



بررسی ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید کاغذ بر مبنای رویکرد ارزیابی چرخه حیات، مطالعه موردی: کارخانه گلستان کاغذ پرشیا

شقایق ابراهیمی^۱، سیدحامد میرکریمی^۲، سپیده سعیدی^۳✉، فاطمه هاشمی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آمایش محیط زیست، گروه علوم محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۲- دانشیار، گروه علوم محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۳- استادیار، گروه علوم محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۴- استادیار، گروه اکروکولوژی، دانشگاه ارسوس، تجله، دانمارک

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	تولید کاغذ به دلیل مصرف منابعی چون آب، مواد معدنی و سوخت‌های فسیلی، نیازمند ارزیابی اثرات محیط‌زیستی است. بررسی موردی در کارخانه‌های داخلی مانند کارخانه گلستان کاغذ پرشیا می‌تواند گامی کاربردی به منظور تولید پایدار و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد علمی باشد. در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر، با هدف ارزیابی اثرات محیط‌زیستی منطبق بر استاندارد ISO 14040 در کارخانه گلستان کاغذ پرشیا در استان گلستان انجام شده است. مرز مطالعه در این تحقیق به صورت دروازه تا دروازه و واحد عملکردی یک تن کاغذ در نظر گرفته شد. در این پژوهش برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی از نرم افزار Simapro ورژن ۹.۰.۰.۳۵ و روش‌های EF و GHG به ترتیب برای ارزیابی ردپای بوم‌شناختی و اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بهره گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ردپای بوم‌شناختی فرایند تولید کاغذ برابر ۷/۳ Pt- و اثر گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ در این کارخانه برابر ۱/۱۱- کیلوگرم معادل دی اکسید کربن است. از میان تمام ورودی‌های فرایند تولید کاغذ، پوشال سفید و کارتن قهوه‌ای بیشترین نقش مثبت و استفاده از کربنات کلسیم، بیشترین سهم منفی را در اثرات محیط‌زیستی داشتند. در این کارخانه، با جایگزینی مواد زیست‌دوست‌تر به جای مواد اولیه‌ای که اثر منفی چشم‌گیری دارند و استفاده از انرژی‌های پاک با اثرات کمتر محیط‌زیستی، می‌توان فرایند تولید کاغذ را با محیط‌زیست سازگارتر کرد. این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی چرخه حیات، می‌تواند ابزاری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی در صنعت کاغذسازی باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰	
کلید واژه‌ها: ردپای بوم‌شناختی، ردپای گازهای گلخانه‌ای، ارزیابی چرخه حیات، سیماپرو، کارخانه گلستان کاغذ پرشیا	



Investigating the ecological footprint of the paper production process based on the life cycle assessment approach (Case study: Persia Golestan Paper Factory)

Shaghayegh Ebrahimi¹, Seyed Hamed Mirkarimi², Sepideh Saeidi^{3✉}, Fatemeh Hashemi⁴

1. Crop and Horticultural Sciences Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Semnan Province (Shahrood), AREEO, Shahrood, Iran.
2. Department of Food Sciences and Industry, School of Nutrition, Food Sciences, Management and Medical Information, Semnan University of Medical Sciences and Health Services, Semnan, Iran
3. Department of Plant Protection, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Semnan Province (Shahrood), AREEO, Shahrood, Iran.
4. Pistachio Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran
5. Economic, Social and Extension Research Department, Gilan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

Article Info	Abstract
Article type: Research Article Article history: Received: 2025/06/09 Accepted: 2025/09/15 Available online: 2025/12/01 Keywords: Ecological Footprint, Greenhouse Gas Footprint, Life Cycle Assessment, SimaPro, Persia Golestan Paper Factory	Paper production, due to the consumption of resources such as water, minerals, and fossil fuels, requires a comprehensive assessment of its environmental impacts. Conducting case studies in domestic industries, such as the Golestan Persia Paper Factory, provides practical insights for sustainable production and evidence-based decision-making. In this study, a life cycle assessment (LCA) of the white top liner paper production process was performed at the Golestan Persia Paper Factory in Golestan Province, with the aim of evaluating environmental impacts in accordance with ISO 14040 standards. The system boundary was defined as gate-to-gate, and the functional unit was one ton of paper. SimaPro software (version 9.0.0.35) was used to assess environmental impacts, applying the EF and GHG methods to evaluate ecological footprint and greenhouse gas emissions, respectively. The results indicated that the ecological footprint of the paper production process was -7.3 Pt, while the greenhouse gas emissions amounted to -11.1 kg CO₂-equivalent. Among all process inputs, white wastepaper and brown cardboard contributed most positively to reducing impacts, whereas calcium carbonate had the highest negative contribution. Substituting raw materials with more environmentally friendly alternatives and employing cleaner energy sources can enhance the environmental compatibility of the paper production process. This study highlights that life cycle assessment can serve as a valuable tool for managerial decision-making and environmental policymaking within the paper manufacturing industry.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، گسترش صنایع تبدیلی و فرآیندی به‌ویژه در حوزه تولید مواد پرمصرف، اثرات محیط‌زیستی چشمگیری به همراه داشته است. صنعت تولید کاغذ، یکی از صنایعی است که به‌دلیل مصرف قابل توجه منابع طبیعی مانند آب، انرژی و مواد شیمیایی، و همچنین تولید انواع آلاینده‌ها، به‌عنوان یکی از صنایع با ردپای محیط‌زیستی بالا شناخته می‌شود (اسمیت^۱ و جانسون^۲، ۲۰۲۰؛ ژو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی^۴ و کیم^۵، ۲۰۱۹؛ اسپرر^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). فرآیندهای متعدد تولید کاغذ، از تهیه خمیر و سفیدسازی تا خشک کردن و شکل‌دهی نهایی، عمدتاً با استفاده از سوخت‌های فسیلی انجام می‌شوند و پیامدهایی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش آلودگی در آب، خاک و هوا را به‌همراه دارند. در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای علمی مختلفی برای شناسایی و مدیریت اثرات محیط‌زیستی توسعه یافته‌اند. یکی از مهم‌ترین این ابزارها ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۷ است که با بررسی سیستماتیک اثرات محیط‌زیستی یک محصول یا فرآیند در تمام مراحل چرخه عمر - از استخراج مواد اولیه تا دفع نهایی - به‌عنوان چارچوبی معتبر در سطح بین‌المللی شناخته می‌شود (موسوی^۸ و همکاران، ۲۰۲۱؛ بومن^۹ و تیلان^{۱۰}، ۲۰۰۴). مزیت اصلی LCA در تحلیل کمی و مقایسه‌پذیر اثرات محیط‌زیستی، آن را به ابزاری کلیدی برای تصمیم‌گیری، شناسایی نقاط بحرانی و ارتقای پایداری در صنایع مختلف تبدیل کرده است (ویدمن^{۱۱} و بارت^{۱۲}، ۲۰۱۰؛ ریز^{۱۳} و واکانجل^{۱۴}، ۱۹۹۶). از جمله نرم‌افزارهای تخصصی مورد استفاده در پیاده‌سازی این رویکرد می‌توان به SimaPro، GaBi، openLCA و OneClick LCA اشاره کرد که هر یک قابلیت‌های خاصی در مدل‌سازی، تحلیل سناریو و پایش شاخص‌های عملکرد محیط‌زیستی دارند (پیزول^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۷). در این میان، نرم‌افزار SimaPro به‌دلیل دارا بودن پایگاه‌های داده گسترده، رابط گرافیکی پیشرفته و پشتیبانی از روش‌های استاندارد بین‌المللی، کاربرد وسیعی در ارزیابی محیط‌زیستی محصولات دارد (پیزول و همکاران، ۲۰۱۷).

مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که به‌کارگیری LCA در صنعت کاغذ، امکان شناسایی سهم هر یک از مراحل فرآیند در مصرف منابع، تولید آلاینده‌ها و ردپای کربنی را فراهم کرده و می‌تواند نقش مهمی در سیاست‌گذاری برای کاهش اثرات محیط‌زیستی ایفا کند (گائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ گیوالا و همکاران، ۲۰۲۰). به‌عنوان نمونه، وانگ و همکاران (۲۰۱۲) سه سناریوی مدیریت ضایعات کاغذ (بازیافت، تولید بیواتانول و سوزاندن با بازده انرژی) را با استفاده از نرم‌افزار SimaPro و شاخص‌های محیط‌زیستی مختلف بررسی کردند و نشان دادند که سوزاندن با فناوری‌های نوین کمترین پیامد محیط‌زیستی را دارد. مزیت این روش در تحلیل کمی و مقایسه‌پذیر اثرات محیط‌زیستی، آن را به ابزاری کلیدی برای تصمیم‌گیری محیط‌زیستی، شناسایی نقاط بحرانی و ارتقای پایداری در صنایع مختلف تبدیل کرده است (ویدمن^{۱۱} و بارت^{۱۲}، ۲۰۱۰؛ ریز^{۱۳} و واکانجل^{۱۴}، ۱۹۹۶). از جمله نرم‌افزارهای تخصصی مورد استفاده در پیاده‌سازی این رویکرد می‌توان به SimaPro، GaBi، openLCA و OneClick LCA اشاره کرد که هر یک قابلیت‌هایی خاص در مدل‌سازی، تحلیل سناریو و پایش شاخص‌های عملکرد محیط‌زیستی دارند (پیزول^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۷). در این میان، SimaPro به‌دلیل دارا بودن پایگاه‌های داده گسترده، رابط گرافیکی پیشرفته و پشتیبانی از روش‌های استاندارد بین‌المللی ارزیابی، به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی محیط‌زیستی محصولات به‌کار گرفته می‌شود (پیزول و

¹ Smith² Johnson³ Zhou⁴ Lee⁵ Kim⁶ Scherer⁷ Life Cycle Assessment⁸ Mousavi⁹ Baumann¹⁰ Tillman¹¹ Wiedmann¹² Barrett¹³ Rees¹⁴ Wackernagel¹⁵ Pizzol

همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات بین‌المللی نیز مؤید این امر هستند که به‌کارگیری LCA در صنعت کاغذ، امکان شناسایی سهم هریک از مراحل فرآیند در مصرف منابع، تولید آلاینده‌ها و ردپای کربنی را فراهم می‌آورد و می‌تواند نقش مهمی در سیاست‌گذاری برای کاهش اثرات محیط‌زیستی ایفا کند (گائو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲؛ گیوالا^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیقی توسط وانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۲) سه سناریوی مدیریت ضایعات کاغذ (بازیافت، تولید بیواتانول و سوزاندن با بازده انرژی) به کمک نرم‌افزار SimaPro و شاخص‌های محیط‌زیستی مختلف مانند پتانسیل گرم شدن زمین، سمیت انسانی و سمیت محیط‌زیستی بررسی شد. نتایج نشان داد که سوزاندن با فناوری‌های نوین کمترین پیامد محیط‌زیستی را دارد. در مطالعه‌ای دیگر، توماس^۴ و لیو^۵ (۲۰۱۳) گزینه‌های فیبری جایگزین مانند بامبو، کنف و کاه گندم را به کمک تحلیل LCA بررسی کردند و دریافتند که برخی جایگزین‌ها، از جمله بامبو، در مراحل اولیه تولید، مصرف آب و انرژی پایین‌تر و ردپای محیط‌زیستی کمتری دارند. سباستیاو^۶ و همکاران (۲۰۱۶) نیز تولید بیواتانول از خمیر و لجن کاغذ را در کارخانه‌ای در پرتغال مورد تحلیل LCA قرار دادند و نشان دادند که استفاده هم‌زمان از این مواد، ضمن کاهش ضایعات، پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی محیط‌زیستی دارد. مطالعه محامدی^۷ و همکاران (۲۰۱۷) نیز به ارزیابی LCA بر پایه مدل IMPACT2002+ برای تولید کاغذ از چوب خام و ضایعات چوب پرداخت و نشان داد که استفاده از ضایعات چوب می‌تواند اثرات مثبت‌تری بر سلامت انسان و اکوسیستم داشته باشد. در همین راستا، سیلوا^۸ و همکاران (۲۰۲۰) و دفئو^۹ (۲۰۲۱) نیز با استفاده از نرم‌افزار SimaPro تأثیرات محیط‌زیستی تولید کاغذ از منابع مختلف انرژی (حرارتی و برقی) و مواد اولیه بازیافتی را تحلیل کردند. نتایج تحقیق سیلوا و همکاران (۲۰۲۰) و دفئو (۲۰۲۱) نشان داد که مصرف انرژی فسیلی و مواد شیمیایی بیشترین سهم را در آلودگی محیطی دارند. در یک تحلیل کلان، تام‌برلین^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳) داده‌های محیط‌زیستی ۲۵۲ کارخانه کاغذسازی در ایالات متحده آمریکا را بررسی کرده و دریافتند که به‌طور میانگین، انتشار کربن دی‌اکسید معادل برای هر تن کاغذ حدود ۹۴۲ کیلوگرم است و مصرف سوخت بیشترین سهم را در این مقدار به خود اختصاص داده است. در نهایت، مطالعه پترووا^{۱۱} (۲۰۲۳) با ترکیب دو رویکرد LCA و ردپای اکولوژیک (EF)، چارچوبی جامع برای تحلیل چند بعدی اثرات محیط‌زیستی پیشنهاد کرد که امکان بررسی هم‌زمان مصرف منابع، اشغال زمین و انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد.

مطالعات مرور شده نشان می‌دهند که به‌کارگیری ارزیابی چرخه حیات با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند SimaPro، ابزار مؤثری برای شناسایی نقاط بحرانی فرآیندهای تولید کاغذ محسوب می‌شود. این مطالعات بر اهمیت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انرژی در مرحله خشک‌سازی، کاهش مصرف مواد شیمیایی در مرحله سفیدسازی، و به‌کارگیری مواد اولیه جایگزین و قابل بازیافت تأکید داشته‌اند. با وجود پیشرفت‌های جهانی، در سطح داخلی هنوز فقدان داده‌های دقیق و کمبود مطالعات موردی مبتنی بر LCA، مانعی در مسیر برنامه‌ریزی محیط‌زیستی و بهینه‌سازی عملکرد کارخانه‌ای به شمار می‌رود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۹). از این‌رو، بررسی موردی در کارخانه‌های داخلی مانند کارخانه گلستان کاغذ پرشیا می‌تواند گامی کاربردی در جهت تولید پایدار و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد علمی باشد.

¹ Gao² Gheewala³ Wange⁴ Thomas⁵ Liu⁶ Sebastião⁷ M'Hamdi⁸ Silva⁹ De Feo¹⁰ Tomberlin¹¹ Petrova

مواد و روش

۱. واحد مورد مطالعه

واحد مورد مطالعه در این پژوهش کارخانه گلستان کاغذ پرشیا است. این کارخانه در سال ۱۳۹۴، در شهرستان آق قلاهی استان گلستان در زمینی به مساحت ۲۵۰۰۰ مترمربع جهت تولید کاغذ و مقوا بهره‌برداری شد و جزء صنایع با مواد اولیه بازیافتی است. این کارخانه دارای ۱۱ واحد مختلف است که شامل انبار مواد اولیه، خمیرسازی، خط تولید، دیگ بخار، آزمایشگاه کنترل کیفی، تصفیه‌خانه، برق، انبار قطعات، واحد فنی، واحد اداری و انبار محصولات است و محصول خروجی این کارخانه کاغذ تاپ وایت لاینر^۱ است.

۲. روش کار

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی اثرات محیط‌زیستی فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در کارخانه گلستان کاغذ پرشیا، انجام شد. برای این منظور، از رویکرد ارزیابی چرخه حیات بر اساس استاندارد بین‌المللی ISO 14040 استفاده شد، تا تمامی مراحل تولید کاغذ، از ورود مواد اولیه تا خروج محصول نهایی، به‌صورت جامع تحلیل شوند. این رویکرد طی چهارم گام اصلی به شرح زیر عملیاتی می‌شود:

۳. گام اول: تعیین هدف و دامنه سیستم

تعیین هدف و دامنه سیستم، نخستین و مهم‌ترین مرحله در ارزیابی چرخه حیات است که محدوده، اهداف و مرزهای مطالعه را مشخص می‌کند تا تحلیل دقیق و هدفمند انجام شود (ISO 14040، ۲۰۰۶). در این مطالعه هدف ارزیابی ردپای بوم‌شناختی و ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در بازه زمانی یک ساله (۱۴۰۲) است. مرز مطالعه به صورت دروازه تا دروازه و واحد عملکردی یک تن کاغذ تاپ وایت لاینر در نظر گرفته شد.

۴. گام دوم: فهرست‌نویسی

این مرحله شامل جمع‌آوری کامل و دقیق داده‌های ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، از جمله مصرف منابع، انرژی، مواد اولیه، و آلاینده‌های منتشر شده است. این اطلاعات، پایه‌ای برای تحلیل اثرات محیط‌زیستی است. فهرست‌نویسی در سه بخش شامل محصولات (کاغذ تاپ وایت لاینر)، ورودی‌های به سیستم و خروجی‌ها از سیستم انجام شد. در این مطالعه ورودی‌ها شامل مواد اولیه فرایند تولید (پوشال سفید، کارتن قهوه‌ای، سنگ نمک، کربوکسی‌متیل سلولز، سدیم سولفات، پلی آلومینوم کلراید، پلی اکریل آمید، نشاسته گندم، آمونیوم سولفات، کربنات موادسازی (کلسیم کربنات)، آنتی فوم، الکیل کتن دیمر (AKD) و آب ژاول)، مصرف انرژی رفت و آمد پرسنل، مصرف انرژی فرایند تولید (گاز طبیعی، گازوئیل و برق) و خروجی‌ها از فرایند شامل پساب، پسماندها و انتشارات به هوا است (شکل ۱). با وجود تعریف محدوده به‌صورت «دروازه تا دروازه»، حمل‌ونقل پرسنل نیز لحاظ گردید؛ زیرا حضور نیروی انسانی برای بهره‌برداری کارخانه ضروری است و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رفت‌وآمد کارکنان می‌تواند سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. همچنین، سازمان‌هایی که رویکرد O-LCA^۲ را به کار برده‌اند، توصیه کرده‌اند این عنصر در تحلیل گنجانده شود (پلتسر^۳ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ارث‌شیفت گلوبال^۴، ۲۰۲۰ و اکوهج^۵،

^۱. Top white liner

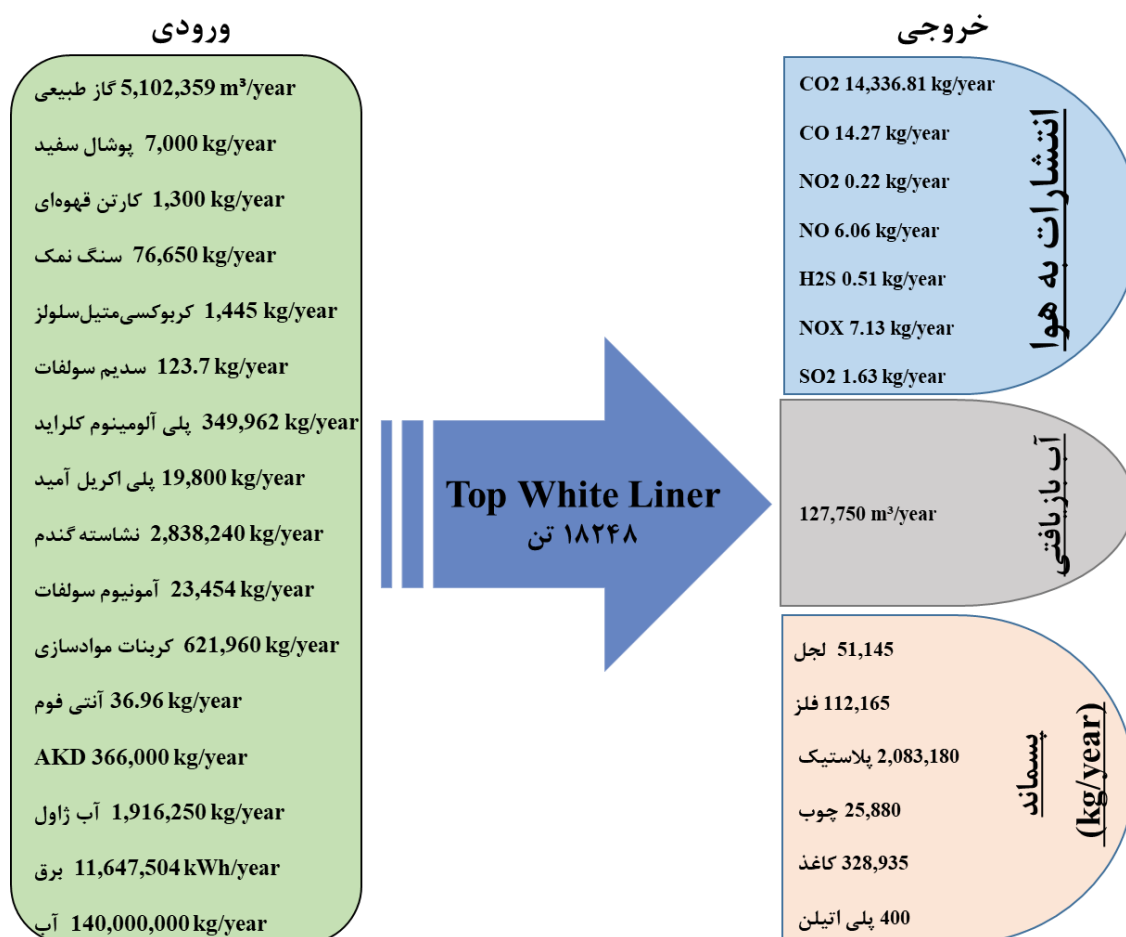
^۲. Organizational Life Cycle Assessment

^۳ Pelzeter

^۴ EarthShift Global

^۵ EcoHedge

۲۰۲۳). ارائه این داده‌ها ضمن افزایش دقت مطالعات، امکان استفاده مدیریتی برای بهینه‌سازی حمل‌ونقل کارکنان را نیز فراهم می‌سازد.



شکل ۱- ورودی و خروجی کارخانه گلستان کاغذ پرشیا

۵. گام سوم: ارزیابی اثرات چرخه حیات

در این گام، داده‌های فهرست‌نویسی شده به شاخص‌های اثرگذار محیط‌زیستی تبدیل می‌شوند تا اثرات مختلف بر محیط‌زیست سنجیده شود. روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات وجود دارد که در این مطالعه از روش ردپای بوم‌شناختی و روش ارزیابی انتشارات گازهای گلخانه‌ای (GHG^۱) برای ارزیابی اثرات استفاده شده است.

روش ردپای بوم‌شناختی به عنوان زمین و آبی که از نظر بیولوژیکی مصرف می‌شود، جمعیت برای تولید منابع مورد نیاز و امحاء بخشی از زباله‌های تولید شده توسط مصرف سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای محاسبه می‌شود. در این روش ردپای بوم‌شناختی برابر است با (Sustainability, 2016; ISO 14040, 2006):

$$EF = EF_{direct} + EF_{CO2} + EF_{nuclear}$$

¹ Greenhouse Gases

ردپای بوم‌شناختی = مجموع میزان اشغال مستقیم و غیرمستقیم زمین، میزان استفاده از انرژی هسته‌ای و میزان

انتشار CO₂ ناشی از مصرف منابع فسیلی

برای دستیابی به ردپای بوم‌شناختی فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در مرحله ارزیابی اثرات چهار گام زیر اجرا شد:

- مشخصه‌سازی
- نرمال‌سازی
- وزن‌دهی
- نمره نهایی

در این مطالعه علاوه بر استفاده از روش EF برای بررسی ردپای بوم‌شناختی، از روش ارزیابی انتشارات گازهای گلخانه‌ای (GHG) نیز برای بررسی اثرات گلخانه‌ای مرتبط با کارخانه استفاده شد.

روش GHG در نرم‌افزار SimaPro برای محاسبه مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن به کار می‌رود. در این روش، این گازها با استفاده از ضرایب پتانسیل گرمایش جهانی که توسط IPCC تعیین شده، به معادل دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند. این روش فقط شامل مرحله مشخصه‌سازی و وزن‌دهی است و نتیجه به صورت عددی معادل دی‌اکسید کربن نمایش داده می‌شود. این روش ساده و دقیق برای محاسبه ردپای کربن یک محصول یا فرآیند استفاده می‌شود.

۶. گام چهارم: تفسیر نتایج

این مرحله شامل تحلیل جامع نتایج ارزیابی اثرات و فهرست‌نویسی برای استخراج نتایج کلیدی، محدودیت‌ها و ارائه پیشنهادها مدیریتی است که به تصمیم‌گیری کمک می‌کند (ISO 14040, 2006). هدف، اطمینان از جامعیت، صحت و کاربردپذیری نتایج است. در این مطالعه پس از تحلیل داده‌ها، مهم‌ترین اثرات محیط‌زیستی مرتبط با فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر شناسایی و راهکارهای کاهش اثرات منفی ارائه خواهد شد.

• یافته‌های پژوهش

۷. نتایج مربوط به برآورد ردپای بوم‌شناختی

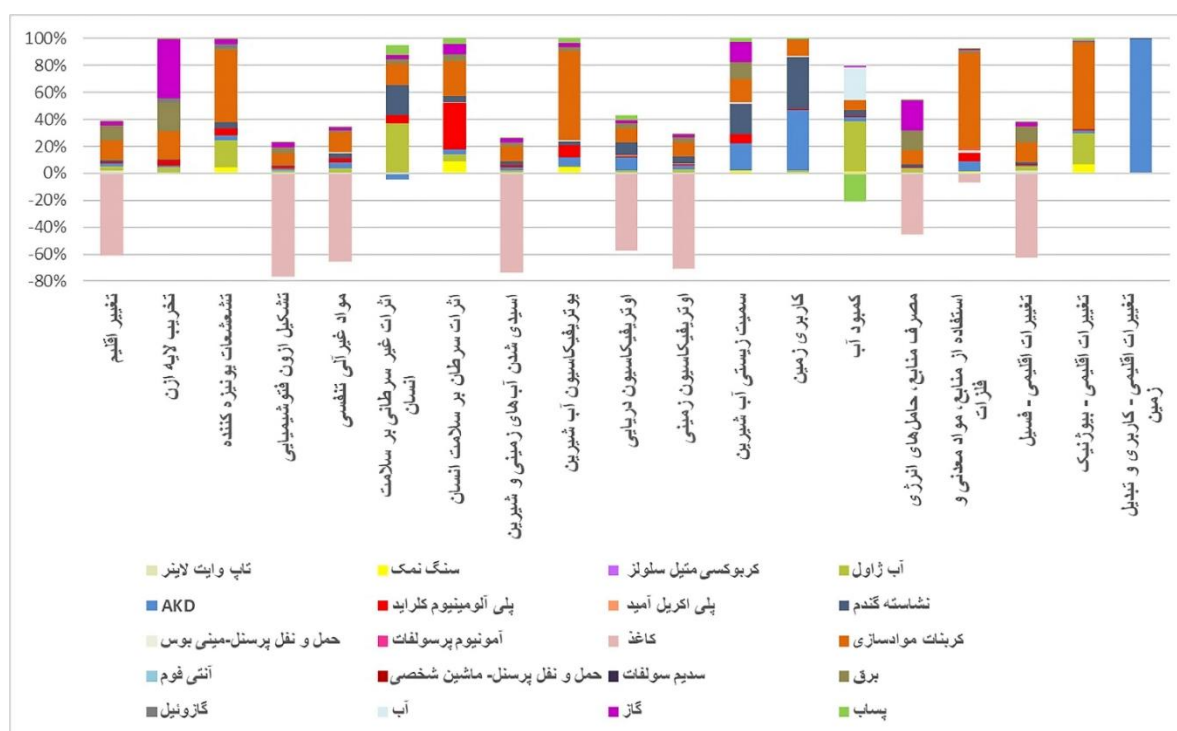
جهت برآورد ردپای بوم‌شناختی فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در کارخانه گلستان کاغذ پرشیا مراحل مشخصه‌سازی، نرمال‌سازی، وزن‌دهی و نمره نهایی انجام شد که در ادامه نتایج مراحل مشخصه‌سازی و وزن‌دهی و نمره نهایی تشریح می‌گردد.

۸. مشخصه‌سازی ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید کاغذ

در گام مشخصه‌سازی، اثرات مداخلات محیط‌زیستی شناسایی شده در مرحله سیاهه‌نویسی به طبقات مختلف اثر تخصیص داده می‌شوند. در این مرحله، هر مداخله (اعم از انتشار یا مصرف منابع) بر اساس ضریبی که نشان‌دهنده سهم نسبی آن در ایجاد یک طبقه اثر محیط‌زیستی است، کمی‌سازی شده و برحسب واحد متعارف مربوط به آن طبقه بیان می‌شود. با این حال، به دلیل تفاوت در واحدهای اندازه‌گیری میان طبقات مختلف اثر، مقایسه مستقیم عددی بین آن‌ها در این مرحله امکان‌پذیر نیست. از این رو، نرمال‌سازی و وزن‌دهی در مراحل بعدی انجام خواهد شد تا امکان مقایسه و تحلیل دقیق‌تر فراهم گردد. نتایج به‌دست‌آمده از مرحله مشخصه‌سازی مربوط تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده‌اند.

جدول (۱) نتایج مشخصه‌سازی ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

مقدار نهایی	واحد اندازه‌گیری	طبقه اثر	
۳۵۳۹/۰۴	kg CO2 eq	Climate change	تغییر اقلیم
۰/۰۰۲	kg CFC11 eq	Ozone depletion	تخریب لایه ازن
۱۴۸۹/۲۹	kBq U-235 eq	Ionising radiation, HH	تشعشعات یونیزه کننده
۱۴۰/۲۲	kg NMVOC eq	Photochemical ozone formation, HH	تشکیل اوزون فتوشیمیایی
۰/۰۰۳	disease inc.	Respiratory inorganics	مواد غیرآلی تنفسی
۰/۰۰۶	CTUh	Non-cancer human health effects	اثرات غیر سرطانی بر سلامت انسان
۰/۰۰۲	CTUh	Cancer human health VN\HDfects	اثرات سرطان بر سلامت انسان
۱۵۱/۸۴	mol H+ eq	Acidification terrestrial and freshwater	اسیدی شدن آب‌های زمینی و شیرین
۱۱/۰۷	kg P eq	Eutrophication freshwater	یوتروفیکاسیون آب شیرین
۳۹/۳۵	kg N eq	Eutrophication marine	یوتروفیکاسیون دریایی
۴۳۲/۹۴	mol N eq	Eutrophication terrestrial	یوتروفیکاسیون زمینی
۴۱۳۷۸/۴۶	CTUe	Ecotoxicity freshwater	سمیت زیستی آب شیرین
۴۵۴۵۱۰۶	Pt	Land use	کاربری زمین
۱۷۳۸۳/۶۷	m3 depriv.	Water scarcity	کمبود آب
۲۹۹۱۷۲/۲	MJ	Resource use, energy carriers	مصرف منابع، حامل‌های انرژی
۰/۰۹۳	kg Sb eq	Resource use, mineral and metals	استفاده از منابع، مواد معدنی و فلزات
۳۵۳۵۰/۱۶	kg CO2 eq	Climate change - fossil	تغییرات اقلیمی - فسیلی
۲۰/۸۳۷	kg CO2 eq	Climate change - biogenic	تغییرات اقلیمی - بیوژنیک
۲۲/۰۳۶	kg CO2 eq	Climate change - land use and transform.	تغییرات اقلیمی - کاربری و تبدیل زمین



شکل (۲) نتایج مشخصه‌سازی ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

با توجه به شکل ۲، کربنات موادسازی (کلسیم کربنات) در طبقات اثر تشعشعات یونیزه‌کننده (به دلیل مصرف برق در فرآوری)، بوتریفیکاسیون آب شیرین (در اثر ورود پساب حاوی مواد معدنی به منابع آبی)، مصرف منابع معدنی و فسیلی (ناشی از استخراج و حمل سنگ آهک)، و تغییرات اقلیمی بیوژنیک تأثیر منفی قابل توجهی دارد.

در طبقه کاربری زمین و تغییرات اقلیمی (کاربری و تبدیل زمین) بیشترین اثر سوء، مربوط به مواد AKD است. این اثرات عمدتاً ناشی از استخراج و مصرف منابع اولیه آلی و انرژی فسیلی در مراحل تولید این ماده است. در طبقه کمبود منابع و و اثرات غیر سرطانی بر سلامت انسان، آب ژاول که برای سفیدسازی خمیر کاغذ استفاده می‌شود، اثر منفی دارد. این مسئله به دلیل انتشار ترکیبات کلرینه و اثرات سمی آن بر انسان و محیط است.

در نمودار ارائه‌شده، مقادیر منفی حاصل از ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، نشان‌دهنده ماهیت زیست‌دوست ماده، فرآیند یا اقدام مورد نظر هستند. در مورد کارخانه گلستان کاغذ پرشیا، پساب خروجی پس از ترک خطوط تولید به واحد تصفیه‌خانه منتقل می‌شود و پس از انجام فرآیند تصفیه، آب بازیابی‌شده مجدداً به چرخه تولید بازمی‌گردد و در فرایندهای مختلف تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند باعث کاهش قابل توجه مصرف منابع آب تازه شده و در نهایت به کاهش اثر بر محیط‌زیست و بهبود کارایی بوم‌شناختی و کاهش ردپای بوم‌شناسی سیستم تولید منجر می‌شود.

کارخانه گلستان کاغذ پرشیا یک واحد تولیدی مبتنی بر بازیافت است که در فرآیند تولید کاغذ، به‌جای استفاده از الوار چوب، از پوشال‌های سفید و کارتن‌های قهوه‌ای بازیافتی به‌عنوان ماده اولیه بهره می‌گیرد. این رویکرد بازیافت‌محور نه تنها منجر به کاهش مصرف منابع طبیعی تجدیدنپذیر می‌شود، بلکه تأثیرات محیط‌زیستی مثبتی نیز به‌دنبال دارد. استفاده از مواد بازیافتی به‌عنوان خوراک ورودی، اثر زیست‌دوست قابل توجهی بر طبقات مختلف از جمله تغییر اقلیم، تشکیل ازن، مواد غیرآلی، اسیدی شدن آب، بوتریفیکاسیون زمینی و دریایی و مصرف منابع داشته است. این نتایج بیانگر نقش مؤثر این کارخانه در کاهش بارگذاری بر محیط‌زیست و ارتقاء شاخص‌های پایداری در صنعت تولید کاغذ است.

۹. وزن دهی و محاسبه نمره نهایی ردپای اکولوژی کاغذ تاپ وایت لاینر

وزن دهی، به عنوان چهارمین و نهایی ترین مرحله از ارزیابی چرخه حیات (LCA)، نقش کلیدی در تلفیق و تفسیر نتایج ایفا می کند. در این مرحله، نتایج نرمال سازی شده برای هر طبقه اثر، در ضرایب وزنی مشخصی ضرب می شود که این ضرایب نشان دهنده اهمیت نسبی هر طبقه از دیدگاه سیاست گذاری، سلامت انسان، و پایداری محیط زیستی هستند. هدف نهایی، دستیابی به یک نمره تجمیعی است که نمایانگر اثر کل نگر محیط زیستی سیستم مورد مطالعه باشد. در روش Ecological Footprint، وزن دهی بر اساس دو فاکتور اصلی انجام می شود (ساللا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸):

❖ ضریب ۴۰۰ برای شاخص های سطح میانی مرتبط با سلامت انسان و کیفیت اکوسیستم ها، که نشان از اولویت بالای این دو حوزه در ارزیابی دارد.

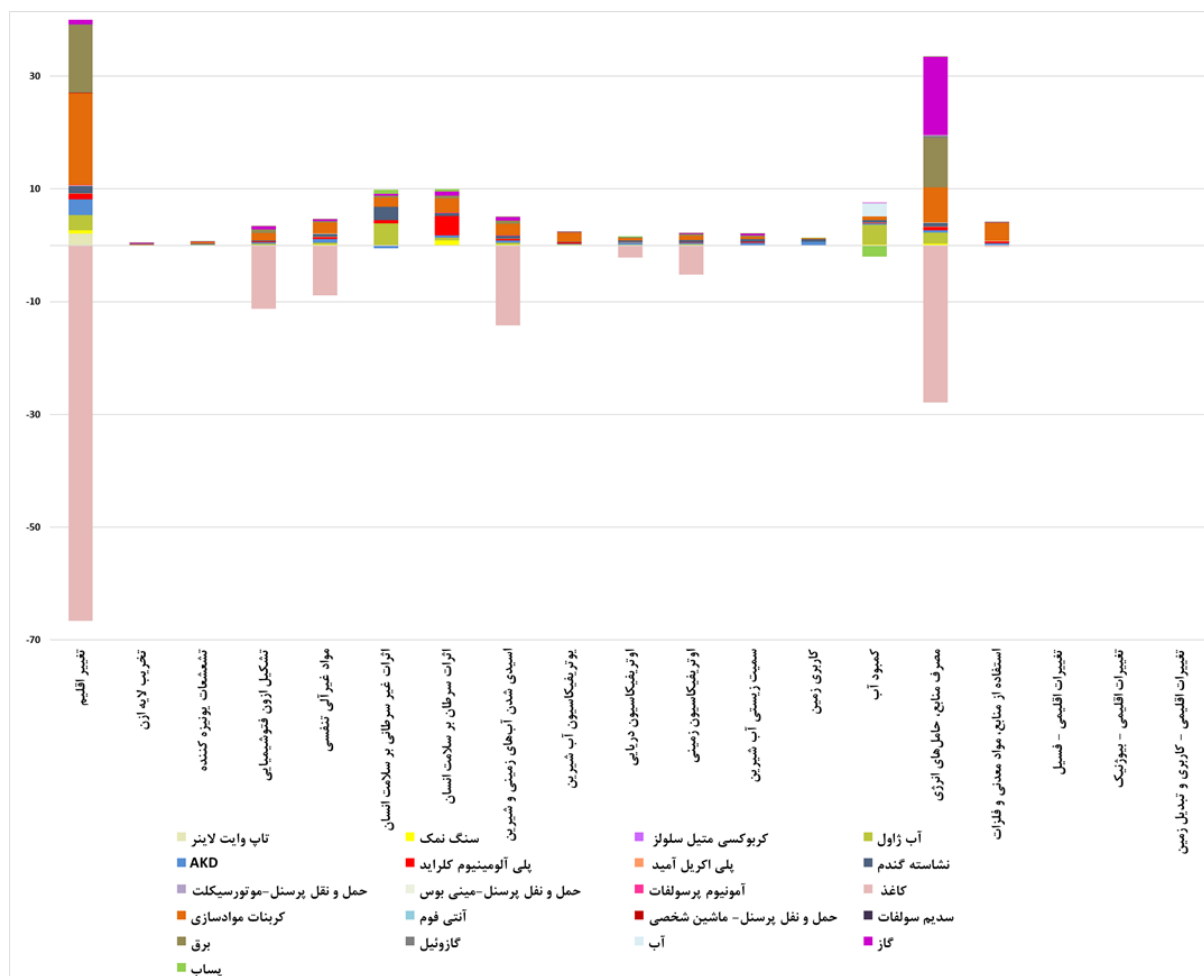
❖ ضریب ۲۰۰ برای شاخص های سطح میانی مرتبط با کمبود منابع، که با اهمیتی کمتر، اما همچنان قابل توجه در ارزیابی نهایی لحاظ می گردند.

در مجموع، مرحله وزن دهی با تمرکز بر ادغام داده های محیط زیستی و تبدیل آن ها به یک شاخص نهایی قابل فهم، پلی میان تحلیل علمی و تصمیم سازی کاربردی ایجاد می کند. نتایج مربوط به گام وزن دهی کارخانه گلستان کاغذ پرشیا در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه می گردد.

جدول (۲) نتایج وزن دهی ردپای بوم شناختی فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

مقدار نهایی	واحد اندازه گیری	طبقه اثر	
-۲۴/۲۰۹	mPt	Climate change	تغییر اقلیم
۰/۴۸	mPt	Ozone depletion	تخریب لایه ازن
۰/۶۸	mPt	Ionising radiation, HH	تشعشعات یونیزه کننده
-۷/۸	mPt	Photochemical ozone formation, HH	تشکیل ازون فتوشیمیایی
-۴/۱۴	mPt	Respiratory inorganics	مواد غیر آلی تنفسی
۹/۴۱	mPt	Non-cancer human health effects	اثرات غیر سرطانی بر سلامت انسان
۹/۹۸	mPt	Cancer human health effects	اثرات سرطان بر سلامت انسان
-۹/۰۹	mPt	Acidification terrestrial and freshwater	اسیدی شدن آب های زمینی و شیرین
۲/۵	mPt	Eutrophication freshwater	یوتروفیکاسیون آب شیرین
-۰/۵۳	mPt	Eutrophication marine	یوتروفیکاسیون دریایی
-۳/۰۵	mPt	Eutrophication terrestrial	یوتروفیکاسیون زمینی
۲/۱۲	mPt	Ecotoxicity freshwater	سمیت زیستی آب شیرین
۱/۳۱	mPt	Land use	کاربری زمین
۵/۴۸	mPt	Water scarcity	کمبود آب
۵/۶	mPt	Resource use, energy carriers	مصرف منابع، حامل های انرژی
۳/۸۴	mPt	Resource use, mineral and metals	استفاده از منابع، مواد معدنی و فلزات
۰	mPt	Climate change - fossil	تغییرات اقلیمی - فسیلی
۰	mPt	Climate change - biogenic	تغییرات اقلیمی - بیوژنیک
۰	mPt	Climate change - land use and transform.	تغییرات اقلیمی - کاربری و تبدیل زمین
-۷/۳	mPt	مقدار نهایی	

¹ Sala



شکل (۳) نتایج وزن‌دهی ردپای بوم‌شناختی فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

با توجه به نتایج بدست آمده و ارائه‌شده در نمودار و شکل فوق، مقدار کل ردپای محیط‌زیستی ناشی از فرآیند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر برابر با 7.3 Pt برآورد شده است که بیانگر این است که برآیند ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید کاغذ در کارخانه گلستان پرشیا دارای اثرات زیست‌دوست (مثبت) است. در این میان، با توجه به جدول ۲ بیشترین سهم اثرگذاری منفی مربوط به طبقه‌های اثرات سرطانی و غیر سرطانی بر سلامت انسان و سپس مصرف منابع و بیشترین اثرات زیست دوست در طبقه تغییر اقلیم قابل مشاهده است. در طبقه اثرات غیر سرطانی، آب زایل؛ طبقه اثرات سرطانی، پلی‌آلومینیوم کلراید بیشترین بار منفی محیط‌زیستی را ایجاد کرده است. همچنین، در طبقه‌ی مصرف منابع، گاز طبیعی مصرف‌شده در فرآیند تولید بیشترین بار محیط‌زیستی را ایجاد کرده است. در مقابل، در طبقه اثر بر تغییر اقلیم، بیشترین اثر مثبت و دوستدار محیط‌زیست مربوط به مواد اولیه‌ی بازیافتی از جمله پوشال سفید و کارتن قهوه‌ای بوده است که با کاهش مصرف منابع اولیه و کاهش انتشار آلاینده‌ها، نقش مؤثری در بهبود شاخص‌های محیط‌زیستی ایفا می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش سهم مواد بازیافتی در ترکیب خوراک ورودی کارخانه می‌تواند به‌عنوان راهبردی کارآمد برای کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی در فرآیند تولید کاغذ مدنظر قرار گیرد.

۱۰. نتایج مربوط به ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای

جهت ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر در کارخانه گلستان کاغذ پرشیا مراحل مشخصه‌سازی و وزن‌دهی انجام شد که در ادامه نتایج مراحل مشخصه‌سازی و وزن‌دهی تشریح می‌گردد.

۱۱. مشخصه‌سازی ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

این روش که تحت عنوان پروتکل گازهای گلخانه‌ای^۱ شناخته می‌شود، توسط مؤسسه منابع جهانی و شورای جهانی کسب‌وکار برای توسعه پایدار طراحی و تدوین شده و به‌عنوان یک چارچوب استاندارد بین‌المللی برای محاسبه و گزارش‌دهی انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار می‌رود. در این رویکرد، به منظور محاسبه معادل دی‌اکسیدکربن، کلیه گازهای گلخانه‌ای غیراز دی‌اکسیدکربن نظیر متان، اکسید نیتروژن، هگزا فلوراید گوگرد، هیدروفلوئوروکربن‌ها و کلروفلوئوروکربن‌ها، بر پایه پتانسیل گرمایش جهانی منتشر شده در آخرین گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) و در افق زمانی ۱۰۰ ساله، به معادل دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند.

پروتکل GHG با در نظر گرفتن مرزهای سیستم مورد مطالعه، کلیه انتشارهای مرتبط با فرآیندهای پیش‌زمینه و پس‌زمینه را بر حسب کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن^۲ محاسبه می‌کند. همچنین، این روش بین منابع مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای تمایز قائل شده و آن‌ها را در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی می‌نماید:

- انتشارات حاصل از سوخت‌های فسیلی
- کربن بیوژنیک (منشأ زیستی)
- ذخیره‌سازی کربن
- انتشارات ناشی از تغییر در کاربری زمین

این تمایزگذاری، در تحلیل دقیق‌تر ردپای کربنی و طراحی راهکارهای کاهش اثرات اقلیمی در زنجیره تولید و مصرف بسیار مؤثر است. نتایج مربوط به گام مشخصه‌سازی کاغذ تاپ وایت لاینر در جدول ۳ و شکل ۴ ارائه می‌گردد.

جدول (۳) نتایج مشخصه‌سازی ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

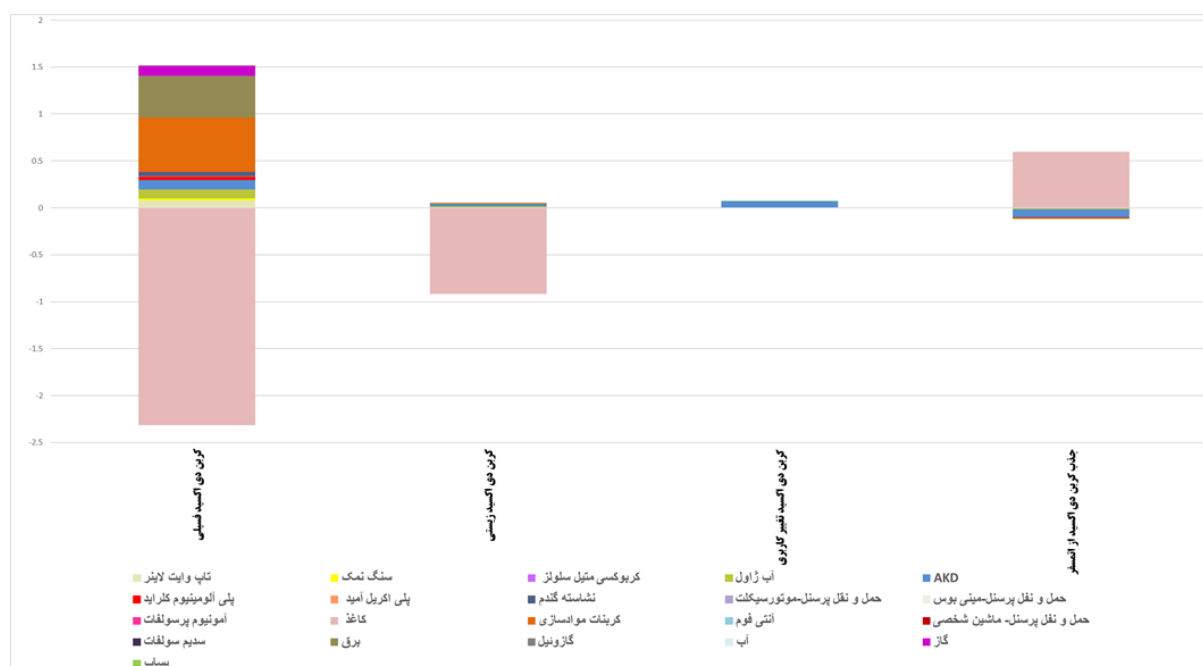
کربن دی اکسید فسیلی	کربن دی اکسید زیستی	کربن دی اکسید تغییر کاربری	جذب کربن دی اکسید از اتمسفر	طبقه اثر
kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	واحد اندازه‌گیری
۷۸/۵۶	۰	۰	۰	تاپ وایت لاینر
۱۹/۲۹	۰/۷۱	۰/۰۳	۰/۳۱	سنگ نمک
۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱۳	کربوکسی متیل سلولز
۹۶/۶۱	۱۳/۸۰	۳/۷۶	۱۲/۴	آب ژاول
۱۰۰/۸۹	۲۴/۹۲	۶۹/۹۶	۸۹/۷۴	AKD
۳۵/۰۱	۰/۵۴	۰/۰۳	۰/۷۱	پلی آلومینیوم کلراید
۳/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۴	پلی اکریل آمید
۴۴/۷۹	۰/۰۰۱	۰/۱۳	۰/۴۳	نشاسته گندم
۱/۳۱	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۰۱	حمل و نقل پرسنل-موتورسیکلت
۲/۹۵	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۳	حمل و نقل پرسنل-مینی بوس
۲/۵	۰/۱۳	۰/۰۰۱	۰/۱۵	آمونیوم پرسولفات
-۲۳۱۶/۲۳	-۹۱۹/۲۳	۰	-۵۹۵/۴	کاغذ
۵۷۹/۳۶	۱۱/۷۳	۰/۴	۱۲/۴۸	کربنات موادسازی
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۸	آنتی فوم
۰/۰۳	۰/۰۰۰۳	۲/۰۷	۰/۰۰۰۳	حمل و نقل پرسنل - ماشین شخصی

