

Original Article



Analyzing the Environmental Impacts of Petrochemical Industries Using a Life Cycle Assessment Approach (Case Study: Ammonia Unit of Khorasan Petrochemical Company)

Received: 2025.05.29

Accepted: 2026.02.10

Ali Jafari, Sepideh Saeidi* , Hassan Rezaei

Department of
Environmental Sciences,
Faculty of Fisheries and
Environmental Sciences,
Gorgan University of
Agricultural Sciences and
Natural Resources, Gorgan,
Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Throughout the life of a product, all activities and processes are associated with resource consumption and the release of pollutants and materials into the natural environment and some environmental exchanges. In the meantime, petrochemical industries also usually have pollutants and wastes that are dangerous in terms of their nature and chemical composition and may cause environmental crises. To control all environmental effects of a product, its environmental effects must be considered throughout its life cycle. Life cycle assessment determines the transfer of environmental effects from one environment to another and from one stage of the life cycle to another. The purpose of this research is life cycle assessment and estimate the environmental indicators of the ammonia product of Khorasan Petrochemical Company.

Material and methods: The life cycle assessment (LCA) of the ammonia unit at Khorasan Petrochemical Complex was conducted in four main stages: (1) Goal and scope definition, including determination of system boundaries and the functional unit; (2) Life Cycle Inventory Analysis, involving the collection of data on energy and raw material inputs to the system, transportation and distribution modes, and system outputs, including emissions to water, soil, air, and waste generation; (3) Life Cycle Impact Assessment using the ReCiPe 2016 Endpoint (I) method implemented in SimaPro software (v9.0.0.35); and (4) Interpretation of results, in which the inventory and impact assessment results were analyzed and compared in order to propose improvement strategies and to identify and evaluate the environmental impact categories experiencing the greatest damage, as well as the key contributing factors.

Results and discussion: The results indicated that, at the endpoint level, the most significant adverse impacts of this unit are associated with human health, mainly due to the consumption of methane, steam, emissions from the ammonia unit, and natural gas. At the midpoint level, the highest negative impacts were related, respectively, to particulate matter formation, global warming (human health), acidification, and fossil resource scarcity. Methane showed the greatest contribution to particulate matter formation and global warming. Incomplete combustion of methane can generate particulate matter such as black carbon, as well as other pollutants including NO_x and CO, which adversely affect particulate matter formation, global warming, and human health. In the fossil resource scarcity category, the main negative impact was attributed to the consumption of natural gas as feedstock, while in the acidification category, methane and steam were identified as the main contributing factors.

Conclusion: Overall, the results demonstrate that the strong dependence of the ammonia production process on fossil fuels and feedstocks, together with emissions associated with methane and the production process, is the main cause of the environmental impacts observed at both midpoint and endpoint levels. Identifying these impacts and proposing targeted mitigation measures can significantly improve the environmental performance of the ammonia unit and reduce its negative consequences. Accordingly, the implementation of CO₂ capture and reduction technologies in the steam methane reforming unit, reduction of methane leakage through continuous monitoring, and establishment of an energy management system based on real-time monitoring of fuel and steam consumption are among the most important recommended measures. In addition, upgrading pollution control systems, optimizing catalyst performance to improve reaction efficiency, recovering heat from furnace and reformer exhaust gases, and optimizing combustion conditions are considered effective strategies. The use of low-NO_x burners can further reduce NO_x emissions and the associated impacts related to acidification and particulate matter formation. These measures are also applicable to other petrochemical units operating under similar conditions.

Keywords: Petrochemical Industries, Ammonia, Life Cycle Assessment, Environmental Impacts

How to cite this article:
Jafari, A., Saeidi, S., and
Rezaei, H. 2026. Analyzing
the Environmental Impacts
of Petrochemical Industries
Using a Life Cycle
Assessment Approach (Case
Study: Ammonia Unit of
Khorasan Petrochemical
Company). Adv. Environ.
Sci. 24 (2): 427-446.

* Corresponding Author Email Address: s.saeidi@gau.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.240174.1514



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

تحلیل پیامدهای محیط زیستی صنایع پتروشیمی با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات (مطالعه موردی: واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

علی جعفری، سپیده سعیدی*، حسن رضایی

گروه علوم و مهندسی محیط زیست،
دانشکده شیلات و محیط زیست،
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع
طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: در طول عمر یک محصول همه فعالیت‌ها و فرایندها با مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها و مواد به محیط طبیعی و برخی تبدلات محیط‌زیستی همراه هستند. در این بین، صنایع پتروشیمی نیز معمولاً دارای آلودگی‌ها و زائداتی هستند که از لحاظ ماهیت و ترکیبات شیمیایی خطرناک هستند و ممکن است موجب بروز بحران‌های محیط‌زیستی گردند. برای کنترل تمام آثار محیط‌زیستی یک محصول، باید اثرات محیط‌زیستی آن در طول چرخه عمرش مدنظر قرار گیرد. ارزیابی چرخه حیات، انتقال اثرات محیط‌زیستی را از یک محیط به محیط دیگر و از یک مرحله چرخه حیات به مرحله دیگر مشخص می‌کند. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی چرخه حیات محصول و برآورد شاخص‌های محیط زیستی واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان است.

مواد و روش‌ها: ارزیابی چرخه حیات واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان طی چهار مرحله انجام شد: ۱- تعریف هدف و دامنه شامل تعیین مرزهای سیستم و واحد عملکردی، ۲- فهرست‌نویسی چرخه حیات شامل جمع‌آوری فهرستی از انرژی و مواد خام ورودی به سیستم، نحوه حمل‌ونقل و توزیع، مواد خروجی از سیستم شامل انتشارات به آب، خاک، هوا و پسماند، ۳- ارزیابی اثرات چرخه حیات با استفاده از روش ReCiPe 2016 Endpoint (I) در نرم‌افزار SimaPro (v9.0.0.35) و ۴- تفسیر نتایج: تفسیر نتایج و مقایسه داده‌های مربوط به تحلیل فهرست‌نویسی و مرحله ارزیابی اثرات جهت ارائه راهکار، انتخاب یا پیشنهاد محصول، فرایند یا فناوری برتر انجام می‌شود و طبقه اثرات محیط‌زیستی که بیشترین صدمات به آن‌ها وارد شده است و عواملی که باعث این اثرات محیط‌زیستی شده‌اند، معرفی و تحلیل خواهند شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که بیشترین اثرات سوء این واحد در طبقات اثر نهایی، متوجه اثر بر سلامت انسان به دلیل مصرف متان، بخار آب، انتشارات واحد آمونیاک و گاز طبیعی است. در طبقات اثر میانی بیشترین اثرات منفی به ترتیب مربوط به طبقه اثر تشکیل ذرات معلق، طبقه اثر گرمایش جهانی (اثر بر سلامت انسان)، اسیدی شدن و کمبود منابع فسیلی است. متان بیشترین اثرگذاری را در طبقه اثر تشکیل ذرات معلق و گرمایش جهانی دارد، احتراق ناقص متان ممکن است ذرات معلق مانند کربن سیاه و دیگر آلاینده‌ها مانند NO_x و CO تولید کند، این ذرات می‌توانند بر طبقه اثر تشکیل ذرات معلق، گرمایش جهانی و همچنین سلامت انسان تأثیر منفی بگذارند. در طبقه اثر کمبود منابع فسیلی بیشترین اثر منفی مربوط به مصرف گاز طبیعی، به عنوان خوراک و عامل اثر در طبقه اسیدی شدن نیز مربوط به متان و بخار آب است.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که وابستگی بالای فرایند تولید آمونیاک به سوخت‌ها و خوراک‌های فسیلی و همچنین انتشارات مرتبط با متان و فرایند تولید، عامل اصلی بروز اثرات محیط‌زیستی این واحد در طبقات اثر میانی و نهایی است. شناسایی این اثرات و ارائه راهکارهای هدفمند می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد محیط‌زیستی و کاهش پیامدهای منفی ایفا کند. در این راستا، به‌کارگیری فناوری‌های جذب و کاهش انتشار CO_2 در واحد ریفرمینگ بخار متان، کاهش نشت متان از طریق پایش مستمر و استقرار سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر پایش لحظه‌ای مصرف سوخت و بخار از مهم‌ترین اقدامات پیشنهادی به شمار می‌رود. همچنین بهسازی سیستم‌های کنترل آلاینده‌ها، بهینه‌سازی عملکرد کاتالیست‌ها به منظور افزایش راندمان واکنش، بازیابی حرارت از گازهای خروجی کوره‌ها و ریفرمرها و بهینه‌سازی شرایط احتراق از دیگر راهکارهای مؤثر محسوب می‌شوند. استفاده از مشعل‌های کم‌آلاینده نیز می‌تواند انتشار NO_x و اثرات مرتبط با اسیدی شدن و تشکیل ذرات معلق را کاهش دهد. قابلیت تعمیر و اجرا در سایر واحدهای پتروشیمی با شرایط عملیاتی مشابه را نیز دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: صنایع پتروشیمی، آمونیاک، ارزیابی چرخه حیات، اثرات محیط‌زیستی

استناد به این مقاله: جعفری، ع، سعیدی، س.، ح، رضایی، ۱۴۰۵. تحلیل پیامدهای محیط زیستی صنایع پتروشیمی با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات (مطالعه موردی: واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان). فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۴ (۲): ۴۴۶-۴۲۷.

* Corresponding Author Email Address: s.saeidi@gau.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.240174.1514



مقدمه

پتروشیمی بر اساس قوانین و الزامات کشوری، منطقه‌ای و بین‌المللی و به‌منظور کاهش مالیات‌های مرتبط با محیط‌زیست ملزم به ارائه گواهی‌نامه‌هایی در این زمینه هستند تا به‌صورت کمی اثبات نمایند مواد اولیه خریداری‌شده از شرکت‌های پتروشیمی دارای ردپای پایین کربن، آب و انرژی است؛ بنابراین، شرکت‌های پتروشیمی به‌منظور افزایش قدرت فروش محصولات خود و باقی ماندن در بازار بسیار رقابتی دنیای امروز، نیازمند انجام بررسی‌های محیط‌زیستی در قالب مطالعات LCA هستند (Fazeni-Fraisl *et al.*, 2023). پژوهش‌های متعددی با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات و نرم‌افزار سیماپرو، به ارزیابی اثرات محیط زیستی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی پرداخته‌اند. (González-Castaño *et al.* (2016)، با استفاده از روش LCA و بررسی معیارهای محیط‌زیستی و اقتصادی به بهینه‌سازی چندهدفه در یک مجتمع نفت و گاز پرداختند. اثرات محیط‌زیستی با توجه به پتانسیل گرم شدن زمین (GWP)^۱ و ۱۸ شاخص میانی و ۳ شاخص نهایی روش ReCiPe در SimaPro بررسی شدند. نتایج نشان داد که مجتمع نفت و گاز مورد نظر می‌تواند با کاهش ۳۳ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای، از ۱۰۴۲ به ۶۹۵/۳۳ کیلو تن CO₂ در سال آثار مخرب محیط‌زیستی خود را کاهش دهد. (Contreras *et al.* (2021)، انتشار گازهای گلخانه‌ای از حوزه نفت و گاز دالاور آمریکا را با رویکرد تحلیل چرخه حیات مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از داده‌های عملیاتی گسترده از جمله اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مهم‌ترین اثر محیط‌زیستی حوزه نفت و گاز دالاور، پتانسیل تغییر اقلیم، کمبود منابع فسیلی و تغییر کاربری زمین هستند. (۲۰۲۲) Tähkämö در پژوهشی اثرات محیط‌زیستی تولید هیدروکربن‌های مایع تجدیدپذیر، پروپیلن و پلی‌پروپیلن را مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج این تحقیق، هیدروکربن‌های مایع تجدیدپذیر، تأثیر کمتری بر تغییرات

صنعتی شدن رویداد مهمی است که دولت‌ها در سیاست‌های توسعه آن را تشویق می‌کنند و نیز در افزایش رفاه انسان نقش مهمی ایفا می‌کند، اما این پیشرفت با چالش‌های جدی محیط‌زیستی همراه بوده است (Yousefi *et al.*, 2016). یکی از آثار و پیامدهای مهم صنعتی شدن در جوامع در حال توسعه، بروز انواع آلودگی‌های محیط‌زیست است. در این میان، صنایع پتروشیمی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع آلاینده، با تولید حجم عظیمی از گازهای گلخانه‌ای، پسماندهای خطرناک و مصرف بالای انرژی، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست به شمار می‌روند (Fazeni-Fraisl *et al.*, 2023). در ایران رشد سریع این صنعت منجر به تشدید آلودگی هوا و آب شده و ضرورت اتخاذ راهکارهای علمی برای کاهش اثرات مخرب را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است (Yousefi *et al.*, 2016). برای نظارت بر تمامی اثرات محیط‌زیستی یک محصول باید تأثیر آن در طول چرخه حیاتش مورد بررسی قرار گیرد (Lemke *et al.*, 2014). در این راستا، ارزیابی چرخه حیات (LCA) به‌عنوان یک روش استاندارد و جامع، ابزاری کلیدی برای تحلیل اثرات محیط‌زیستی از مرحله استخراج مواد خام تا دفع پسماندها ارائه می‌دهد (Kargari & Mostavi, 2010). با توجه به فشار جهانی برای حرکت به‌سوی شیوه‌های پایدار، ارزیابی چرخه حیات نقشی محوری در شناسایی نقاط بحرانی زنجیره تولید و طراحی راهکارهای کاهش اثرات مخرب ایفا می‌کند و به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه پایدار در صنایع پتروشیمی مورد توجه قرار گرفته است (Alizadeh Osaloo & Keynejad, 2008). ارزیابی چرخه حیات محصول امکان مقایسه چند برنامه، فرآیند یا فعالیت مختلف با یکدیگر و برگزینی بهترین آن‌ها را فراهم می‌کند. با به‌کارگیری LCA در فعالیت‌های تولیدی و دیگر فرآیندها، می‌توان اثرات محیطی، هزینه‌های مالی طرح‌ها و میزان اثرات مخرب بر محیط را کاهش داد (Soltani *et al.*, 2010). امروزه شرکت‌های مصرف‌کننده محصولات

اقلیمی و کاهش منابع انرژی فسیلی نسبت به جایگزین‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی داشتند. پلی‌پروپیلن تجدیدپذیر در مقایسه با پلی‌پروپیلن مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در کل چرخه حیات خود حداقل ۸۱ درصد ردپای کربن کمتر و حداقل ۷۸ درصد مصرف سوخت‌های فسیلی کمتری داشت. (۲۰۲۳) Fazeni-Fraisl & Lindorfer اثرات محیط‌زیستی تولید بایو ایزوبوتن و ایزوبوتن فسیلی را با روش تحلیل چرخه حیات مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج این تحقیق، فرآیند تولید بایو ایزوبوتن در مقایسه با تولید ایزوبوتن فسیلی باعث کاهش اثرات بر تغییر اقلیم می‌شود. از دیگر اثرات مهم محیط‌زیستی تولید ایزوبوتن، اثر بر یوتریفیکاسیون است که در هر دو روش میزان این اثر یکسان محاسبه شد. همچنین پتانسیل اسیدی شدن در فرآیند تولید ایزوبوتن زیستی نسبت به ایزوبوتن فسیلی کمتر بود. در ایران نیز مطالعات محدودی در حوزه نفت، گاز و پتروشیمی با رویکرد ارزیابی چرخه حیات در نرم‌افزار سیمپرو انجام شده است، از جمله (Afkhami et al. (2022 در مطالعه‌ای به بررسی ردپای آب فرآورده‌های تولیدی پالایشگاه با رویکرد ارزیابی چرخه حیات با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو پرداختند. در این مطالعه ردپای آب تولید متان، اتان، پروپان، بوتان، میعانات گازی و گوگرد در واحدهای فرآوری پالایشگاه گاز عسلویه، با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در هشت طبقه اثر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری ردپای آب در فرآیند تولید محصولات مختلف نشان داد که میعانات گازی بیش‌ترین و گوگرد کم‌ترین مصرف آب را به خود اختصاص داده است. (۲۰۲۵) Pooladi Borj et al. با استفاده از رویکرد LCA و روش ReCiPe در نرم‌افزار SimaPro، اثرات محیط‌زیستی حذف گوگرد از گاز کندانسیت را در سناریوهای مختلف بررسی کردند، نتایج نشان داد که بهینه‌سازی فرایند می‌تواند به کاهش اثرات محیط‌زیستی مانند پتانسیل گرم شدن زمین، اسیدی شدن و ذرات معلق منجر شود. نتایج همچنین نشان

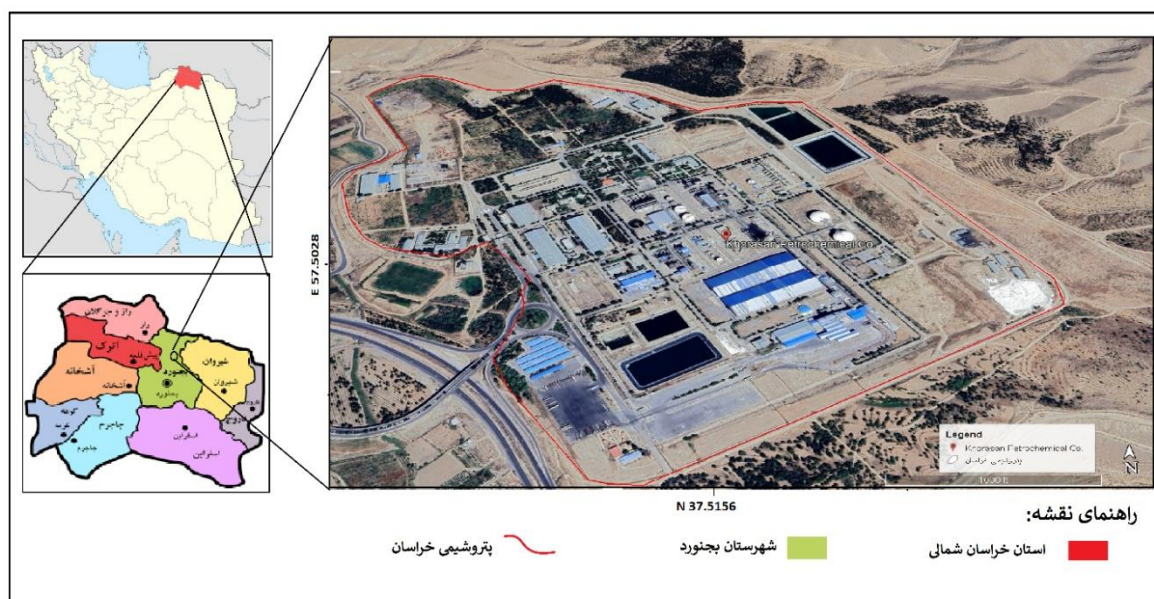
می‌دهند که محصول نهایی با غلظت کمتر گوگرد (بهینه) از نظر محیط‌زیستی امتیاز نهایی کمتری نسبت به محصول با گوگرد بیشتر دارد که بیانگر مزیت‌های محیط‌زیستی حذف بیشتر گوگرد است. (2025) Zamani et al. اثرات محیط زیستی تولید متانول را با تمرکز بر ردپای سمیت بوم‌سازگان‌های خشک و آبی و با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات و روش ReCiPe بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تولید متانول، به‌ویژه در بخش‌های فرآوری اولیه و مصرف انرژی، می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌های خشکی و آبی داشته باشد و استفاده از LCA امکان شناسایی نقاط بحرانی و پیشنهاد راهکارهای کاهش اثرات محیط‌زیستی را فراهم می‌کند. علاوه بر کاربرد مطالعات ارزیابی چرخه حیات در حوزه نفت، گاز و پتروشیمی، در سایر حوزه‌ها نیز در ایران مطالعاتی مختلفی با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات انجام شده است که می‌توان به مطالعه (۲۰۱۸) Maleki Delarestaghi et al. در خصوص مقایسه روش‌های مختلف مدیریت پسماند شهر طبس با رویکرد ارزیابی چرخه حیات، Esparham & Ebrahimi (2021)، تحلیل نقاط حساس محیط زیستی سیستم‌های تامین انرژی بارویکرد ارزیابی چرخه عمر، (2022) Ebrahimi & Ebrahimi، ارزیابی چرخه حیات تولید محصولات کشاورزی سیب و انگور و (۲۰۲۳) Babaei et al. در خصوص ارزیابی چرخه حیات صنعت بسته‌بندی مواد غذایی واقع در ناحیه صنعتی دهک، اشاره کرد. مرور منابع فوق همگی بیانگر کاربردهای متعدد ارزیابی چرخه حیات محصول در مطالعات مختلف جهت مدیریت و تقلیل اثرات محیط‌زیستی است. در این پژوهش نیز به بررسی اثرات محیط‌زیستی مراحل مختلف تولید محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با در نظر گرفتن تمامی موارد ورودی به سیستم و خروجی‌ها از سیستم پرداخته شده است. درواقع این پژوهش، درصد ارزیابی و تحلیل اثرات محیط‌زیستی حاصل از فرآیند تولید محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه واحد آمونیاک شرکت پتروشیمی خراسان است. این شرکت در ۱۷ کیلومتری جاده اصلی بجنورد-شیروان، در زمینی به مساحت ۲۰۰ هکتار در موقعیت ۳۷ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۳۰ دقیقه

طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). شرکت پتروشیمی خراسان یک مجتمع تولیدی مواد پتروشیمیایی در زمینه تولید آمونیاک (۱۰۰۰ تن در روز)، کود اوره (۱۵۰۰ تن در روز)، ملامین (۶۰ تن در روز) و ازت مایع است. در این مطالعه، هدف ارزیابی چرخه حیات محصول آمونیاک تولیدی پتروشیمی خراسان است.



شکل ۱- موقعیت مکانی پتروشیمی خراسان در استان خراسان شمالی
Fig. 1- Location of Khorasan Petrochemical in North Khorasan Province

تشریح فرآیند واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان

فرآیند تهیه آمونیاک بر اساس ترکیب گاز سنتز نیتروژن و هیدروژن طی واکنش شناخته شده هابر-بوش در حضور کاتالیست آهن استوار است. جهت تهیه گاز سنتز از گاز طبیعی ورودی به واحد که منجر به تهیه آمونیاک می شود نیاز به انجام مراحل ذیل است:

- فرآیند تصفیه کاتالیستی گاز ورودی جهت حذف ترکیبات گوگردی مضر برای تهیه گاز فرآیند
- فرآیند ریفرمینگ با بخار آب (Steam Reforming) جهت تولید گاز سنتز مورد نیاز آمونیاک سازی
- فرآیندهای CO₂ Removal, Shift-Conversion و متاناسیون جهت خالص سازی گاز سنتز

- فرآیند فشرده سازی گاز سنتز و سنتز آمونیاک
- فرآیند تبرید و جداسازی آمونیاک تولید شده
- فرآیند تصفیه و بازیافت آب های حاصل از فرآیند تولید جهت ارزیابی اثرات چرخه حیات آمونیاک تولیدی لازم نیست تمامی موارد ورودی و خروجی در فرآیندهای فوق الذکر اعم از مواد و انرژی مصرفی، انواع انتشارات به محیط و ... به صورت کمی مشخص شوند.

مراحل انجام ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات یک روش شناخته شده جهت ارزیابی اثرات محیط زیستی یک فرآیند، کالا یا خدمات و ابزاری جهت عددی ساختن اثرات محیط زیستی محصول در تمامی مراحل گوناگون زندگی آن (از گهواره تا گور) است. در این روش برای هر نمونه مشخص، سیستم مورد نظر تعریف می گردد، سپس ورودی ها و

خروجی‌های سیستم (اعم از مواد و انرژی) و همچنین نحوه حمل‌ونقل و توزیع مواد ورودی و محصولات مشخص می‌گردد. در نهایت، باتوجه به چرخه عمر ورودی‌ها و خروجی‌ها و همچنین توجه به سیستم حمل‌ونقل مورد استفاده برای تأمین مواد ورودی و توزیع محصولات، اثرات محیط‌زیستی محاسبه می‌شود. فرآیند (LCA) یک روش سیستمی است که بر اساس استاندارد ISO ۱۴۰۴۰ دارای چهار گام اصلی است (جدول ۱). در ادامه هریک از این مراحل تشریح می‌گردد:

جدول ۱- مراحل انجام ارزیابی چرخه حیات مطابق استاندارد ISO 14040
Table 1- Stages of Life Cycle Assessment (LCA) according to ISO 14040

مرحله	عنوان مرحله	شرح مختصر	خروجی اصلی
۱	تعیین هدف و برد سیستم	تعریف هدف مطالعه، واحد کارکردی، مرزهای سیستم و فناوری مورد بررسی	تعریف شفاف سیستم و محدوده مطالعه
۲	فهرست‌نویسی چرخه حیات (LCI ^۱)	جمع‌آوری داده‌های مربوط به ورودی‌های مواد و انرژی، حمل‌ونقل و خروجی‌ها شامل انتشار به هوا، آب، خاک و پسماند	فهرست کمی جریان‌های ورودی و خروجی
۳	ارزیابی پیامدهای چرخه حیات (LCIA ^۲)	تبدیل داده‌های LCI به شاخص‌های اثرات محیط زیستی و انسانی بالقوه	مقادیر عددی طبقات اثر
۴	تفسیر چرخه حیات	تحلیل، مقایسه و تفسیر نتایج LCI و LCIA و ارائه پیشنهادهای بهبود	نتیجه‌گیری و پیشنهاد راهکار

تعیین هدف و برد سیستم (شناسایی محصول، فرآیند، فناوری و تعیین برد سیستم)

تعیین برد سیستم در ارزیابی چرخه حیات (LCA) به معنای مشخص کردن محدوده‌ای است که تحلیل در آن انجام می‌شود. این مرحله برای اطمینان از دقت و کارایی ارزیابی بسیار مهم است. تعیین برد سیستم در LCA به تحلیل گران این امکان را می‌دهد که به طور دقیق‌تری اثرات محیط‌زیستی را شناسایی و تحلیل کنند. با تعریف صحیح این مرزها، می‌توان نتایج قابل‌اعتمادتری به دست آورد و در نهایت تصمیمات بهتری برای کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست اتخاذ کرد (Tighnavard *et al.*, 2012). انواع مرزبندی‌ها در مطالعات چرخه حیات شامل گهواره تا گور، گهواره تا دروازه، دروازه تا دروازه و دروازه تا گور است که با توجه به هدف مطالعه و اطلاعات در دسترس یکی از این مرزبندی‌ها در پروژه تعریف می‌گردد. در این مطالعه هدف اصلی دستیابی به شاخص اثرات محیط‌زیستی برای محصولات واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات است و دامنه مطالعه به صورت دروازه تا دروازه یعنی از لحظه ورود مواد اولیه به چرخه تا لحظه خروج محصول نهایی از کارخانه و به ازای یک تن محصول آمونیاک تعیین شده است. داده‌های دریافتی

باتوجه به مرز سیستم و هدف مطالعه در بازه زمانی یک‌ساله از واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان جمع‌آوری شده است.

فهرست‌نویسی چرخه حیات

این مرحله مهم‌ترین و زمان‌برترین مرحله در انجام مطالعات ارزیابی چرخه حیات است. سیاهه نویسی در سه بخش شامل: ۱- محصولات اصلی و فرعی، ۲- ورودی‌ها به فرآیند (ورودی-ها از طبیعت و تکنوسفر^۴) ۳- خروجی‌ها از فرآیند (انتشارات به هوا، انتشارات به آب، انتشارات به خاک، پسماندهای تولیدی و سروصدا انجام می‌شود. جمع‌آوری اطلاعات از طریق بازدید میدانی از سیستم مورد مطالعه و گزارش‌های فنی صورت گرفته است. اطلاعات و داده‌های مواد مصرفی، انرژی، منابع مورد استفاده، انتشارات و پسماندها به صورت سیاهه نویسی بر اساس هدف مطالعه ذکر شده گردآوری شد (جدول ۲). برای پردازش داده‌های ورودی و تکمیل موجودی چرخه حیات (LCI)، از کتابخانه Ecoinvent استفاده شد. این پایگاه داده یکی از جامع‌ترین و معتبرترین بانک‌های اطلاعاتی LCA در سطح بین‌المللی است که شامل داده‌های به‌روز و مستند از فرآیندهای صنعتی، انرژی، حمل‌ونقل و مواد اولیه در مقیاس جهانی و به‌ویژه کشورهای توسعه‌یافته اروپایی از جمله آلمان و فرانسه می‌باشد.

جدول ۲- سیاهه نویسی ارزیابی چرخه حیات واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان (بازه زمانی یک ساله)
Table 2- Life Cycle Inventory Analysis of Khorasan Petrochemical Ammonia Unit (One Year Period)

مشخصات تولید محصولات واحد آمونیاک			
محصولات			
نام محصول	واحد اندازه گیری	مقدار	
آمونیاک (محصول اصلی)	تن	۳۰۶۴۵۵	
کربن دی اکسید (محصول فرعی)	تن	۴۱۲۰۸۳۹۳۶	
خوراک و مواد افزودنی			
نام ماده	واحد اندازه گیری	مقدار	
گاز طبیعی (خوراک)	مترمکعب	۲۰۷۶۶۱۴۱۰۶۱	
هیدرازین	کیلوگرم	۶۱۲	
اتانول	کیلوگرم	۴۱۱۸۵۸	
پنتا اکسید وانادیوم (کاتالیست اسیدسولفوریک)	کیلوگرم	۲۳۰	
آنتی فوم	کیلوگرم	۲۶۴	
دی سدیم فسفات	کیلوگرم	۵۸	
تری سدیم فسفات	کیلوگرم	۶۹	
مورفولین	کیلوگرم	۸۸۶۶۷۷	
سیکلو هگزیل امین	لیتر	۶۸	
نیتريت پتاسیم	کیلوگرم	۸۲۵	
گلاپکول اتیلن	کیلوگرم	۲۱۶۵۵	
متانول	کیلوگرم	۶۶۴۲	
کربنات پتاسیم	کیلوگرم	۷۰۰۰	
اکتیو کربن	کیلوگرم	۱۷۵	
سرویس های جانبی			
نوع سرویس جانبی	واحد اندازه گیری	مقدار	
آب BFW	کیلوگرم	۱۶۱۳۸۵۸۵۶۹	
آب DM جبرانی	کیلوگرم	۱۹۴۱۱۸	
برق واحد آمونیاک	مگاوات ساعت در سال	۱۴۴۲۳۳۴	
نیترژن مصرفی کل	کیلوگرم	۹۶۸۵۷	
سوخت مصرفی (متان)	مترمکعب	۲۳۲۳۶۰۲۲۵	
بخار آب مصرفی	تن	۱۱۸۶۴۵۵	
هوای فشرده ابزار دقیق	مترمکعب	۳۵۳۰۶۴	
حمل و نقل (خوراک) - خط لوله			
نوع ماده	مقدار ماده حمل شده	طول خط لوله	مقدار نهایی ماده حمل شده
گاز طبیعی	۱۴۸۶۸۵۵۷ تن	۲ کیلومتر	۲۹۷۳۷۱۰۱۳۶ تن کیلومتر
حمل و نقل پرسنل واحد آمونیاک			
نوع وسیله حمل و نقل	مسافت طی شده پرسنل (روزانه)	مسافت طی شده در ۳۶۵ روز	تعداد پرسنل
اتوبوس	۳۸ کیلومتر	۳۴۶۷۵۰ پرسنل کیلومتر	۲۵ نفر

ادامه جدول ۲- سیاهه نویسی ارزیابی چرخه حیات واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان (بازه زمانی یک ساله)
Table 2 (cont.)- Life Cycle Inventory Analysis of Khorasan Petrochemical Ammonia Unit (One Year Period)

مقدار آلاینده منتشرشده به هوا			
نوع آلاینده	واحد اندازه گیری	ID.Fan	ونت استریپر
CO ₂	تن بر سال	۱۴۰۴۲۱.۴۱۴۰	۱۳۲۷۴۶۴۰.۸
NO ₂	تن بر سال	۴.۲۱۱۸	
NO	تن بر سال	۱۱۵.۱۴۶۸	
NOX	تن بر سال	۱۲۵.۶۲۵۶	
H ₂ S	تن بر سال	۱.۷۶۰۳	
CO	تن بر سال	۰.۵۸۰۹	
پساب و فاضلاب تولیدی			
نوع جریان خروجی	واحد اندازه گیری	مقدار	
پساب فرآیندی	مترمکعب	۲۶۲۸۰	
پساب بهداشتی	مترمکعب	۱۰۹۵	
پسماند تولیدی			
نام پسماند	واحد اندازه گیری	مقدار	
روغن مستعمل	کیلوگرم	۱۱۷۴۲.۳	
بشکه فلزی	کیلوگرم	۴۷۲۰	
بشکه پلی اتیلن	کیلوگرم	۱۲۰	
المنت فیلتر مستعمل	کیلوگرم	۴۰	
کربن اکتیو	کیلوگرم	۸۵۰	
انواع کاتالیست ها	تن	۱۱.۸۸	

ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)

در مطالعات ارزیابی چرخه حیات روش های مختلفی جهت ارزیابی اثرات محیط زیستی وجود دارد که این روش ها باتوجه به اهداف مطالعه انتخاب می شوند. ارزیابی اثرات در تحقیق حاضر با استفاده از روش ReCiPe 2016 Endpoint (I) که بیشترین طبقات اثر محیط زیستی را پوشش می دهد، در نرم افزار (SimaPro (v9.0.0.35 و در دو سطح طبقات اثر میانی و نهایی صورت گرفته است. ReCiPe یکی از روش های استاندارد ارزیابی اثرات چرخه حیات است که شاخص های نقطه میانی^۶ را به شاخص های نقطه پایانی^۷ مرتبط می کند. در سطح میانی، اثرات محیط زیستی در دسته هایی مانند تغییر اقلیم، اسیدی شدن، یوتریفیکاسیون و سمیت انسانی محاسبه می شوند،

درحالی که در سطح پایانی این اثرات به سه حوزه آسیب شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی تجمیع می گردند. این روش امکان تحلیل جامع و مقایسه پذیر اثرات محیط زیستی سناریوهای مختلف را فراهم می سازد. جهت ارزیابی اثرات چرخه حیات با استفاده از روش ReCiPe 2016 Endpoint (I)، چهار گام مشخصه سازی، ارزیابی آسیب، نرمال سازی و وزن دهی به شرح زیر پیموده شد.

- مشخصه سازی اثرات محیط زیستی

در گام مشخصه سازی اثر مداخلات محیط زیستی تخصیص داده شده به یک طبقه اثر، مشخص شده و بر اساس واحد متعارف برای همان طبقه، کمی می شود و مجموع اثرات به صورت عددی در محدوده ۰ تا ۱۰۰ ارائه می شود.

محیط‌زیستی سطح میانی مؤثر بر سلامت انسان و کیفیت اکوسیستم

✓ فاکتور وزن‌دهی ۲۰۰ برای شاخص‌های محیط‌زیستی سطح میانی مؤثر بر کمبود منابع از فواید اصلی وزن‌دهی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اعمال اولویت و اهمیت نسبی طبقه آسیب‌ها نسبت به یکدیگر، برای مثال در شیوه‌ی وزن‌دهی روش ReCiPe اهمیت نسبی طبقه آسیب‌های سلامت انسان و کیفیت اکوسیستم بیشتر از طبقه کمبود منابع است.
- تسهیل در مقایسه بین محصولات و خدمات، برای مثال وجود شاخص واحد این امکان را فراهم می‌آورد که برای تشخیص سریع کل اثرات محیط‌زیستی یک محصول و مقایسه با کل اثرات محیط‌زیستی یک محصول دیگر، به نمره نهایی آن‌ها توجه نمود.

تسهیل در توضیح اثرات محیط‌زیستی و تفصیل نتایج ارزیابی چرخه حیات محصول، برای مثال در روش ReCiPe درنهایت توضیح و تفصیل نتایج نهایی بر مبنای یک واحد ثابت نسبت به سه واحد متفاوت DALY، species.yr و USD آسان‌تر خواهد بود.

تفسیر چرخه حیات

تفسیر نتایج و اتخاذ تصمیم آخرین مرحله از فرآیند ارزیابی چرخه حیات است، در این مرحله مقایسه داده‌های مربوط به تحلیل فهرست‌نویسی و مرحله ارزیابی اثرات جهت ارائه راهکار، انتخاب یا پیشنهاد محصول، فرآیند یا فناوری برتر انجام می‌شود و طبقه اثرات محیط‌زیستی که بیشترین صدمات به آن‌ها وارد شده است و عواملی که باعث این اثرات محیط‌زیستی شده‌اند، معرفی و تحلیل خواهند شد. جهت تفسیر بهتر و اطمینان از صحت نتایج این امکان وجود دارد، شاخص محیط‌زیستی محصول مورد مطالعه را با محصول مشابه در دیتا بیس نرم‌افزار مقایسه کرد.

بدین‌صورت که مقدار هر ماده در ضریبی که نشان‌دهنده سهم نسبی آن از اثرات محیط‌زیستی است، ضرب می‌شود. در گام مشخصه‌سازی با توجه به متفاوت بودن واحدها در این مرحله میزان اثرات به‌صورت عددی قابل‌مقایسه نیستند، لذا در این خصوص پس از نرمال‌سازی و یکسان‌سازی نتایج قابل‌مقایسه خواهد شد.

- ارزیابی آسیب چرخه حیات

هدف از ارزیابی آسیب، هم واحد نمودن تعدادی از شاخص‌های محیط‌زیستی طبقات اثر سطح میانی به‌منظور تلفیق در یک طبقه آسیب سطح نهایی است. به‌عنوان مثال، در روش ReCiPe، تمام طبقه اثراتی که به سلامت انسان اشاره می‌نمایند، با واحد DALY (سال عمر تعدیل‌شده برحسب ناتوانی^۵)، مواردی که به طبقه اثر کیفیت اکوسیستم اشاره می‌کنند با واحد Species.yr (از دست رفتن یک گونه یا کسری از یک گونه در مدت‌زمان یک سال) و مواردی که به طبقه اثر مصرف منابع اشاره می‌کنند با واحد USD (دلار آمریکا) بیان می‌شوند.

- نرمال‌سازی اثرات محیط‌زیستی

اثرات محیط‌زیستی ارزیابی چرخه حیات اغلب در واحدهایی ارائه می‌شوند که درک آن‌ها دشوار و غیرقابل مقایسه با شاخص‌های محیط‌زیستی سایر طبقات اثر (با واحدهای مختلف) است. در گام نرمال‌سازی، طبقات مختلف اثر بدون واحد و با یکدیگر قابل‌مقایسه خواهند شد.

- وزن‌دهی و محاسبه نمره نهایی اثرات

محیط‌زیستی

مرحله وزن‌دهی و محاسبه نمره نهایی چهارمین و آخرین مرحله از ارزیابی چرخه حیات به‌منظور دستیابی به نمره نهایی واحد است. در مرحله وزن‌دهی، نتایج مرحله نرمال‌سازی هر طبقه اثر در فاکتور وزن‌دهی که نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن طبقه اثر است ضرب می‌شود. در روش ReCiPe جهت وزن‌دهی از دو فاکتور وزن‌دهی به شرح ذیل استفاده می‌شود:

✓ فاکتور وزن‌دهی ۴۰۰ برای شاخص‌های

مقایسه شاخص محیط زیستی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با محصول مشابه در دیتا بیس نرم افزار

به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل سازی و تعیین جایگاه عملکرد محیط زیستی محصول مورد مطالعه در مقایسه با محصولات مشابه موجود در بازار، نتایج ارزیابی چرخه حیات به دست آمده با داده های مربوط به یک محصول مشابه موجود در پایگاه داده نرم افزار SimaPro مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه با اهداف محک عملکرد زیست محیطی (ارزیابی نسبی عملکرد محصول در شاخص های مختلف اثرات زیست محیطی در قیاس با محصول مرجع به منظور شناسایی نقاط قوت و ضعف، اعتبار سنجی نتایج (بررسی سازگاری و منطقی بودن نتایج حاصل از مدل سازی با داده های موجود در یک پایگاه داده معتبر و شناسایی احتمالی مغایرت ها) و

شناسایی فرصت های بهبود انجام شد. در فرآیند مقایسه، تلاش گردید تا محصول مرجع انتخابی از پایگاه داده SimaPro تا حد امکان از نظر کارکرد، مشخصات فنی و بازار هدف با محصول مورد مطالعه همخوانی داشته باشد تا یک ارزیابی معنادار و قابل استناد صورت پذیرد. نتایج این مقایسه در بخش نتایج به تفصیل ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

نتایج و بحث

با توجه به اهمیت نتایج مربوط به گام های مشخصه سازی و وزن دهی در تفسیر نتایج و تصمیم گیری در ادامه نتایج این دو مرحله تشریح و تفسیر می گردند.

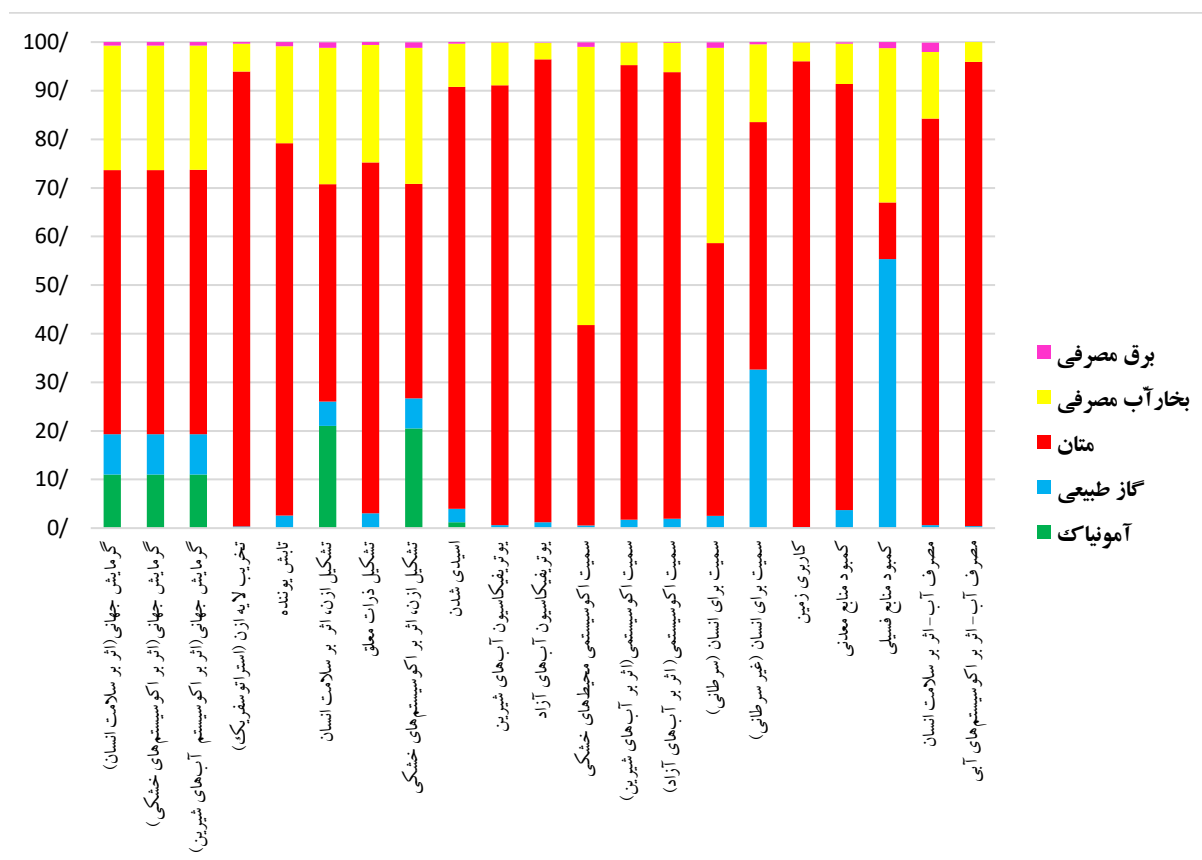
مشخصه سازی اثرات محیط زیستی

در جدول ۳ و شکل ۱ نتایج مربوط به مشخصه سازی واحد آمونیاک ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج گام مشخصه سازی ارزیابی چرخه حیات

Table 3- The Results of the characterization step of Life Cycle Assessment

مقدار نهایی	واحد اندازه گیری	طبقه اثر
۰.۰۰۰۴۱۹	DALY	گرمایش جهانی- اثر بر سلامت انسان
2.75×10^{-6}	Species.yr	گرمایش جهانی- اثر بر اکوسیستم های خشکی
7.49×10^{-11}	Species.yr	گرمایش جهانی- اثر بر اکوسیستم آب های شیرین
9.9×10^{-7}	DALY	تخریب لایه ازن (استراتوسفریک)
5.63×10^{-7}	DALY	تابش یوننده
4.88×10^{-6}	DALY	تشکیل ازن، اثر بر سلامت انسان
۰.۰۰۰۶۰۵	DALY	تشکیل ذرات معلق
7.1×10^{-7}	Species.yr	تشکیل ازن، اثر بر اکوسیستم های خشکی
7.43×10^{-6}	Species.yr	اسیدی شدن
1.14×10^{-6}	Species.yr	یوتریفیکاسیون آب های شیرین
5.2×10^{-11}	Species.yr	یوتریفیکاسیون آب های آزاد
2.99×10^{-6}	Species.yr	سمیت اکوسیستمی محیط های خشکی
1.01×10^{-7}	Species.yr	سمیت اکوسیستمی- اثر بر آب های شیرین
4.63×10^{-9}	Species.yr	سمیت اکوسیستمی- اثر بر آب های آزاد
2.71×10^{-6}	DALY	سمیت برای انسان (سرطانی)
9.3×10^{-6}	DALY	سمیت برای انسان (غیر سرطانی)
1.51×10^{-6}	Species.yr	کاربری زمین
۰.۴۵۵	USD2013	کمبود منابع معدنی
۳۸۸	USD2013	کمبود منابع فسیلی
1.58×10^{-5}	DALY	مصرف آب- اثر بر سلامت انسان
2.82×10^{-11}	Species.yr	مصرف آب- اثر بر اکوسیستم های آبی



شکل ۱- نتایج مشخصه سازی چرخه حیات در سطح میانی
Fig. 1- Characterization results of Life Cycle Assessment at midpoint Level

محیط زیستی منفی منجر شود (Esfahanizadeh & Bagherzadeh, 2023). بخار آب مصرفی در تولید آمونیاک می تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی اکوسیستم های خشکی داشته باشد، به ویژه از طریق انتقال آلاینده ها، تولید باران های اسیدی و تأثیر بر کیفیت خاک و سلامت گیاهان، این عوامل می توانند به تغییرات منفی در تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم ها منجر شوند. (Ghorbani, 2016).

وزن دهی و محاسبه نمره نهایی اثرات محیط زیستی

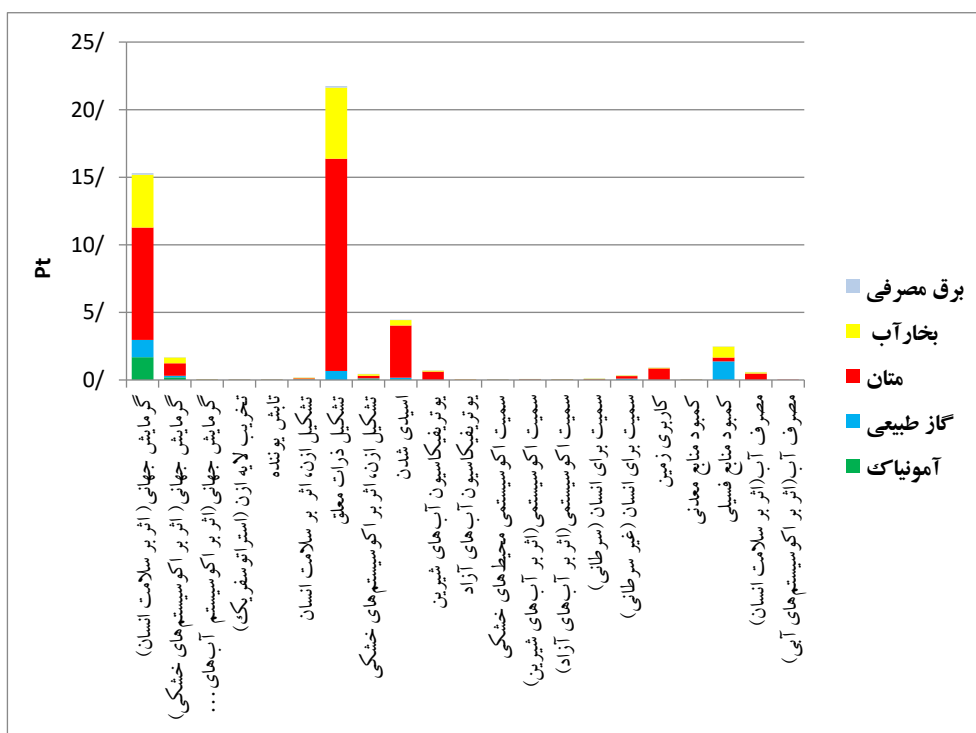
نتایج مربوط به گام وزن دهی بر حسب Pt در سطح میانی واحد آمونیاک در جدول ۴ و شکل ۲ ارائه می گردد. Pt یک شاخص نسبی برای مقایسه شدت اثرات محیط زیستی مختلف است و بر اساس داده های فهرست نویسی چرخه حیات و مدل وزن دهی استاندارد ReCiPe محاسبه می شود. یک pt برابر با یک هزارم اثرات سالانه یک شهروند (اروپایی) بر محیط زیست است.

