق (۱۱/۷)، خمر چوب (۱۱/۴)
اکوسیستم ها	mPt	۸۵/۵	کاغذ تحریر (۶۰)، خمر چوب (۲۲/۶)
منابع	mPt	۱/۰۹	کاغذ تحریر (۰/۳۲۲)، مصرف برق (۰/۴۲۵)
کل	mPt	۱۳۴	

نتیجه گیری

ارزیابی چرخه حیات (LCA) رویکردی تحلیلی است که جریان‌های مرتبط با کل عمر یک محصول، از استخراج مواد خام تا تولید (در این مطالعه، کاغذ تحریر)، را بررسی می‌کند و ورودی‌ها (مواد و انرژی) و خروجی‌ها (انتشارات به هوا، آب و خاک) را در هر مرحله تعیین می‌نماید. نتایج کلی این مطالعه نشان داد که مصرف برق و خمر چوب بیشترین سهم از اثرات زیست‌محیطی را در فرایند تولید کاغذ تحریر دارند. با در نظر گرفتن داده‌های LCA و وضعیت موجود در خط تولید، چهار گلوگاه کلیدی آسیب و انتشار زیست‌محیطی شناسایی شده عبارتند از فرایند تولید و آماده‌سازی خمر، تجهیزات قدیمی و فرسوده، استفاده از کربنات کلسیم رسوبی (PCC)، و استفاده از چوب خام می‌باشند. دستاورد محوری این تحقیق، ترجمه موفقیت‌آمیز یافته‌های فنی و پیچیده زیست‌محیطی به مجموعه‌ای از راهکارهای عملی و قابل اجرا برای مدیریت و بهبود عملکرد کارخانه است. بر این اساس، استراتژی فوری کارخانه باید بر روی کاهش متمرکز اثرات ناشی از این عوامل اصلی متمرکز شود. در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی (که تأثیر اصلی آن از طریق برق است)، دو مسیر استراتژیک تعریف شده است: نخست، نوسازی و بازسازی تجهیزات، که مستلزم جایگزینی موتورهای پمپ‌های با بازده پایین با مدل‌های مدرن و راندمان بالا،

همراه با بهینه‌سازی دقیق سیستم‌های حرارتی و بخار پس از انجام یک ممیزی انرژی جامع برای شناسایی دقیق نقاط هدررفت است. دوم، ارزیابی امکان تأمین انرژی پاک از طریق نصب سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر، مانند پنل‌های خورشیدی، برای پوشش بخشی از نیازهای برق خطوط کم‌مصرف می‌باشد. در مدیریت منابع چوب و خمر، که مستقیماً به زنجیره تأمین مرتبط است، ضرورت دارد تا وابستگی به چوب خام کاهش یابد و سهم الیاف بازیافتی در ترکیب خمر نهایی افزایش یابد. این امر سرمایه‌گذاری در ارتقاء واحدهای پیش‌تصفیه و بهینه‌سازی فرآیندهای پالایش را برای دستیابی به کیفیت محصول مطلوب با کمترین مصرف انرژی و مواد اولیه ضروری می‌سازد. علاوه بر این، لازم است بازنگری دقیق در استفاده از افزودنی‌ها، به ویژه کربنات کلسیم رسوبی (PCC) صورت پذیرد؛ این شامل بهینه‌سازی دوز مصرفی برای اطمینان از انطباق آن با حداقل نیازهای فنی (سفیدی و کدوری) و همچنین ارزیابی اثرات محیطی فرآیند تولید داخلی PCC، در صورتی که این ماده در محل تولید می‌شود، خواهد بود. در نهایت، پایش و بهبود مستمر فرآیند آماده‌سازی خمر به عنوان یک گلوگاه سیستمی، نیازمند بازبینی شیمیایی دقیق برای شناسایی و جایگزینی مواد شیمیایی پرخطر با گزینه‌های پایدارتر، و همچنین بهبود مدیریت کلی ضایعات شامل لجن و پساب،

با تمرکز بر تبدیل آن‌ها به محصولات جانبی ارزشمند یا استفاده به عنوان سوخت جایگزین در صورت توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی، می‌باشد.

منابع

- (PCMs) for building applications: A review', *Journal of Building Engineering*, 6, pp. 133–143. doi: 10.1016/j.jobbe.2016.02.008.
- [9] Kovacic, I., Reisinger, J. and Honic, M. (2018) 'Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 1774–1786. doi: 10.1016/j.rser.2017.07.058.
- [10] Jiménez-González, C., Kim, S. and Overcash, M. (2000) 'Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, pp. 153–159. doi: 10.1007/BF02978615.
- [11] Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. and Van Zelm, R. (2017) *ReCiPe2016 v1.1. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization*. Nijmegen: Department of Environmental Science, Radboud University.
- [12] Jiménez-González, C., Kim, S. and Overcash, M. (2000) 'Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, pp. 153–159. doi: 10.1007/BF02978615.
- [13] ISO (2006) *ISO 14040: Environmental Management–Life Cycle Assessment. Principles and Framework*. Geneva: International Organization for Standardization.
- [14] Jiang, S., Binjie, L. and Shen, Y. (2021) 'The influence of pulp and paper industry on environment', *E3S Web of Conferences (MSETEE 2021)*, 308, p. 02007. doi: 10.1051/e3sconf/202130802007.
- [15] Mahmood, K., Ur Rehman, S., Wang, J., Farooq, F., Mahmood, Q., Jadoon, A., Javed, M. and Ahmad, I. (2019) 'Treatment of Pulp and Paper Industrial Effluent Using Physicochemical Process for Recycling', *Water*, 11(11), p. 2393. doi: 10.3390/w11112393.
- [16] Cepi (2024) *Key Statistics 2023*. pp.17.
- [17] EPA (2021) *2011–2021 Greenhouse Gas Reporting Program Sector Profile: Pulp and Paper*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- [1] Moosavi, M., Ghorbannezhad, P., Azizi, M. and Zarea-Hosseiniabadi, H. (2021) 'Evaluation of Life cycle assessment in a paper manufacture by analytical hierarchy process', *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), pp. 1647–1657. doi: 10.1080/19397038.2021.1982065.
- [2] Dai, M., Sun, M., Chen, B., Shi, L., Jin, M., Man, Y., Liang, Z., Almeida, C., Li, J., Zhang, P., Chiu, A., Xu, M., Yu, H., Meng, J. and Wang, Y. (2024) 'Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry', *Nature*, 626, pp. 327–334. doi: 10.1038/s41586-023-06962-0.
- [3] Dionne, J. and Walker, T. (2021) 'Air pollution impacts from a pulp and paper mill facility located in adjacent communities, Edmundston, New Brunswick, Canada and Madawaska, Maine, United States', *Environmental Challenges*, 5, p. 100245. doi: 10.1016/j.envc.2021.100245.
- [4] Gupta, G., Shukla, P. and Liu, H. (2019) 'Pulp and paper industry-based pollutants, their health hazards and environmental risks', *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, pp. 48–56. doi: 10.1016/j.coesh.2019.09.010.
- [5] Mysen, T. (2012) 'Sustainability as corporate mission and strategy', *European Business Review*, 24(6), pp. 496–509. doi: 10.1108/09555341211270519.
- [6] FAO (2019) *Global forest products 2018*. Rome: UNECE, FAO Forestry Department.
- [7] Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. and Suh, S. (2009) 'Recent developments in Life Cycle Assessment', *Journal of Environmental Management*, 91(1), pp. 1–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [8] Kylili, A. and Fokaides, P.A. (2016) 'Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials