نشریه علمی-پژوهشی
شیمی و مهندسی شیمی ایران
https://nsmsi.ir
NSMSI ۱۳۶۰
نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران | دوره ۴۵، شماره ۱، ۱۴۰۵ | ISSN: 1022-7768

# ارزیابی محیط‌زیستی چرخه حیات سیستم سردسازی پروپان در تأمین سرمایش مبدل‌های حرارتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس

مزدک آرپناهی[۱،۲]، سهیل سیاحی[۲،۳*+]، سید محسن پیغمبرزاده[۱،۲]

۱ گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۲ دانشکده معدن، نفت و انرژی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۳ گروه شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

## چکیده

باتوجه‌به نگرانی‌های فزاینده جهانی در مورد اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌های صنعتی و اقتصادی، ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان ابزاری جامع و سیستماتیک برای کمی‌سازی و تحلیل این اثرات در تمام مراحل عمر یک محصول، فرایند یا سیستم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا، پژوهش حاضر باهدف بررسی و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان که برای تأمین سرمایش موردنیاز مبدل‌های حرارتی در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس به کار می‌رود، انجام شد. به‌منظور انجام این ارزیابی، از سه روش شناخته شده ارزیابی چرخه حیات شامل IMPACT 2002+، CML baseline و ReCiPe 2016 endpoint در نرم‌افزار سیماپرو استفاده شد. نتایج حاصل از این روش‌ها در ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان نشان داد: در روش IMPACT 2002+، از ۱۵ طبقه اثر، بیشترین تأثیر به ترتیب مربوط به کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر برابر ۰/۰۰۰۵۱۲، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی برابر ۰/۰۰۰۱۳۲ و گرمایش جهانی برابر ۰/۰۰۰۱۱۷ بوده است. در بررسی ۴ طبقه آسیب نهایی این روش (شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییر اقلیم و منابع)، نیز بیشترین آسیب متوجه منابع انرژی با میزان ۰/۰۰۰۵۱۲ بوده است. همچنین، نتایج حاصل از کاربرد روش CML baseline در ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان نشان داد که بالاترین رده پیامدها به ترتیب مربوط به سمیت آب‌های آزاد با میزان نرمال شده ۲/۴۴E-۱۲ و کاهش منابع فسیلی با میزان ۲/۳۱E-۱۲ است و گرمایش جهانی (۲/۴۱E-۱۳) و اسیدی شدن (۳/۲۵E-۱۳) در رده‌های بعدی قرار دارند. علاوه بر این، بررسی نتایج نرمال‌سازی و وزن‌دهی در ۲۲ طبقه اثر با استفاده از روش ReCiPe 2016 endpoint،

## اطلاعات مقاله

CC BY

**واژه‌های کلیدی:**
ارزیابی چرخه حیات،
پالایشگاه گاز،
سیکل سردسازی پروپان،
اثرات محیط‌زیستی،
نرم‌افزار سیماپرو.

**Keywords:**
*Life cycle assessment,*
*Gas refinery,*
*Propane refrigeration cycle,*
*Environmental impacts,*
*SimaPro software.*

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

**نوع مقاله:** علمی - پژوهشی

* عهده‌دار مکاتبات
+E- mail: sayyahi.soheil@iau.ac.ir

ارجاع: مزدک آرپناهی، سهیل سیاحی، سید محسن پیغمبرزاده، ارزیابی محیط‌زیستی چرخه حیات سیستم سردسازی پروپان در تأمین سرمایش مبدل‌های حرارتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۴۵(۱)**: ۹۹ تا ۱۲۲ (۱۴۰۵).

*حاکی از آن بود که طبقات گرمایش جهانی (سلامت انسان) با میزان ۰/۰۰۰۱۵۹، سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان با میزان ۰/۰۰۰۰۵۵، گرمایش جهانی (اکوسیستم‌های خشکی) با میزان ۰/۰۰۰۰۳۴، کاهش سوخت‌های فسیلی برابر ۰/۰۰۰۰۲۶ و تشکیل ذرات معلق برابر ۰/۰۰۰۰۱۸، به ترتیب بیشترین شاخص نرمال‌سازی را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج حاصل از هر سه روش، به‌وضوح نشان داد که برجسته‌ترین سهم در اثرات محیط‌زیستی این سیستم، عمدتاً ناشی از مصرف پروپان به‌عنوان مبرد، به‌ویژه در حوزه‌های کاهش منابع تجدیدناپذیر، گرمایش جهانی و سمیت اکوسیستم‌ها است. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب و مدیریت بهینه مبردها در سیستم‌های سردسازی و ضرورت تمرکز بر کاهش نشتی مبرد و ارزیابی جامع مبردهای جایگزین با کارایی انرژی بالاتر و ردپای محیط‌زیستی کمتر در طول چرخه حیات جهت دستیابی به پایداری بیشتر در صنایع پالایشگاهی تأکید می‌کند.*

## مقدمه

رشد صنعتی فزاینده در سراسر جهان، مستلزم مصرف فزاینده انرژی و توسعه فرایندهای بالادستی و پایین‌دستی مرتبط است. این امر به نوبه خود، منجر به افزایش چشمگیر مخاطرات محیط‌زیستی شده است [۱]. با گسترش جامعه صنعتی و افزایش تولید کالاها و خدمات از ابتدای قرن هجدهم، تشدید آسیب‌های محیط‌زیستی مشاهده می‌شود. این پدیده عمدتاً ناشی از مصرف بی‌رویه منابع طبیعی و رها سازی آلاینده‌ها بیش از ظرفیت خودپالایی اکوسیستم‌ها است. در واکنش به این چالش‌ها، سیاست‌های محیط‌زیستی [۲]، تدوین شده‌اند که به نوبه خود، به توسعه روش‌های ارزیابی محیط‌زیستی با هدف کاهش ردپای محیط‌زیستی محصولات منجر شده‌اند [۴، ۳]. افزایش آگاهی نسبت به مسائل محیط‌زیستی، صنعت تولید را به سمت رویکردی فعالانه در طراحی محصولات جدید، بهبود محصولات موجود و توسعه فرایندهای تولید پاک‌تر سوق داده است [۵]. همزمان با این تحولات، مفاهیم "اکولوژی صنعتی (IE)[۱]" و "طراحی برای محیط زیست (DfE)[۲]" ظهور کرده‌اند. اکولوژی صنعتی به عنوان یک دیدگاه سیستمی در مورد چگونگی، مکان و چرایی بهبودهای محیط‌زیستی برای دستیابی به یک صنعت پایدار تعریف می‌شود، که به معنای "برآوردن نیازهای نسل‌های کنونی، بدون به خطر انداختن نیازهای نسل‌های آینده" است [۶]. اکولوژی صنعتی را به عنوان "رشته‌ای از مطالعات مربوط به روابط متقابل سیستم‌های صنعتی انسانی و محیط آنها" تعریف کرده‌اند [۷]. مفهوم DfE نیز "حوزه روش‌شناسی طراحی محصول است که شامل ابزارها، روش‌ها و اصول جهت کمک به طراحان برای کاهش اثرات محیط‌زیستی است". این دو مفهوم، هر دو، چتری جامع برای طیف وسیعی از ابزارها و روش‌های ارزیابی محیط‌زیستی محسوب می‌شوند که در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار توسعه یافته‌اند. از جمله مهم‌ترین این ابزارها، "ارزیابی چرخه حیات (LCA)[۳]" است که به عنوان یک روش تحلیلی تثبیت شده برای کمی سازی اثرات محیط‌زیستی یک محصول، خدمت یا فرایند تولید در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اولیه کاربرد LCA، این روش عمدتاً برای محصولات مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما شواهد و تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که این روش پتانسیل قابل توجهی به عنوان ابزاری تحلیلی و طراحی برای فرآیندها نیز دارد [۸]. گاز طبیعی، در میان سایر سوخت‌های فسیلی، به دلیل ویژگی‌های محیط‌زیستی مطلوب‌تر و ایمنی بالاتر، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای صنایع انرژی‌بر مطرح است [۹]. در عصر حاضر، تقریباً تمامی مراحل چرخه عمر یک محصول، از تولید تا مصرف و دفع، به مصرف انرژی و در نتیجه، انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. بخش صنعت، با سهمی بالغ بر ۳۰ درصد از کل مصرف سالانه انرژی فسیلی جهان، یکی از حوزه‌های کلیدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و به تبع آن، تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. در این میان، پالایشگاه‌های نفت و گاز به دلیل ماهیت فرایندهای پر انرژی خود، از بزرگترین مصرف‌کنندگان انرژی در این بخش به شمار می‌آیند. بنابراین، مدیریت بهینه و افزایش کارایی انرژی در پالایشگاه‌ها، نه تنها به کاهش قابل توجه مصرف سوخت‌های فسیلی و اثرات محیط‌زیستی ناشی از آن کمک می‌کند، بلکه با توجه به نقش این صنایع در تولید و فرآوری حامل‌های انرژی، از منظر امنیت انرژی و پایداری سیستم انرژی جهانی نیز حائز اهمیت راهبردی است [۱۰، ۱۱]. رابطه میان توسعه اقتصادی و مصرف انرژی یک رابطه متقابل است؛ به این معنا که توسعه اقتصادی می‌تواند منجر به افزایش کارایی انرژی و صرفه‌جویی در مصرف آن شود [۱۲]. پیش‌بینی‌های اخیر نشان می‌دهد که مصرف سوخت‌های فسیلی (شامل زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی) احتمالاً تا قبل از سال ۲۰۳۰ به اوج خود خواهد رسید (افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی نسبت به سطح کنونی)، با این حال، در بسیاری از سناریوهای بلندمدت، سطح مصرف آن‌ها تا سال ۲۰۵۰ همچنان

(۱) Industrial ecology
(۲) Design for environment
(۳) Life cycle assessment

قابل توجه باقی خواهد ماند. این روند، در کنار رشد فزاینده تقاضای جهانی برای انرژی، مسئله تأمین پایدار انرژی را به یکی از چالش‌های اساسی و چندوجهی پیش روی جامعه بشری در دهه‌های آتی تبدیل کرده است [۱۳]. این واقعیت، در کنار وابستگی بخش عمده‌ای از اقتصاد کشورها به منابع انرژی تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی، منجر به تشدید آلودگی‌های محیطزیستی شده است [۱۴]. لذا، تلاش برای افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای پایدار مصرف انرژی، از جمله عوامل کلیدی در کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست به شمار می‌رود. این هدف تنها به معنای کاهش مصرف کلی انرژی‌های تجدیدناپذیر نیست، بلکه مهمتر از آن، کاهش شدت انرژی (مصرف انرژی به ازای واحد تولید) را در بر می‌گیرد [۱۵]. صنعت پالایش و فرآوری نفت و گاز در ایران، در حال حاضر در حال گسترش است [۱۶]. با این وجود، ایران از نظر حجم گازسوزی در مشعل‌ها و انتشار هیدروکربن‌ها به محیط زیست، سومین تولیدکننده آلاینده در جهان محسوب می‌شود [۱۷]. عملیات فرآوری نفت و گاز ذاتاً فرآیندهایی با مصرف انرژی و اثرات محیطزیستی بالا هستند. از این رو، کمی‌سازی دقیق مصرف انرژی و منابع در فرایندهای فرآوری نفت و گاز، به صنایع کمک می‌کند تا بخش‌های پرمصرف و ناکارآمد را شناسایی و برای بهبود وضعیت موجود، برنامه‌ریزی کنند [۱۴]. ارزیابی چرخه حیات (LCA)، به عنوان یک ابزار محیطی با رویکرد "گهواره تا گور"، به طور گسترده‌ای برای ارزیابی جنبه‌های مختلف محیطزیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸–۲۰]. کارایی LCA به عنوان ابزاری برای ارزیابی محصولات و فرایندهای شیمیایی، توسط پژوهشگران مختلف تأیید شده است [۲۱–۲۳]. فرایند LCA می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در بررسی و ارزیابی اثرات محیطزیستی یک محصول یا فرایند کمک شایانی نماید [۲۴ – ۲۶]. با توجه به چالش‌های محیطزیستی و بحران انرژی جهانی، و همچنین با در نظر گرفتن سهم قابل توجه واحدهای فرآوری گاز در تولید انرژی و اقتصاد کشور، و اهمیت استراتژیک منطقه و تعهدات بین‌المللی در قبال مسائل محیطزیستی، پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی چرخه حیات سیکل سردسازی گاز پروپان، جهت تأمین سرمایش مورد نیاز در مبدل‌های حرارتی مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، طراحی شده است. در این پژوهش، مدیریت و کمی‌سازی مصرف انرژی و اثرات محیطزیستی فرایند با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو[۱] مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل کمی و جامع اثرات محیطزیستی سیکل سیستم سردسازی پروپان برای تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، با تمرکز بر شناسایی مراحل و فرایندهای دارای بالاترین بار محیطزیستی و سهم هر یک در دسته‌های اثر مختلف بوده است. این تحلیل با بهره‌گیری از چارچوب متدولوژی ارزیابی چرخه حیات و با استفاده از رویکردها و متدهای مختلف انجام شده است. در نهایت، نتایج حاصله به منظور ارائه بینش‌های مبتنی بر داده برای توسعه استراتژی‌های بهینه‌سازی محیطزیستی و کاهش پتانسیل آسیب‌های اکولوژیکی و انسانی مرتبط با سیستم سردسازی، از طریق شناسایی فرصت‌های بهبود در طراحی، انتخاب مواد، فاز بهره‌برداری و مدیریت پایان عمر سیستم، به کار گرفته شده‌اند.

## پیشینه پژوهش

در شرایط کنونی، با توجه به بحران‌های محیطزیستی و محدودیت منابع انرژی در سطح جهان، بررسی و کمی‌سازی مصرف انرژی و اثرات محیطزیستی محصولات، خدمات و فرایندها، به‌ویژه در صنایع نفت و گاز، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است. طی دهه‌های اخیر، پژوهشگران متعددی به این موضوع پرداخته و مدل‌های مناسبی را برای ارزیابی این موارد ارائه کرده‌اند که در ادامه این بخش از مقاله، به برخی از مطالعات مرتبط اشاره خواهد شد. در حوزه مطالعات داخلی مرتبط، پژوهش بهمنی‌نیا (۲۰۰۶) به ارزیابی اثرات یک کارخانه گاز طبیعی در تصفیه‌خانه گاز سر خون بندرعباس، باهدف تعیین میزان انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای و سایر پیامدهای محیطزیستی عمده آن با استفاده از LCA پرداخته است [۲۷]. *رضایی راد* و *همکاران* (۱۳۹۸) نیز از روش LCA برای ارزیابی محیطزیستی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد استفاده نمودند [۲۸]. *خیرالهی‌پور* و *همکاران* (۲۰۲۱) اثرات محیطزیستی فرایند پالایشگاه گاز طبیعی را بر اساس روش LCA CML-IA مورد بررسی قرار دادند [۲۹]. همچنین، *مؤید کاظمی* و *همکاران* (۱۴۰۱) به ارزیابی اثرات محیطزیستی فرایند دفع لجن صنعتی پالایشگاه روغن با رویکرد ارزیحه حیات و با استفاده از مدل ارزیابی اثرات CML-Baseline پرداختند [۳۰]. پژوهش *افخمی* و *همکاران* (۲۰۲۲) نیز به ارزیابی اثرات محیطزیستی فرآورده‌های پالایشگاه گاز عسلویه با اندازه‌گیری ردپای آب اختصاص داشت [۳۱]. اخیرا در این زمینه، تحقیق *ناصری* و *همکاران* (۲۰۲۳) است که به ارزیابی چرخه حیات فرآوری نفت خام با رویکرد مدیریت انرژی پرداخته است [۳۲]. همچنین در این زمینه می‌توان به پژوهش *بیسواس و روسانو*[۲] (۲۰۱۱) در بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از رویکرد چرخه حیات کمپرسورهای تبرید و تهویه مطبوع بازسازی شده [۳۳]، پژوهش *شی و همکاران*[۳] (۲۰۱۵) در ارزیابی و تعیین کمیت مصرف انرژی و انتشار گازهای محیطی یک کمپرسور تبرید تولید شده توسط

(۱) SimaPro
(۲) Biswas W., & Rosano M.,
(۳) Shi J., et al.

یک کارخانه چینی [۳۴]، مطالعه *رودا استوارت*[۱] (۲۰۱۸) در ارزیابی چرخه حیات گاز طبیعی مایع (LNG)[۲] تولید شده در کانادا برای مصرف در چین [۳۵]، مطالعه *روسی و همکاران*[۳] (۲۰۲۱) در ارزیابی و مقایسه چرخه حیات دو سیستم تبرید خنک کننده مواد غذایی [۳۶]، و پژوهش *ماچگیانی*[۴] (۲۰۲۴) در بررسی چرخه حیات سیستم تبرید تجاری با تمرکز بر تأثیر محیط زیست مبردها [۳۷]، اشاره نمود.