با توجه به شکل ۱، نقش متان به عنوان اصلی ترین عامل در تمامی طبقات اثر به جز کمبود منابع فسیلی و سمیت اکوسیستمی محیط های خشک قابل مشاهده است. در طبقه کمبود منابع فسیلی بیش ترین اثر مربوط به مصرف گاز طبیعی و در طبقه سمیت اکوسیستمی محیط های خشک بیش ترین اثر مربوط به بخار آب مصرفی است. متان با تشکیل ذرات معلق و ازن سطحی (O_3) بر کیفیت هوا و سلامت انسان، با تغییر در الگوی آب و هوایی و دما بر اکوسیستم ها، با انتشار به آب های زیرزمینی بر مصرف آب و سلامت انسان و با افزایش دما و تغییرات آب و هوایی بر تغییرات در چرخه های بیولوژیکی نظیر کربن و نیتروژن تأثیر منفی می گذارد (Hakakzadeh & Talebi, 2022). گاز طبیعی به عنوان منبع اصلی هیدروژن و وابستگی شدید صنایع به آن، تأثیر زیادی بر طبقه اثر کمبود منابع فسیلی در تولید آمونیاک دارد. کاهش دسترسی به گاز طبیعی می تواند به کاهش تولید، افزایش هزینه ها و تأثیرات

جدول ۴- نتایج وزن دهی ارزیابی چرخه حیات در سطح میانی

Table 4- Weighting Results of Life Cycle Assessment at midpoint Level

مقدار نهایی	واحد اندازه گیری	طبقه اثر
۱۵.۱	Pt	گرمایش جهانی- اثر بر سلامت انسان
۱.۶۴	Pt	گرمایش جهانی- اثر بر اکوسیستم های خشکی
4.47×10^{-5}	Pt	گرمایش جهانی- اثر بر اکوسیستم آب های شیرین
۰.۰۳۵۶	Pt	تخریب لایه ازن (استراتوسفریک)
۰.۰۲۰۲	Pt	تابش یوننده
۰.۱۷۵	Pt	تشکیل ازن، اثر بر سلامت انسان
۲۱.۷	Pt	تشکیل ذرات معلق
۰.۴۲۴	Pt	تشکیل ازن، اثر بر اکوسیستم های خشکی
۴.۴۳	Pt	اسیدی شدن
۰.۶۸۳	Pt	یوتریفیکاسیون آب های شیرین
۰.۰۰۰۳۱	Pt	یوتریفیکاسیون آب های آزاد
۰.۰۱۷۸	Pt	سمیت اکوسیستمی محیط های خشکی
۰.۰۶۰۲	Pt	سمیت اکوسیستمی- اثر بر آب های شیرین
۰.۰۰۲۷۶	Pt	سمیت اکوسیستمی- اثر بر آب های آزاد
۰.۰۹۷۵	Pt	سمیت برای انسان (سرطانی)
۰.۳۳۵	Pt	سمیت برای انسان (غیر سرطانی)
۰.۹۰۲	Pt	کاربری زمین
۰.۰۰۲۸۷	Pt	کمبود منابع معدنی
۲.۵	Pt	کمبود منابع فسیلی
۰.۵۶۸	Pt	مصرف آب- اثر بر سلامت انسان
1.68×10^{-5}	Pt	مصرف آب- اثر بر اکوسیستم های آبی
۴۸.۷	Pt	جمع کل



شکل ۲- نتایج وزن دهی ارزیابی چرخه حیات در سطح میانی

Fig. 2 - Weighting results of Life Cycle Assessment at midpoint Level

وزن دهی و محاسبه نمره نهایی اثرات

محیط‌زیستی واحد آمونیاک در سطح نهایی

در جدول ۵ و شکل ۳ که نتایج مربوط به وزن دهی در سطح نهایی ارائه شده است.

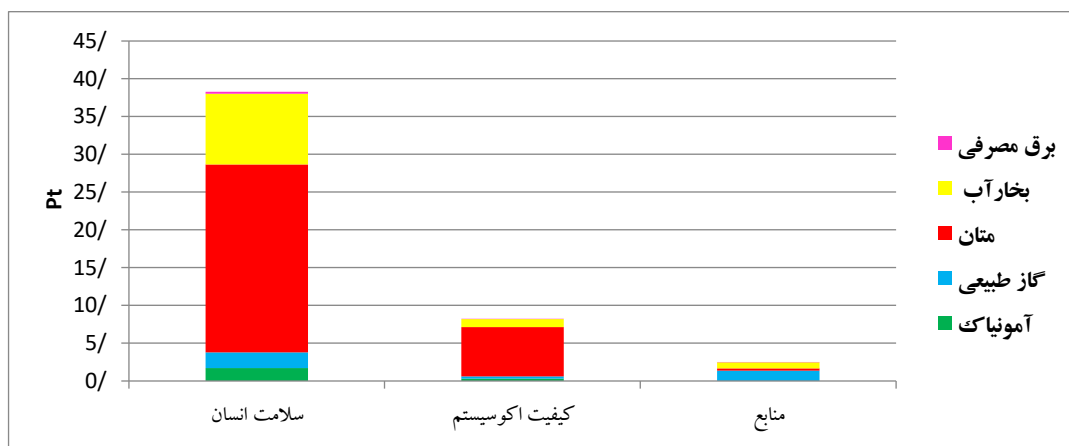
با توجه به شکل ۳ بیشترین اثرات محیط‌زیستی در چرخه حیات واحد آمونیاک پتروشیمی وارد بر طبقه سلامت انسان و سپس کیفیت اکوسیستم است که در هر دو طبقه بیشترین اثرات سوء مربوط به گاز متان و سپس بخار آب مصرفی و آمونیاک است.

با توجه به شکل ۲، مقدار کل اثرات محیط‌زیستی واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان برابر $Pt\ 48/7$ برآورد شد که در این بین بیشترین اثر مربوط به طبقه اثر تشکیل ذرات معلق (به دلیل مصرف گاز متان، بخار آب و گاز طبیعی) و سپس متوجه طبقه اثر گرمایش جهانی - اثر بر سلامت انسان (به دلیل مصرف متان، بخار آب، آمونیاک و گاز طبیعی) و کمبود منابع فسیلی (به دلیل مصرف گاز طبیعی، بخار آب و متان) و اسیدی شدن (به دلیل مصرف متان و بخار آب) است.

جدول ۵- نتایج وزن‌دهی ارزیابی چرخه حیات در سطح نهایی

Table 5- Weighting results of Life Cycle Assessment at endpoint level

طبقه اثر	واحد اندازه‌گیری	مقدار نهایی
مقدار نهایی	Pt	۴۸.۷
سلامت انسان	Pt	۳۸
کیفیت اکوسیستم	Pt	۸.۱۶
منابع	Pt	۲.۵



شکل ۳- نتایج وزن‌دهی ارزیابی چرخه حیات در سطح نهایی

Fig. 3 - Weighting results of Life Cycle Assessment at endpoint level

خراسان و نتایج به‌دست‌آمده، مقایسه نتایج حاصله با وضعیت کشورهای پیشرفته می‌تواند مفید واقع شود. در جدول ۶ و شکل ۴ نتایج نمره نهایی شاخص محیط زیستی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با آمونیاک ROW^A

مقایسه شاخص محیط‌زیستی محصول آمونیاک

پتروشیمی خراسان با محصول مشابه در دیتا

بیس نرم‌افزار

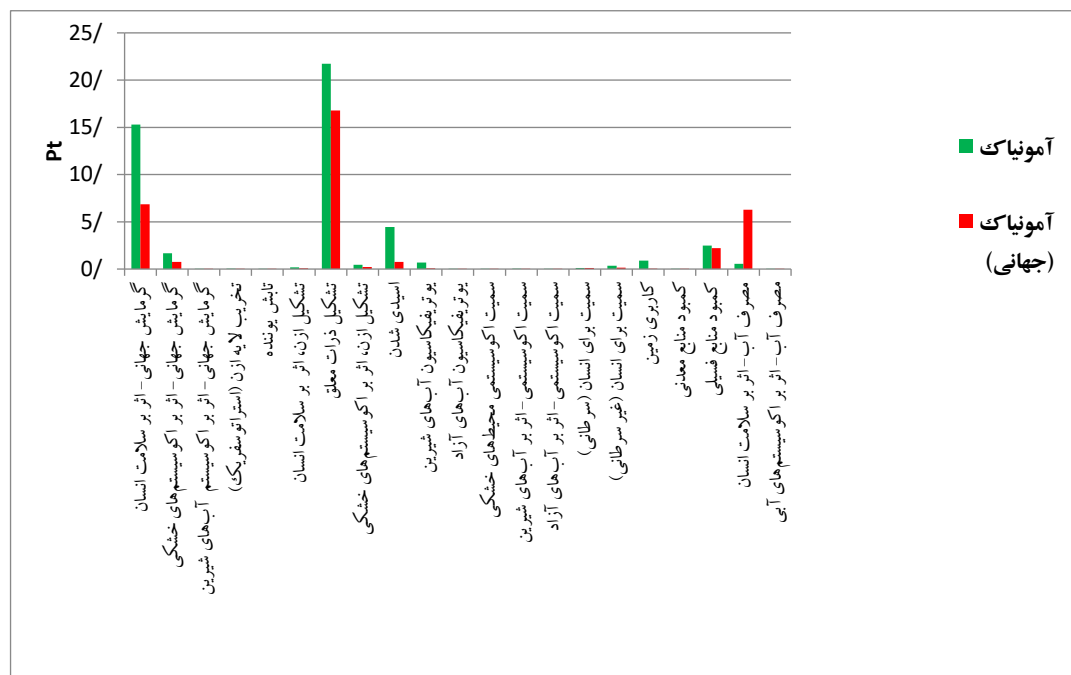
با توجه به انجام ارزیابی چرخه حیات آمونیاک پتروشیمی

(جهانی) با واحد عملکردی در سطح میانی مقایسه شده است که این نتایج نشان می‌دهد در هر دو محصول بیشترین اثرات منفی متوجه طبقات اثر، تشکیل ذرات معلق و سپس گرمایش جهانی - اثر بر سلامت انسان و کمبود منابع فسیلی است این موضوع بیانگر تأیید نتایج به دست آمده است. نتایج ارائه شده در جدول و شکل ذیل نشان می‌دهد که محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان در تمامی طبقات اثر به جز طبقه اثر سمیت برای انسان (سرطانی) با نمره نهایی (۰.۰۹۷۵)، وضعیت نامناسب تری نسبت به محصول مشابه در دیتابیس‌های جهانی در نرم‌افزار SimaPro دارد.