^۱ Green House Gas Protocol

^۲ CO₂eq

جدول (۴) نتایج وزن‌دهی ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

کربن دی اکسید فسیلی	کربن دی اکسید زیستی	کربن دی اکسید تغییر کاربری	جذب کربن دی اکسید از اتمسفر	طبقه اثر
kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	واحد اندازه‌گیری
۰/۰۷	۰	۰	۰	تاپ وایت لاینر
۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۷	۳/۱۲	-۰/۰۰۰۳	سنگ نمک
۰/۰۰۰۳	۷/۷۲	۳/۴۷	-۰/۰۰۰۱	کربوکسی متیل سلولز
۰/۰۹	۰/۰۱	۳/۶۷	-۰/۰۱	آب ژاول
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۰۸	AKD
۰/۰۳	۰/۰۰۰۵	۳/۳۱	-۰/۰۰۰۷	پلی آلومینیوم کلراید
۰/۰۰۳	۳/۵۱	۱/۱۹	-۳/۶۹	پلی اکریل آمید
۰/۰۴	۱/۵	۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۴	نشاسته گندم
۰/۰۰۱	۱/۰۲	۰	-۱/۰۲	حمل و نقل پرسنل- موتورسیکلت
۰/۰۰۲	۲/۴۵	۱/۶۷	-۳/۰۰۸	حمل و نقل پرسنل- مینی بوس
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۱/۲	-۰/۰۰۰۱	آمونیم پرسولفات
-۲/۳۱	-۰/۹۱	۰	۰/۵۹	کاغذ
۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۱	کربنات موادسازی
۸/۴۳	۸/۱۱	۱/۷۴	-۸/۷۹	آنتی فوم
۳/۷۱	۳/۰۴	۲/۰۷	-۳/۷۲	حمل و نقل پرسنل- ماشین شخصی
۱/۱۷	۲/۲۱	۱/۷۸	-۲/۸۱	سدیم سولفات
۰/۴۳	۰/۰۰۰۲	۱/۱۶	-۰/۰۰۰۲	برق
۰/۰۰۳	۳/۲۷	۱/۳۸	-۲/۷۴	گازوئیل
۰/۰۰۰۱	۱/۶۶	۱/۱	-۲/۵۱	آب
۰/۱	۰/۰۰۰۳	۱/۵۴	-۰/۰۰۰۱	گاز
۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۳/۲۸	-۴/۴۹	پساب
-۱/۱۱				نمره نهایی



شکل (۵) نتایج وزن‌دهی ارزیابی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند تولید کاغذ تاپ وایت لاینر

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۴ و شکل ۵، می‌توان دریافت که از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف سوخت‌های فسیلی و فرایندهای مرتبط با آن، استفاده از کرینات کلسیم در بخش موادسازی، بیشترین سهم را در افزایش اثرات منفی محیط‌زیستی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، گرچه انتظار می‌رود کاغذ بازیافتی به‌دلیل کاهش نیاز به مواد اولیه خام و کمک به جذب دی‌کربن اکسید از اتمسفر تأثیر مثبتی داشته باشد، اما در این مطالعه در طبقه‌ی "جذب دی‌اکسید کربن از اتمسفر" اثر منفی ثبت شده است، زیرا فرایند بازیافت معمولاً با مصرف انرژی بالاتری همراه است.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات ردپای بوم‌شناختی نشان می‌دهند که مقدار کل ردپای محیط‌زیستی ناشی از فرآیند تولید کاغذ وایت‌تاپ لاینر برابر با $Pt -7/3$ برآورد شده است. در این میان، بیشترین سهم اثرگذاری منفی مربوط به طبقه‌های سرطان زایی و غیر سرطان‌زایی برای انسان و مصرف منابع است. در طبقه اثرات غیر سرطان‌زایی، آب ژاول؛ طبقه اثرات سرطان‌زایی، پلی آلومینیوم کلراید و طبقه‌ی مصرف منابع، گاز طبیعی مصرف‌شده در فرآیند تولید بیشترین بار محیط‌زیستی را ایجاد کرده است.

تولید کاغذ با استفاده از مواد افزودنی بکر مانند کلسیم کرینات، دلیل مصرف بالای منابع طبیعی و انرژی، بر ردپای بوم‌شناختی فرآیند تولید تأثیر منفی دارد (ویلانوا^۱ و ونزل^۲، ۲۰۰۷؛ مونته^۳ و همکاران، ۲۰۰۹)، در مقابل، در کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا، استفاده از مواد بازیافتی مانند پوشال سفید و کارتن قهوه‌ای با کاهش مصرف منابع اولیه و کاهش فشار بر اکوسیستم‌ها، اثرات محیط‌زیستی را به طور قابل توجهی کاهش داده است. به طور کلی افزایش سهم مواد بازیافتی در مواد اولیه ورودی کارخانه جهت کاهش ردپای بوم‌شناختی و حفظ منابع طبیعی بسیار موثر است، مطالعه انجام شده توسط لوریسیجن^۴ و همکاران (۲۰۱۰) نیز موید نتایج تحقیق حاضر است. نتایج ارزیابی اثرات به روش GHG نشان داد، مصرف سوخت‌های فسیلی