نقص عمده در ادبیات موجود، فقدان مطالعات جامع LCA است. بسیاری از پژوهش‌های گذشته، عمدتاً بر انتشار گازهای گلخانه‌ای یا ردپای آب تمرکز داشته‌اند، و کمتر به تحلیل جامع تمام دسته‌های اثر محیط‌زیستی در طول کل چرخه حیات و شناسایی دقیق نقاط داغ محیط‌زیستی در یک سیستم پیچیده صنعتی می‌پردازند. همچنین، مطالعات خارجی مرتبط با سیستم‌های تبرید، اغلب بر روی مبردهای خاص و در مناطق با ویژگی‌های اقلیمی و صنعتی متفاوت انجام شده‌اند. علاوه بر این، اکثر مطالعات پیشین برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، تنها از یک متدولوژی ارزیابی اثر استفاده کرده‌اند که ممکن است منجر به عدم قطعیت در نتایج و محدودیت در جامعیت تحلیل گردد؛ لذا، نوآوری و ارزش اصلی پژوهش حاضر در ارائه اولین تحلیل جامع ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای سیکل سیستم سردسازی پروپان در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، با بهره‌گیری از داده‌های عملیاتی و واقعی و مدل‌سازی اختصاصی شرایط بومی است. این پژوهش، با تمرکز بر شناسایی دقیق نقاط داغ محیط‌زیستی در طول چرخه حیات، کمی‌سازی سهم هر یک از فرایندها در دسته‌های اثر مختلف، و افزایش قابلیت اطمینان و جامعیت نتایج از طریق به‌کارگیری و مقایسه هم‌زمان سه متدولوژی مختلف ارزیابی اثر (شامل IMPACT 2002+، CML baseline و ReCiPe 2016 endpoint)، یک ابزار تحلیلی قدرتمند برای تصمیم‌گیران صنعتی به‌منظور توسعه استراتژی‌های هدفمند کاهش اثرات محیط‌زیستی و افزایش پایداری عملیاتی سیستم‌های سردسازی در مقیاس صنعتی بزرگ ارائه می‌دهد. نتایج این تحقیق، نه‌تنها به پر کردن خلأ موجود در ادبیات علمی کمک می‌کند، بلکه راهکارهای عملی و مبتنی بر شواهد را برای بهبود عملکرد محیط‌زیستی در صنعت نفت و گاز ایران فراهم می‌آورد.

## بخش تجربی

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعاتی

در مطالعات LCA، جمع‌آوری داده‌های دقیق در خصوص ورودی‌ها، خروجی‌ها و انتشارات مرتبط با سیستم‌ها، فرایندها یا فعالیت‌های تولیدی و خدماتی، امری ضروری است. این داده‌ها جهت کمی‌سازی دقیق اثرات محیط‌زیستی سیستم‌های مورد مطالعه، بنیادین محسوب می‌شوند. پژوهش حاضر نیز بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده از فرایند و سیکل سردسازی محصولات گازی پروپان و بوتان در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس (PGBGT)[۵] انجام شده است. شایان‌ذکر است که شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، واقع در شهرستان بهبهان، استان خوزستان، بزرگ‌ترین پالایشگاه گازی در خاورمیانه است که در سال ۱۳۹۷ به بهره‌برداری رسیده است و مجتمع تأسیسات و مخازن آن نیز در شهرستان بندر ماهشهر – جاده بندر صادراتی مجیدیه واقع شده است (شکل ۱). این مجتمع، با مساحتی بالغ بر ۶۰ هکتار، جهت جمع‌آوری و ذخیره‌سازی محصولات پروپان، بوتان و میعانات پنتان پلاس، که از پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس ارسال می‌شوند، احداث گردیده است.

ارزیابی چرخه حیات بر اساس استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044 در چهار مرحله اصلی صورت می‌پذیرد [۳۸]:

**گام ۱**– اولین گام در LCA تعیین هدف و محدوده مطالعه[۶] است. در این مرحله، دلایل انجام LCA مشخص می‌شود. محصول، فرایند یا خدمات مورد مطالعه تعریف می‌شود؛ یک واحد کاربردی برای آن محصول انتخاب می‌شود؛ و انتخاب‌های مربوط به مرزهای سیستم، از جمله مرزهای زمانی و مکانی، انجام می‌شود.

**گام ۲**– مرحله دوم در ارزیابی چرخه عمر، فهرست موجودی‌های چرخه حیات (LCI)[۷] است. به عبارتی در این بخش، توضیح داده می‌شود که چگونه داده‌ها جمع‌آوری شده‌اند (منابع داده: اولیه، ثانویه، نرم‌افزارها)، و همچنین فهرستی از ورودی‌ها (انرژی، مواد خام) و خروجی‌ها (انتشارات به هوا، آب، خاک و تولید پسماند) مرتبط با واحد عملکردی ارائه می‌گردد. این مرحله موجودی چرخه عمر نامیده می‌شود و اغلب وقت گیرترین و داده فشرده ترین بخش ارزیابی چرخه عمر است.

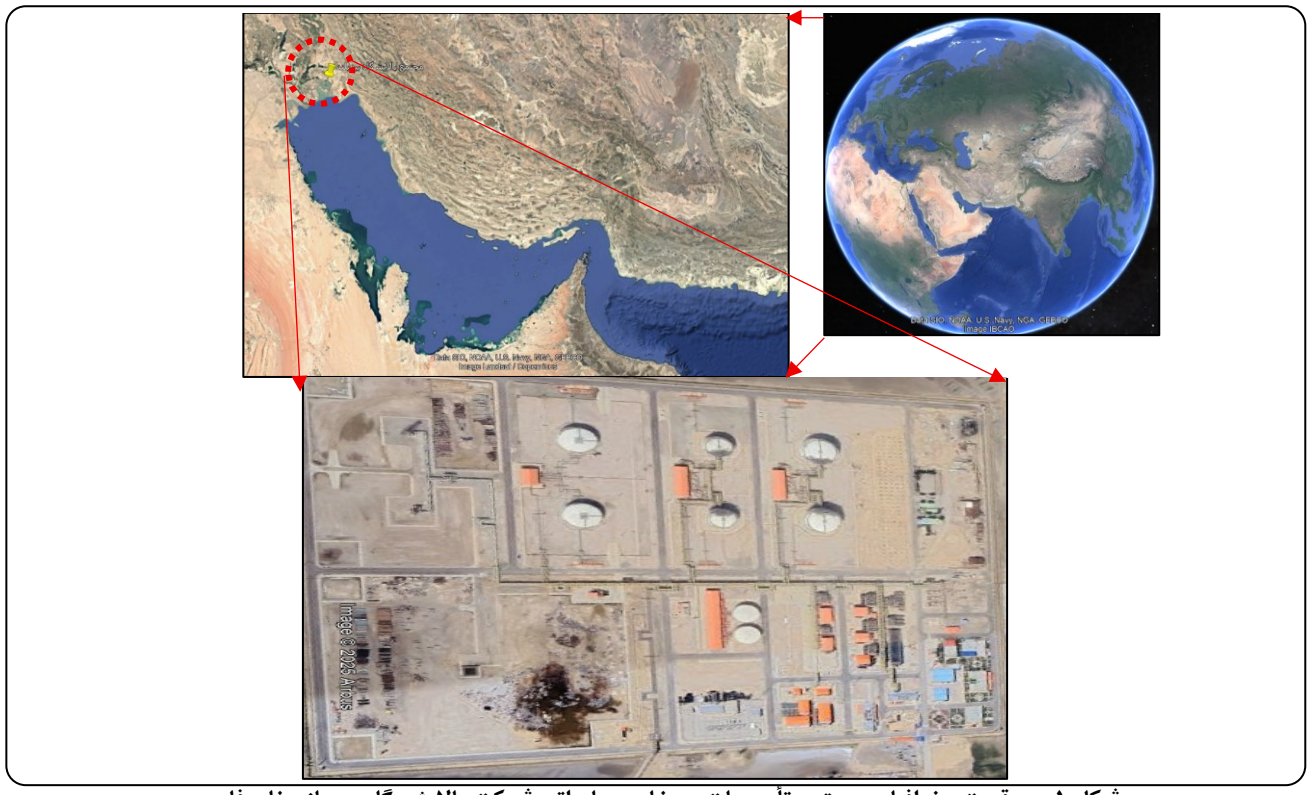
**گام ۳**– گام سوم در ارزیابی چرخه عمر، ارزیابی اثرات محیط‌زیستی ورودی‌ها و خروجی‌های گردآوری شده در موجودی است. این مرحله ارزیابی اثرات چرخه حیات[۸] نامیده می‌شود. در این مرحله، روش‌های ارزیابی مورد استفاده و دلیل انتخاب روش‌ها ارائه می‌شود.

**گام ۴**– چهارمین مرحله در ارزیابی چرخه حیات، تفسیر نتایج ارزیابی اثرات است و در صورت امکان، بهبودهایی را پیشنهاد می‌کند. به عنوان مثال، هنگامی که ارزیابی چرخه عمر برای مقایسه محصولات انجام می‌شود، این مرحله ممکن است شامل توصیه مطلوب ترین محصول از نظر محیط‌زیستی باشد. متناوباً، اگر یک محصول واحد

(۱) Roda-Stuart D.J.,
(۲) Liquefied natural gas
(۳) Rossi M., et al.
(۴) Macheggiani S.,
(۵) Persian Gulf Bidboland Gas Refining Company
(۶) Goal and Scope Definition
(۷) Life Cycle Inventory
(۸) life-cycle impact assessment

**جدول ۱ - خلاصه مراحل چرخه حیات فرایند مورد مطالعه**

| ویژگی‌های LCA | موارد استفاده شده در این پژوهش |
|---|---|
| واحد عملکردی | تأمین سرمایش موردنیاز برای ۷۰ تن پروپان از دمای ۴۰ °C به ۴۱ °C - و ۴۰ تن بوتان از دمای ۳۵ °C به ۵- °C |
| منابع داده | اطلاعات شرکت موردمطالعه<br>پایگاه‌های داده استاندارد Ecoinvent (2007)، |
| مرز سیستم | سیستم سردسازی پروپان جهت تأمین سرمایش موردنیاز در مبدل‌های حرارتی |
| روش‌های ارزیابی | IMPACT 2002+، ReCiPe 2016 endpoint، CML baseline |
| اثرات محیطی در نظر گرفته شده | اثرات گازهای گلخانه‌ای، لایه ازن، اسیدی شدن، کیفیت اکوسیستم، منابع انرژی، و... |



**شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس**

تجزیه و تحلیل شود، ممکن است اصلاحات طراحی خاصی که می‌تواند عملکرد محیطزیستی را بهبود بخشد، پیشنهاد شود. این مرحله را تحلیل بهبود یا مرحله تفسیر[۱] می‌نامند.

در این پژوهش، از روش تحلیل چرخه حیات (LCA) مطابق با استانداردهای ISO 14040:2006 و ISO 14044:2006 برای ارزیابی جامع اثرات محیطزیستی سیستم سردسازی پروپان جهت تأمین سرمایش موردنیاز در مبدل‌های حرارتی در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس استفاده شده است. خلاصه‌ای از مراحل ارزیابی چرخه حیات فرایند موردمطالعه در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

## تعیین هدف و دامنه

### هدف مطالعه

در مطالعه حاضر هدف اصلی پژوهش، ارزیابی جامع اثرات محیطزیستی چرخه حیات سیستم سردسازی پروپان مورد استفاده در پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس، با استفاده از متدولوژی ارزیابی چرخه حیات (LCA) و بر اساس استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 است که نتایج این مطالعه در درجه اول برای مدیران محیطزیست و مهندسان فرایند در صنایع نفت و گاز (به‌ویژه پالایشگاه بید بلند خلیج‌فارس)، محققان حوزه ارزیابی چرخه حیات و سیاست‌گذاران مرتبط با مقررات محیطزیستی مبردها و سیستم‌های سردسازی در ایران و منطقه قابل‌توجه است. یافته‌های این پژوهش

(۱) improvement analysis or an interpretation step

به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌سازی آگاهانه در خصوص انتخاب مبردهای جایگزین، بهینه‌سازی فرایندهای عملیاتی، و شناسایی فرصت‌های کاهش اثرات محیطزیستی سیستم‌های سردسازی در مقیاس صنعتی مورداستفاده قرار خواهد گرفت. این مطالعه می‌تواند به مقایسه گزینه‌های مختلف مبرد و استراتژی‌های مدیریت پسماند کمک کند و زمینه‌ساز بهبود مستمر عملکرد محیطزیستی صنایع نفت و گاز باشد. واحد عملکردی این مطالعه، "تأمین سرمایش موردنیاز برای ۷۰ تن پروپان از دمای ۴۰ °C به ۴۰- °C و ۴۰ تن بوتان از از دمای ۳۵ °C به ۵- °C در مبدل‌های حرارتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس" براساس عملکرد واقعی سیستم شرکت تعریف شده است.

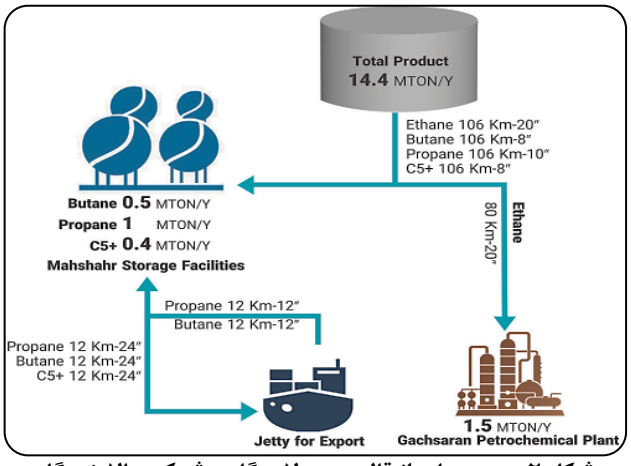
## دامنه مطالعه

### معرفی سیستم و فرایند موردمطالعه

مطالعه موردی در این پژوهش، بر فرایند و سیکل سردسازی پروپان متمرکز است که به‌منظور تأمین سرمایش موردنیاز در مبدل‌های حرارتی جهت کاهش دمای محصولات گازی پروپان و بوتان در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصولات ورودی به مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، در فاز مایع، روزانه از طریق سه خط لوله زیرزمینی جداگانه به طول ۱۰۵ کیلومتر و قطرهای ۱۰، ۸ و ۸ اینچ، از مخازن پالایشگاه به مخازن ذخیره‌سازی منتقل می‌شوند. مخازن ذخیره‌سازی پروپان و بوتان از نوع اتمسفریک و دو جداره بوده و به ترتیب دارای ظرفیت‌های ۵۲ هزار تن و ۲۷ هزار تن می‌باشند. این مخازن دو جداره، امکان نگهداری پروپان در دمای ۴۱- درجه سلسیوس و بوتان در دمای ۵- درجه سلسیوس را فراهم می‌آورند [۳۹].

### شرح سیستم و سیکل سردسازی پروپان

پروپان ارسالی از پالایشگاه، طی چهار مرحله و با عبور از سه چیلر و یک شیر فشارشکن، از دمای ۴۰ درجه سلسیوس به دمای ۴۱- درجه سلسیوس کاهش می‌یابد و پس از سرد شدن، به مخازن ذخیره ارسال می‌شود. بوتان دریافتی از پالایشگاه نیز، پس از عبور از دو چیلر، دمای آن از ۳۵ درجه سلسیوس به ۵- درجه سلسیوس رسیده و پس از کاهش فشار، به مخازن ذخیره منتقل می‌گردد. در سیکل سردسازی، پروپان به عنوان مبرد اصلی[۱]، مستقیماً از جریان گاز ورودی به مجتمع، پس از مراحل اولیه جداسازی و آماده‌سازی، تأمین می‌گردد. این پروپان توسط کمپرسورهای تبریدی چهار مرحله‌ای، که دارای چهار ورودی با فشار و دمای متفاوت هستند، برای سردسازی آماده می‌شود. محصولات پروپان و بوتان ذخیره شده در دما و فشار پایین،




**شکل ۲ - مسیرهای انتقال محصولات گازی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس**

سپس به واسطه پمپ‌های انتقال، به تأسیسات بارگیری جهت صادرات با کشتی به اسکله صادراتی ارسال می‌گردند [۴۰-۳۹] *ویژه نامه اداره توسعه محصول، فناوری و نوآوری شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، متاعی مقدم*. شرح کامل فرایند مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به دامنه مطالعه حاضر و جزئیات ارائه شده در مقاله، رویکرد ما در این پژوهش را می‌توان ترکیبی از "Cradle-to-Gate" برای ورودی‌های سیستم و "Gate-to-Gate" با تمرکز بر فرایند اصلی در نظر گرفت.

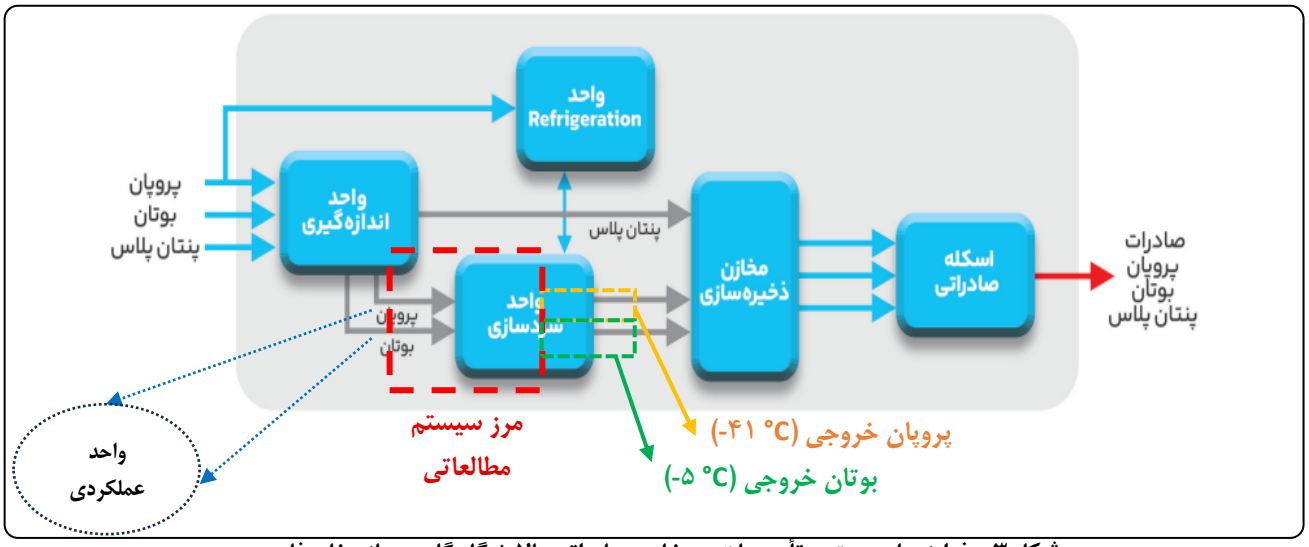
### واحد ۵۰۳: سیستم تبرید پروپان (مرز سیستم مطالعاتی)

سیستم تبرید پروپان به‌منظور تأمین سرمایش موردنیاز چیلرهای ورودی پروپان (E-502-001A/B/C)، چیلرهای ورودی بوتان (E-502-002A/B) و سیستم‌های بازیافت بخار پروپان و بوتان (واحدهای ۵۰۵ و ۵۰۶) طراحی شده است. این سیستم متشکل از سه خط[۲] فرایندی موازی و مستقل است که هر یک شامل کمپرسورهای چند مرحله‌ای C-503-001A/B/C می‌باشند و پروپان را به عنوان مبرد به کار می‌برند. کمپرسورهای تبرید مورد استفاده از نوع سانتریفیوژ چهار مرحله‌ای هستند. این کمپرسورها، که وظیفه کنترل گاز مبرد پروپان را بر عهده دارند، با فشار مکنده ۱/۴۴ بار مطلق[۳] و فشار تخلیه نهایی ۲۲/۰۱ بار مطلق عمل می‌کنند.

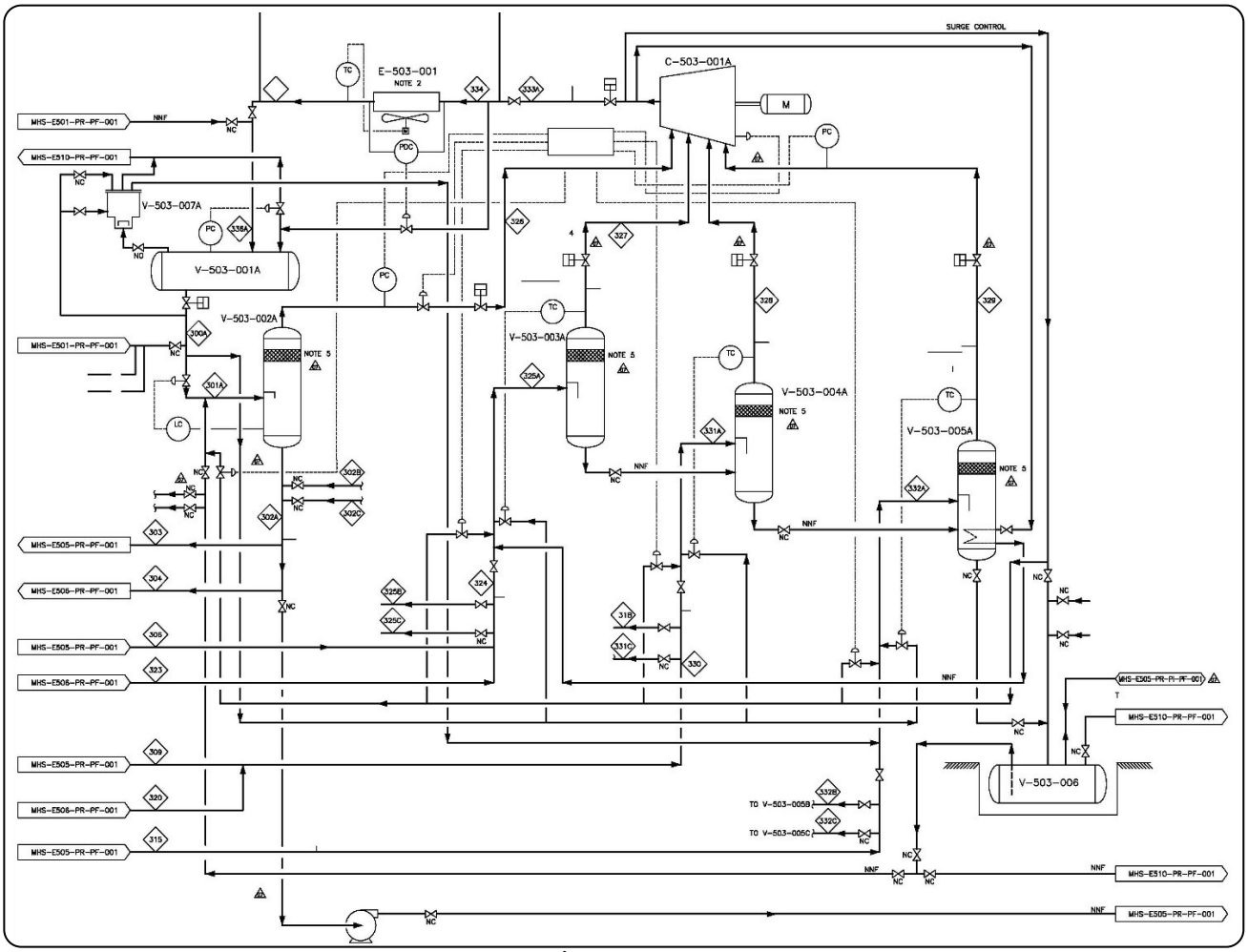
## تحلیل موجودی چرخه حیات

در این مرحله از LCA، کلیه منابع مصرفی و انتشارات آلاینده‌ها در طول چرخه عمر محصول یا فرایند، مطابق با واحد عملکردی

(۱) Refrigerant
(۲) Train
(۳) Bar A




شکل ۳ – فرایندهای مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس




شکل ۴ – شماتیک سیکل سردسازی پروپان برای تأمین دمای مورد نیاز مبدل‌های حرارتی

و مرزهای سامانه تعریف شده، شناسایی و کمی‌سازی می‌شوند. هدف اصلی این مرحله، تدوین یک جدول جامع از فهرست از تمامی ورودی‌ها (شامل مواد خام، انرژی و منابع) و خروجی‌ها (شامل انتشارات به هوا، آب‌وخاک و همچنین پسماندها و محصولات جانبی) به‌ازای واحد یا فرایند عملکردی است. به‌عبارت‌دیگر، جدول موجودی تصویری شفاف و دقیق از تمامی

**جدول ۲ - فهرست موجودی سیکل سردسازی**

| ورودی / خروجی | موارد استفاده | به‌ازای سردسازی ۷۰ تن گاز پروپان و ۴۰ تن گاز بوتان |
|---|---|---|
| گاز پروپان | خوراک ورودی سیکل سردسازی و سیال مبرد در مبدل‌ها (چیلرها) | ۱۰۰ تن |
| انرژی الکتریسیته | ایرفن‌ها (E-503-001)<br>کمپرسورها (A/B/C، 2×50%)<br>پمپ‌های روغن - کمپرسورها | ۶/۱۵ مگاوات ساعت |
| نیتروژن (ازت) | Dry Gas Seal – کمپرسورها | ۰/۸ تن |
| روغن روانکاری | روغن Rundown تانک کمپرسورها | ۴/۷۶ تن |
| انتشارات به آب، خاک، هوا | سیکل بسته و انتشاراتی به محیط وجود ندارد. | ۰ |

جریانات فیزیکی و انرژی مرتبط با سامانه مورد مطالعه را به‌منظور ارزیابی محیط‌زیستی فراهم می‌آورد. در مطالعه حاضر، باتوجه‌به هدف و دامنه تعریف شده که بر سیکل سردسازی پروپان جهت تأمین سرمایش مبدل‌های حرارتی در مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس متمرکز است، جدول ۲ دقیقاً این نقش را ایفا می‌کند. این جدول به طور خاص، داده‌های ورودی را که برای پایداری و عملکرد سیکل ضروری هستند، بر اساس آمار واقعی و میانگین یک ساله مجتمع (۱۴۰۳)، کمی‌سازی و ارائه نموده است. در واقع، نتایج منعکس‌کننده شرایط در این بازه زمانی است.

**جمع‌آوری داده‌ها و منابع اطلاعاتی**

در این پژوهش، از ترکیب داده‌های اولیه جمع‌آوری‌شده از مجتمع پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس و داده‌های ثانویه از پایگاه‌داده‌های معتبر بین‌المللی استفاده شده است. در این بخش، تمامی داده‌های مربوط به مصرف انرژی (برق ورودی به تجهیزات، گاز طبیعی مصرفی)، مصرف نیتروژن، مصرف روغن، میزان پسماندهای تولیدی (جامد، مایع، گازی) و انتشارات در داخل محدوده عملیاتی سیستم سردسازی پروپان، به‌صورت مستقیم از سوابق عملیاتی و اندازه‌گیری‌های واقعی مجتمع پالایشگاهی بید بلند خلیج‌فارس برای دوره زمانی سال ۱۴۰۳ جمع‌آوری شده‌اند. برای فرایندهای بالادستی[۱] و تولید ورودی‌هایی که داده‌های اولیه آن‌ها در دسترس نبود یا جمع‌آوری آن‌ها خارج از دامنه این مطالعه بود، از پایگاه داده Ecoinvent نسخه x.۳ استفاده شده است. پایگاه داده Ecoinvent به دلیل پوشش گسترده فرایندهای صنعتی در سطح جهانی، به‌روزرسانی‌های منظم و شفافیت در مستندسازی متدولوژی جمع‌آوری داده‌ها، به عنوان یکی از معتبرترین و پرکاربردترین پایگاه‌های داده در مطالعات LCA در سراسر جهان شناخته می‌شود. با توجه به عدم دسترسی به پایگاه‌های داده LCA بومی‌سازی‌شده و جامع برای تمامی فرایندهای بالادستی در ایران، استفاده از Ecoinvent به عنوان بهترین گزینه برای پوشش این شکاف داده‌ای انتخاب شد. تلاش شده است تا حد امکان، datasetهایی انتخاب شوند که از نظر تکنولوژی و منطقه جغرافیایی، بیشترین همخوانی را با شرایط مورد مطالعه داشته باشند. به دلیل ماهیت بسته و برگشتی بودن سیکل، خروجی‌های محیط زیستی مستقیم قابل کمی‌سازی در داخل مرز سیستم و در چارچوب داده‌های موجود به طور عمده در این مرحله ناچیز یا صفر در نظر گرفته شده‌اند که این نیز بخشی از تعریف موجودی برای این سیستم خاص است.

در خصوص کیفیت داده‌ها، سعی گردید داده‌های اولیه به طور دقیق و از واحدهای فرایندی و مهندسی مسلط بر کل فرایند در طول یکسان و داده‌های ثانویه از پایگاه‌داده‌های باکیفیت بالا و به‌روز جمع‌آوری گردد. به‌منظور درک عمیق‌تر قابلیت اطمینان نتایج، اذعان می‌شود که تحلیل عدم قطعیت می‌تواند کمک‌کننده باشد؛ لذا، این موضوع به‌عنوان یک محدودیت در مطالعه حاضر و پیشنهادی برای تحقیقات آتی، در بخش نتیجه‌گیری و پیشنهادها ذکر شده است. جدول فهرست موجودی، به‌عنوان داده ورودی کلیدی برای مرحله بعدی، یعنی ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)[۲]، عمل نموده و مبنای تحلیل‌های بعدی و کمی‌سازی اثرات محیط زیستی است؛ لذا، فهرست موجودی مرتبط با سیستم سردسازی، با ارجاع به واحد عملکردی، در نرم‌افزار سیماپرو نسخه ۸,۳,۰ مدل‌سازی شدند.

## محدودیت‌ها و مفروضات

هر تحلیل ارزیابی چرخه حیات بر پایه مجموعه‌ای از مفروضات مدل‌سازی بنا شده و با محدودیت‌های ذاتی مواجه است که تعیین‌کننده دامنه و میزان تعمیم‌پذیری نتایج آن هستند. شفاف‌سازی این موارد برای درک صحیح چهارچوب مطالعه و تفسیر دقیق خروجی‌ها ضروری است. محدودیت‌ها و مفروضات کلیدی این مطالعه به شرح زیر است:

**مرزهای سیستم:**

*محدودیت:* این مطالعه عمدتاً بر فاز عملیاتی و نگهداری سیستم سردسازی پروپان متمرکز است. فعالیت‌های بالادستی مربوط به ساخت و تولید اولیه تجهیزات اصلی (نظیر کمپرسورها، کندانسورها، اواپراتورها، و لوله‌کشی) و همچنین فاز پایان عمر تجهیزات (شامل جمع‌آوری، بازیافت، دفن، یا امحا) از مرزهای سیستم مستثنی شده‌اند.

(۱) Upstream Processes

(۲) Life Cycle Impact Assessment

*فرض:* این تصمیم بر اساس پیچیدگی بالا و عدم دسترسی به داده‌های جامع و قابل‌اطمینان برای فرایندهای ساخت و مونتاژ تجهیزات در مقیاس صنعتی در منطقه موردمطالعه بوده است.

**واحد عملکردی و سناریو عملیاتی:**

*محدودیت:* نتایج بر اساس واحد عملکردی مشخص، تأمین سرمایش موردنیاز برای ۷۰ تن پروپان از دمای $40\ ^{\circ}C$ به $-40\ ^{\circ}C$ و ۴۰ تن بوتان از دمای $35\ ^{\circ}C$ به $-5\ ^{\circ}C$ در مبدل‌های حرارتی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس و سناریوی عملیاتی مفروض مقید هستند.

*فرض:* در این بخش، پایداری شرایط عملیاتی و عدم تغییرات عمده در پارامترهای فرایندی در طول دوره مطالعه (یک‌ساله) فرض گردیده است.

**داده‌های ورودی و کیفیت آن‌ها:**

*محدودیت:* دقت نتایج به کیفیت و اعتبار داده‌های ورودی وابسته است.

*فرض:* داده‌های اولیه برای فرایندهای اصلی و مستقیم عملیاتی (مانند مصرف انرژی و مواد خام، و انتشارات مستقیم) که به‌صورت داخلی در پالایشگاه رخ می‌دهند، از داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم‌های اندازه‌گیری و ثبت داخلی پالایشگاه (مانند دیتالاگرها و گزارشات اپراتوری) در بازه زمانی ۱۴۰۳ استفاده شده است. فرض بر این است که این داده‌ها دارای بالاترین سطح دقت و مرتبط‌ترین اطلاعات برای سیستم موردمطالعه هستند. داده‌های ثانویه نیز برای فرایندهای بالادستی و پس‌زمینه (نظیر تولید برق، استخراج و فراوری مواد اولیه صنعتی)، از پایگاه‌داده معتبر و بین‌المللی "Ecoinvent 3.9.1" استفاده شده است. فرض بر این است که سناریوها و میانگین‌های منطقه‌ای موجود در این پایگاه‌داده، به دلیل عدم دسترسی به دیتابیس‌های ملی جامع و به‌روز، بهترین تقریب را برای شرایط عمومی ایران فراهم می‌کنند.

*عدم قطعیت:* تحلیل آماری جامع عدم قطعیت (مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو) به دلیل محدودیت در دسترسی به توزیع‌های آماری دقیق برای تمامی داده‌های ورودی و پیچیدگی مدل در این مطالعه انجام نشده است. بااین‌حال، تلاش شده است تا با انتخاب منابع داده باکیفیت بالا و شفاف‌سازی مبانی جمع‌آوری و انتخاب داده‌ها، تا حدامکان از عدم قطعیت‌های عمده کاسته شود.

**خروجی‌ها و انتشارات به آب، خاک، هوا**

*محدودیت:* عدم وجود انتشار به آب، خاک و هوا به دلیل عملکرد سیکل بسته در بخش خروجی‌ها.

*فرض:* ناچیز درنظرگرفتن انتشارات مستقیم فرّار یا نشتی‌های جزئی از سیستم فرایندی اصلی در چارچوب مرزهای تعریف‌شده و به دلیل عدم دسترسی به داده‌های کمی دقیق بود. این موضوع می‌تواند بر جامعیت ارزیابی اثرات محیط‌زیستی تأثیر بگذارد و نیازمند بررسی بیشتر در مطالعات آتی است.