جدول ۶- نتایج مقایسه نمره نهایی شاخص محیط زیستی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با پایگاه داده نرم‌افزار در سطح میانی به ازای یک تن محصول

Table 6- Comparison of the weighing results of Ammonia product of Khorasan Petrochemical Company with the Ammonia of the database at the end point level

طبقة اثر	واحد اندازه‌گیری	آمونیاک پتروشیمی خراسان	آمونیاک (جهانی)
مقدار نهایی	Pt	۴۸.۷	۳۴.۴
گرمایش جهانی - اثر بر سلامت انسان	Pt	۱۵.۱	۶۶۸
گرمایش جهانی - اثر بر اکوسیستم‌های خشکی	Pt	۱.۶۴	۰.۷۴۶
گرمایش جهانی - اثر بر اکوسیستم آب‌های شیرین	Pt	۴.۴۷×10^{-۵}	۲.۰۳۴×10^{-۵}
تخریب لایه ازن (استراتوسفریک)	Pt	۰.۰۳۵۶	۰.۰۰۵۲۶
تابش یوننده	Pt	۰.۰۲۰۲	۰.۰۰۰۶۱
تشکیل ازن، اثر بر سلامت انسان	Pt	۰.۱۷۵	۰.۰۸۸۹
تشکیل ذرات معلق	Pt	۲۱.۷	۱۶.۸
تشکیل ازن، اثر بر اکوسیستم‌های خشکی	Pt	۰.۴۲۴	۰.۲۱۷
اسیدی شدن	Pt	۴.۴۳	۰.۷۶۹
یوتریفیکاسیون آب‌های شیرین	Pt	۰.۶۸۳	۰.۰۷۵۲
یوتریفیکاسیون آب‌های آزاد	Pt	۰.۰۰۰۳۱	۱.۳۵×10^{-۵}
سمیت اکوسیستمی محیط‌های خشکی	Pt	۰.۰۱۷۸	۰.۰۳۲۶
سمیت اکوسیستمی - اثر بر آب‌های شیرین	Pt	۰.۰۶۰۲	۰.۰۰۹۳۷
سمیت اکوسیستمی - اثر بر آب‌های آزاد	Pt	۰.۰۰۲۷۶	۰.۰۰۰۶۰۵
سمیت برای انسان (سرطانی)	Pt	۰.۰۹۷۵	۰.۱۱۳
سمیت برای انسان (غیر سرطانی)	Pt	۰.۳۳۵	۰.۱۵۹
کاربری زمین	Pt	۰.۹۰۲	۰.۰۶۱۸
کمبود منابع معدنی	Pt	۰.۰۰۲۸۷	۰.۰۰۳۲۷
کمبود منابع فسیلی	Pt	۲.۵	۲.۲۲۲
مصرف آب - اثر بر سلامت انسان	Pt	۰.۵۶۸	۶.۲۸
مصرف آب - اثر بر اکوسیستم‌های آبی	Pt	۱.۶۸×10^{-۵}	۲.۰۸×10^{-۵}



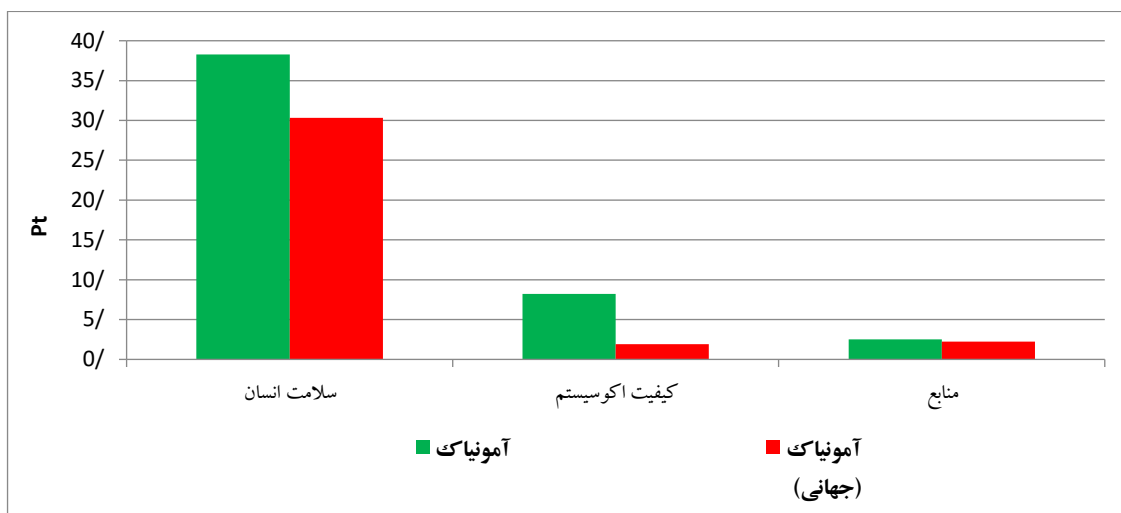
شکل ۴- نتایج مقایسه نمره نهایی شاخص محیط زیستی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با پایگاه داده نرم افزار در سطح میانی
Fig. 4- Comparison of the weighing results of Ammonia product of Khorasan Petrochemical Company with the Ammonia of the database at the midpoint level

اثر مثبتی بر کیفیت اکوسیستم دارد. با این حال، اثرات منفی بیشتر در طبقات اثر دیگر از جمله طبقات اثر گرمایش جهانی - اثر بر سلامت انسان، تشکیل ذرات معلق و اسیدی شدن، ناشی از انتشار بالای آلاینده ها (NO_x، SO_x)، استفاده از سوخت های فسیلی، روش و تجهیزات قدیمی تر است، که منجر به عملکرد ضعیف تر در این طبقات نسبت به داده های جهانی می شود. در نهایت محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با نمره ۴۸.۷ نسبت به آمونیاک ROW (جهانی) با نمره ۳۴.۴ اثرات سوء بیشتری دارد و نیاز به ارائه راهکارهایی جهت مدیریت این اثرات است.

جدول ۶ و شکل ۴ مقایسه نمره نهایی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با محصول مشابه در دیتابیس های جهانی در نرم افزار SimaPro را نشان می دهد. محصول مورد مقایسه به ترتیب دارای اثرات بارزی بر طبقات اثر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و مصرف منابع است. در حالی که آمونیاک موجود در دیتابیس نرم افزار بیشترین اثرات سوء متوجه اثر بر سلامت انسان، سپس مصرف منابع و در آخر کیفیت اکوسیستم است. تفاوت در نمرات نهایی محصول واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان با داده های جهانی در نرم افزار SimaPro نشان می دهد که مصرف کمتر آب به دلیل سیستم بازگردانی و تصفیه خانه فعال،

جدول ۷- مقایسه نتایج وزن دهی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با پایگاه داده نرم افزار در سطح نهایی به ازای یک تن محصول
Table 7- Comparison of the weighing results of Ammonia product of Khorasan Petrochemical Company with the Ammonia of the database at the end point level

طبقه اثر	آمونیاک پتروشیمی خراسان	آمونیاک در دیتا بیس نرم افزار	واحد اندازه گیری
مقدار نهایی	۴۸.۷	۳۴.۴	Pt
سلامت انسان	۳۸	۳۰.۳۰۲۷	Pt
کیفیت اکوسیستم	۸.۱۶	۱.۹۱۱۵	Pt
منابع	۲.۵	۲.۲۲۷۵	Pt



شکل ۵- مقایسه نتایج وزن دهی محصول آمونیاک پتروشیمی خراسان با پایگاه داده نرم افزار در سطح نهایی

Fig. 5- Comparison of the weighing results of Ammonia product of Khorasan Petrochemical Company with the Ammonia of the database at the end point level

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق که به منظور ارزیابی چرخه حیات واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان با روش ReCiPe انجام شد نشان داد که بیشترین اثرات سوء محیط زیستی در طبقات اثر نهایی در واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان متوجه اثر بر سلامت انسان است و در طبقات اثر میانی بیشترین اثرات منفی متوجه طبقات اثر، تشکیل ذرات معلق و سپس گرمایش جهانی- اثر بر سلامت انسان و کمبود منابع فسیلی است، این اثرات مربوط به انتشارات ناشی از مصرف متان به عنوان سوخت مصرفی، بخار آب مصرفی جهت تولید آمونیاک، انتشارات در فرآیند تولید آمونیاک و گاز طبیعی به عنوان خوراک واحد است. در تحقیق مشابهی که توسط Liu et al (2020)، در خصوص ارزیابی چرخه حیات انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای فرآیند تولید آمونیاک انجام شد نیز نتایج نشان داد که بیشترین اثر سوء مربوط به طبقات اثر تشکیل ذرات معلق و گرمایش جهانی است که با نتایج تحقیق حاضر هم سو است. در مطالعه دیگری که توسط Kheiralipour et al. (2021)، به منظور بررسی اثرات محیط زیستی فرآیند پالایشگاه گاز طبیعی انجام شد، نتایج نشان داد که بیشترین اثر محیط زیستی پالایشگاه مورد مطالعه مربوط به طبقه اثر

کاهش منابع فسیلی و گرمایش زمین است؛ نتایج مطالعات Contreras et al (2021) که با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات به ارزیابی مهم ترین آثار محیط زیستی حوزه نفت و گاز دلاور پرداختند نیز نشان داد پتانسیل تغییر اقلیم و کمبود منابع فسیلی از اثرات شاخص محیط زیستی هستند که با نتایج تحقیق حاضر، منطبق است. در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی باید راهکارهایی در خصوص منابع انتشار آلاینده‌ها و کاهش مصرف سوخت مصرفی ارائه گردد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر و مقایسه آن با نتایج تحقیقات مشابه می توان نتیجه گرفت با شناسایی این موارد و ارائه راهکارهایی جهت مدیریت این اثرات می تواند به بهبود عملکرد محیط زیستی واحد آمونیاک و کاهش اثرات منفی آن کمک کند. در مطالعه حاضر نیز با توجه به این که در فرآیند تولید آمونیاک متان به عنوان سوخت مصرفی، گاز طبیعی به عنوان خوراک مجموعه و بخار آب در بخش یوتیلیتی مصرفی و انتشارات ناشی از دودکش های واحد بیشترین اثرات سوء محیط زیستی را دارند لذا می بایست جهت کاهش اثرات سوء محیط زیستی راهکارهایی در خصوص این موارد پیشنهاد و اجرایی گردند که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بهینه‌سازی عملیاتی فرآیند تولید آمونیاک

پیشنهاد می‌شود در واحد ریفرمینگ بخار، کاتالیست‌های با راندمان بالاتر و عمر عملیاتی طولانی‌تر جایگزین کاتالیست‌های موجود گردند. این اقدام منجر به کاهش مصرف گاز طبیعی به‌عنوان خوراک و سوخت شده و به‌طور مستقیم باعث کاهش انتشار CO_2 در مرحله تولید می‌شود. همچنین نصب و به‌کارگیری مبدل‌های بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی ریفرمر و بویلرها می‌تواند برای پیش‌گرمایش خوراک یا تولید بخار کم‌فشار مورد استفاده قرار گیرد که موجب کاهش مصرف انرژی اولیه خواهد شد.

