



Environmental Life Cycle Assessment of Ethylene Glycol Production in the Petrochemical Industry

Rouzhan Siavash Moghaddam¹, Gholamreza Nabi BidHendi², Mohammad Javad Amiri³, Hossein Vahidi^{4*}

¹ PhD Student, Department of Energy Systems and Environment, Kish Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

⁴ Department of Environmental Research, Environmental Research Institute, Kerman Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

Abstract

This study was conducted to perform a life cycle environmental assessment of ethylene glycol production in Iran's petrochemical industry. Using a quantitative and systematic life cycle assessment (LCA) approach, it aimed to identify and quantify the environmental impacts associated with producing one tonne of ethylene glycol and to determine the key hotspots. The methodology was developed in accordance with the ISO 14040 series and comprised goal and scope definition, life cycle inventory (LCI) analysis, life cycle impact assessment (LCIA), and interpretation. The system boundary was defined as gate-to-gate, and the functional unit was set as "production of one tonne of ethylene glycol". The results indicated that the environmental impact profile of ethylene glycol production is significantly influenced by utility units and supporting processes. In the global warming impact category, electricity generation—and subsequently steam generation—accounted for the largest share of CO₂-equivalent emissions, highlighting the dominant role of fossil fuel-based energy supply in shaping the product's carbon footprint. In human health-related categories, including carcinogenic effects and inorganic and organic respiratory impacts, electricity generation was also identified as the primary hotspot, reflecting the substantial contribution of combustion-related emissions and associated pollutants. By contrast, in the non-carcinogenic category, the industrial water production unit was the dominant contributor, underscoring the importance of chemical consumption and management of water-related flows in health-oriented impacts. Overall, the findings confirm that improving the environmental performance of ethylene glycol production requires an integrated approach that simultaneously focuses on optimizing energy use (electricity and steam), reducing combustion emissions, enhancing water and wastewater management, and improving waste management.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Ethylene Glycol Production, Petrochemical Industry, Carbon Footprint, Environmental Impact Assessment

* Corresponding Author: Hossein Vahidi

Email: h.vahidi@kgut.ac.ir
Phone: 09133434393

Doi: 10.48306/juem.2026.579283.1151



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۱

ارزیابی زیست محیطی چرخه حیات تولید اتیلن گلیکول در صنعت پتروشیمی

روژان سیاوش مقدم^۱، غلامرضا نبی بیدهندی^۲، محمدجواد امیری^۳، حسین وحیدی^{۴*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه سیستم انرژی و محیط زیست، پردیس کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

این مطالعه با هدف انجام ارزیابی زیست محیطی چرخه عمر تولید اتیلن گلیکول در صنعت پتروشیمی ایران صورت گرفته است و در تلاش است تا با بهره گیری از رویکرد کمی و نظام مند ارزیابی چرخه عمر اثرات زیست محیطی تولید یک تن اتیلن گلیکول را شناسایی و کمی سازی کرده و نقاط بحرانی فرآیند را تعیین کند. روش تحقیق بر مبنای استانداردهای سری ISO 14040 تدوین شد. مرز سیستم با رویکرد «دروازه تا دروازه» تعریف و واحد عملکردی «تولید یک تن اتیلن گلیکول» در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوی اثرگذاری زیست محیطی تولید اتیلن گلیکول به طور معناداری تحت تأثیر واحدهای یوتیلیتی و فرآیندهای پشتیبان قرار دارد. در دسته اثر گرمایش جهانی، واحد تولید برق و پس از آن تولید بخار بیشترین سهم را در انتشار معادل CO₂ به خود اختصاص دادند که بیانگر نقش غالب تأمین انرژی مبتنی بر سوخت های فسیلی در شکل دهی ردپای کربن محصول است. در دسته های مرتبط با سلامت انسان، از جمله اثرات سرطان زا و اثرات تنفسی آلی و غیر آلی نیز واحد تولید برق به عنوان نقطه بحرانی اصلی شناسایی شد؛ امری که نشان دهنده سهم بالای انتشارهای احتراقی و آلاینده های مرتبط با آن است. در مقابل، در دسته اثر غیرسرطان زاها، سهم غالب به واحد تولید آب صنعتی اختصاص یافت که اهمیت مصرف مواد شیمیایی و مدیریت جریان های مرتبط با آب را در اثرات سلامت محور برجسته می کند. در مجموع، یافته های پژوهش تأیید می کند که بهبود عملکرد زیست محیطی تولید اتیلن گلیکول مستلزم رویکردی یکپارچه است که به صورت هم زمان بر بهینه سازی مصرف انرژی (برق و بخار)، کاهش انتشارهای احتراقی، ارتقای مدیریت آب و پساب و بهبود مدیریت پسماند تمرکز کند.

کلمات کلیدی: ارزیابی چرخه حیات، تولید اتیلن گلیکول، صنعت پتروشیمی، ردپای کربن، ارزیابی اثرات زیست محیطی

۱-مقدمه

ارزیابی چرخه حیات^۱ به عنوان یکی از جامع ترین ابزارهای تصمیم سازی زیست محیطی، امکان سنجش و مقایسه پیامدهای محیط زیستی یک محصول یا فرایند را در طول چرخه حیات آن فراهم می کند. این رویکرد با تکیه بر چارچوب های استاندارد بین المللی (از جمله سری ISO 14040/14044)، جریان های ورودی و خروجی سیستم—مانند مصرف مواد خام، انرژی و آب، و همچنین انتشار آلاینده ها به هوا، آب و خاک—را به صورت کمی شناسایی کرده و آن ها را به شاخص های اثرگذاری زیست محیطی تبدیل می کند. در شرایطی که صنایع برای پاسخ گویی به الزامات پایداری، کاهش شدت کربن و بهبود عملکرد محیط زیستی تحت فشار فزاینده ذی نفعان قرار دارند، LCA می تواند تصویری شفاف و مبتنی بر داده از «نقاط بحرانی» اثرگذار در یک زنجیره تولید ارائه دهد و مسیرهای بهینه سازی را هدفمند سازد.

صنعت پتروشیمی به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد مبتنی بر هیدروکربن، نقش مهمی در تولید مواد شیمیایی پایه و میانی ایفا می کند؛ با این حال، ماهیت انرژی بر و موادی فرایندهای پتروشیمی، این صنعت را به یکی از کانون های بالقوه ایجاد اثرات زیست محیطی تبدیل کرده است. در میان محصولات این صنعت، اتیلن گلیکول به دلیل کاربرد گسترده در تولید پلی استرها، رزین ها، ضدیخ ها و صنایع شیمیایی، از جایگاه ویژه ای برخوردار است و تقاضای آن در بسیاری از کشورها روندی رو به رشد دارد. فرایند تولید اتیلن گلیکول—که معمولاً بر پایه اکسیداسیون اتیلن و سپس هیدراسیون اتیلن اکساید انجام می شود—علاوه بر مصرف قابل توجه انرژی و آب، با انتشارهایی نظیر دی اکسید کربن و آلاینده های احتراقی (به ویژه در واحدهای تولید بخار، مشعل ها و فلرینگ) همراه است. از این رو، شناخت دقیق سهم هر بخش از فرایند در ایجاد اثرات زیست محیطی، برای مدیریت محیط زیستی مجتمع های پتروشیمی و طراحی راهکارهای کاهش اثرگذاری اهمیت ویژه دارد.

با وجود اهمیت راهبردی اتیلن گلیکول در زنجیره ارزش پتروشیمی، ارزیابی های زیست محیطی این محصول در کشور عمدتاً به رویکردهای کیفی یا گزارش های عمومی آلاینده محدود بوده و کمتر به یک تحلیل کمی، نظام مند و قابل مقایسه بر مبنای چارچوب LCA تکیه داشته است. در چنین شرایطی، انجام یک مطالعه ارزیابی چرخه حیات برای تولید اتیلن گلیکول می تواند خلأ دانشی موجود را پوشش دهد و مبنایی علمی برای بهبود عملکرد محیط زیستی فراهم سازد.

اتیلن گلیکول در صنعت پتروشیمی به عنوان یکی از محصولات شیمیایی پایه با اهمیت راهبردی شناخته می شود که نقش تعیین کننده ای در زنجیره تأمین بسیاری از صنایع پایین دستی دارد. این ترکیب شیمیایی در طیف وسیعی از کاربردها از جمله تولید الیاف و رزین های پلی استری، انواع ضدیخ، سیالات انتقال حرارت و سایر محصولات شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد و بررسی ها نشان می دهد که تقاضای جهانی برای آن طی دهه های گذشته به طور مستمر افزایش یافته است [۱]. با وجود این جایگاه صنعتی، فرایند تولید اتیلن گلیکول همانند بسیاری از محصولات پایه پتروشیمی با پیامدهای زیست محیطی قابل توجهی همراه است که ریشه اصلی آن ها را می توان در مصرف بالای انرژی، اتکا به خوراک های فسیلی و انتشار آلاینده های هوا و گازهای گلخانه ای در مراحل مختلف تولید جست و جو کرد [۲]. از این رو، در سال های اخیر تأکید فزاینده ای از سوی متخصصان محیط زیست بر ضرورت گردآوری داده های کمی و دقیق درباره آلاینده ها و اثرات زیست محیطی فرایندهای صنعتی شکل گرفته است؛ امری که می تواند زمینه ساز ارتقای سیاست های نظارتی، بهبود نظام پایش عملکرد صنایع و طراحی راهکارهای مؤثر برای کاهش پیامدهای زیست محیطی فعالیت های پتروشیمی باشد.

در مطالعه که توسط اینگارا و همکاران در سال ۲۰۱۷ صورت گرفت مربوط به صنعت بسته بندی بود [۳]. دسته بندی به شدت به مسائل زیست محیطی مرتبط است زیرا محصولی است که با نرخ مصرف بالای مواد مشخص می شود. اغلب در مسافت های طولانی حمل می شود و عمر کوتاهی دارد. بنابراین، ارائه تجزیه و تحلیل زیست محیطی برای شناسایی راه حل های کارآمد انرژی و منابع ضروری است. این مطالعه، با بهره گیری از یک مطالعه موردی، یک تحلیل مقایسه ای مبتنی بر چرخه زندگی را در بین سه سیستم مختلف بسته بندی مواد غذایی ارائه می کند. این مقاله چرخه حیات بسته بندی فولاد قلع، پلی پروپیلن و شیشه ای یک تولیدکننده کنسرو ایتالیایی را مقایسه می کند. نتایج برای سناریو بازیافت نوسانات قابل توجهی را در مصرف انرژی و انتشار CO₂ در رابطه با سه نوع بسته بندی نشان داد. تجزیه و تحلیل نتایج برای سناریوی پایه، بسته بندی پلی پروپیلن را به عنوان سبزترین راه حل در زمینه پایداری و زیست محیطی نشان می دهد، در حالی که بسته بندی شیشه ای در این مطالعه به عنوان بدترین نوع بسته بندی نشان داده شد [۳].