**مدل‌سازی و تخصیص**

*فرض:* سیستم سردسازی پروپان به‌عنوان یک سیستم تک‌محصولی با یک خروجی اصلی (تولید سرمایش) مدل‌سازی شده است؛ بنابراین، نیازی به تخصیص اثرات محیط‌زیستی بین محصولات مشترک (کوپروداکت‌ها) وجود ندارد. در خصوص مدل‌سازی فرایند نیز فرض شده است که تمامی فرایندهای مدل‌سازی شده خطی هستند و اثرات مقیاس‌گذاری بر نتایج تأثیر قابل توجهی ندارند.

**محدودیت‌های زمانی و مکانی**

*محدودیت:* نتایج مطالعه منحصراً مرتبط با بازه زمانی سال ۱۴۰۳ و محدوده جغرافیایی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس، واقع در جنوب غرب ایران می‌باشند.

*توجیه:* داده‌های اولیه جمع‌آوری شده از این دوره زمانی و مکان استخراج شده‌اند. تعمیم نتایج به دوره‌های زمانی دیگر یا مناطق جغرافیایی متفاوت، بدون درنظرگرفتن تغییرات در فناوری، ساختار شبکه انرژی، و سیاست‌های محیط‌زیستی، باید بااحتیاط صورت گیرد.

## ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)

در این مرحله، اثرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و انتشار آلاینده‌ها بر سلامت انسان و اکوسیستم ارزیابی می‌گردد. هدف اصلی ارزیابی اثر چرخه حیات، تفسیر دقیق‌تر داده‌های حاصل از مرحله سیاهه چرخه حیات (LCI)[۱] است [۴۱]. بر اساس دستورالعمل ISO 14042، ارزیابی اثرات چرخه حیات شامل چهار مرحله اصلی است: انتخاب و طبقه‌بندی دسته‌های اثر، مشخصه‌سازی[۲]، نرمال‌سازی[۳] و وزن‌دهی[۴] [۴۲]. مراحل نرمال‌سازی و وزن‌دهی با هدف یکسان‌سازی واحدها انجام می‌پذیرند، زیرا در مطالعات ارزیابی چرخه حیات، هر یک از دسته‌های اثر دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی هستند. بنابراین، جهت تسهیل مقایسه و استفاده از این مقادیر به عنوان مقادیر هم واحد، از روش نرمال‌سازی استفاده می‌شود. نرمال‌سازی دسته‌های اثر، واحدهای اندازه‌گیری آنها را یکسان ساخته و امکان مقایسه بین آنها را فراهم می‌آورد. در این مطالعه، جهت ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در مرحله سوم، از روش‌های IMPACT 2002+، CML baseline و ReCiPe 2016 endpoint استفاده شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که این روش‌ها به طور گسترده در ارزیابی چرخه حیات مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا علاوه بر در نظر گرفتن طبقات اثر محیط‌زیستی، اثرات بهداشتی و سلامت انسان را نیز محاسبه می‌کنند. بعلاوه، روش‌های مختلف LCIA از مدل‌ها،

(۱) Life Cycle Inventory
(۲) Characterization
(۳) Normalization
(۴) Weighting

مجموعه‌داده‌ها و فرضیات متفاوتی برای برآورد ضرایب مشخصه‌سازی استفاده می‌کنند. استفاده از چندین روش به ارزیابی اعتبار و پایداری نتایج کمک می‌کند. اگر نتایج حاصل از روش‌های مختلف، روندهای مشابهی را نشان دهند (مثلاً یک فاز یا یک ماده خاص به طور مداوم به عنوان نقطه داغ شناسایی شود)، این امر به قوت و قابلیت اطمینان یافته‌ها می‌افزاید. همچنین، این رویکرد سبب آشنایی با ماهیت مدل‌سازی در LCIA و تأثیر انتخاب روش بر نتایج نهایی می‌شود.

روش IMPACT 2002+ دارای ۱۵ شاخص طبقه‌بندی اثر جزئی است و به طور کلی در قالب چهار شاخص نهایی «سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع» مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص‌ها و طبقات اثر مورد استفاده در این روش در جدول ۳ شرح داده شده‌اند.

روش CML baseline دارای ۱۱ شاخص طبقه بندی اثر می‌باشد که تعاریف و واحد هر کدام از طبقات اثر آن در جدول ۴ قابل مشاهده است.

روش ReCiPe 2016 endpoint نیز دارای ۲۲ شاخص طبقه‌بندی اثر است و در قالب سه طبقه کلی اثر شامل «سلامت انسان، اکوسیستم و منابع» مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تعاریف شاخص‌های مورد استفاده در این روش نیز با شاخص‌ها و طبقات اثر در دو روش IMPACT 2002+ و روش CML baseline همپوشانی دارد.

## نتیجه‌ها و بحث

### تفسیر چرخه حیات

پس از جمع‌آوری داده‌ها و تکمیل مرحله فهرست‌برداری، داده‌های مربوطه وارد نرم‌افزار سیماپرو گردید. در ادامه، نتایج ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان که به‌منظور تأمین سرمایش موردنیاز در مبدل‌های حرارتی مورداستفاده قرار می‌گیرد، با استفاده از روش‌های ارزیابی اثر IMPACT 2002+، CML baseline و ReCiPe 2016 endpoint محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند.

در جدول ۵، نتایج مربوط به میزان انتشار آلاینده‌ها که حاصل از ارزیابی اثر چرخه حیات سیکل سردسازی پروپان جهت تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی در مجتمع تأسیسات و مخازن ذخیره‌سازی پالایشگاه گاز بید بلند خلیج‌فارس است، بر مبنای شاخص‌های روش IMPACT 2002+ در مرحله مشخصه‌سازی نشان داده شده است. در فرایند مشخصه‌سازی، مقادیر آلاینده‌های ناشی از فرایند و سیکل مورد مطالعه مشخص شده و بر اساس میزان تولید آن‌ها در گروه‌های اثرگذار بر محیط‌زیست طبقه‌بندی می‌شوند. سپس، با ضرب این مقادیر در ضرایب ویژگی‌سازی مربوطه، سهم هر آلاینده در طبقات مختلف اثرات محیط‌زیستی تعیین می‌گردد. بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول ۵، در طی سیکل سردسازی پروپان برای تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی، معادل ۱/۱۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن ($CO_2$) به محیط منتشر می‌شود. از این مقدار، ۱/۰۱ کیلوگرم (معادل ۸۷/۸۲ درصد) مربوط به گاز پروپان مصرفی در سیکل سردسازی است. همچنین، میزان مصرف منابع انرژی تجدیدناپذیر ۷۷/۸ مگاژول است که ۷۲/۴ مگاژول از آن (معادل ۹۳ درصد) به مصرف گاز پروپان در سیکل (به عنوان مبرد) اختصاص دارد. بنابراین، از آنجایی که در این سیکل سردسازی از گاز پروپان به عنوان سیال تبرید استفاده می‌شود که خود یکی از اجزای اصلی گاز طبیعی و از منابع انرژی تجدیدناپذیر است، می‌توان نتیجه گرفت که عمده بار آلایندگی محیط‌زیستی در این سیکل مربوط به مصرف گاز پروپان می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به مقادیر مربوط به سایر طبقات اثر در این پژوهش، که در شکل ۵ نیز به وضوح قابل مشاهده است، نقش غالب و حداکثری گاز پروپان مصرفی در تمامی طبقات اثر مورد تأیید قرار می‌گیرد. در این زمینه *بهمنی‌نیا* (۲۰۰۶) در پژوهشی به ارزیابی چرخه حیات یک کارخانه گاز طبیعی در تصفیه خانه گاز سرخون در بندرعباس ایران به منظور بررسی انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای و همچنین سایر پیامدهای عمده محیط‌زیستی پرداخت. نتایج مطالعه نشان داد که $CO_2$ عامل اصلی است که ۸۹/۳ ٪ از پتانسیل گرمایش جهانی را برای این سیستم تشکیل می‌دهد. در خصوص مصرف انرژی، نیز بیشتر انرژی مصرف شده، حدود ۸۷ درصد، مربوط به گاز طبیعی بوده است که به توربین‌های گازی وارد می‌شود. در خصوص مصرف منابع نیز گاز طبیعی با بالاترین نرخ، که ۹۴/۵ ٪ از کل منابع را بر اساس وزن تشکیل می‌دهد، و پس از آن، آهن با ۴/۶ درصد، سنگ آهک ۰/۴ درصد و نفت ۰/۴ درصد قرار داشته است [۲۷].

در جدول ۶، نتایج مربوط به نرمال‌سازی و وزن‌دهی در ۱۵ طبقه اثر به تفصیل ارائه شده است. با توجه به بی‌بعد بودن شاخص نرمال‌سازی، امکان مقایسه اهمیت نسبی و دامنه نتایج بین طبقات اثر فراهم می‌گردد. از میان ۱۵ طبقه اثر، طبقات کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر (۰/۰۰۰۵۱۲)، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی (۰/۰۰۰۱۳۲) و گرمایش جهانی (۰/۰۰۰۱۱۷)، به ترتیب بیشترین شاخص نرمال‌سازی را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده اهمیت بالای این دسته‌ها در ارزیابی کلی اثرات است. شکل ۶ نیز به وضوح مقادیر نرمال‌شده ۱۵ طبقه اثر را به تفکیک برای کل سیکل و نیز برای مواد و انرژی‌های اصلی مورد استفاده در سیکل سردسازی شامل گاز پروپان، انرژی الکتریسیته، روغن روان‌کاری تجهیزات کمپرسور و ازت نشان می‌دهد. در این شکل، تأثیر حداکثری گاز پروپان مصرفی به عنوان ماده مبرد در ایجاد آلودگی محیط‌زیست در تمامی طبقات اثر به وضوح قابل مشاهده است که نشان‌دهنده نقش غالب آن در بار محیط‌زیستی کلی سیکل می‌باشد. جدول ۶ همچنین مقادیر انتشار آلاینده‌های وزن‌دهی‌شده و بار محیط‌زیستی معادل آن‌ها را در تمامی

**جدول ۳ - طبقات اثر، واحد اندازه‌گیری و تعریف آن‌ها براساس روش** IMPACT 2002+

| ردیف | طبقه اثر | واحد | تعریف |
|---|---|---|---|
| ۱ | سرطان‌زا بودن[۱] | معادل کیلوگرم وینیل کلراید[۲] | پتانسیل ترکیبات شیمیایی و مواد موجود در انتشارات برای ایجاد سرطان در انسان، از طریق مسیرهای مختلف تماس (استنشاق، گوارش، جذب پوستی). |
| ۲ | غیرسرطان‌زا بودن[۳] | معادل کیلوگرم وینیل کلراید | پتانسیل ترکیبات شیمیایی و مواد موجود در انتشارات برای ایجاد اثرات سمی غیرکشنده (غیرسرطان‌زا) بر سلامت انسان. |
| ۳ | تنفس ذرات معدنی[۴] | معادل کیلوگرم ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرون[۵] | پتانسیل انتشارات ذرات ریز معدنی و گازها برای ایجاد مشکلات تنفسی و اثرات نامطلوب بر سلامت انسان از طریق استنشاق. |
| ۴ | تابش یونیزاسیون[۶] | معادل بکرل کربن-۱۴[۷] | پتانسیل تابش‌های یونیزه‌کننده (مانند آلفا، بتا، گاما) برای ایجاد آسیب‌های بیولوژیکی در انسان و محیط‌زیست از طریق تغییر ساختار مولکولی و اتمی. |
| ۵ | تخریب لایه ازن[۸] | معادل کیلوگرم CFC-11[۹] | پتانسیل انتشار مواد شیمیایی که باعث کاهش غلظت ازن در استراتوسفر شده و در نتیجه افزایش میزان تابش فرابنفش مضر به سطح زمین را در پی دارد. |
| ۶ | تنفس ذرات آلی[۱۰] | معادل کیلوگرم اتیلن[۱۱] | پتانسیل انتشارات ذرات ریز آلی و ترکیبات آلی فرار (VOCs) برای ایجاد مشکلات تنفسی و اثرات نامطلوب بر سلامت انسان از طریق استنشاق. |
| ۷ | سمیت آبی[۱۲] | معادل کیلوگرم TEG در آب[۱۳] | پتانسیل ترکیبات شیمیایی رها شده در محیط‌زیست برای ایجاد اثرات سمی و آسیب‌رسان بر ارگانیسم‌های آب شیرین و اکوسیستم‌های مربوطه. |
| ۸ | سمیت خاک[۱۴] | معادل کیلوگرم TEG در خاک[۱۵] | پتانسیل ترکیبات شیمیایی رها شده در محیط‌زیست برای ایجاد اثرات سمی و آسیب‌رسان بر ارگانیسم‌های خشکی و اکوسیستم‌های زمینی. |
| ۹ | اسیدی/نیترات شدن خاک[۱۶] | معادل کیلوگرم دی‌اکسید گوگرد[۱۷] | پتانسیل انتشارات (مانند $SO_x$, $NO_x$, $NH_3$) برای افزایش اسیدیته خاک (اسیدی شدن) یا افزایش بیش از حد مواد مغذی نیتروژن‌دار و فسفردار در خاک (مغزی شدن) که منجر به تغییر در کیفیت خاک می‌شود. |
| ۱۰ | تغییر کاربری اراضی[۱۸] | مترمربع زمین قابل‌کشت[۱۹] | اثرات محیط زیستی ناشی از تغییر نوع استفاده از زمین (مانند تبدیل جنگل به کشاورزی یا شهری)، شامل ازدست‌دادن تنوع زیستی، تخریب خاک. |
| ۱۱ | اسیدی شدن محیط‌های آبی[۲۰] | معادل کیلوگرم دی‌اکسید گوگرد | پتانسیل انتشارات گازها (مانند $SO_x$, $NO_x$) که پس از حل‌شدن در آب، منجر به کاهش pH و افزایش اسیدیته آب در اکوسیستم‌های آبی می‌شوند. |
| ۱۲ | مغزی شدن محیط‌های آبی[۲۱] | معادل کیلوگرم فسفات محدودکننده فسفر[۲۲] | پتانسیل انتشارات و رواناب مواد مغذی (مانند نیتروژن و فسفر) که منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها و گیاهان آبی در اکوسیستم‌های آبی شده، و در نهایت باعث کاهش اکسیژن محلول و آسیب به حیات آبی می‌شود. |
| ۱۳ | گرمایش جهانی[۲۳] | معادل کیلوگرم دی‌اکسیدکربن[۲۴] | پتانسیل گازهای گلخانه‌ای (مانند $CO_2$, $CH_4$, $N_2O$) برای جذب و بازتاب حرارت در جو زمین که منجر به افزایش دمای کره زمین می‌شود. |
| ۱۴ | انرژی غیرقابل‌تجدید[۲۵] | مگاژول انرژی اولیه[۲۶] | میزان مصرف منابع انرژی که با نرخ بسیار کندتری نسبت به مصرف آنها در طبیعت تشکیل می‌شوند (مانند سوخت‌های فسیلی). |
| ۱۵ | استخراج مواد معدنی[۲۷] | مگاژول مازاد[۲۸] | میزان مصرف و کاهش ذخایر مواد معدنی غیرقابل‌تجدید (فلزات و غیرفلزات) از پوسته زمین. |

(۱) Carcinogens
(۲) kg C2H3Cl eq
(۳) Non-carcinogens
(۴) Respiratory inorganics
(۵) kg PM2.5 eq
(۶) Ionizing radiation
(۷) Bq C-14 eq
(۸) Ozone layer depletion
(۹) kg CFC-11 eq
(۱۰) Respiratory organics
(۱۱) kg C2H4 eq
(۱۲) Aquatic ecotoxicity
(۱۳) kg TEG water
(۱۴) Terrestrial ecotoxicity
(۱۵) kg TEG soil
(۱۶) Terrestrial acid/nutri
(۱۷) kg SO2 eq
(۱۸) Land occupation
(۱۹) M2org.arable
(۲۰) Aquatic acidification
(۲۱) Aquatic eutrophication
(۲۲) kg PO4 P-lim
(۲۳) Global warming
(۲۴) kg CO2 eq
(۲۵) Non-renewable energy
(۲۶) MJ primary
(۲۷) Mineral extraction
(۲۸) MJ surplus