¹ Villanueva

² Wenzel

³ Monte

⁴ Laurijssen

و فرایندهای مرتبط با آن، مانند استفاده از کربنات کلسیم در بخش موادسازی، بیشترین سهم را در افزایش اثرات منفی محیط-زیستی ایفا می‌کنند. کربنات کلسیم مصرفی در این کارخانه در پیشینه محیط زیستی خود دارای اثر منفی بر محیط زیست است، چرا که فرایند استخراج کربنات کلسیم انرژی‌بر و وابستگی بالایی به منابع فسیلی دارد و در این پژوهش به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار دی‌اکسید کربن فسیلی شناسایی شده است که با نتایج پژوهش انجام شده توسط هانین^۱ و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن تمامی ابعاد مرتبط، از جمله مصرف انرژی در فرایند بازیافت، استفاده از مواد خام جایگزین و میزان انتشار آلاینده‌ها، نتایج نشان داد که برآیند نهایی اثرات محیط‌زیستی استفاده از کاغذ بازیافتی در مقایسه با کاغذ اولیه مثبت است. به عبارت دیگر، اگرچه فرایند بازیافت مستلزم مصرف انرژی است، اما کاهش نیاز به برداشت مواد خام و کاهش انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن و سایر آلاینده‌ها منجر به آن شده است که اثرات زیست‌دوست بر اثرات منفی غلبه کند. بنابراین، نمره نهایی محصول منفی گزارش شد که نشان‌دهنده برتری جنبه‌های پایدار و مزایای استفاده از کاغذ بازیافتی است. اما برخی مطالعات نشان داده‌اند که در چارچوب ارزیابی چرخه حیات، اگر فرایند بازیافت با مصرف انرژی بالا همراه باشد، ممکن است منجر به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن به اتمسفر شود و در نتیجه بروز اثرات سوء محیط زیستی شود (فرارا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات مشابه در سطح بین‌المللی همسو است، به‌عنوان مثال، چاکرابورتی^۳ (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای بر روی یک کارخانه بازیافت کاغذ در هند نیز به این نتیجه رسید که بیش از ۷۰ درصد از ردپای بوم‌شناختی ناشی از مصرف منابع اولیه است. پژوهش جمچه^۴ و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داد که استفاده از کاغذ بازیافتی نسبت به خمیر خام، به‌طور میانگین موجب کاهش حدود ۳۰ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. به طور کلی، نتایج تحقیق حاضر نشان داد اقدامات زیست دوستی همچون استفاده از مواد اولیه بازیافتی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود فرآیند تصفیه پساب می‌تواند به‌طور قابل توجهی اثرات محیط‌زیستی صنعت کاغذسازی را کاهش دهد. این یافته‌ها نه تنها لزوم توجه به چرخه حیات محصولات و استفاده مجدد از منابع را تأیید می‌کنند، بلکه بر اهمیت تدوین سیاست‌های محیط‌زیستی در راستای اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار در صنایع سلولزی تأکید دارند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که اقدامات مدیریتی نظیر بهبود بهره‌وری منابع، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر، و ارتقاء فناوری‌های تصفیه آب و بازیافت مواد به‌عنوان استراتژی‌های کلیدی در جهت کاهش ردپای بوم‌شناختی مدنظر قرار گیرند. همچنین، توسعه شاخص‌های بومی برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات محیط‌زیستی در صنایع کشور می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در حوزه سیاست‌گذاری محیط‌زیستی کمک کند.

منابع

- الف. صالحی، فاطمه، سلیمانی، محمد رضا، و نادری، علی. (۱۳۹۹). تحلیل سیاست‌های محیط‌زیستی صنعت کاغذ در ایران با رویکرد ارزیابی چرخه حیات. *فصلنامه توسعه پایدار محیط‌زیست*، ۱۲(۴)، ۳۵-۴۹.
- Baumann, H. & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur.
- Chakraborty, S. (2015). Ecological footprint analysis of a recycled paper-based industry in Odisha, India. *Journal of Environmental Research and Development*.
- De Feo, G. (2021). Environmental assessment of the recycled paper production: The effects of energy supply source. *Sustainability*, 13(9), 4841. <https://doi.org/10.3390/su13094841>

¹ Hanein

² Ferrara

³ Chakraborty

⁴ Gemechu

- EarthShift Global. (2020). How O-LCA can identify your organization's most effective ways of reducing environmental impact. Retrieved from <https://earthshiftglobal.com/blog/how-o-lca-can-identify-your-organizations-most-effective-ways-of-reducing-environmental-impact>
- EcoHedge. (2023). Employee commuting emissions: Scope 3 category 7 explained. Retrieved from <https://www.ecohedge.com/blog/employee-commuting-emissions-scope-3-category-7-explained>
- Ferrara, G., De Feo, G. & Masucci, P. (2021). Environmental assessment of the recycled paper production: The effects of energy supply source. *Science of The Total Environment*, 758, 143626.
- Gao, W., Zhang, T. & Li, J. (2022). Carbon footprint analysis of pulp and paper manufacturing processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112329>
- Gemechu, E. D., Butnar, I., Llop, M. & Castells, F. (2013). A comparison of the greenhouse gas emissions of paper and plastic packaging. *Journal of Cleaner Production*, 54, 284–293.
- Gheewala, S. H., Pongpetch, N. & Malakul, P. (2020). Environmental impacts of paper production from agricultural residues: Energy and water consumption assessment. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121064>
- Hanein, T., Simoni, M., Woo, C. L., Provis, J. L. & Kinoshita, H. (2021). Decarbonisation of calcium carbonate at atmospheric temperatures and pressures, with simultaneous CO₂ capture, through production of sodium carbonate. *Energy & Environmental Science*, 14(12), 6595–6604.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006). ISO.
- Laurijssen, J., Marsidi, M., Westenbroek, A., Worrell, E., & Faaij, A. (2010). Energy efficiency in the paper industry: An assessment of policies and measures. *Energy Policy*, 38(11), 6534–6544.
- Lee, S. & Kim, H. (2019). Environmental impacts of chemical usage in paper production processes. *Journal of Environmental Management*, 245, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.030>
- M'Hamdi, A. I., Idrissi Kandri, N., Zerouale, A., Blumberga, D. & Gušča, J. (2017). Life cycle assessment of paper production from treated wood. *Energy Procedia*, 128, 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.031>
- Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A. & Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29(1), 293–308.
- Mousavi, M., Ghorbannezhad, P., Azizi, M., & Zarea Hosseinabadi, H. (2021). Evaluation of life cycle assessment in a paper manufacture by analytical hierarchy process. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(8), 1051–1062. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1982065> [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/3582065) + [Taylor & Francis Online](https://www.tandfonline.com) + [1](https://www.tandfonline.com)
- Pelzeter, A., Hinz, E., & Seitz, T. (2022). Calculating the carbon footprint of services: Integrating employee mobility. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 1130–1145. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02065>
- Petrova, V. (2023). Assessment of the ecological footprint of industrial processes: An integrated approach to life cycle analysis. *Journal of Environmental Management*, 335, 117608. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117608>
- Pizzol, M., Weidema, B. P. & Hauschild, M. Z. (2017). Software tools for life cycle assessment. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment* (pp. 399–421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6099-5_17
- Sala, S., Cerutti, A., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/945290>
- Scherer, L., Pfister, S. & Hellweg, S. (2017). Assessment of water use impacts in the life cycle of pulp and paper products. *Environmental Science & Technology*, 51(17), 10052–10063.
- Sebastião, D. M. B., Gonçalves, M. S., Marques, S., Matos, C. T., Alves, L. & Gírio, F. M. (2016). Life cycle assessment of advanced bioethanol production from pulp and paper sludge. *Bioresource Technology*, 208, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.081>

- Silva, M. B., Aguiar, J. A. M. & Lima, R. M. S. M. (2020). Life cycle assessment of paper production from treated wood. *Science Progress*, 103(3), 1–15.
<https://doi.org/10.1177/0036850419895530>
- Smith, J. & Johnson, M. (2020). Water and energy consumption in the pulp and paper industry: A global perspective. *Sustainable Industry Reviews*, 12(3), 145–160.
<https://doi.org/10.1016/j.susindrev.2020.03.004>
- Sustainability, P. (2016). *SimaPro database manual Methods library*. SimaPro: Utrecht, The Netherlands.
- Thomas, A. & Liu, B. (2013). Life cycle and market review of alternative fibres for paper production. *Green Seal Report*.
- Tomberlin, K. E., Venditti, R. & Yao, Y. (2023). Life cycle carbon footprint analysis of pulp and paper grades in the United States using production-line-based data and integration. *Bioresources*.
- Villanueva, A. & Wenzel, H. (2007). Paper waste – Recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments. *Waste Management*, 27(8), 29–46.
- Wackernagel, M. & Rees, W. (1996). *Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth*. New Society Publishers.
- Wang, L., Templer, R. & Murphy, R. J. (2012). A Life Cycle Assessment (LCA) comparison of three management options for waste papers: Bioethanol production, recycling and incineration with energy recovery. *Bioresource Technology*, 120, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.130>
- Wiedmann, T. & Barrett, J. (2010). A review of the ecological footprint indicator—Perceptions and methods. *Sustainability*, 2(6), 1645–1693. <https://doi.org/10.3390/su2061645>
- Zhou, Y., Zhang, Y. & Liu, J. (2019). *Research progress on wastewater treatment methods and technologies in paper industry*. *Environmental Pollution & Control*, 41(3), 45–52.
<https://doi.org/10.1016/j.envpolcon.2019.03.007>