^۱ Life Cycle Assessment

در مطالعه دیگر تأثیر زیست محیطی چهار گزینه برای تقویت ۱۰۰ مترمربع مسیر پیاده روی بتنی، با استفاده از ارزیابی چرخه حیات از گهواره تا گور LCA، در استرالیا ارزیابی شده است. به طور خاص، چهار گزینه در نظر گرفته شده عبارتند از:

(الف) تولید مش تقویت کننده فولادی SRM،

(ب) تولید الیاف بکر پلی پروپیلن PP،

(ج) بازیافت ضایعات PP صنعتی و

(د) بازیافت زباله های PP خانگی.

FU مقدار 364 کیلوگرم SRM در (الف) و ۴۰ کیلوگرم الیاف PP در (ب، ج و د) تولید می کند که برای رسیدن به همان درجه تقویت در بتن ضروری است. تمام فعالیت های مورد نیاز برای تولید این مواد یعنی ساخت و حمل و نقل و همچنین بازیافت و باز فرآوری در مورد الیاف PP بازیافت شده صنعتی و خانگی در این مطالعه در نظر گرفته شده است، این فرآیندها به صورت جداگانه از نظر مصرف مواد، استفاده از آب و انتشار در محیط تجزیه و تحلیل و کمی سازی می شوند. تأثیرات حاصل از تولید الیاف بازیافتی با تأثیرات تولید الیاف PP بکر و SRM که به طور سنتی استفاده می شوند مقایسه شد. نتایج LCA نشان می دهد که الیاف PP بازیافت شده صنعتی مزایای زیست محیطی مهمی را نسبت به الیاف PP بکر ارائه می دهد. به طور خاص، الیاف PP بازیافت شده صنعتی می تواند ۵۰٪ معادل CO₂، ۶۵٪ معادل PO₄، ۲۹٪ آب و ۷۸٪ معادل روغن را در مقایسه با فیبر PP بکر صرفه جویی کند. در مقایسه با SRM، فیبر PP بازیافت شده صنعتی می تواند ۹۳ درصد معادل CO₂، ۹۷ درصد معادل PO₄، ۹۹ درصد آب و ۹۱ درصد معادل روغن را ذخیره کند. فیبر PP بازیافتی خانگی نیز اثرات زیست محیطی کمتری نسبت به فیبر PP بکر به جز مصرف بیشتر آب مرتبط با فرآیندهای شستشو ایجاد می کند. [۴]

در بررسی اثرات زیست محیطی که به روی کامپوزیت های پلیمرهای تقویت شده با الیاف طبیعی در این مطالعه صورت گرفت، الیاف طبیعی مانند سبزال، کتان، جوت و الیاف چوب وقتی به درستی با پلیمرها ترکیب شوند، قابلیت تقویت خوبی دارند. این کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی طیف گسترده ای از کاربردها را در صنعت ساختمان و ساخت و ساز و صنعت خودرو پیدا می کنند. استفاده از الیاف طبیعی در مواد کامپوزیتی به طور خودکار آن را به یک مواد پایدار تبدیل نمی کند، به این معنی که طبیعی بودن لزوماً به معنای سازگاری با محیط زیست نیست. در این مقاله، مقالات مربوط به کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی با توجه به وضعیت زیست محیطی آن ها بررسی شده است. ارزیابی چرخه عمر برای پیش ساخته های کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف چوب تولید شده به روش قالب گیری فشاری در مقایسه با پلی پروپیلن انجام شده است. از سه سطح فیبر ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ جرمی استفاده شده است. سطح اثرات زیست محیطی ناشی از حمل و نقل نیز مورد مطالعه قرار می گیرد. این مطالعه اصطلاح جدیدی به نام چگالی خدمات مواد را معرفی می کند که به عنوان حجم ماده ای که یک نیاز مقاومتی خاص را برآورده می کند تعریف می شود. دلیل این امر این است که حجم خاصی از مواد مختلف برای تحمل یک بار مکانیکی معین مورد نیاز است. مقایسه چگالی خدمات مواد برای دو ماده: کامپوزیت تقویت شده با الیاف چوب و پلی پروپیلن انجام شده است. نتایج نشان داد که وقتی از چگالی خدمات مواد به عنوان واحد عملکردی استفاده می شود، کامپوزیت تقویت شده با الیاف چوب سازگاری با محیط زیست بالاتری نسبت به پلی پروپیلن نشان داد. [۵]

همسویی پایداری در فرآیند ساخت و ساز را می توان از طریق فرآیند انتخاب مواد با تأثیر کم بر محیط زیست و سلامت انسان به دست آورد. امروزه، مواد بیوکامپوزیت و مواد سازگار با محیط زیست که در صنعت ساخت و ساز استفاده می شوند، منجر به ظهور نسل بعدی مصالح ساختمانی پایدار و سبز می شود. هدف این مقاله ایجاد مدلی از بیوکامپوزیت کاملاً هیبریدی مبتنی بر زیست کامپوزیت بر اساس ارزیابی چرخه حیات LCA و مقایسه آن با کامپوزیت کاملاً مبتنی بر نفت است که مصالح ساختمانی معمولی هستند. چارچوب روش شناسی این تحقیق بر اساس استانداردهای ISO 14040 و ۱۴۰۴۴ تعیین شده است. همچنین، ReCiPe به عنوان روش رایج در نرم افزار SimaPro برای ارزیابی و مقایسه ارزیابی تأثیر انتخاب شده است. این تحقیق تأثیر منفی این نوع مصالح ساختمانی را با ارائه امتیازات واحد از سه معیار سلامت انسان، اکوسیستم و منابع برجسته می کند. مشاهده شده است که جایگزینی بیوکامپوزیت با کامپوزیت کاملاً مبتنی بر نفت منجر به کاهش حدود ۳۰ درصدی در نتیجه تک امتیازی شده است. اهمیت این تحقیق منجر به افزایش اطلاعات برای قضاوت در سیاست گذاران و سازندگان آینده نگر در مرحله تجاری سازی این بیوکامپوزیت های جدید به عنوان مصالح ساختمانی پایدار و سبز کمک می کند [۶].

هم سوخت‌های زیستی و هم پلاستیک‌های زیستی اغلب به‌عنوان راه‌حل‌های پایدار برای مشکلات زیست محیطی فعلی مانند تغییرات آب‌وهوا، کاهش فسیل‌ها و اسیدی شدن در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، هر دو به دلیل هزینه‌های اقتصادی، رقابت با سایر کالاهای مفید اجتماعی مانند غذا و ارائه مزایای زیست محیطی محدود در مقایسه با همتایان فسیلی خود مورد انتقاد قرار گرفته‌اند. این مطالعه یک تجزیه و تحلیل چرخه حیات محیطی را برای بطری‌های ۱۰۰٪ پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) با پایه زیستی، در مقابل بطری‌های PET کاملاً مبتنی بر فسیل و تا حدی زیستی ارائه می‌کند. یک ارزیابی چرخه حیات اسنادی و تجزیه و تحلیل حساسیت مفروضات کلیدی برای مقایسه اثرات گهواره به کارخانه (به‌عنوان مثال استخراج مواد اولیه، تولید جزء و تولید محصول) دوازده سناریو تولید بطری PET انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بطری‌های PET مبتنی بر زیست‌توده چوبی ۲۱ درصد پتانسیل کمتری برای گرم شدن کره زمین دارند و به سوخت فسیلی ۲۲ درصد کمتری نسبت به همتایان مبتنی بر فسیل نیاز دارند، اما در مقوله‌های دیگر مانند سمیت زیست محیطی و اثرات تخریب لایه ازن عملکرد بدتری دارند. نتایج به مفروضات تخصیص تأثیر و همچنین مفروضات ورودی پارامتر مربوط به تولید ایزوبوتانول حساس هستند. در بیشتر دسته‌ها، با در نظر گرفتن اعتبارات تأثیر اجتناب‌ناپذیر، مواد اولیه باقیمانده جنگل عملکرد زیست محیطی کلی بهتری نسبت به مواد اولیه ذرت برای تولید بطری‌های PET دارند. تنوع درباره‌ی اجتناب‌ناپذیر می‌تواند رتبه‌بندی نسبی محیطی را برای بطری‌های فسیلی و زیستی PET تغییر دهد. بسته به مواد اولیه زیست‌توده، استخراج و پیش‌فرآوری احتمالاً نسبت به فرآیندهای پالایشگاه فسیلی متناظر، به دلیل انتشار قابل توجه بالادستی که در کاربرد کودها و ورودی‌های شیمیایی و انرژی قابل توجهی برای شکستن پیوندهای لیگنوسولوزی مقاوم لازم است، انتشار فشرده‌تری دارند. [۷]

در ادامه برخی از مطالعات مرتبط به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مرور بر مطالعات مربوط با ارزیابی چرخه حیات و محاسبه ردپای کربن

سال	منبع	توضیحات
۲۰۲۲	[۸]	این مطالعه به ارزیابی چرخه حیات هیدروکربن‌های مایع تجدیدپذیر، پروپیلن و پلی‌پروپیلن مشتق شده از زباله‌ها و پسماندهای زیستی می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهند که پلی‌پروپیلن زیستی در مقایسه با پلی‌پروپیلن مبتنی بر فسیل حداقل ۸۱٪ ردپای کربن کمتری در طول چرخه حیات خود دارد. این کاهش با بهینه‌سازی مکان‌های مجتمع‌های پتروشیمی مرتبط و سایت‌های تولید به منظور به حداقل رساندن تأثیرات زیست محیطی حاصل می‌شود.
۲۰۲۲	[۹]	این مطالعه ارزیابی چرخه حیات تولید و بازیافت پلی‌پروپیلن در منطقه شورای همکاری خلیج فارس (GCC) را ارزیابی می‌کند. میزان انتشار کربن معادل برای PP ارزیابی شده است که نشان‌دهنده پتانسیل کاهش قابل توجه از طریق بهبود شیوه‌های بازیافت است. مطالعه همچنین تأثیرات فرآیندهای پتروشیمی بر محیط زیست را بررسی می‌کند و بر نیاز به گزینه‌های پایدارتر تأکید می‌کند.
۲۰۲۲	[۱۰]	این مطالعه تأثیر زیست محیطی یک قطعه پلاستیکی تزریق شده با پلی‌پروپیلن بازیافتی را با پلی‌پروپیلن دست‌نخورده و دیگر مواد جایگزین مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پلی‌پروپیلن بازیافتی باعث کاهش ۲۹٫۸٪ در ردپای زیست محیطی تحت روش ReCiPe و ۴۲٫۸٪ تحت روش ردپای کربن در مقایسه با پلی‌پروپیلن دست‌نخورده می‌شود. این نتایج به مزایای استفاده از مواد بازیافتی برای کاهش اثرات زیست محیطی اشاره دارد.
۲۰۲۳	[۱۱]	این تحقیق به ارزیابی اثرات زیست محیطی تولید گلوله‌های پلاستیکی بازیافتی، از جمله پلی‌پروپیلن بازیافتی می‌پردازد. این مطالعه نشان می‌دهد که انتشار کربن در طول تولید گلوله از زباله‌های پلاستیکی ۲۲٫۶٪ کاهش یافته و سایر اثرات زیست محیطی بین ۱۱٪ تا ۴۰٪ کمتر از پلی‌پروپیلن دست‌نخورده است. این پژوهش به مزایای بازیافت در صنعت پتروشیمی برای کاهش ردپای کربن تأکید دارد.
۲۰۲۳	[۱۲]	این مطالعه به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید پلی‌پروپیلن با تمرکز بر جداسازی غشایی گازهای خروجی می‌پردازد. این تحقیق نشان‌دهنده پتانسیل قابل توجه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و انتشار کربن به ازای هر کیلوگرم محصول ۱٫۵۸ کیلوگرم CO ₂ محاسبه شده است. این مطالعه اهمیت بهینه‌سازی فرآیند در کاهش ردپای کربن تولید پتروشیمی را برجسته می‌کند.

سال	منبع	توضیحات
۲۰۲۳	[۱۳]	این مطالعه به ارزیابی چرخه حیات فرآورده‌های مختلف تولید پلی‌اتیلن با تمرکز بر جذب و استفاده CO ₂ می‌پردازد. این تحقیق اثرات زیست‌محیطی این فرآورده‌ها، به ویژه در ارتباط با انتشار کربن، را بررسی می‌کند و به پتانسیل یکپارچه‌سازی شیوه‌های پایدار برای کاهش ردپای کربن در صنایع پتروشیمی اشاره دارد.
۲۰۲۴	[۱۴]	این مطالعه به بهینه‌سازی فرآورده‌های تولید پلی‌پروپیلن با تمرکز بر جداسازی غشایی گازهای خروجی می‌پردازد. این تحقیق نشان‌دهنده پتانسیل قابل توجه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و انتشار کربن به ازای هر کیلوگرم محصول ۱,۵۸ کیلوگرم CO ₂ محاسبه شده است. این مطالعه اهمیت بهینه‌سازی فرآیند در کاهش ردپای کربن تولید پتروشیمی را برجسته می‌کند.
۲۰۲۴	[۱۵]	این تحقیق یک ارزیابی چرخه زندگی از گهواره تا دروازه کامپوزیت‌های زیستی پلی‌آمید-نشاسته را انجام می‌دهد که بر روی ردپای کربن به عنوان شاخص پایداری تمرکز دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه مواد مبتنی بر زیستی در کاهش ردپای محیطی نقش دارند.
۲۰۲۴	[۱۶]	این مقاله یک مدل حسابداری انتشار کربن برای محصولات مکانیکی سه مرحله‌ای در تولید پیشنهاد می‌کند. این به طور سیستماتیک انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مراحل مختلف تولید ارزیابی می‌کند تا بینشی برای استراتژی‌های کاهش کربن ارائه دهد.
۲۰۲۴	[۱۷]	این مطالعه امکان سنجی فنی-اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر استفاده از منابع انرژی بدون کربن در فرآیند ترک خوردگی نفتا را بررسی می‌کند. این سوخت‌های جایگزین و تأثیر آنها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و دوام اقتصادی را ارزیابی می‌کند.
۲۰۲۴	[۱۸]	این تحقیق کارایی متابولیسم منابع جهانی را در زنجیره تامین پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) ارزیابی می‌کند. این استراتژی‌های کاهش مشترک را برای بهبود کارایی منابع و کاهش انتشار کربن در تولید PET پیشنهاد می‌کند.
۲۰۲۴	[۱۹]	این مقاله پتانسیل انجام یک ارزیابی چرخه عمر محصولات PVC در اندونزی را بررسی می‌کند. این پیامدهای زیست‌محیطی تولید PVC را مورد بحث قرار می‌دهد و بهبودهای پایداری را پیشنهاد می‌کند.
۲۰۲۴	[۲۰]	این مطالعه به بررسی انتشار کربن در صنعت الفین و بررسی استراتژی‌های توسعه کم کربن می‌پردازد. بهبودهای بهره‌وری انرژی، فناوری‌های جذب کربن و پیامدهای سیاستی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را ارزیابی می‌کند.
۲۰۲۵	[۲۱]	این مطالعه سیاست‌های اوج کربن چین را تجزیه و تحلیل می‌کند و انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه زندگی را تحت نظم محدودیت پلاستیک تخمین می‌زند. این ارزیابی می‌کند که چگونه این سیاست بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت پلاستیک و پیامدهای پایداری گسترده تر آن تأثیر می‌گذارد.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در حوزه ارزیابی چرخه حیات و تحلیل ردپای کربن محصولات و فرآورده‌های صنعت پتروشیمی انجام شده است که هر یک به بررسی ابعاد مختلفی از پیامدهای زیست‌محیطی این صنعت پرداخته‌اند. تمرکز اصلی این مطالعات بر شناسایی منابع عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها در مراحل مختلف تولید بوده و در بسیاری از آن‌ها، راهکارهایی برای کاهش انتشارها و ارتقای پایداری زیست‌محیطی واحدهای پتروشیمی پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که تحلیل سیستماتیک فرآورده‌های تولیدی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد زیست‌محیطی این صنعت ایفا کند.

مرور این مطالعات حاکی از آن است که اغلب آن‌ها از چارچوب ارزیابی چرخه حیات به عنوان ابزار اصلی تحلیل اثرات زیست‌محیطی استفاده کرده‌اند. برای نمونه، برخی پژوهش‌ها با بهره‌گیری از LCA به بررسی اثرات زیست‌محیطی محصولات مختلف پرداخته و قابلیت‌ها و محدودیت‌های این روش را به عنوان یک استاندارد تحلیلی ارزیابی کرده‌اند. در مطالعات دیگر، تحلیل‌های مقایسه‌ای میان انواع پلیمرها نظیر PVC، PE و PP انجام شده و نتایج نشان داده است که پلی‌پروپیلن، به دلیل ماهیت انرژی‌بر فرآیند تولید و وابستگی بالا به منابع فسیلی، سهم بیشتری در ایجاد اثر گرمایش جهانی دارد. همچنین بررسی محصولات پتروشیمی مختلف، از جمله ترکیبات پلیمری و محصولات پلاستیکی، بیانگر آن است که مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مراحل تولید، منجر به شکل‌گیری ردپای کربن قابل توجهی می‌شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معرفی محدوده مطالعاتی

با توجه به محدودیت های تجاری در ارائه اطلاعات مربوط به پتروشیمی مورد مطالعه و تعهدات محرمانگی مرتبط با داده های استفاده شده در مطالعه ارزیابی چرخه حیات، جزئیات مربوط به منطقه مورد مطالعه به درخواست مسئولین ارائه نمی شود. این تصمیم به منظور حفظ حریم خصوصی و رعایت تعهدات قراردادی اتخاذ شده است تا اطمینان حاصل شود که اطلاعات حساس و استراتژیک به درستی محافظت می شوند.

۲-۲- مراحل ارزیابی زیست محیطی چرخه حیات تولید اتیلن گلیکول

ارزیابی زیست محیطی چرخه حیات یک تکنیک جامع برای ارزیابی کل تأثیرات زیست محیطی یک محصول یا سیستم در طول چرخه حیات آن است. LCA تمام تأثیرات را از استخراج مواد خام، تولید، حمل و نقل، مرحله استفاده و دفع نهایی بررسی می کند و از یک رویکرد "گهواره تا گور" پیروی می کند. انجام این مطالعات چهار مرحله اصلی دارد که خلاصه آن در شکل زیر نشان داده شده است.



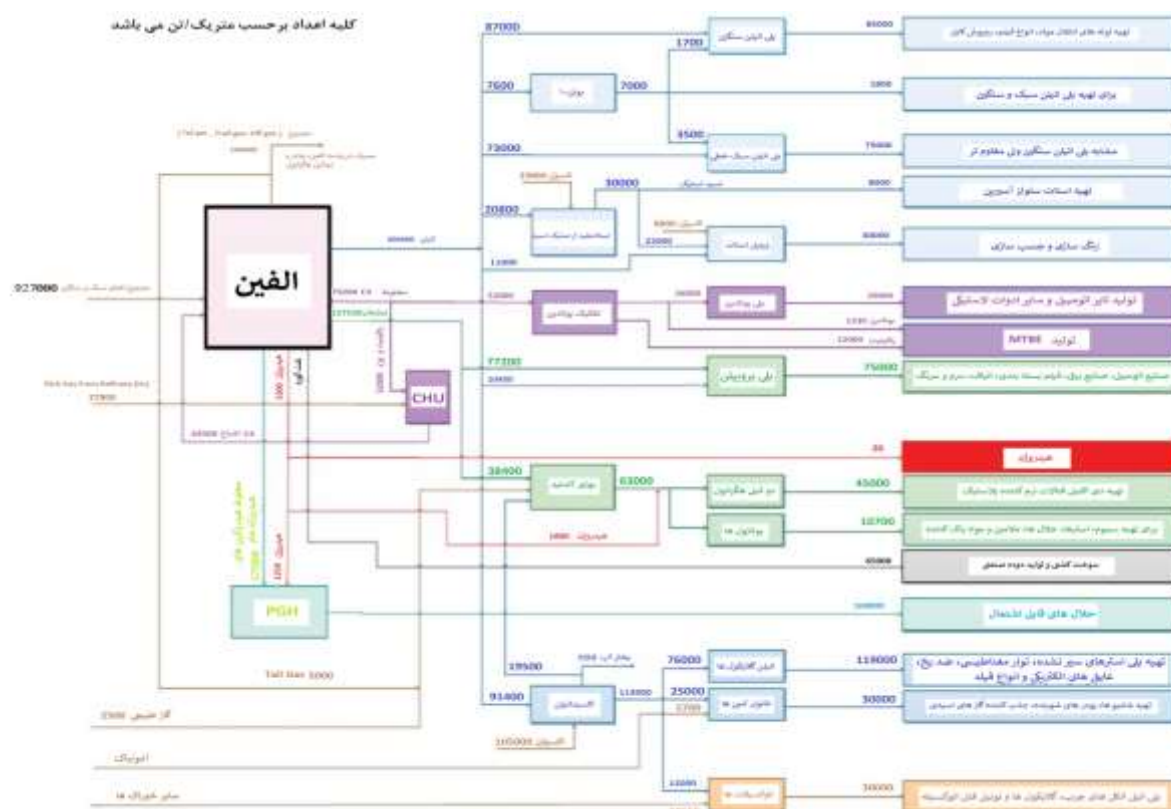
شکل ۱- چهار مرحله اصلی در مطالعات ارزیابی چرخه حیات به همراه جزئیات هر مرحله [۲۲]

۲-۳- تعیین دامنه و مرز سیستم مورد مطالعه

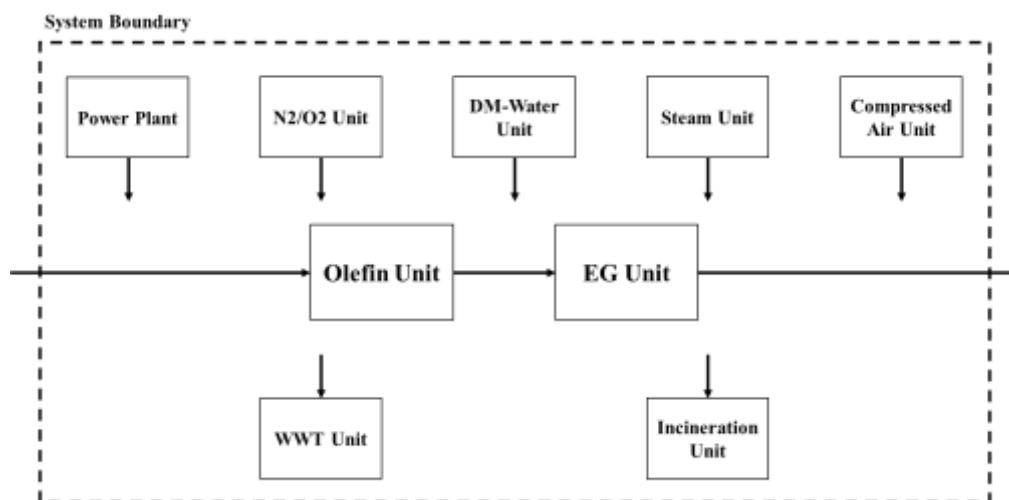
در پارامترهای این پژوهش واحد عملکردی به عنوان تولید یک تن پلی پروپیلن تعیین شده است. مدل فعلی LCA بر اساس متغیرهای کلیدی مانند تمام مواد ورودی، انرژی و آب مصرفی در فرآیند تولید اتیلن گلیکول، و داده های مرتبط - انتشارها، تولید و اتلاف انرژی، پساب - به عنوان متغیرهای وابسته استوار است. این داده ها از طریق بازدیدهای سایت، نمونه برداری، آزمایش، ارزیابی های محاسباتی و قضاوت مهندسی به دقت جمع آوری خواهند شد.

مرز سیستم برای LCA توسط اهداف و محدوده مطالعه تعیین می‌شود. در این تحلیل، هدف ما ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از عملیات تولید در یک واحد پتروشیمی خاص در ایران است. بنابراین، تأثیر زیست‌محیطی تحت بررسی به تأسیسات و مناطق مجاور آن محدود می‌شود. مطالعه ما از رویکرد 'دروازه به دروازه' استفاده می‌کند و به‌طور صریح از تأثیرات گسترده‌تر 'گهواره تا گور' صرف نظر می‌کند. این مرزبندی شامل فرآیندهای بالادستی مانند استخراج مواد خام، حمل و نقل به کارخانه و هرگونه فعالیت‌های مقدماتی و همچنین فرآیندهای پایین‌دستی شامل توزیع محصول، استفاده، تولید مجدد و دفع نهایی نمی‌شود. نقطه تمرکز برای مرز سیستم ما شامل ورود خوراک به مجتمع پتروشیمی تا بسته‌بندی محصول به همراه مدیریت و دفع پسماندهای جامد و مایع است، همانطور که در شکل همراه نشان داده شده است. این مرز واحدهای خاصی از جمله اولفین، تولید برق و بخش‌های تولید بخار را شامل می‌شود که منحصراً نتایج واسطه‌ای را تولید می‌کنند.

در این مطالعه مرز سیستم، از دروازه تا دروازه تعریف شده است. در این مرز سیستم، اثرات زیست‌محیطی جریان بالادستی و پایین‌دستی مجتمع پتروشیمی در نظر گرفته نخواهد شد. جریان بالادستی از استخراج مواد خام، حمل و نقل مواد و فرآیندهایی که تا قبل از ورود خوراک به مجتمع پتروشیمی را شامل می‌شود. جریان پایین‌دستی شامل حمل و نقل محصولات تولیدی، استفاده از محصولات، فرآیندهای تولید و در نهایت پایان عمر محصول است. مرز سیستم در این مطالعه از ورود خوراک به مجتمع پتروشیمی تا بسته‌بندی محصولات و پالایش مواد زاید جامد و مایع را شامل می‌شود. در شکل ۲، جریان مواد برای کل محصولات تولیدی در مجتمع مورد مطالعه را مشاهده می‌کنید. برخی از واحدها مانند واحد الفین، واحد نیروگاه و واحد تولید بخار تنها محصولات میانی تولید می‌کنند. همچنین در شکل ۲ و ۳ مرز سیستم برای واحدهایی که در تولید محصول اتیلن‌گلیکول دخیل هستند، نشان داده شده است.



شکل ۲- جریان مواد برای کل واحدهای تولید مجتمع پتروشیمی



شکل ۳- مرز سیستم مورد مطالعه برای تولید محصول اتیلن گلیکول

همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است، واحدهای دخیل در تولید اتیلن گلیکول عبارتند از:

۱. واحد اولفین (تولید پروپیلن و اتیلن)

۲. واحد تولید اتیلن گلیکول

۳. واحد بسته بندی

۴. واحد تولید بخار آب

۵. واحد نیروگاه

۶. واحد تولید هوای ابزار دقیق

۷. واحد سوزاندن پسماند (زیباله سوز)

۸. واحد تصفیه فاضلاب

۲-۴-سیاهه نویسی

جمع آوری داده ها به عنوان یکی از دشوارترین جنبه های اجرای مدل LCA مطرح می شود. اگرچه می توان از منابع ثانویه بسیاری مانند مقالات علمی یا پایگاه های داده مانند ecoinvent استفاده کرد، اما معمولاً با فرآیندها یا موادی خاص مواجه می شویم که داده های مربوط به آن ها به راحتی در دسترس نیست.

۲-۴-۱-جمع آوری و دسته بندی داده ها

جدول ۲ طبقه بندی را که داده های فهرست چرخه حیات، شامل ورودی های مواد، ورودی های انرژی، ورودی های منابع طبیعی، خروجی های انتشار و خروجی های محصول را توصیف می کند. داده های موجودی به جرم در واحد عملکردی (در مورد ورودی های مواد و منابع و انتشار یا خروجی های مواد)، مگاژول (MJ) در هر واحد عملکردی (در مورد ورودی های انرژی)، یا تعداد اجزا در هر واحد عملکردی (در مورد اجزای نمایشگر) نرمال سازی شده اند. واحد عملکردی، تولید یک تن محصول اتیلن گلیکول است.

داده هایی که تولید را برای یک سال از فرآیندهای پیوسته منعکس می کردند به یک واحد عملکردی مقیاس شدند. بنابراین، فرض بر این بود که مواد یا انرژی بیش از حد مرتبط با استارت آپ ها، تعطیلی ها و تغییرات در طول زمان توزیع می شوند. در نتیجه، هر گونه مدل سازی محیطی و مواجهه مرتبط با ارزیابی تأثیر، انتشارات مداوم را منعکس می کند به طوری که غلظت های تعادلی ممکن است در نظر گرفته شود. اگر سال گزارش برای هر یک از اقلام موجودی کمتر از یک سال بود، تجزیه و تحلیل به صورت مناسب تعدیل شده است.

در جدول زیر دسته بندی داده های مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات بر اساس طبقه بندی پایگاه اطلاعاتیecoinvent نشان داده شده است. برای هر واحد فرایندی در مرز سیستم بایستی اطلاعات براساس این جدول جمع آوری، تجمیع و خلاصه سازی شوند.

جدول ۲- دسته بندی داده های مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات

دسته داده ها	شرح
ورودی مواد (کیلوگرم بر هر واحد عملکردی)	
مواد اولیه	مواد واقعی که محصول نهایی را برای یک فرآیند خاص تشکیل می دهند. اینها می توانند مواد منفرد یا ترکیبی از موادی باشند که یک جزء را تشکیل می دهند.
مواد فرعی (فرایندی)	موادی که در فرآوری یک محصول برای یک فرآیند خاص استفاده می شوند. به عنوان مثال مواد فرایندی از تولید مانیتور می تواند شامل مواد شیمیایی باشد که در طول فتولیتوگرافی استفاده می شوند و شسته می شوند و بخشی از محصول نهایی نیستند، اما برای تولید محصول ضروری هستند.
ورودی های انرژی (MJ بر واحد عملکردی)	
انرژی فرآیند	انرژی مصرف شده توسط هر فرآیند در چرخه حیات.
انرژی پیش احتراق	انرژی صرف شده برای استخراج، پردازش، پالایش و تحویل سوخت قابل استفاده برای احتراق.
انرژی حمل و نقل	انرژی مصرف شده در حمل و نقل مواد یا محصولات در چرخه حیات.
ورودی های منابع طبیعی (kg بر هر واحد عملکردی)	
منابع تجدید ناپذیر	مواد استخراج شده از زمین که تجدیدنپذیر یا منابع ذخیره شده هستند (مانند زغال سنگ).
منابع تجدیدپذیر (مانند آب)	آب یا سایر منابع یا جریان تجدیدپذیر (به عنوان مثال، سنگ آهک) در تجزیه و تحلیل گنجانده شده است. مقادیر داده های منابع تجدیدپذیر بر حسب جرم آب مصرفی برای یک فرآیند خاص ارائه می شوند.
خروجی انتشار (kg بر هر واحد عملکردی)	
هوا	جرم یک محصول یا ماده که در هر مرحله از چرخه حیات به عنوان یک آلاینده در نظر گرفته می شود. خروجی های هوا نشان دهنده انتشار واقعی گاز یا ذرات به محیط از یک نقطه یا منبع انتشار، پس از عبور از دستگاه های کنترل انتشار، در صورت وجود، هستند.
آب	جرم یک محصول یا ماده که در هر مرحله از چرخه حیات به عنوان یک آلاینده در نظر گرفته می شود. خروجی آب نشان دهنده تخلیه واقعی به آب های سطحی یا زیرزمینی از منابع نقطه ای یا پراکنده، پس از عبور از هر دستگاه تصفیه آب است.
مواد زائد جامد	جرم محصول یا ماده ای که در محل دفن پسماند یا چاه عمیق دفن می شود. نشان دهنده دفع واقعی جامدات یا مایعاتی است که قبل یا بعد از تصفیه (به عنوان مثال، سوزاندن، کمپوست)، بازیافت یا فرایندهای بازیافت دفع می شوند.
محصولات (kg مواد یا تعداد اجزا بر هر واحد عملکردی)	
محصولات اولیه	مواد یا اجزای خروجی از یک فرآیند که به عنوان ورودی یک فرآیند واحد بعدی در چرخه حیات دریافت می شود.
محصولات مشترک	خروجی های مواد از یک فرآیند که می تواند مورد استفاده قرار گیرد، چه با یا بدون پردازش بیشتر، که به عنوان بخشی از محصول واحد عملکردی نهایی استفاده نمی شود.

۲-۴-۲- جمع آوری داده ها

عمده اطلاعات مورد استفاده بر اساس مستندات و اطلاعات میدانی جمع آوری شده از مجتمع به دست آمده است که مجموعه دسته بندی شده آنها به صورت پیوست در اختیار مجتمع قرار خواهد گرفت.

داده‌ها به دو دسته داده‌های اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. داده‌های اولیه شامل داده‌های فنی، داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی است. داده‌های ثانویه در صورت کمبود داده‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های ثانویه شامل داده‌های مطالعات مشابه و داده‌های پایگاه ecoinvent داده است. سنجش آلاینده‌ها در این مطالعه از سه منبع اصلی استخراج شده است:

۱. داده‌های پایش شده توسط پتروشیمی مورد مطالعه:

اطلاعات مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2 , CH_4 , N_2O)، ترکیبات آلی فرار (NMVOCs)، و اکسیدهای گوگرد و نیتروژن (SO_x , NO_x) از گزارش‌های زیست‌محیطی پتروشیمی دریافت شده است. بسیاری از این اطلاعات توسط سنسورهای آنلاین و بدون دخالت کارشناسان پایش و ثبت می‌شوند. این داده‌ها از طریق سیستم‌های پایش آنلاین، نمونه‌برداری‌های دوره‌ای (انجام شده توسط آزمایشگاه‌های معتمد محیط زیست)، و گزارش‌های ثبت‌شده توسط واحد محیط‌زیست مجموعه به دست آمده‌اند.

۲. مدل‌سازی و محاسبه داده‌های تکمیلی:

برخی از داده‌های موردنیاز که توسط پتروشیمی پایش نشده بودند، از طریق مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها محاسبه شده‌اند. برای مثال، میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق در فلر گازی با استفاده از مدل AP-42 (ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا - USEPA) شبیه‌سازی شده است. این مدل توسط متخصصان مهندسی شیمی فرآیند اجرا شد و خروجی‌های آن به عنوان داده‌های تکمیلی در محاسبات LCA مورد استفاده قرار گرفت.

۳. استفاده از پایگاه داده ecoinvent و مقایسه با مطالعات بین‌المللی:

برای بهبود دقت و اعتبارسنجی داده‌ها، اطلاعات به‌دست‌آمده با پایگاه داده بین‌المللی ecoinvent و مطالعات مشابه منتشرشده در زمینه تولید PP مقایسه شده است. باتوجه به آنکه اندازه‌گیری برخی داده‌ها تقریباً غیرممکن و همچنین اثرات آنها ناچیز است، از آنها صرف‌نظر می‌شود. داده‌های زیر در مطالعه گنجانده نشده است:

- ❖ مواد متفرقه و افزودنی‌ها
- ❖ تهویه فضا
- ❖ پشتیبانی از نیازهای پرسنلی

۲-۴-۳- محاسبه نرخ انتشار آلاینده‌های هوا (فلر گازی)

به منظور محاسبه نرخ انتشار گازهای خروجی از فلر گازی مجتمع با توجه به ترکیبات ورودی به آن از مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی در نرم افزار HSC Chemistry استفاده شده است. مدل فرآیند ایجاد شده با استفاده از ماژول صفحه جریان HSC-Sim شامل یک فایل HSCSim با یک فلو شیت گرافیکی و یک فایل XLS برای هر واحد پردازش است. قابل ذکر است، شرایط احتراق کامل برای مدل‌سازی واکنش‌ها فرض شده است. همچنین از نسخه تحت لیسانس نرم افزار به منظور دقت در محاسبات استفاده شده است.

۲-۴-۴- صحت‌سنجی داده‌ها

در ادامه نمونه‌ای از اطلاعات و مشخصات فلر گازی مجتمع در سال ۱۴۰۰ نشان داده شده است:

جدول ۳- نمونه ای از ترکیب مواد ورودی به فلر گازی در سال ۱۴۰۰

نام ترکیبات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
Methane	۱۸	۱۶	۲۰	۸	۸	۱۱	۹	۹	۵۶	۴۶	۲۴	۲۰	۲۰,۵
Isobutene (۲-)	۹	۱۰	۲۴	۷	۷	۹	۶	۷	۲۴	۱۵	۹	۱۰	۱۱,۴
(Methylpropene)													
Butadiene- ۱,۳	۱۲	۵	۱۵	۶	۶	۷	۸	۶	۱۹	۱۸	۱۲	۸	۱۰,۳
Ethylene	۳۶	۴۳	۲۰	۴۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۶	۴۵	۱۵	۳۴	۳۳	۳۲,۹
Propylene	۲۵	۲۶	۲۲	۳۶	۳۹	۳۳	۳۲	۳۲	۰	۵	۲۱	۲۹	۲۴,۹
مقدار گاز ارسال شده به فلر (در سال) :	۴۵۶۶,۲۰												

با توجه به اطلاعات اخذ شده از مجتمع و روش مدل سازی پیشنهادی EPA به منظور تبدیل غطلت به نرخ انتشار در ادامه نتایج میانگین سالیانه محاسبه و ارائه شده است.

۲-۵- ارزیابی اثرات چرخه حیات

مشخصه یابی تأثیر از عوامل تبدیل مبتنی بر علم، به نام عوامل مشخصه سازی، برای تبدیل و ترکیب نتایج LCI به شاخص های معرف تأثیرات بر سلامت انسان و زیست محیطی استفاده می کند. فاکتور های مشخصات نیز معمولاً به عنوان فاکتورهای هم ارزی شناخته می شوند. مشخصه سازی راهی برای مقایسه مستقیم نتایج LCI در هر دسته تأثیر ارائه می کند. به عبارت دیگر، فاکتور های مشخصات، ورودی های موجودی مختلف را به شاخص های تأثیر مستقیم قابل مقایسه تبدیل می کنند. به عنوان مثال، مشخصه یابی تخمینی از سمیت نسبی زمینی بین سرب، کروم و روی ارائه می دهد.

شاخص های تأثیر معمولاً با استفاده از معادله زیر مشخص می شوند: داده های موجودی $\times$ فاکتور مشخصه = شاخص های تأثیر
در این مطالعه از روش نرمال سازی World 2000 استفاده شده است. روش نرمال سازی World 2000 یکی از رویکردهای پرکاربرد در مرحله ارزیابی اثرات چرخه حیات است که برای مقایسه میزان اثرات زیست محیطی فرآیندها یا محصولات مختلف به کار می رود. نرمال سازی (Normalization) در LCIA به معنای بیان اثرات زیست محیطی نسبی یک سیستم، در مقایسه با کل انتشار جهانی در یک سال مشخص است. World 2000 یک مجموعه مرجع جهانی است که میزان کل انتشار آلاینده ها و اثرات زیست محیطی در سطح جهانی در سال ۲۰۰۰ را به عنوان مبنا در نظر می گیرد. این روش در مدل های ارزیابی چرخه حیات مانند CML, ReCiPe و Eco-indicator 99 مورد استفاده قرار می گیرد.

این مطالعه از چارچوب Impact 2002+ برای ارزیابی تأثیرات زیست محیطی مرتبط با LCA استفاده کرده است. در مواردی که داده های محلی در دسترس نبوده اند، مطالعات پیشین استفاده از نسخه Impact 2002+ v.2.15 را توصیه کرده اند.

جدول ۴- چارچوب ارزیابی تأثیر چرخه حیات IMPACT 2002+

دسته بندی های میانی	دسته بندی های نهایی	واحدها
مواد سرطانزا	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	
مواد غیر سرطانزا	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	
مواد معدنی تنفسی	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	
تابش یونیزان	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	
تخریب لایه اوزون	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	
مواد آلی تنفسی	سال های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی (DALY)	

واحد‌ها	دسته‌بندی‌های نهایی	دسته‌بندی‌های میانی
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)	کیفیت اکوسیستم	اکوتوکسیکسیسته آبی
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)		اکوتوکسیکسیسته زمینی
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)		اسیدی شدن/تغذیه زمینی
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)		اشغال زمین
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)		اسیدی شدن آبی
کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده در متر مربع سال (PDF*m2yr)		اتروفیکاسیون آبی
کیلوگرم معادل CO2	تغییرات اقلیمی	گرمایش جهانی
مگاژول اولیه		انرژی غیرقابل تجدید
مگاژول اضافی		استخراج مواد معدنی

واحد‌ها:

DALY: سال‌های زندگی تعدیل یافته با ناتوانی

PDF: کسر گونه‌های بالقوه ناپدید شده

۳- بحث و نتایج

سیاهه نویسی از مهمترین و حساس ترین قسمتهای ارزیابی چرخه حیات است. در این قست اطلاعات مورد نیاز با استفاده از موارد زیر جمع آوری و ارائه شده است:

- ✓ بازدید های میدانی و کسب اطلاعات فنی از واحدهای عملیاتی
- ✓ در صورت نبود اطلاعات مستند در صورت امکان از محاسبه و مدل سازی به منظور تکمیل اطلاعات و رفع نواقص و همچنین تبدیل واحد و مقیاس های زمانی داده ها استفاده شده است.
- ✓ در صورتی که بعد از در نظر گرفتن دو مورد بالا همچنان اطلاعاتی ناقص باشد، از پایگاه داده اکواینونت اطلاعات میانگین جهانی برای فرایندها و سیاهه مورد نظر تکمیل می شود.
- در ادامه خلاصه نتایج به صورت جداول سیاهه نویسی و شماتیک ارتباط محصولات میانی و محصولات مورد بررسی ارائه شده است.

جدول ۵- سیاهه نویسی و شماتیک ارتباط محصولات میانی و محصولات مورد بررسی

تشریح واحد فرآیند: اتیلن گلاکول	دوره زمانی: سال ۱۴۰۰	واحد فرآیند: EG
ورودی (Input)		
مواد ورودی (Material inputs)	واحد	مقدار
ethylene dichloride	kg	746.18
ethylene, average	kg	54197100.72
Nalco T-1801(CHIM.1463)	kg	877.83
nitrogen, liquid	kg	1507.05
Oleyl alcohol	kg	116.15
Other chemicals	kg	47.9
oxygen, liquid	kg	62243024.24
petroleum coke	kg	21203902.11
potassium carbonate	kg	13984.63

تشریح واحد فرآیند: اتیلن گلیکول		دوره زمانی: سال ۱۴۰۰		EG واحد فرآیند:	
انرژی مورد نیاز (Energy demand)	واحد	مقدار	روش اندازه گیری	مبداء (Origin)	
electricity, high voltage	MWh	17002.91	اطلاعات فنی واحد	نیروگاه برق	
آب مصرفی (Water consumption)	واحد	مقدار			
steam, in chemical industry	kg	109022211.3	واحد بخار		
Water Cooling fresh	kg	21470409.28	چاه آب		
water, deionized	kg	1394226.45	واحد املاح زدایی		
خروجی (Output)					
محصولات	واحد	مقدار	روش اندازه گیری	مقصد (Destination)	
Ethylene glycol	kg	79053000	اطلاعات فنی		
انتشار به هوا (Emissions to air)	واحد	مقدار	روش اندازه گیری		
Acetaldehyde	kg	111.46	آنالیز و محاسبات		
Ethene	kg	478.27	آنالیز و محاسبات		
انتشار به آب (Emissions to water)	واحد	مقدار	روش اندازه گیری		
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	22925.37	آنالیز و محاسبات		
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	22925.37	آنالیز و محاسبات		
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	5976.40	آنالیز و محاسبات		
TOC, Total Organic Carbon	kg	5976.40	آنالیز و محاسبات		

در جدول ۶ نتایج تحلیل فهرست چرخه حیات برای تولید یک تن محصول اتیلن گلیکول آورده شده است. نتایج این جدول تمامی جریان‌های ابتدایی ورودی و خروجی را در تمامی فرآیندهای دخیل در تولید محصول نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج فهرست چرخه حیات تولید یک تن محصول اتیلن گلیکول

Inputs				
Flow	Category	Unit	Result	
Gas, natural, 36.6 MJ per m3	Resource	m3	1858.9441	
Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m3	Resource	m3	0.2251851	
Gas, natural, feedstock, 46.8 MJ per kg	Resource	kg	108210.84	
Oil, crude, feedstock, 41 MJ per kg	Resource	kg	672.43213	
Water, cooling, unspecified natural origin	Resource	m3	747.71313	
Water, well	Resource	m3	7819.312	
Outputs				
Flow	Category	Unit	Result	
Acenaphthene	Emission to air	kg	4.603E-08	
Acetaldehyde	Emission to air	kg	4.637E-05	
Acetaldehyde	Emission to air	kg	0.0014153	
Acetic acid	Emission to air	kg	0.0070226	
Acetic acid	Emission to air	kg	0.0007878	
Aluminium	Emission to soil	kg	9.617E-05	
Aluminium	Emission to water	kg	2.853E-05	
Aluminium	Emission to water	kg	4.5883437	
Aluminium	Emission to air	kg	6.034E-08	
Ammonia	Emission to air	kg	6.256E-05	
Ammonium, ion	Emission to water	kg	0.0010082	
Arsenic	Emission to air	kg	2.386E-06	
Arsenic	Emission to soil	kg	1.266E-08	
Arsenic	Emission to air	kg	2.318E-11	

Arsenic, ion	Emission to water	kg	2.789E-09
Arsenic, ion	Emission to water	kg	6.674E-08
Benzene	Emission to air	kg	5.231E-05
Benzene	Emission to air	kg	0.0021008
Benzo(a)pyrene	Emission to air	kg	3.069E-08
Benzo(a)pyrene	Emission to air	kg	5.259E-08
Beryllium	Emission to air	kg	1.434E-07
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.29
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.0075239
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.0009214
Boron	Emission to water	kg	5.563E-06
Boron	Emission to air	kg	9.365E-07
Boron	Emission to water	kg	1.219E-06
Butane	Emission to air	kg	0.0537615
Butane	Emission to air	kg	0.0036831
Cadmium	Emission to soil	kg	9.006E-09
Cadmium	Emission to air	kg	1.31E-05
Cadmium	Emission to air	kg	2.288E-11
Cadmium, ion	Emission to water	kg	2.832E-09
Cadmium, ion	Emission to water	kg	1.321E-08
Calcium	Emission to air	kg	2.176E-07
Calcium	Emission to soil	kg	0.0003255
Calcium, ion	Emission to water	kg	0.0001135
Calcium, ion	Emission to water	kg	0.0041922
Carbon	Emission to soil	kg	0.0011288
Carbon dioxide	Emission to air	kg	1.7433521
Carbon dioxide, biogenic	Emission to air	kg	0.0157277
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	3136.0885
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	296.24668
Carbon monoxide	Emission to air	kg	0.0155169
Carbon monoxide, biogenic	Emission to air	kg	1.477E-05
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	kg	1.1648329
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	kg	0.0110561
Chloride	Emission to water	kg	0.0001405
Chloride	Emission to water	kg	126.62786
Chromium	Emission to air	kg	1.669E-05
Chromium	Emission to soil	kg	3.931E-07
Chromium	Emission to air	kg	1.021E-11
Chromium VI	Emission to water	kg	9.287E-06
Chromium VI	Emission to water	kg	2.612E-05
Chromium, ion	Emission to water	kg	5.029E-10
Cobalt	Emission to air	kg	9.979E-07
Cobalt	Emission to air	kg	5.749E-08
Cobalt	Emission to water	kg	8.214E-05
Cobalt	Emission to soil	kg	5.211E-08
Cobalt	Emission to water	kg	1.824E-08
COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.0027801
COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.29
COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg	0.0075314
Copper	Emission to soil	kg	1.81E-06
Copper	Emission to air	kg	2.082E-07
Copper, ion	Emission to water	kg	1.153E-05
Copper, ion	Emission to water	kg	1.368E-05
Cyanide	Emission to air	kg	7.38E-06
Dinitrogen monoxide	Emission to air	kg	0.0566736
Dinitrogen monoxide	Emission to air	kg	0.0005656
DOC, Dissolved Organic Carbon	Emission to water	kg	0.0032945
DOC, Dissolved Organic Carbon	Emission to water	kg	0.0762993
Ethane	Emission to air	kg	0.0795222
Ethene	Emission to air	kg	0.00605
Fluoride	Emission to water	kg	6.63E-06
Fluoride	Emission to water	kg	0.0041123

Formaldehyde	Emission to air	kg	0.0018705
Formaldehyde	Emission to air	kg	0.0005259
Hexane	Emission to air	kg	0.0460333
Hydrocarbons, unspecified	Emission to air	kg	1.0583816
Hydrogen chloride	Emission to air	kg	3.57E-05
Hydrogen fluoride	Emission to air	kg	1.034E-06
Iron	Emission to air	kg	1.157E-08
Iron	Emission to soil	kg	0.0008663
Iron, ion	Emission to water	kg	0.0001626
Iron, ion	Emission to water	kg	0.0003292
Lead	Emission to air	kg	1.225E-08
Lead	Emission to air	kg	5.97E-06
Lead	Emission to water	kg	9.585E-08
Lead	Emission to water	kg	1.725E-06
Lead	Emission to soil	kg	5.029E-07
Magnesium	Emission to soil	kg	3.653E-05
Magnesium	Emission to air	kg	2.016E-08
Magnesium	Emission to water	kg	6.6539416
Magnesium	Emission to water	kg	1.353E-05
Manganese	Emission to air	kg	4.536E-06
Manganese	Emission to soil	kg	1.705E-06
Manganese	Emission to water	kg	2.459E-06
Manganese	Emission to water	kg	5.897E-07
Manganese	Emission to air	kg	3.717E-15
Mercury	Emission to water	kg	1.438E-08
Mercury	Emission to air	kg	3.987E-06
Mercury	Emission to soil	kg	9.006E-09
Mercury	Emission to air	kg	1.576E-07
Mercury	Emission to water	kg	3.867E-08
Methane, biogenic	Emission to air	kg	4.571E-05
Methane, fossil	Emission to air	kg	0.0563376
Methane, fossil	Emission to air	kg	0.010504
Molybdenum	Emission to air	kg	2.464E-11
Molybdenum	Emission to soil	kg	3.077E-08
Molybdenum	Emission to water	kg	4.663E-08
Molybdenum	Emission to water	kg	1.019E-08
Nickel	Emission to soil	kg	1.691E-07
Nickel	Emission to air	kg	2.498E-05
Nickel	Emission to air	kg	9.875E-08
Nickel, ion	Emission to water	kg	4.068E-05
Nickel, ion	Emission to water	kg	2.929E-05
Nitrate	Emission to water	kg	0.000298
Nitrate	Emission to water	kg	0.0045208
Nitrite	Emission to water	kg	5.897E-05
Nitrogen	Emission to air	kg	8.941879
Nitrogen	Emission to water	kg	4.48E-05
Nitrogen dioxide	Emission to air	kg	0.0040947
Nitrogen monoxide	Emission to air	kg	0.0878115
Nitrogen oxides	Emission to air	kg	2.2200447
Nitrogen oxides	Emission to air	kg	0.0945404
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air	kg	2.085E-07
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emission to air	kg	0.0004637
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emission to air	kg	5.259E-05
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	kg	0.0284488
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	kg	0.0010504
Pentane	Emission to air	kg	0.0667539
Pentane	Emission to air	kg	0.0063091
Phosphate	Emission to water	kg	0.0016566
Phosphate	Emission to water	kg	2.473E-06
Phosphate	Emission to water	kg	0.000369
Phosphorus	Emission to air	kg	1.772E-06

Potassium, ion	Emission to water	kg	3.648E-05
Propane	Emission to air	kg	0.0408812
Propane	Emission to air	kg	0.0010504
Propionic acid	Emission to air	kg	0.0009285
Propionic acid	Emission to air	kg	0.000105
Selenium	Emission to air	kg	2.845E-07
Silicon	Emission to water	kg	0.0002179
Silicon	Emission to air	kg	0.0002083
Silicon	Emission to water	kg	0.0890844
Silicon	Emission to soil	kg	0.0001918
Sodium, ion	Emission to water	kg	0.1158882
Sulfate	Emission to water	kg	0.0041822
Sulfate	Emission to water	kg	115.5418
Sulfur	Emission to soil	kg	0.0001005
Sulfur dioxide	Emission to air	kg	0.034446
Sulfur dioxide	Emission to air	kg	0.003019
Tin	Emission to soil	kg	1.289E-07
Tin	Emission to air	kg	6.857E-11
Tin, ion	Emission to water	kg	2.601E-08
Tin, ion	Emission to water	kg	1.298E-07
TOC, Total Organic Carbon	Emission to water	kg	0.0032945
TOC, Total Organic Carbon	Emission to water	kg	0.0762775
Toluene	Emission to air	kg	8.703E-05
Toluene	Emission to air	kg	0.0010504
Water	Emission to water	m3	349.53214
Water	Emission to air	m3	17.122362
Water	Emission to air	m3	0.0008147
Water	Emission to air	m3	5.6991816
Zinc	Emission to soil	kg	4.937E-06
Zinc	Emission to air	kg	1.854E-06
Zinc, ion	Emission to water	kg	3.202E-05

فرآیند تولید اتیلن گلیکول در مجتمع پتروشیمی مورد مطالعه تأثیر قابل توجهی بر آلودگی محیط زیست دارد که این موضوع از طریق ارزیابی چرخه حیات انجام شده با نرم افزار OpenLCA مشخص شده است. انتخاب آلاینده های شاخص بر اساس دسته بندی های تأثیر زیست محیطی صورت گرفته که جزئیات آن در جدول زیر ارائه شده است. این جدول، میزان تولید ناخالص اتیلن گلیکول به ازای هر تن و پیامدهای زیست محیطی آن را تشریح می کند.

جدول ۷ ارزیابی جامع اثرات زیست محیطی تولید یک تن اتیلن گلیکول را ارائه می دهد که شامل دسته بندی هایی نظیر مواد سرطان زا، گرمایش جهانی، مواد غیر سرطان زا، مصرف انرژی غیر قابل تجدید، تأثیرات تنفسی ناشی از مواد معدنی و آلی، اسیدی شدن/تغذیه زمینی و اکوتوکسیکسیته زمینی است. این تحلیل جامع می تواند به شناسایی نقاط بحرانی در فرآیند تولید کمک کرده و راهکارهایی برای کاهش اثرات زیست محیطی پیشنهاد کند.

جدول ۷- ارزیابی تأثیرات زیست محیطی برای تولید یک تن اتیلن گلیکول

شاخص	مقدار (به ازای تولید ۱ تن)	واحد
مواد سرطان زا	1.837607	کیلوگرم معادل C2H3Cl
گرمایش جهانی	3445.57	کیلوگرم معادل CO2
مواد غیر سرطان زا	9.50154	کیلوگرم معادل C2H3Cl
انرژی غیر قابل تجدید	5159882	مگاژول اولیه
مواد معدنی تنفسی	0.344766	کیلوگرم معادل PM2.5
مواد آلی تنفسی	0.099768	کیلوگرم معادل C2H4

شاخص	مقدار (به ازای تولید ۱ تن)	واحد
اسیدی شدن/تغذیه زمینی	13.50468	کیلوگرم معادل SO ₂
اکوتوکسیکسیته زمینی	169.4919	کیلوگرم TEG soil

اسیدی شدن خاک یکی از اثرات زیست محیطی مهمی است که بر کاهش حاصلخیزی خاک از طریق تجمع اسیدهای مبتنی بر نیتروژن و گوگرد مانند NO_x، SO₂ و NH₃ تأثیر می گذارد. این فرآیند باعث تشدید فرآیندهای شیمیایی مخرب در خاک، کاهش تنوع زیستی و کاهش کیفیت منابع آبی می شود. در مطالعات ارزیابی چرخه حیات، میزان تأثیر اسیدی شدن محیط زیست بر حسب جرم معادل SO₂ اندازه گیری می شود. در مورد تولید اتیلن گلیکول، معادل 13.50468 کیلوگرم SO₂ به ازای هر تن اتیلن گلیکول تولید شده است.

کاهش منابع که نشان دهنده میزان مصرف منابع فسیلی غیرقابل تجدید در فرآیند تولید است، بر حسب کیلوگرم معادل نفت خام اندازه گیری می شود. نتایج این تحقیق نشان می دهد که برای تولید هر تن گرانول اتیلن گلیکول، حدود 5159882 مگاژول نفت خام مصرف می شود. این وابستگی زیاد به منابع فسیلی، ماهیت پتروشیمیایی تولید اتیلن گلیکول را منعکس می کند. با این حال، بررسی منابع جایگزین مانند استفاده از سوخت های زیستی یا انرژی های تجدیدپذیر می تواند به کاهش این تأثیر کمک کند. توسعه فناوری های جایگزین و اتخاذ راهکارهای نوین در صنعت پتروشیمی می تواند وابستگی به سوخت های فسیلی را کاهش داده و اثرات زیست محیطی این محصول را به حداقل برساند.

سمیت انسانی معیاری برای سنجش آسیب های بالقوه ناشی از آلاینده های زیست محیطی بر سلامت انسان است که بر اساس هر یک از دسته بندی های تأثیر زیست محیطی شناسایی شده، منعکس کننده مراحل مختلف در چرخه تولید اتیلن گلیکول و پروفایل های انتشار آلاینده های گوناگون است. به عنوان مثال، بیشترین میزان انتشار آلاینده ها در مراحل خوراک دهی و تصفیه مشاهده می شود، که پس از آن، مرحله واکنش های شیمیایی بیشترین سهم را در انتشار دارد. این روند نشان می دهد که اصلاح فرآیندهای خوراک دهی و تصفیه می تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار آلاینده ها و اثرات زیست محیطی داشته باشد.

در جدول بعدی، نتایج نرمال سازی و وزن دهی شده برای دسته بندی های مختلف اثرات زیست محیطی بر اساس روش شناسی Impact 2002+ ارائه شده است.

یافته ها نشان می دهند که دسته بندی انرژی های غیرقابل تجدید بیشترین تأثیر زیست محیطی را دارد، که بیانگر وابستگی شدید این فرآیند به منابع فسیلی است. پس از آن، دسته بندی های گرمایش جهانی و اسیدی شدن/تغذیه زمینی قرار دارند که تأثیرات قابل توجهی بر بار زیست محیطی تولید هر تن اتیلن گلیکول دارند. این نتایج نشان دهنده نیاز به بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده ها در فرآیندهای اصلی تولید اتیلن گلیکول است.

جدول ۸- نتایج نرمال و وزن دهی شده برای دسته های مختلف تأثیرات

Impact category	Reference unit	Normalized	Weighted	Single score unit
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	3.64915E-08	1.0218E-13	Pt
Global warming	kg CO2 eq	34114557.88	34114557.9	Pt
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	1.88683E-07	5.2831E-13	Pt
Non-renewable energy	MJ primary	7.84177E+11	7.8418E+11	Pt
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	1.7116E-06	1.1981E-09	Pt
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1.50714E-09	3.2102E-15	Pt
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	192395.3899	200091.206	Pt
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	18365.49728	145.271084	Pt

جدول ۹ سهم مشارکت هر یک از واحدها و فرآیندهای مرتبط با تولید یک تن اتیلن گلیکول را نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که واحدهای تولید بخار و برق، همراه با فرآیندهای تولید محصولات اولفینی، در اغلب دسته‌های تأثیرات زیست‌محیطی سهم بیشتری دارند.

دلیل اصلی این سهم بالای تأثیر، میزان بالای مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از مواد خام و انتشار گازهای آلاینده از دودکش‌های این واحدها است. تولید بخار و برق به‌عنوان بخش‌های انرژی‌بر فرآیند، نقش مهمی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند CO_2 و NO_x)، اسیدی‌شدن محیط (ناشی از انتشار SO_2) و مصرف انرژی‌های غیرقابل تجدید دارند. علاوه بر این، فرآیندهای تولید اولفین‌ها، به دلیل واکنش‌های حرارتی شدید و نیاز به خوراک هیدروکربنی، تأثیر قابل توجهی بر افزایش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی دارند.

یافته‌های ارائه‌شده در جدول اتیلن گلیکول می‌توانند مبنایی برای شناسایی نقاط بحرانی در فرآیند تولید اتیلن گلیکول و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی باشند.

جدول ۹- میزان مشارکت هر یک از واحدها و فرآیندهای دخیل در تولید یک تن اتیلن گلیکول

دسته‌بندی تأثیر	واحد مرجع	کارخانه اتیلن گلیکول	واحد تولید آب DM	واحد سوزاندن	کارخانه اولفین	نیروگاه	واحد تولید بخار	واحد تصفیه فاضلاب
مواد سرطان‌زا	kg C2H3Cl eq	9.562E-05	2.04E-09	2.04866E-09		1.64855 963	0.18836409	0.00058750
گرمایش جهانی	kg CO2 eq			1.6830688	1.767713 58	3147.34 142	216.991035	0.00185483
مواد غیرسرطان‌زا	kg C2H3Cl eq	2.271E-05	6.9285974	0.0053106		0.04572 113	0.01736057	0.02489071
انرژی غیرقابل تجدید	MJ primary			7.8814788	27569.71 75	68037.3 556	5064267.26	
مواد معدنی تنفسی	kg PM2.5 eq			3.129E-05	0.029532 57	0.30190 637	0.013275	2.07726E-05
مواد آلی تنفسی	kg C2H4 eq	0.0069503				0.08725 9	0.005558	1.25271E-07
اسیدی شدن/تغذیه	kg SO2 eq			0.0013275	1.269954 89	11.7119 3	0.52023071	0.00123326
زمینی سمیت زمینی	kg TEG soil	0.000151	1.04E-07	2.1919147		49.8209 2	0.621779	116.857179

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک چارچوب کمی و نظام‌مند برای سنجش پیامدهای زیست‌محیطی تولید یک تن اتیلن گلیکول به‌کار گرفته شد تا تصویر روشنی از الگوی اثرگذاری این محصول در دسته‌های مختلف اثر ارائه شود. نتایج نشان داد که اثرات زیست‌محیطی اتیلن گلیکول ماهیتی چندبعدی دارند و تنها با تمرکز بر یک شاخص (مانند گرمایش جهانی) نمی‌توان عملکرد زیست‌محیطی فرآیند را به‌درستی قضاوت کرد. از این‌رو، تحلیل دسته‌به‌دسته اثرات، امکان شناسایی دقیق‌تر نقاط بحرانی و اولویت‌بندی مداخلات اصلاحی را فراهم ساخت.

یافته‌های مرتبط با گرمایش جهانی بیانگر آن بود که سهم غالب این دسته اثر از مسیر تأمین انرژی به سیستم تحمیل می‌شود. به‌طور خاص، واحدهای تولید برق و تولید بخار به‌دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حجم بالای مصرف انرژی، بیشترین نقش را

در انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش پتانسیل گرمایش جهانی ایفا کردند. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش ردپای کربن تولید اتیلن گلیکول بیش از هر چیز به اصلاح ساختار انرژی، ارتقای کارایی، و مدیریت مصرف انرژی در واحدهای یوتیلیتی وابسته است؛ نه صرفاً تغییرات محدود در واکنش‌های شیمیایی اصلی.

در دسته‌های اثر مرتبط با سلامت انسان، الگوی نتایج نشان داد که اثرات سرطان‌زا و همچنین اثرات ناشی از آلاینده‌های تنفسی، عمدتاً تحت تأثیر فرآیندهای انرژی بر (به‌ویژه تولید برق) قرار دارند. این مسئله از منظر مدیریتی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که حتی اگر فرآیند اصلی تولید اتیلن گلیکول به‌صورت کنترل‌شده و ایمن انجام شود، بخش قابل توجهی از فشار زیست‌محیطی سلامت‌محور می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم از زنجیره تولید انرژی به سیستم منتقل شود. بنابراین، کاهش این دسته اثرات به سیاست‌های کنترل آلاینده‌های احتراقی، بهبود کیفیت سوخت و ارتقای فناوری‌های تولید انرژی گره خورده است.

در مقابل، در دسته اثر غیرسرطان‌زاها مشاهده شد که یک واحد جانبی مشخص—تولید آب صنعتی—سهم غالب را به خود اختصاص داده است. این یافته نشان می‌دهد که برخی از دسته‌های اثر، به‌جای انرژی، به شدت به مصرف مواد شیمیایی کمکی، کیفیت آب، و فرآیندهای تصفیه و آماده‌سازی آب وابسته هستند. از منظر بهبود عملکرد، این موضوع ضرورت تمرکز بر کاهش مصرف مواد شیمیایی در تولید آب، بهینه‌سازی سیکل‌های آب، افزایش بازیافت آب و کاهش بار آلاینده‌های بالقوه زیان‌آور را برجسته می‌سازد.

نتایج مربوط به مصرف انرژی غیرتجدیدپذیر نیز نشان داد که واحد تولید بخار نقطه بحرانی اصلی در چرخه حیات است. این الگو معمولاً با ماهیت انرژی‌بر مراحل جداسازی و عملیات حرارتی (مانند تقطیر، تبخیر و بازیافت) سازگار است و بیانگر آن است که هرگونه بهبود در بازده تولید بخار، کاهش تلفات حرارتی، بازیافت حرارت و یکپارچه‌سازی حرارتی می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش مصرف منابع فسیلی و به تبع آن کاهش سایر دسته‌های اثر مرتبط با احتراق داشته باشد.

در دسته اثر تغذیه‌گرایی/اسیدی‌شدن زمینی نیز واحد تولید برق بیشترین سهم را نشان داد که دلالت بر نقش انتشارهای احتراقی به‌ویژه SO_2 و NO_x دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که اثرات وارد بر اکوسیستم‌های زمینی و خاک، تا حد زیادی از انتشار آلاینده‌های هوا و انتقال آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای ناشی می‌شود و مدیریت آن نیازمند رویکردهای کنترلی در بخش انرژی، از جمله نصب سامانه‌های کاهش آلاینده، بهبود احتراق و کاهش شدت انتشار از منابع بزرگ احتراقی است.

در دسته اثر سمیت زمینی، نقش غالب واحد تصفیه فاضلاب و سپس فرآیندهای مرتبط با تولید انرژی و مدیریت پسماند قابل مشاهده بود. این یافته نشان می‌دهد که فشار زیست‌محیطی وارد بر اکوسیستم‌های خاکی، در این سیستم بیش از آنکه تابع انرژی باشد، به مدیریت جریان‌های خروجی، ترکیبات سمی احتمالی در پساب و نحوه کنترل و دفع پسماندها وابسته است. بنابراین، ارتقای کارایی تصفیه، کاهش آلاینده‌ها در مبدأ، تفکیک و مدیریت هدمند جریان‌های آلوده و کاهش ریسک انتشار ترکیبات خطرناک، برای کاهش سمیت اکولوژیک زمینی ضروری است.

در نهایت، جمع‌بندی کلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تولید اتیلن گلیکول از منظر زیست‌محیطی، بیش از هر چیز یک مسئله «سیستم انرژی و یوتیلیتی» و مدیریت جریان‌های جانبی است. به بیان دیگر، راهبردهای مؤثر کاهش اثرات زیست‌محیطی باید به‌صورت یکپارچه بر (۱) بهبود کارایی انرژی و کاهش مصرف برق و بخار، (۲) کاهش انتشارهای احتراقی و آلاینده‌های مرتبط با سلامت انسان و اکوسیستم‌ها، (۳) بهینه‌سازی واحدهای آب و پساب و مدیریت پسماند، و (۴) به‌کارگیری فناوری‌ها و سیاست‌های کم‌کربن متمرکز شوند. بر این اساس، ارزیابی چرخه حیات انجام‌شده در این پژوهش، مبنایی علمی و قابل اتکا برای تصمیم‌گیری مدیریتی، اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های زیست‌محیطی و حرکت به‌سوی تولید پایدارتر اتیلن گلیکول در صنعت پتروشیمی فراهم می‌کند.

۵-منابع

- 1.Horne, R., T. Grant, and K. Verghese, *Life cycle assessment: principles, practice, and prospects*. 2009: Csiro Publishing.
- 2.Roes, A., et al., *Environmental and cost assessment of a polypropylene nanocomposite*. Journal of Polymers and the Environment, 2007. 15(3): p. 212-226. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0064-5>

3. Ingarao, G., et al., *Life cycle energy and CO2 emissions analysis of food packaging: an insight into the methodology from an Italian perspective*. International Journal of Sustainable Engineering, 2017. **10**(1): p. 31-43. <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1233296>
4. Yin, S., et al., *A life cycle assessment of recycled polypropylene fibre in concrete footpaths*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 2231-2242. DOI: [10.1016/j.jclepro.2015.09.073](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.073)
5. Xu, X., et al., *Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **198**(1-3): p. 168-177.
6. Khoshnava, S.M., et al., *A cradle-to-gate based life cycle impact assessment comparing the KBFw EFB hybrid reinforced poly hydroxybutyrate biocomposite and common petroleum-based composites as building materials*. Environmental Impact Assessment Review, 2018. **70**: p. 11-21. DOI: [10.1016/j.eiar.2018.02.002](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.02.002);
7. Chen, L., R.E. Pelton, and T.M. Smith, *Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles*. Journal of Cleaner Production, 2016. **137**: p. 667-676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.094>
8. Tähkämö, L., et al., *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, 2022. **379**: p. 134645. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134645](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134645)
9. Alsabri, A., F. Tahir, and S.G. Al-Ghamdi, *Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region*. Materials Today: Proceedings, 2022. **56**: p. 2245-2251. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.11.574](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574)
10. Galve, J.E., et al., *Life cycle assessment of a plastic part injected with recycled polypropylene: A comparison with alternative virgin materials*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022. **9**(3): p. 919-932. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00363-2>
11. Saleem, J., et al., *Assessing the environmental footprint of recycled plastic pellets: A life-cycle assessment perspective*. Environmental Technology & Innovation, 2023. **32**: p. 103289. DOI: [10.1016/j.eti.2023.103289](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103289)
12. Wang, W., et al., *Life cycle assessment and process optimization for polypropylene off-gas membrane separation*. Chemical Physics Letters, 2023. **821**: p. 140475. DOI: [10.1016/j.cplett.2023.140475](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140475)
13. Mufarrij, F., et al., *Development and lifecycle assessment of various low-and high-density polyethylene production processes based on CO2 capture and utilization*. Journal of Cleaner Production, 2023. **414**: p. 137624. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.137624](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137624)
14. Yang, K., et al., *Collaborative optimization of pollution and carbon reduction through carbon flow tracking integrated with life cycle assessment for petrochemical production*. Chemical Engineering Journal, 2024. **488**: p. 151123. DOI: [10.1016/j.ccej.2024.151123](https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.151123)
15. Äkräs, L., et al., *A cradle-to-gate life cycle assessment of polyamide-starch biocomposites: carbon footprint as an indicator of sustainability*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2024. **26**(10): p. 3297-3312. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02884-1>

16. Wang, M., Y. Wu, and B. Wang, *Carbon emission accounting model of three-stage mechanical products for manufacturing process*. Sustainability, 2024. **16**(18): p. 8101. <https://doi.org/10.3390/su16188101>
17. Fitriasari, E.I. and J.J. Liu, *Techno-Economic and Life Cycle Assessments of the Utilization of Carbon-Free Energy Sources as an Alternate Fuel in Naphtha Cracker*, in *Computer Aided Chemical Engineering*. 2024, Elsevier. p. 1231-1236. DOI: [10.1016/B978-0-443-28824-1.50206-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28824-1.50206-4)
18. Duan, C., et al., *Global polyethylene terephthalate (PET) plastic supply chain resource metabolism efficiency and carbon emissions co-reduction strategies*. Sustainability, 2024. **16**(10): p. 3926. <https://doi.org/10.3390/su16103926>
19. Soekotjo, E.S., et al. *Potential research of study PVC products life cycle assessment in Indonesia*. in *AIP Conference Proceedings*. 2024. AIP Publishing LLC. DOI: [10.1063/5.0199436](https://doi.org/10.1063/5.0199436)
20. Shen, Q., et al., *Carbon emissions and low-carbon development in Olefin industry*. Environmental Research, 2024. **244**: p. 117841. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117841>
21. Cai, Y., et al., *China's carbon peak analysis and life-cycle greenhouse gas emission estimation under the plastics limit order*. Sustainable Production and Consumption, 2025. **53**: p. 190-202. DOI: [10.1016/j.spc.2024.12.005](https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.005)
22. Arvanitoyannis, I.S., *ISO 14040: life cycle assessment (LCA)–principles and guidelines*. Waste management for the food industries, 2008: p. 97-132.