**جدول ۴ - طبقات اثر، واحد اندازه‌گیری و تعریف آن‌ها براساس روش CML baseline**

| ردیف | طبقه اثر | واحد | تعریف |
|---|---|---|---|
| ۱ | کاهش منابع غیرزنده[۱] | کیلوگرم معادل آنتیموان[۲] | پتانسیل کاهش منابع طبیعی غیرزنده (از قبیل فلزات، مواد معدنی و سوخت‌های فسیلی) ناشی از استخراج و مصرف آن‌ها. |
| ۲ | کاهش منابع فسیلی[۳] | مگاژول[۴] | زیرمجموعه‌ای از کاهش منابع غیرزنده که به طور خاص پتانسیل کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی، زغال‌سنگ) را اندازه‌گیری می‌کند. |
| ۳ | گرمایش جهانی[۵] | کیلوگرم معادل $CO_2$ | پتانسیل انتشار گازهای گلخانه‌ای ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$) برای به دام انداختن حرارت در جو زمین و افزایش دمای کره زمین. |
| ۴ | تخریب لایه ازن[۶] | کیلوگرم معادل CFC-11 | پتانسیل ترکیبات شیمیایی (مانند CFCs، هالون‌ها) در کاهش غلظت ازن در لایه استراتوسفر که منجر به افزایش تابش فرابنفش به سطح زمین می‌شود. |
| ۵ | سمیت انسانی[۷] | کیلوگرم معادل ۱،۴-دی‌کلروبنزن[۸] | پتانسیل ترکیبات شیمیایی منتشر شده در محیط در ایجاد اثرات سمی (سرطان‌زا و چه غیرسرطان‌زا) بر سلامت انسان از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی. |
| ۶ | سمیت آب‌های سطحی[۹] | کیلوگرم معادل ۱،۴-دی‌کلروبنزن | پتانسیل ترکیبات شیمیایی منتشر شده در محیط‌زیست در ایجاد اثرات سمی بر ارگانیسم‌های اکوسیستم‌های آب شیرین (مانند ماهی‌ها، بی‌مهرگان آبزی). |
| ۷ | سمیت آب‌های آزاد[۱۰] | کیلوگرم معادل ۱،۴-دی‌کلروبنزن | پتانسیل ترکیبات شیمیایی منتشر شده در محیط‌زیست در ایجاد اثرات سمی بر ارگانیسم‌های اکوسیستم‌های آب‌شور (ماهی‌ها، جلبک‌ها و بی‌مهرگان دریایی). |
| ۸ | سمیت موجودت خاکزی[۱۱] | کیلوگرم معادل ۱،۴-دی‌کلروبنزن | پتانسیل ترکیبات شیمیایی منتشر شده در محیط در ایجاد اثرات سمی بر ارگانیسم‌های اکوسیستم‌های خاکی (گیاهان، حشرات، کرم‌ها). |
| ۹ | اکسیداسیون فتوشیمیایی[۱۲] | کیلوگرم معادل اتیلن | پتانسیل ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن منتشر شده، برای تولید ازن تروپوسفری در حضور نور خورشید که منجر به ایجاد مه دودفتوشیمیایی می‌شود. |
| ۱۰ | اسیدی شدن[۱۳] | کیلوگرم معادل $SO_2$ | پتانسیل ترکیبات اسیدی منتشر شده (مانند $SO_2$, $NO_x$, $NH_3$) برای کاهش pH محیط‌های طبیعی (آب، خاک و باران). |
| ۱۱ | یوتریفیکاسیون[۱۴] | کیلوگرم معادل فسفات[۱۵] | پتانسیل انتشار مواد مغذی (مانند ترکیبات نیتروژن و فسفر) به محیط‌های آبی و خاکی که منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها و گیاهان و در نتیجه کاهش سطح اکسیژن و اختلال در تعادل اکوسیستم می‌شود. |

گروه‌های اثر با واحد یکسان میکروپوینت (µpt)[۱۶] ارائه می‌کند که امکان مقایسه مستقیم را فراهم می‌آورد. مقدار کل انتشار آلاینده‌ها از مجموع گروه‌های اثر به ازای یک ساعت کارکرد سیکل سردسازی، ۷۸۳ µpt محاسبه شده است. همانطور که در جدول ۶ مشخص است، بخش اعظم این اثرات مربوط به کاهش منابع سوخت‌های تجدیدناپذیر، اثرات تنفسی ناشی از ورود ذرات آلاینده معدنی به اتمسفر و همچنین تولید گازهای گلخانه‌ای و تأثیر بر گرمایش جهانی است. نتایج حاصل از محاسبه سهم کلی مواد و منابع انرژی مورد استفاده در سیکل سردسازی در انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست نشان داد که بیشترین سهم مربوط به پروپان مصرفی با ۷۰۷ µpt، روغن مورد استفاده در مخزن کمپرسورها با ۵۱/۱ µpt، ازت مورد استفاده با ۰/۳۱ µpt و انرژی الکتریسیته با ولتاژ متوسط با ۲۴/۶ µpt است.

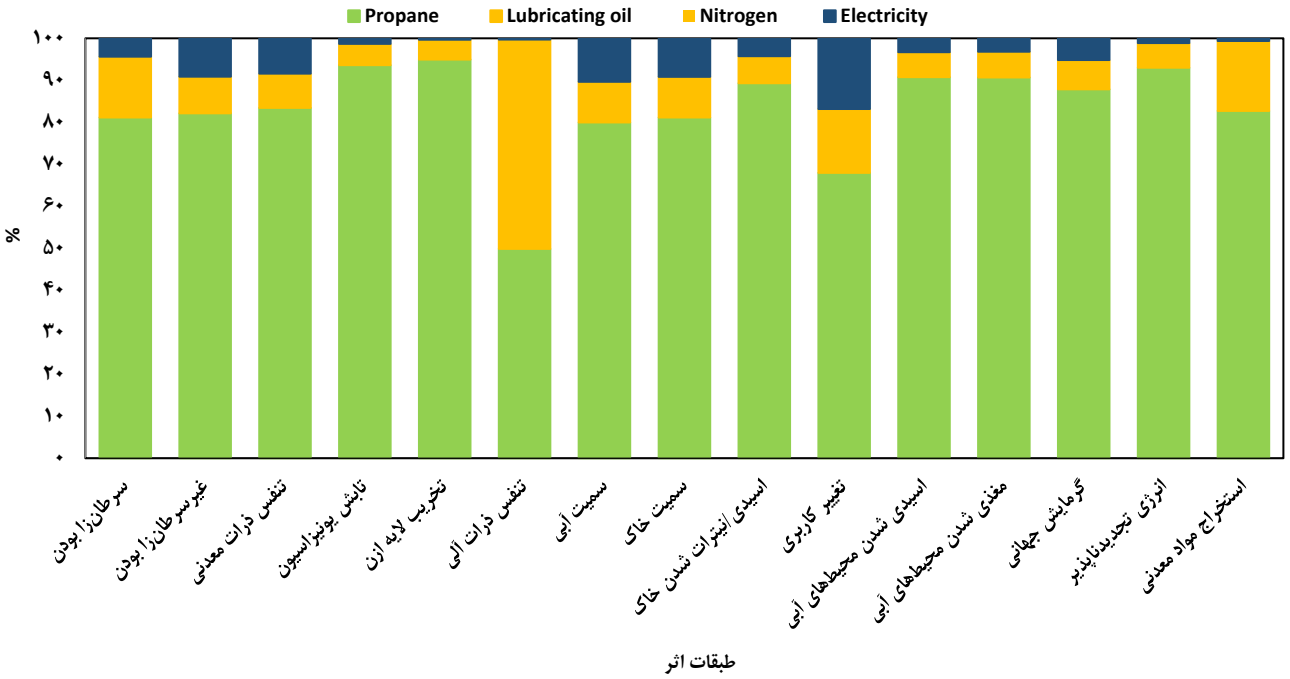
بدین ترتیب، بیشترین تأثیر محیط‌زیستی (۷۰۷ µpt) مربوط به اثرات ناشی از پروپان مورد استفاده به عنوان ماده مبرد در سیکل است که از منابع انرژی تجدیدناپذیر گاز طبیعی تأمین می‌شود.

نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های محیط‌زیستی، در قالب چهار دسته‌بندی نهایی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع، در جدول ۷ ارائه شده است. این نتایج امکان مقایسه میزان آلایندگی و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از سیکل سردسازی پروپان، در یک دوره زمانی یک ساعته در طول شبانه‌روز را فراهم می‌آورد. تحلیل این نتایج، ابزار مؤثری برای انتخاب گزینه‌های مناسب جهت کاهش اثرات محیط‌زیستی، بهینه‌سازی فرایندهای تولید، سیاست‌گذاری و طراحی مناسب تأسیسات جدید است. بر اساس نتایج جدول ۷، سهم گاز تبرید مصرف‌شده (پروپان)

(۱) Abiotic depletion
(۲) kg Sb eq
(۳) Abiotic depletion (fossil fuel)
(۴) MJ
(۵) Global warming
(۶) Ozone layer depletion
(۷) Human toxicity
(۸) kg 1,4-DB eq
(۹) Fresh water aquatic ecotoxicity
(۱۰) Terrestrial ecotoxicity
(۱۱) Terrestrial ecotoxicity
(۱۲) Photochemical oxidation
(۱۳) Acidification
(۱۴) Eutrophication
(۱۵) kg PO4 eq
(۱۶) Micro Point

**جدول ۵ - مقادیر شاخص‌های محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان در مرحله مشخصه‌سازی اثرات با روش IMPACT 2002+**

| طبقه اثر | واحد | مقدار کل | پروپان | روغن | نیتروژن | الکتریسیته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سرطان‌زا بودن | kg $C_2H3Cl$ eq | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۱۲۹ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۶ | ۰/۰۰۰۷۰ |
| غیرسرطان‌زا بودن | kg $C_2H_3Cl$ eq | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۰۰۸۵ | ۰/۰۰۰۹۰ | ۰/۰۰۰۰۰۱۵۸ | ۰/۰۰۰۹۴۶ |
| تنفس ذرات معدنی | kg PM2.5 eq | ۰/۰۰۱۳۴ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۸۴ | ۰/۰۰۰۱۱۲ |
| تابش یونیزاسیون | Bq C-14 eq | ۳۰/۷ | ۲۸/۸ | ۱/۵۴ | ۰/۰۲۸۷ | ۰/۴۰۲ |
| تخریب لایه ازن | kg CFC-11 eq | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۸۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۸ |
| تنفس ذرات آلی | kg $C_2H_4$ eq | ۰/۰۰۱۸۶ | ۰/۰۰۰۹۲ | ۰/۰۰۰۹۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۶۳ | ۰/۰۰۰۰۰۵۲ |
| سمیت آبی | kg TEG water | ۶۸/۸ | ۵۴/۹ | ۶/۶۳ | ۰/۰۰۰۴۵۸ | ۷/۱۲ |
| سمیت خاک | kg TEG soil | ۱۵/۵ | ۱۲/۶ | ۱/۵ | ۰/۰۰۰۷۹۵ | ۱/۴۲ |
| اسیدی/نیترات شدن خاک | kg $SO_2$ eq | ۰/۰۲۳۳ | ۰/۰۲۰۸ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۰۰۰۰۱۵۶ | ۰/۰۰۰۹۹۵ |
| تغییر کاربری | M2org.arable | ۰/۰۰۲۰۵ | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۳۱ | X | ۰/۰۰۰۳۴۵ |
| اسیدی شدن محیط‌های آبی | kg $SO_2$ eq | ۰/۰۰۸۵۸ | ۰/۰۰۷۸ | ۰/۰۰۰۵۰ | ۰/۰۰۰۰۰۷۰ | ۰/۰۰۰۲۸۲ |
| مغزی شدن محیط‌های آبی | kg $PO_4$ P-lim | ۰/۰۰۰۳۸۱ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۰۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۶ | ۰/۰۰۰۰۱۲ |
| گرمایش جهانی | kg $CO_2$ eq | ۱/۱۵ | ۱/۰۱ | ۰/۰۷۹۶ | ۰/۰۰۰۹۷۴ | ۰/۰۵۹۴ |
| انرژی تجدیدناپذیر | MJ primary | ۷۷/۸ | ۷۲/۴ | ۴/۵۳ | ۰/۰۱۹ | ۰/۸۸۸ |
| استخراج مواد معدنی | MJ surplus | ۰/۰۰۱۸۶ | ۰/۰۰۱۵۴ | ۰/۰۰۰۳۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۹۵ | ۰/۰۰۰۰۱۱۶ |



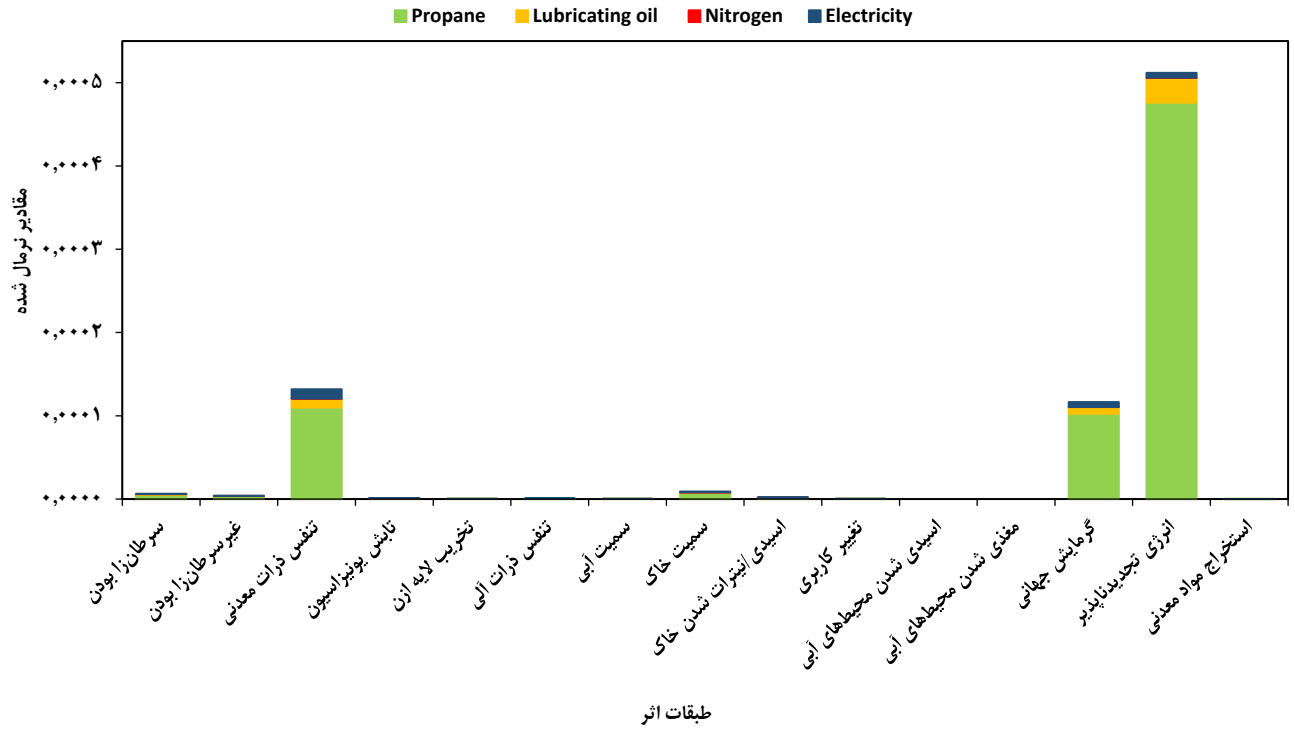

**شکل ۵ - نتایج ارزیابی چرخه حیات در مرحله مشخصه‌سازی اثرات با استفاده از روش IMPACT 2002+**

در آسیب‌های محیط‌زیستی، به‌ترتیب، بیشترین میزان تأثیر را در آسیب به سلامت انسان (۸۳٪)، کاهش کیفیت اکوسیستم (۸۲٪)، وقوع تغییرات اقلیمی (۸۷٪)، و آسیب به منابع طبیعی (۹۳٪) دارد. از این رو، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مهم‌ترین جنبه‌های محیط‌زیستی در این سیکل مربوط به گاز پروپان مصرفی به عنوان ماده تبرید است و توجه ویژه به کاهش مصرف و مدیریت بهینه آن ضرورت دارد.

در شکل ۷، نتایج مربوط به نرمال‌سازی شاخص‌های محیط‌زیستی در چهار گروه نهایی آسیب ارائه شده است. براساس این نمودار، ترتیب تأثیرات سیکل بر این گروه‌ها به‌صورت منابع > سلامت انسان > تغییر اقلیم > کیفیت اکوسیستم است. در میان این چهار گروه، بیشترین میزان آسیب مربوط به شاخص‌های مربوط به منابع انرژی (با مقدار ۰/۰۰۰۵۱۲) است، پس از آن آسیب به سلامت انسان (۰/۰۰۰۱۴۴) و تغییرات اقلیمی (۰/۰۰۰۱۱۷) قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که تمرکز اصلی در مدیریت و کاهش اثرات محیط‌زیستی باید بر منابع انرژی و سلامت انسان متمرکز گردد.