- استفاده محدود و مرحله‌ای از سوخت‌های

جایگزین تجدیدپذیر

در مصارفی که نیاز به انرژی حرارتی با دمای بسیار بالا ندارند (نظیر بویلرهای کمکی یا واحدهای جانبی)، امکان جایگزینی جزئی گاز طبیعی با بیوگاز بررسی و به‌صورت پایلوت اجرا گردد. این اقدام ضمن کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، می‌تواند در کاهش پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) چرخه عمر آمونیاک مؤثر باشد.

- بهینه‌سازی شرایط احتراق در تجهیزات

حرارتی

تنظیم دقیق نسبت سوخت به هوا در مشعل‌های واحد ریفرمینگ و بویلرها از طریق سیستم‌های کنترلی پیشرفته (O_2 Trim Control) پیشنهاد می‌شود. این اقدام باعث جلوگیری از احتراق ناقص، کاهش تولید CO و بهبود بازده احتراق شده و در نتیجه منجر به کاهش انتشار آلاینده‌های هوا خواهد شد.

- جایگزینی مشعل‌های موجود با مشعل‌های

کم‌انتشار (Low NOx Burners)

نصب و بهره‌برداری از مشعل‌های Low NOx در کوره‌ها و بویلرهای واحد آمونیاک می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی و اثبات‌شده، انتشار اکسیدهای نیتروژن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. این راهکار به‌طور مستقیم در کاهش شاخص اسیدی شدن و آلودگی هوا در نتایج LCA مؤثر است.

- پیاده‌سازی فناوری‌های جذب و کاهش انتشار

CO_2

با توجه به سهم بالای انتشار دی‌اکسید کربن در مرحله ریفرمینگ، استفاده از سیستم‌های جذب CO_2 پس از فرآیند ریفرمینگ (نظیر جذب شیمیایی با آمین‌ها) پیشنهاد می‌گردد CO_2 جذب‌شده می‌تواند در واحدهای پایین‌دستی یا برای مصارف صنعتی مورد استفاده قرار گیرد که این امر موجب کاهش انتشار نهایی گازهای گلخانه‌ای خواهد شد.

- استقرار سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر

پایش لحظه‌ای

پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی (ISO 50001) همراه با نصب تجهیزات پایش لحظه‌ای مصرف گاز طبیعی و انرژی الکتریکی در بخش‌های مختلف واحد آمونیاک، امکان شناسایی نقاط اتلاف انرژی و بهینه‌سازی مصرف را فراهم می‌سازد و منجر به کاهش مصرف منابع فسیلی در کل چرخه عمر محصول می‌شود.

- بهسازی سیستم کنترل آلاینده‌های خروجی

بررسی عملکرد فعلی سیستم‌های کنترل آلاینده و ارتقای آن‌ها از طریق نصب اسکرابرهای تر در مسیر گازهای خروجی واحد آمونیاک پیشنهاد می‌شود. این سیستم‌ها می‌توانند ذرات معلق، بخارات سمی و برخی ترکیبات نیتروژنی را قبل از رهاسازی به اتمسفر حذف کرده و اثرات محیط زیستی مرتبط با آلودگی هوا را کاهش دهند.

درنهایت، اجرای تدریجی و ترکیبی این راهکارها می‌تواند به‌عنوان یک برنامه عملیاتی کاهش اثرات زیست‌محیطی، علاوه بر واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان، در سایر صنایع نفت، گاز و پتروشیمی نیز مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، تحلیل هزینه-فایده (Cost-Benefit Analysis) به‌منظور مقایسه هزینه‌های اجرای هر راهکار با منافع حاصل از کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌تواند مکمل تحلیل LCA باشد؛ اما این نوع تحلیل نیازمند داده‌های دقیق اقتصادی مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و ارزش مالی اثرات زیست‌محیطی است. با توجه به محدوده

سپاسگزارییم.

پی‌نوشت‌ها

¹ Global Warming Potential

² Life Cycle Inventory

³ Life Cycle Impact Assessment

⁴ سامانه‌های انسان‌ساخت، از جمله فعالیت‌های صنعتی، زیرساخت‌ها و

فرایندهای فنی

⁵ شاخصی است که میزان از دست رفتن عمر سالم انسان را در اثر مرگ

زودرس و/یا ابتلا به بیماری و ناتوانی نشان می‌دهد.

⁶ Midpoint

⁷ Endpoint

⁸ ROW

References

Afkhami, F., Ardestani, M., & Mehrdadi, N. 2022. Environmental Impact Assessment of Asaluyeh Gas Refinery Products Based on Blue Water Footprint Measurement. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 14(3).

Alizadeh Osaloo, A., & Keynejad, M. A. 2008. Life cycle of processes and its application in environmental impact assessment of petrochemical industries. *Fourth National Congress of Civil Engineering*, Tehran.

Babaei, A., Sayyah Nia, R., & Ommi, S. 2023. Life cycle assessment of the food packaging industry located in Dehak industrial area. *Environmental Research Journal*, 14(28), 235-253.

Contreras, W., Hardy, C., Tovar, K., Piwetz, A. M., Harris, C. R., Tullos, E. E., ... & Laurenzi, I. J. (2021). Life cycle greenhouse gas emissions of crude oil and natural gas from the Delaware Basin. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129-530.

Ebrahimi, E., & Ebrahimi, L. 2022. Life Cycle Assessment (LCA) in crop production, case study: apple and grape. *Journal of Advanced Environmental Sciences*, 20(1)251-266.

Esfahanizadeh, M., & Bagherzadeh Koohbanani, M. H. 2023. Evaluation of the environmental performance of construction and demolition waste management in Tehran using life cycle assessment (LCA).

Esparham, D. R., & Ebrahimi, E. 2021. Environmental Hot Spot Analysis of Energy Supply Systems Using Life Cycle Assessment Approach. *Mechanical Engineering of Energy Conversion*, 8(4), 27-44.

Fazeni-Fraisl, K., & Lindorfer, J. 2023. Comparative life cycle assessment of first and second generation bio isobutene as a drop in substitute for fossil isobutene. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*,

موضوعی و داده‌های موجود در این مطالعه، چنین تحلیلی انجام نشده است. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تحلیل هزینه-فایده برای تکمیل فرآیند تصمیم‌گیری و پشتیبانی از اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی لحاظ شود.

سپاسگزاری

از ریاست محترم و تمامی همکاران واحد HSE پتروشیمی خراسان که با ارائه اطلاعات اولیه و فراهم نمودن بستر پژوهش، ما را در انجام این مطالعه یاری نمودند، صمیمانه

منابع

17(1), 207-225.

Ghorbani, M. 2016. Investigation and identification of environmental pollutants of petrochemical industries and providing appropriate solutions. *First International Conference on Natural Hazards and Environmental Crises in Iran, Solutions and Challenges*.

González-Castaño, A., Bandoni, J. A., & Diaz, M. S. 2016. Multi-Objective Optimisation in a Petrochemical Complex with LCA considerations. *In Computer Aided Chemical Engineering*, 38, 1497- 1502.

Hakakzadeh, M. R., & Talebi, F. 2022. The impact of methane gas on the international environment and Iran with a focus on the role of the National Iranian Gas Company, 1728555.

Kargari, N., & Mostavi, R. 2010. The position of life cycle assessment in evaluating the environmental impacts of agricultural activities. *National Conference on Waste and Agricultural Wastewater*

Kheiralipour, K., Tashanifar, E., Hemati, A., Motaghed, S. and Golmohammadi, A. 2021. Environmental impact investigation of natural gas refinery process based on LCA CML-IA baseline method. *Gas Processing Journal*, 9(2): 53-60.

Lemke, F., & Luzio, J. P. P. 2014. Exploring Green Consumers' Mind-Set toward Green Product Design and Life Cycle Assessment: The Case of Skeptical Brazilian and Portuguese Green Consumers. *Journal of Industrial Ecology*, 18(5), 619-630.

Liu, X., Elgowainy, A., & Wang, M. 2020. Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chemistry*, 22(17), 5751-5761.

Maleki Delarestaghi, R., Ghasemzadeh, R., Mirani,

- M., & Yaghoubzadeh, P. 2018. Comparison of different waste management methods in Tabas city using life cycle assessment approach. *Environmental Science Studies*, 3(3), 782-793.
- Pooladi Borj, B., Saeidi*, S., As'adi, H., Naddaf, A., Fekri, H., & Sarkhoshkalat, M. 2025. Environmental life cycle assessment (LCA) of oxidative desulfurization of gas condensate in novel oxidation system. *Environmental Pollution*, 371, 125958.
- Soltani, A., Rajabi, M. H., Zeinali, A., & Soltani, E. 2010. Environmental impact assessment of crop production using LCA method: wheat in Gorgan. *Crop Production (Electronic Journal of Crop Production)*, 3(3), 201-218.
- Tähkämö, L., Ojanperä, A., Kemppi, J., & Deviatkin, I. 2022. Life cycle assessment of renewable liquid hydrocarbons, propylene, and polypropylene derived from bio-based waste and residues: Evaluation of climate change impacts and abiotic resource depletion potential. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134-645.
- Tighnavard Balasbaneh, T., Kadir, M. A., & Marsono, B. 2012. Environmental lifecycle assessment of a single-family house in Malaysia: Assessing two alternative IBS frames. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), 534-540.
- Yousefi, H., Jaanalizadeh, H., Norollahi, Y., Shadmehr, M., & Mokhtari, B. 2016. Life cycle assessment of renewable energy sources. Third Conference of the Iranian Energy Association (International Conference on Energy Technology and Management), Tehran.
- Zamani, A., Moeinoddini, M., Kazemi, A., & Ghodrati, M. 2025. Terrestrial and Aquatic Ecosystem Toxicity Footprint Based on Life Cycle Perspective in Methanol Production. *Journal of Animal Environmental Research*, 1(2), 125-130.



*This page is intentionally
left blank.*