جدول ۶ – نتایج مربوط به مراحل نرمال‌سازی و وزن دهی براساس روش IMPACT 2002

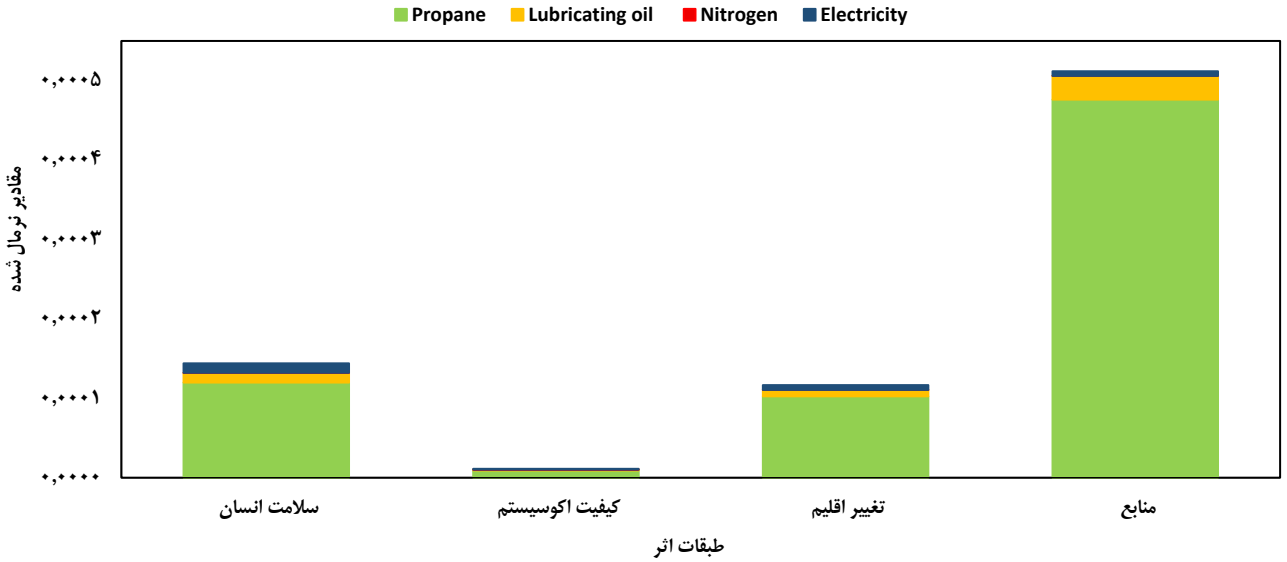
| طبقه اثر | مقادیر نرمال‌سازی | مقادیر وزن‌دهی (µpt) |
|---|---|---|
| سرطان‌زا بودن | ۰/۰۰۰۰۰۶۳ | ۶/۳ |
| غیرسرطان‌زا بودن | ۰/۰۰۰۰۰۴۱ | ۴/۱ |
| تنفس ذرات معدنی | ۰/۰۰۰۱۳۲ | ۱۳۲ |
| تابش یونیزاسیون | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۱ | ۰/۹۱ |
| تخریب لایه ازن | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۳ | ۰/۱۳۴ |
| تنفس ذرات آلی | ۰/۰۰۰۰۰۰۵۶ | ۰/۵۵۹ |
| سمیت آبی | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۵ | ۰/۲۵۲ |
| سمیت خاک | ۰/۰۰۰۰۰۱۸ | ۸/۹۶ |
| اسیدی/نیترات شدن خاک | ۰/۰۰۰۰۰۱۸ | ۱/۷۷ |
| تغییر کاربری | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۶ | ۰/۱۶۳ |
| اسیدی شدن محیط‌های آبی | – | – |
| مغزی شدن محیط‌های آبی | – | – |
| گرمایش جهانی | ۰/۰۰۰۱۱۷ | ۱۱۷ |
| انرژی تجدیدناپذیر | ۰/۰۰۰۵۱۲ | ۵۱۲ |
| استخراج مواد معدنی | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲ | ۰/۰۱۲۳ |
| کل | | ۷۸۳ |




شکل ۶ – مقادیر نرمال شده هر کدام از بخش‌های اثر مربوط به سیکل سردسازی پروپان با استفاده از روش IMPACT 2002+

جدول ۷ – نتایج ارزیابی اثرات کلی براساس روش IMPACT 2002+

| طبقه آسیب | واحد | کل | پروپان | روغن | نیتروژن | الکتریسیته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سلامت انسان | DALY | ۰/۰۰۰۰۱۰۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۸۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۳ |
| کیفیت اکوسیستم | PDF*m2*yr | ۰/۱۵۳ | ۰/۱۲۶ | ۰/۰۱۴۱ | ۰/۰۰۰۰۲۲۵ | ۰/۰۱۳۲ |
| تغییر اقلیم | kg CO2 eq | ۱/۱۵ | ۱/۰۱ | ۰/۰۷۹۶ | ۰/۰۰۰۹۷۴ | ۰/۰۵۹۴ |
| منابع | MJ primary | ۷۷/۸ | ۷۲/۴ | ۴/۵۳ | ۰/۰۱۹ | ۰/۸۸۸ |




**شکل ۷ - نتایج مقادیر نرمال شده اثرات کلی براساس روش IMPACT 2002+**

به‌طورکلی، نتایج ارزیابی اثرات محیطزیستی سیکل سردسازی پروپان در تأمین سرمایش موردنیاز مبدل‌های حرارتی، با استفاده از روش IMPACT 2002+، نشان می‌دهد که در میان ۱۵ طبقه اثر، شاخص‌های کاهش منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی و نیز گرمایش جهانی بیشترین میزان تأثیر را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس ارزیابی این اثرات در چهار گروه نهایی آسیب، نیز بیشترین آسیب مربوط به منابع انرژی بوده است. در این روش، مهم‌ترین جنبه محیطزیستی در سیکل سردسازی، مربوط به مصرف گاز پروپان به‌عنوان ماده تبرید است؛ بنابراین، بر اساس یافته‌های این مطالعه، کنترل مصرف و جایگزینی مواد تبرید با منابع تجدیدپذیر به‌عنوان اقدامات اساسی برای کاهش اثرات محیطزیستی پیشنهاد می‌شود. این اقدامات، شامل کاهش مصرف و مصرف مواد جایگزین، نقش مهمی در حفاظت از اکوسیستم، منابع طبیعی، سلامت انسان و مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا خواهد کرد. شاخص آسیب به‌سلامت انسان در این پژوهش، مقدار ۰/۰۰۰۰۰۱۰۲ است (براساس سال‌های زندگی تعدیل شده بر حسب ناتوانی یا DALY)[۱]، که مجموعه‌ای از دسته‌های میانی شامل سمیت انسان، اثرات تنفسی، تابش یون‌ساز، کاهش لایه اوزون و اکسیداسیون فتوشیمیایی را در برمی‌گیرد و شدت عوارض ناشی از آن را با افزایش مرگ‌ومیر زودرس و ناتوانی در بیماران نشان می‌دهد. مقایسه نتایج جدول ۷ و نتایج وزن دهی در جدول ۶ نشان می‌دهد که تنفس ترکیبات معدنی منتشرشده به هوا و ترکیبات سرطان‌زا، به ترتیب، مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده سلامت انسان محسوب می‌شوند. براساس یافته‌های موجود در جدول ۷ تأثیر مواد و منابع مختلف مصرفی در سیکل سردسازی بر کیفیت اکوسیستم برحسب کسری از گونه‌های بالقوه ناپدید شده در مساحت مشخص از اکوسیستم و مدت زمان معینی از سال ($PDF*m^2*yr$)[۲] مشخص شد. در بررسی اثرات بر کیفیت اکوسیستم، یافته‌ها نشان می‌دهد که مصرف پروپان به عنوان مبرد و روغن روان‌کاری در کمپرسورها، بیشترین تأثیر منفی را بر سمیت و اسیدی شدن اکوسیستم خاک دارد. در خصوص اثرات بر منابع، براساس یافته‌های ارائه شده در جدول ۷ به ازای هر ۱ ساعت سیکل سردسازی پروپان، کاهش بر منابع طبیعی معادل ۷۷/۸ (MJ primary) است که بخش عمده آن مربوط به استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر است. در روش IMPACT 2002، بررسی تأثیر بر تغییرات اقلیمی از طریق گازهای گلخانه‌ای بررسی می‌شود، که در سیکل سردسازی پروپان به ازای هر ۱ ساعت معادل ۱/۱۵ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن به اتمسفر انتشار می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش مصرف و جایگزینی مواد تبرید، راه‌حلی کلیدی برای کاهش اثرات منفی بر محیطزیست، به‌خصوص گرمایش جهانی، محسوب می‌شود.

در جدول ۸ نتایج ارزیابی اثرات محیطزیستی سیکل سردسازی پروپان جهت تأمین سرمایش مورد نیاز در مبدل‌های حرارتی در مرحله ویژگی‌سازی اثرات با استفاده از روش CML baseline در نرم افزار سیماپرو ارائه شده است. در این بخش، انتشارات محیطزیستی سیکل سردسازی پروپان برای تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی به ازای ۱ ساعت را در ۱۱ طبقه اثر قابل مشاهده است. نتایج ارائه شده در جدول ۸ نشان داد در همه طبقات تأثیر، به غیر از پتانسیل تقلیل منابع غیرزنده، گاز پروپان مصرفی به عنوان سیال تبرید

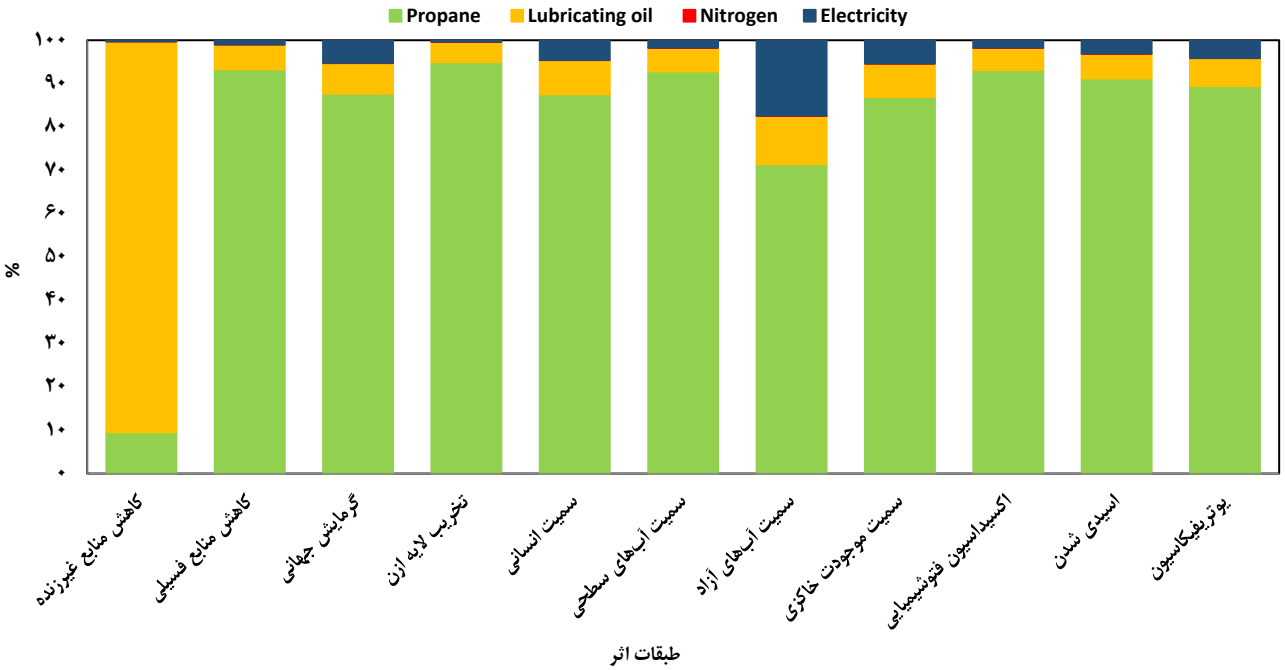
(۱) Disability-Adjusted Life Years

(۲) Potentially Disappeared Fraction of species over a certain amount of m 2 during a certain amount of year (PDF)

در سیکل سردسازی بیشترین انتشارات محیطزیستی را دارا بوده است. در گروه پتانسیل تخلیه غیرزنده مربوط به سوختهای فسیلی، گاز پروپان مصرفی در سیکل دارای بیشترین تأثیر بوده است. در بخش اثر تقلیل منابع غیرآلی به بررسی میزان مصرف منابع غیرآلی در طول چرخه حیات سیکل مورد بررسی پرداخته شده است. طبق نتایج به دست آمده در جدول ۸ مقدار آلایندگی محیطزیستی تقلیل منابع غیرآلی برابر ۰/۰۰۰۰۰۰۳۶۳ کیلوگرم آنتیموان معادل قرار دارد و مطابق شکل ۸، روغن روانکاری تجهیزات کمپرسور با سهم ۰/۰۰۰۰۰۰۳۲۷ و گاز پروپان مصرفی به عنوان مبرد با سهم ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۴۵ بیشترین اثر و ازت مصرفی با کمترین اثر بر آلایندگی زیستی تقلیل منابع غیرآلی را داشتند. در واقع میتوان گفت روغن روانکاری و گاز تبرید پروپان با ۹۷/۵۲ درصد بیشترین تأثیر را داشتند. در خصوص تخلیه منابع فسیلی نیز طبق نتایج به دست آمده مقدار آلایندگی محیطزیستی تخلیه منابع فسیلی برای سیکل سردسازی برابر ۷۲/۶ مگاژول است. طبق شکل (۸)، از میان پارامترهای مختلف دخیل در سیکل، گاز تبرید پروپان بیشترین سهم را در ایجاد آلایندگی در تخلیه منابع فسیلی با مقدار ۶۷/۸ مگاژول و معادل ۹۳ درصد از کل سیکل داشته است. این موضوع بیان کننده مصرف منابع فسیلی میباشد که به عنوان گاز تبرید در سیکل به کار میرود. در خصوص طبقه اثر پتانسیل گرمایش جهانی این شاخص جزء مهمترین شاخصها در ارزیابی چرخه حیات است و به منظور بیان سهم گازهای منتشر شده از سیکل سردسازی که سبب ایجاد مشکلات محیطزیستی میشوند استفاده میگردد. نتایج بررسیهای پژوهش حاضر نشان داد بار زیستی پتانسیل گرمایش جهانی ۱/۲۱ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن معادل قرار دارد. در پتانسیل گرمایش جهانی مطابق یافتههای ارائه شده در شکل ۸، گاز مبرد پروپان مورد استفاده در سیکل سردسازی با سهم ۱/۰۶ کیلوگرم معادل ۹۲ درصد بیشترین اثر را داشته است. یکی دیگر از گروههای اثر در روش CML baseline تخریب لایه ازن است. ازن سپر محافظتی زمین در برابر تابشهای زیان آور خورشید میباشد. این لایه به عنوان یک فیلتر طبیعی نور، اشعههای زیان بار خورشید مخصوصاً UV-B را تا حدی جذب میکند. پتانسیل تخریب لایه ازن تأثیر مواد انتشار یافته در از بین بردن لایه ازن را کمی میکند. طبق نتایج به دست آمده در جدول ۶ میزان آلایندگی تخریب لایه ازن ۰/۰۰۰۰۰۰۰۹۰ کلروفلوروکربن کیلوگرم معادل قرار دارد. براساس یافتهها، گاز پروپان با سهم ۰/۰۰۰۰۰۰۸۵۷ بیشترین اثر را بر تخریب لایه ازن داشته است. گروه اثر پتانسیل مسمومیت انسانی شاخصی است برای بررسی تأثیر مواد سمی منتشر شده از مواد و انرژیهای مصرفی در سیکل که بر روی انسانها تأثیر گذار میباشند. نتایج بررسی نشان داد مقدار آلایندگی محیطزیستی مسمومیت انسانی ۰/۱۹۵ کیلوگرم ۱/۴- دی کلروبنزن معادل قرار دارد. طبق شکل ۸ پروپان مصرفی در سیکل با سهم ۰/۱۷۱ بیشترین میزان اثر و گاز ازت مصرفی در سیکل با سهم ۰/۰۰۰۰۵۷ کمترین میزان اثر بر آلایندگی مسمومیت انسانی را داشته است. طبقه اثر مسمومیت آبهای سطحی نیز اشاره به تأثیر مواد سمی منتشر شده به اکوسیستمهای آبهای سطحی دارد. نتایج بررسی این گروه تأثیر ناشی از سیکل سردسازی نشان داد که میزان آلایندگی محیطزیستی مسمومیت آبهای سطحی برابر ۰/۰۲۰۴ کیلوگرم ۱/۴- دی کلروبنزن معادل است و گاز تبرید پروپان مصرفی در سیکل با سهم ۰/۰۱۸۹ بیشترین اثر را بر روی آلایندگی مسمومیت آبهای سطحی داشته است. گروه تأثیر مسمومیت آبهای آزاد اشاره به تأثیر مواد سمی منتشر شده به اکوسیستم آبهای آزاد است. نتایج بررسی حاضر نشان داد که میزان آلایندگی محیطزیستی مسمومیت آبهای آزاد برابر ۲۸۵ کیلوگرم ۱/۴-دی کلروبنزن معادل است. طبق یافتهها گاز پروپان مصرفی در سیکل با سهم ۲۰۴ و سپس انرژی الکتریسیته مصرفی با ۴۹/۵ کیلوگرم ۱/۴-دی کلروبنزن معادل بیشترین تأثیر را بر روی آلایندگی مسمومیت آبهای آزاد داشته است. طبقه اثر مسمومیت خاک نیز اشاره به تأثیر مواد سمی منتشر شده به اکوسیستمهای خاکی دارد و شاخصی است که به بررسی تأثیر مواد سمی منتشر شده در سیکل سردسازی که بر روی موجودات خاکزی تأثیر گذار است. براساس بررسیهای پژوهش حاضر میزان آلایندگیهای محیطزیستی مسمومیت خاک ۰/۰۰۰۹۶۶ کیلوگرم ۱/۴-دی کلروبنزن معادل بوده است و گاز پروپان مصرفی با سهم ۰/۰۰۰۸۴ کیلوگرم ۱/۴-دی کلروبنزن معادل بیشترین اثر را در ایجاد آلایندگی مسمومیت خاک را داشته است. پتانسیل اکسیداسیون فتوشیمیایی نیز به طور عمده ناشی از تشکیل ازن در لایه تحتانی اتمسفر میباشد. البته در طبیعت ازن به مقدار کم تولید میشود، ولی در شرایط انتشار آلایندهها، تولید آن افزایش مییابد و میتواند اثرات سوئی بر سلامت انسان و اکوسیستم بگذارد. از نشانههای قابل رویت مجاورت با ازن صدماتی از جمله آسیب آشکار به برگها، کاهش رشد گیاهان و محصولات کشاورزی و در نتیجه افزایش تنشهای زیستی میباشد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد طبقه اثر اکسیداسیون فتوشیمیایی آلایندگی محیطزیستی ۰/۰۰۰۶۱۲ کیلوگرم اتیلن معادل را داراست. طبق یافتهها گاز پروپان مصرفی در سیکل با سهم ۰/۰۰۰۵۷ کیلوگرم اتیلن معادل بیشترین اثر را بر روی آلایندگی محیطزیستی اکسیداسیون فتوشیمیایی دارد. در خصوص گروه اثر پتانسیل اسیدی شدن، مقصود از اسیدیته بررسی عوامل مؤثر بر باران اسیدی میباشد. در طبقه اثر پتانسیل اسیدی شدن طبق نتایج جدول ۸، بار آلایندگی محیطزیستی پتانسیل اسیدی شدن برابر ۰/۰۰۹۱۷ کیلوگرم سولفور دی اکسید معادل است. طبق شکل ۸، گاز تبرید پروپان با سهم ۰/۰۰۸۳۶ (۹۱ ٪) بیشترین تأثیر را در آلایندگی پتانسیل اسیدی شدن داشته است.

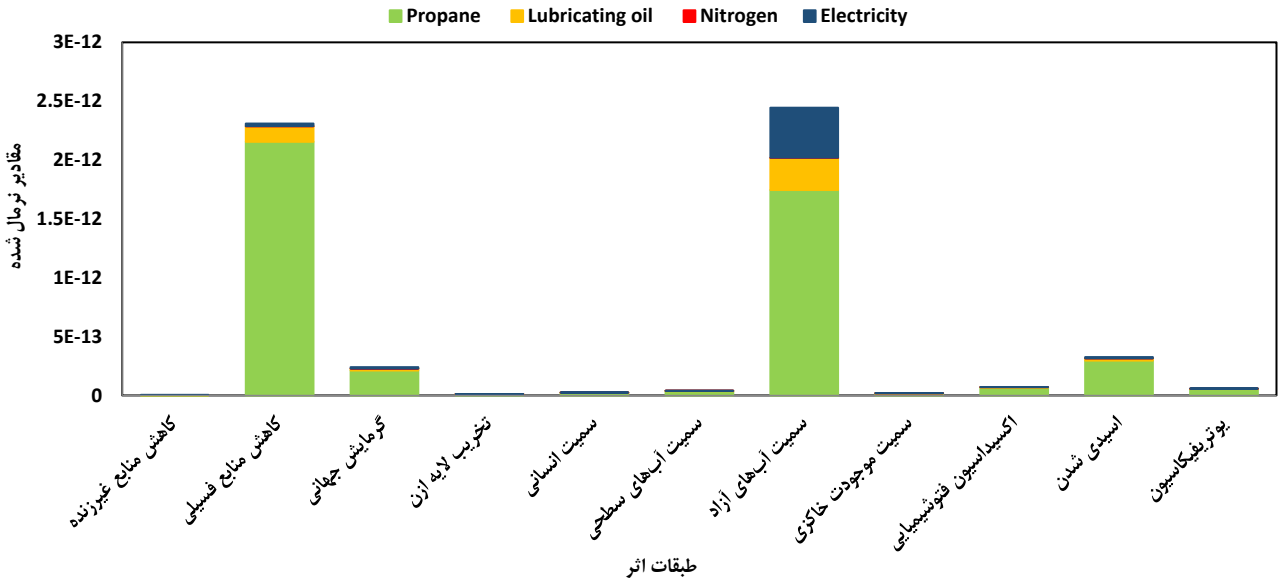
**جدول ۸ - مقادیر شاخص‌های محیطزیستی سیکل سردسازی پروپان در مرحله ویژگی‌سازی اثرات با استفاده از روش CML baseline**

| طبقه اثر | واحد | مقدار کل | پروپان | روغن | نیتروژن | الکتریسیته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کاهش منابع غیرزنده | kg Sb eq | ۰/۰۰۰۰۰۰۳۶۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۳۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۹ |
| کاهش منابع فسیلی | MJ | ۷۲/۶ | ۶۷/۸ | ۴/۱۷ | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۶۸۳ |
| گرمایش جهانی | kg $CO_2$ eq | ۱/۲۱ | ۱/۰۶ | ۰/۰۸۵۳ | ۰/۰۰۱۰۱ | ۰/۰۶۲۹ |
| تخریب لایه ازن | kg CFC-11 eq | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۰۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۷ |
| سمیت انسانی | kg 1,4-DB eq | ۰/۱۹۵ | ۰/۱۷۱ | ۰/۰۱۵۵ | ۰/۰۰۰۰۵۷ | ۰/۰۰۸۸۶ |
| سمیت آب‌های سطحی | kg1,4-DB eq | ۰/۰۲۰۴ | ۰/۰۱۸۹ | ۰/۰۰۱۱۲ | ۰/۰۰۰۰۰۱۹ | ۰/۰۰۰۳۴۵ |
| سمیت آب‌های آزاد | kg1,4-DB eq | ۲۸۵ | ۲۰۴ | ۳۱/۷ | ۰/۳۸۵ | ۴۹/۵ |
| سمیت موجودت خاکزی | kg1,4-DB eq | ۰/۰۰۰۹۶۶ | ۰/۰۰۰۸۴ | ۰/۰۰۰۰۷۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۷۲ | ۰/۰۰۰۰۵۱ |
| اکسیداسیون توشیمیایی | kg C2H4 eq | ۰/۰۰۰۶۱۲ | ۰/۰۰۰۵۷ | ۰/۰۰۰۰۳۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۳۶ | ۰/۰۰۰۰۱۰۶ |
| اسیدی شدن | kg $SO_2$ eq | ۰/۰۰۹۱۷ | ۰/۰۰۸۳۶ | ۰/۰۰۰۵۲ | ۰/۰۰۰۰۰۷۶ | ۰/۰۰۰۲۷۶ |
| یوتریفیکاسیون | kg $PO_4$ eq | ۰/۰۰۰۷۹۱ | ۰/۰۰۰۷۰۷ | ۰/۰۰۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۵ | ۰/۰۰۰۰۳۲ |




**شکل ۸ - نتایج ارزیابی چرخه حیات در مرحله ویژگی‌سازی اثرات با استفاده از روش CML baseline**

در شکل ۹، مقادیر نرمال‌سازی‌شده هر یک از اثرات مرتبط با سیکل سردسازی پروپان برای تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی، با استفاده از روش CML baseline، نمایش داده شده است. بر اساس نتایج این نمودار، بیش‌ترین تأثیرات ناشی از فعالیت سیکل سردسازی در مدت ۱ ساعت، مربوط به سمیت آب‌های آزاد با مقدار نرمال شده ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۴ و کاهش منابع فسیلی با مقدار ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۳ است. در رده‌های بعدی، گرمایش جهانی با مقدار ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲۴ و اسیدی شدن با مقدار ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۳۲ قرار دارند. به‌علاوه، در این نمودار مقادیر نرمال‌شده ۱۵ طبقه اثر برای مواد و انرژی‌های مصرفی در سیکل شامل گاز پروپان، انرژی الکتریکی، روغن روان‌کاری برای کمپرسورها و نیتروژن نیز قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که مصرف گاز پروپان، به عنوان ماده تبرید در این سیکل، بیش‌ترین تأثیر منفی را در تمامی طبقات اثرات محیطزیستی دارد و عامل اصلی آلودگی محیطزیست است. *رضایی راد و همکاران* (۱۳۹۸) در پژوهشی به ارزیابی محیطزیستی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با استفاده از روش LCA پرداختند. بدین منظور کلیه مواد، منابع محیطی، تکنولوژی‌های مورد استفاده و میزان انتشارات مختلف به ازای تولید ۱ مگاوات ساعت برق که واحد عملکردی در نظر گرفته شده بود، تهیه شد و سپس تأثیر هر یک از این نهاده‌ها در قالب شاخص‌های محیط زیستی، کمی شده و در نهایت ارزیابی اثرات محیط زیستی تولید برق با استفاده از نرم افزار سیماپرو در ۱۰ طبقه اثر انجام شد.




**شکل ۹ - مقادیر نرمال شده هر کدام از بخش‌های اثر مربوط به سیکل سردسازی پروپان از روش CML baseline**

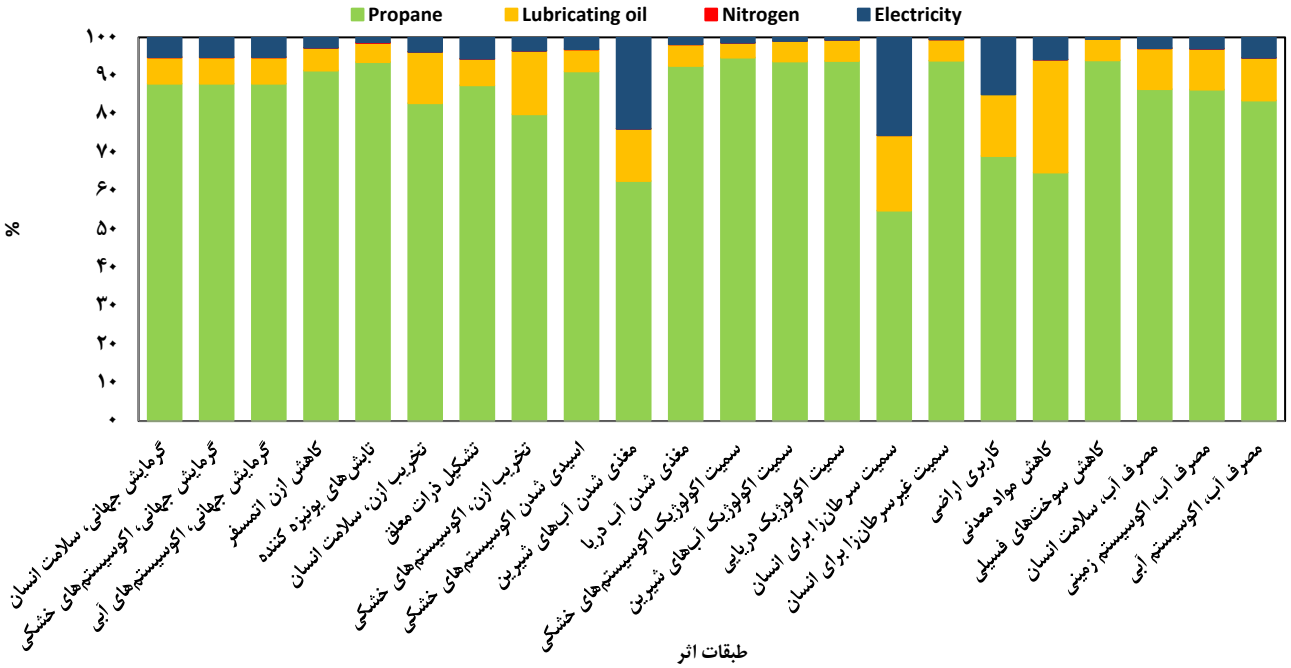
نتایج ارزیابی نشان داد که مشابه یافته‌های این بخش از مطالعه حاضر، اثرات سمیت آب‌های آزاد، تخلیه منابع فسیلی، اسیدی شدن و گرمایش جهانی در تولید ۱ مگاوات ساعت برق در نیروگاه سیکل ترکیبی یزد بیشتر از سایر اثرات، به محیط زیست آسیب می‌رسانند. از طرفی سوخت‌های فسیلی بیشترین بار منفی محیط زیستی را از بین سایر ورودی‌ها ایجاد می‌نمایند. شاخص نهایی پتانسیل گرمایش جهانی در طول چرخه حیات تولید ۱ مگاوات ساعت برق در نیروگاه یزد، در مرحله بهره برداری ۶۲۳ کیلوگرم معادل انتشار گاز $CO_2$ محاسبه شد که نسبت به مرحله ساخت نیروگاه دارای اثر بیشتری در این طبقه اثر بود [۲۸]. *خیرعلی‌پور و همکاران* (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی به بررسی اثرات محیطزیستی فرایند پالایشگاه گاز طبیعی بر اساس روش پایه LCA CML-IA پرداخت. یازده شاخص محیطی گاز خروجی ۱ تنی محاسبه و سپس در نرم افزار سیما پرو نرمال سازی شد. نتایج نشان داد بیشترین میزان اثر مربوط به شاخص تخریب سوخت‌های فسیلی با مقدار $۴۷/۴\times۱۰^{-۹}$ و گرمایش زمین ($۳۶/۱\times۱۰^{-۹}$) بود. شاخص‌های پتانسیل اسیدی ($۳/۶۵\times۱۰^{-۱۰}$)، اوتروفیکاسیون ($۲/۰۳\times۱۰^{-۱۰}$)، و اکوتوکسیکولوژی زمینی ($۱/۱۰\times۱۰^{-۱۰}$) پس از این شاخص‌ها رتبه‌بندی شدند و شاخص تخریب لایه ازن کمترین مقدار را داشت. فرایند پالایشگاه، برق، دستگاه‌های الکترونیکی، ورودی‌های آمین، سولفیت سدیم، فولاد و مس عوامل اصلی مؤثر بر بیشتر شاخص‌های محیطی مورد مطالعه بودند. در این پژوهش عنوان گردید که ارزیابی چرخه عمر به عنوان یک روش قابل اعتماد می‌تواند در بخش پالایشگاه گاز برای رسیدگی، ارزیابی و سپس کاهش بارهای محیطزیستی به کار رود [۲۹]. از جمله پژوهش دیگری در این زمینه می‌توان به مطالعه *شی و همکاران* (۲۰۱۵) در ارزیابی و تعیین کمیت مصرف انرژی و انتشار گازهای محیطی یک کمپرسور تبرید تولید شده توسط یک کارخانه چینی در کل چرخه حیات کمپرسور و تلاش برای تعیین مرحله با قوی ترین اثرات محیط زیستی پرداختند. روش شناسی ارزیابی چرخه حیات در این مطالعه با استفاده از پایگاه داده چرخه حیات چین برای ارزیابی بوده است و نتایج ارزیابی از نظر دسته تأثیر فردی مطابق با مدل CML 2001 ارائه شد. ۷ طبقه از اثرات شامل پتانسیل گرم شدن کره زمین، پتانسیل اسیدی شدن، پتانسیل اتروفیکاسیون، پتانسیل تشکیل ازن فتوشیمیایی، پتانسیل کاهش ازن، سمیت اکولوژیکی و تقاضای انرژی اولیه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از LCA نشان داد که مرحله استفاده از کمپرسور در چرخه حیات بیشترین انرژی را مصرف می‌کند و قوی ترین اثرات محیط زیستی را اعمال می‌کند و به دنبال آن مراحل تولید مواد اولیه است. در همین حال، تقاضای اولیه انرژی، سمیت اکولوژیکی و پتانسیل گرم شدن کره زمین سه طبقه تأثیر غالب ناشی از کل چرخه زندگی کمپرسور تبرید بودند. که به ترتیب ۳۶/۲۱۵۰، ۳۴/۴۵۶۷ و ۱۶/۵۸۶۲ ٪ از کل اثرات را تشکیل دادند [۳۴].

در جدول ۹، نتایج مربوط به میزان انتشار آلاینده‌ها بر اساس ارزیابی چرخه حیات، برای سیکل سردسازی پروپان به منظور تأمین سرمایش مورد نیاز مبدل‌های حرارتی، با استفاده از شاخص‌های روش ReCiPe 2016 Endpoint، در مرحله ویژگی‌سازی، ارائه شده است. در شکل ۱۰ نیز نتایج نهایی ارزیابی، بر اساس سهم کل آسیب وارد شده که در جدول ۹ نشان داده شده است، میزان اثرات محیطزیستی سیکل سردسازی گاز پروپان را در ۲۲ طبقه اثر، بر مواد و انرژی‌های مصرفی، تفکیک کرده است. بر اساس نتایج حاصل، بیش‌ترین بار محیطزیستی مربوط به گاز پروپان مصرفی به عنوان ماده تبرید در این سیکل است. این نتیجه نشان می‌دهد که نقش گاز پروپان در ایجاد آلودگی‌های محیطزیستی بسیار حائز اهمیت است و باید در فرایندهای بهبود و کاهش اثرات محیطزیستی در نظر گرفته شود.

**جدول ۹ – مقادیر شاخص‌های محیط‌زیستی سیکل سردسازی پروپان در مرحله ویژگی‌سازی اثرات با روش ReCiPe 2016 endpoint**

| طبقه اثر | واحد* | مقدار کل | پروپان | روغن | نیتروژن | الکتریسیته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| گرمایش جهانی (سلامت انسان) | DAILY | ۰/۰۰۰۰۱۴۲ | ۰/۰۰۰۰۱۲۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۷۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۲۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۷۲ |
| گرمایش جهانی (اکوسیستم خشکی) | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۷۷۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۹۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۴۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۴ |
| گرمایش جهانی (اکوسیستم آبی) | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۷۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۳۹ |
| کاهش ازن اتمسفر | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۹۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۷۹ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۱۹ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۷۹ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۱ |
| تابش‌های یونیزه‌کننده | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۵۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۷۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۶۹ |
| تخریب ازن (سلامت انسان) | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۲۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۶۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۳۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲ |
| تشکیل ذرات معلق | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۱۶۵ | ۰/۰۰۰۰۰۱۴۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۱۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۹۱ |
| تخریب ازن، اکوسیستم خشکی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۰۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۰۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴۳۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۷ |
| اسیدی شدن اکوسیستم‌های خشکی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۵ | ۰/۰۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۹۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۸ |
| مغزی شدن آب‌های شیرین | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۶۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۵ |
| مغزی شدن آب دریا | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲ |
| سمیت اکولوژیک اکوسیستم خشکی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۳۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۳۹ |
| سمیت اکولوژیک آب‌های شیرین | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۳ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۲ |
| سمیت اکولوژیک دریایی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۷ |
| سمیت سرطان‌زا برای انسان | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۳۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۴ |
| سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۴۹ | ۰/۰۰۰۰۰۴۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۳ |
| کاربری اراضی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۳۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۵۰ | X | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۴۶ |
| کاهش مواد معدنی | USD | ۰/۰۰۰۰۳۵ | ۰/۰۰۰۰۲۲ | ۰/۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۶۱ | ۰/۰۰۰۰۰۲۰ |
| کاهش سوخت‌های فسیلی | USD | ۰/۷۴۱ | ۰/۶۹۷ | ۰/۰۴۱ | ۰/۰۰۰۰۳۱ | ۰/۰۰۳۱۴ |
| مصرف آب، سلامت انسان | DAILY | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۷ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۵۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴۷ |
| مصرف آب، اکوسیستم زمینی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۹۰ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۳۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۳۰ |
| مصرف آب، اکوسیستم آبی | species. yr | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۲ |

* DAILY: روزانه؛ species. yr: گونه در سال؛ USD: دلار




**شکل ۱۰ – نتایج ارزیابی چرخه حیات در مرحله ویژگی‌سازی اثرات با استفاده از روش ReCiPe 2016 endpoint**

در جدول ۹، نتایج نرمال‌سازی و وزن‌دهی در ۲۲ طبقه اثر با استفاده از روش ReCiPe ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که از بین این طبقات، اثرات مربوط به گرمایش جهانی (مرتبط با سلامت انسان) با مقدار ۰/۰۰۰۱۵۹، بیش‌ترین شاخص نرمال‌سازی را به خود اختصاص داده است، و پس از آن، سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان با مقدار ۰/۰۰۰۰۵۵، گرمایش جهانی (در حوزه اکوسیستم‌های خشکی)

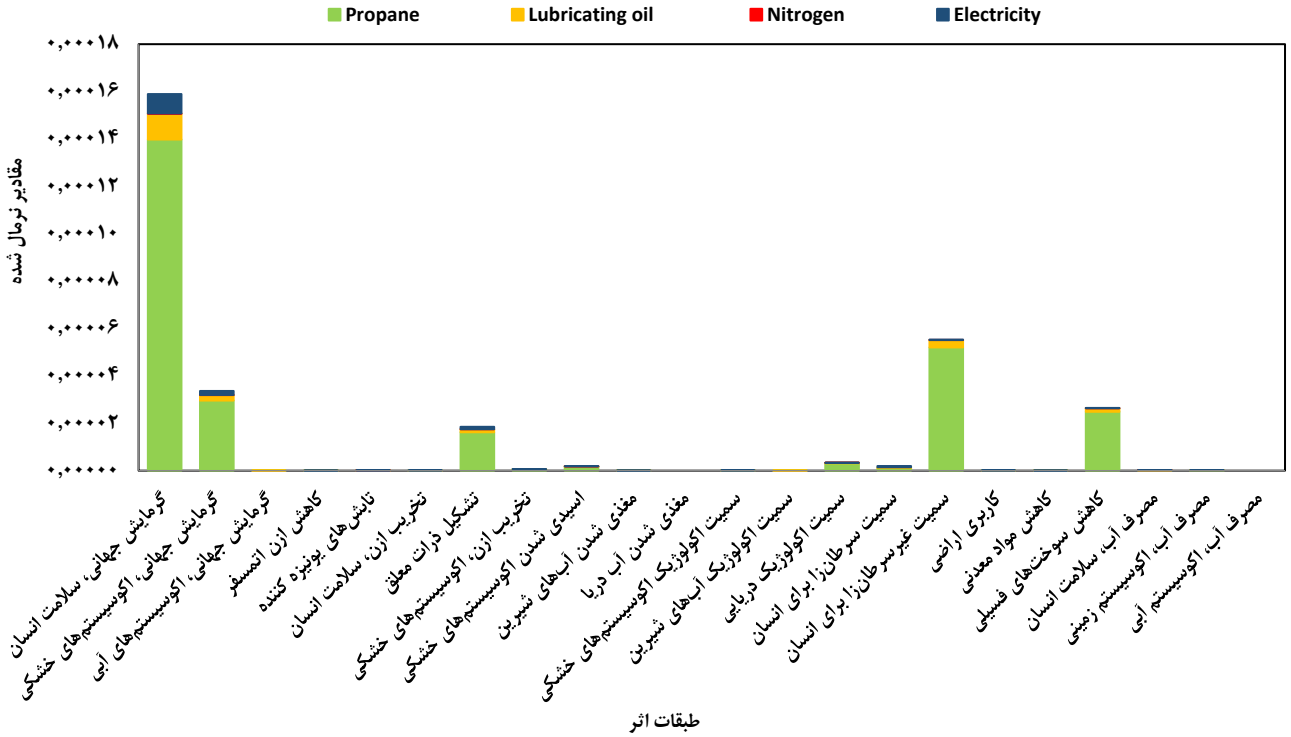
**جدول ۹ - نتایج مربوط به مراحل نرمال‌سازی و وزن دهی براساس روش ReCiPe 2016 endpoint**

| طبقه اثر | مقادیر نرمال‌سازی | مقادیر وزن‌دهی (mPt) |
|---|---|---|
| گرمایش جهانی (سلامت انسان) | ۰/۰۰۰۱۵۹ | ۶۳/۶ |
| گرمایش جهانی (اکوسیستم‌های خشکی) | ۰/۰۰۰۰۳۳۷ | ۱۳/۵ |
| گرمایش جهانی (اکوسیستم‌های آبی) | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۹۱۸ | ۰/۰۰۰۳۶۷ |
| کاهش ازن اتمسفر | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۱۹ | ۰/۰۰۸۷۵ |
| تابش‌های یونیزه‌کننده | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۶۲۳ | ۰/۰۲۴۹ |
| تخریب ازن (سلامت انسان) | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۶۳ | ۰/۰۱۴۵ |
| تشکیل ذرات معلق | ۰/۰۰۰۰۱۸۵ | ۷/۴۱ |
| تخریب ازن، اکوسیستم‌های خشکی | ۰/۰۰۰۰۰۰۵۹۶ | ۰/۲۳۹ |
| اسیدی شدن اکوسیستم‌های خشکی | ۰/۰۰۰۰۰۱۸۸ | ۰/۷۵۳ |
| مغزی شدن آب‌های شیرین | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲۹ | ۰/۰۰۵۱۵ |
| مغذی شدن آب دریا | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۲۷ | ۰/۰۰۰۰۵۰۷ |
| سمیت اکولوژیک اکوسیستم‌های خشکی | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۳۹ | ۰/۰۱۳۶ |
| سمیت اکولوژیک آب‌های شیرین | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۵۹ | ۰/۰۰۰۶۳۴ |
| سمیت اکولوژیک دریایی | ۰/۰۰۰۰۰۳۳۱ | ۱/۳۲ |
| سمیت سرطان‌زا برای انسان | ۰/۰۰۰۰۰۱۹۴ | ۰/۷۷۵ |
| سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان | ۰/۰۰۰۰۵۵۴ | ۲۲/۱ |
| کاربری اراضی | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۳۷۳ | ۰/۰۱۴۹ |
| کاهش مواد معدنی | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۲۶ | ۰/۰۰۰۵۲۵ |
| کاهش سوخت‌های فسیلی | ۰/۰۰۰۰۲۶۵ | ۵/۲۹ |
| مصرف آب، سلامت انسان | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۹۱ | ۰/۰۷۶۳ |
| مصرف آب، اکوسیستم زمینی | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۲۴ | ۰/۰۴۹۵ |
| مصرف آب، اکوسیستم آبی | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶۱۵ | ۰/۰۰۰۰۰۲۴۶ |
| کل | | ۱۱۵ |

با مقدار ۰/۰۰۰۰۳۴، کاهش سوخت‌های فسیلی با مقدار ۰/۰۰۰۰۰۲۶، و تشکیل ذرات معلق با مقدار ۰/۰۰۰۰۰۱۸، قرار دارند. شکل ۱۱، مقادیر نرمال‌شده این اثرات در ۲۲ طبقه و همچنین اثرات مربوط به مواد و انرژی‌های مصرفی در سیکل سردسازی را نشان می‌دهد. بر پایه این یافته‌ها، بیش‌ترین اثرات مربوط به گاز پروپان مصرفی در سیکل به عنوان ماده تبرید است. در جدول ۹، مقادیر انتشار آلاینده‌های وزن‌دهی‌شده و بار محیط‌زیستی آنها در تمامی گروه‌های اثر، با واحد mPt، آورده شده است و امکان مقایسه میان اثرات مختلف وجود دارد. بر اساس محاسبات، مجموع بار انتشار آلاینده‌ها در طول یک ساعت عملکرد سیکل سردسازی، معادل ۱۱۵ mPt است. بیش‌ترین سهم از این اثرات مربوط به اثرات مرتبط با گرمایش جهانی (مؤثر بر سلامت انسان، با ۳۰/۵۵ درصد)، سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان (۲۱/۱۹ درصد)، گرمایش جهانی در حوزه اکوسیستم‌های خشکی (۱۱/۳ درصد)، تشکیل ذرات معلق (۶/۴۶ درصد) و کاهش سوخت‌های فسیلی (۴/۴ درصد) است، که در مجموع، بیش از ۹۷ درصد اثرات را تشکیل می‌دهند. همچنین، تحلیل سهم هر منبع انرژی و مواد مصرفی نشان می‌دهد که اثرات ناشی از پروپان مصرفی، معادل ۱۰۳ mPt است، در حالی‌که روغن مورد استفاده در مخزن‌های کمپرسور، ۶۴/۷ mPt از مورد استفاده، ۰/۰۷۳ mPt، و انرژی الکتریسیته با ولتاژ متوسط، ۴۴/۴ mPt دارند. بیش‌ترین تأثیر به‌ترتیب، مربوط به پروپان، از منابع گاز طبیعی تجدیدناپذیر است که نقش عمده‌ای در ایجاد اثرات محیط‌زیستی در این سیکل دارد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، باهدف ارزیابی جامع اثرات محیط‌زیستی سیکل سرمایش پروپان در تأمین سرمایش مبدل‌های حرارتی مجتمع تأسیسات و مخازن صادراتی شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، خروجی‌های سه روش متداول ارزیابی چرخه حیات (شامل IMPACT 2002+، CML baseline و ReCiPe 2016 endpoint) مورد مقایسه قرار گرفت. با وجود تفاوت‌های ذاتی در دسته‌بندی اثرات و رویکردهای نرمال‌سازی هر روش، تحلیل تطبیقی نتایج حاکی از همگرایی قابل‌توجهی در شناسایی کانون‌های بحرانی اصلی این سیکل سردسازی بود. یافته‌ها به‌وضوح نشان دادند که کاهش منابع انرژی تجدیدناپذیر (به‌ویژه سوخت‌های فسیلی)، اثرات بر سلامت انسان (ناشی از تنفس ذرات معلق و آلاینده‌های معدنی) و سهم در گرمایش جهانی (از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای)،




**شکل ۱۱ - مقادیر نرمال شده هر کدام از بخش‌های اثر مربوط به سیکل سردسازی پروپان از روش ReCiPe 2016**

مهم‌ترین پیامدهای محیطزیستی این سیکل را تشکیل می‌دهند. این نتیجه با شناسایی کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر و اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی و گرمایش جهانی در روش IMPACT 2002+ (به‌ویژه آسیب به منابع انرژی در سطح آسیب نهایی)، کاهش منابع فسیلی، گرمایش جهانی و اسیدی شدن در روش CML baseline، و نیز گرمایش جهانی (سلامت انسان و اکوسیستم‌های خشکی)، سمیت غیرسرطان‌زا برای انسان و تشکیل ذرات معلق در روش ReCiPe 2016، به طور پیوسته موردتأکید قرار گرفت. این همگرایی در شناسایی کانون‌های بحرانی، علی‌رغم رویکردهای متفاوت مدل‌سازی در هر روش، قویاً نشان می‌دهد که این موارد، نقاط کلیدی برای مداخله در راستای بهبود عملکرد محیطزیستی سیکل هستند.

علاوه بر این، بررسی دقیق خروجی هر سه روش، به یک نتیجه‌گیری حیاتی دیگر نیز منجر شد: مهم‌ترین جنبه محیطزیستی و در واقع محرک اصلی اثرات شناسایی‌شده در سیکل سردسازی، به گاز پروپان مصرفی به‌عنوان ماده تبرید بازمی‌گردد. این امر، باتوجه‌به خواص فیزیکی و شیمیایی پروپان و نقش آن در انتقال حرارت، قابل‌توجیه است؛ چرا که هرگونه نشتی یا انتشار آن به اتمسفر، به طور مستقیم به گرمایش جهانی و سایر اثرات محیطزیستی کمک می‌کند. این یافته، به‌وضوح نشان‌دهنده نیاز مبرم به بازنگری در انتخاب ماده تبرید در این مجتمع صنعتی است.

بنابراین، بر اساس یافته‌های کلی این پژوهش، مهم‌ترین اقدامات ضروری برای مقابله و کاهش اثرات محیطزیستی در سیکل سردسازی پروپان در مجتمع پالایشگاه بید بلند خلیج‌فارس، بر کنترل دقیق انتشار و در صورت امکان، جایگزینی هدفمند ماده تبرید مصرفی متمرکز است. کاهش مصرف و جایگزینی پروپان با مبردهای با پتانسیل گرمایش جهانی کمتر و اثرات محیطزیستی پایین‌تر، گامی مؤثر و ضروری برای حفاظت از اکوسیستم‌ها و منابع طبیعی، ارتقای سلامت انسان، و مقابله با تغییرات اقلیمی جهانی خواهد بود.

لذا، این پژوهش زمینه‌ساز تحقیقات تکمیلی می‌شود که باید شامل بررسی دقیق و تفصیلی مبردهای جایگزین از نظر امکان‌سنجی فنی (شامل عملکرد سیستم، سازگاری با زیرساخت‌های موجود)، پیامدهای اقتصادی (هزینه‌های اولیه و عملیاتی)، ملاحظات ایمنی (مانند اشتعال‌پذیری یا سمیت) و مشخصات دقیق محیطزیستی (از جمله ارزیابی چرخه حیات کامل مبرد جایگزین) در بستر عملیاتی پالایشگاه بید بلند باشد. این رویکرد جامع، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در راستای توسعه پایدار و افزایش تاب‌آوری محیطزیستی در صنعت پتروشیمی کمک شایانی نماید. در این زمینه، پیشنهاد می‌گردد جایگزینی پروپان با مبردهایی نظیر پروپیلن (R1270) با GWP پایین‌تر از پروپان و خواص ترمودینامیکی مشابه، به‌عنوان جایگزین مستقیم‌تر با ملاحظات ایمنی اشتعال‌پذیری، آمونیاک (R717) با GWP صفر، کارایی بالا و سابقه طولانی در کاربردهای صنعتی، با تأکید بر رعایت پروتکل‌های ایمنی مربوط به سمی بودن و اشتعال‌پذیری و دی‌اکسیدکربن (R744) با GWP=1، غیرسمی و غیر قابل‌اشتعال، اما با چالش‌های مهندسی ناشی از فشار کاری بالا،

به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای کاهش پتانسیل گرمایش جهانی و اثرات زیست‌محیطی در سیستم سردسازی پالایشگاه گاز مورد مطالعه و امکان‌سنجی قرار گیرد. انتخاب مبرد بهینه بایستی با درنظرگرفتن عواملی نظیر خواص ترمودینامیکی، ملاحظات ایمنی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، و استانداردهای مربوط به طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های سردسازی صنعتی صورت پذیرد. در مطالعه‌ای که توسط *مازیان و همکاران* انجام شد، نیز تأثیر استفاده از مخلوط‌های مبرد پروپان – NH3، پروپان– $SO_2$ و پروپان – $CO_2$ بر ضریب عملکرد یک‌چرخه تبرید در فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفت و یافته‌ها نشان داد که با استفاده از مخلوط‌های مبرد می‌توان ضریب عملکرد چرخه تبرید در فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی را افزایش داد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیریت محترم شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس بابت همکاری بی‌دریغ در فراهم‌آوردن داده‌های موردنیاز این پژوهش، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین، مراتب قدردانی خود را از سرکار خانم دکتر فریبا هدایت‌زاده به جهت همکاری ارزشمند در زمینه تجزیه‌وتحلیل داده‌ها ابراز می‌داریم.

## مراجع

[1] Mohamadi-Baghmolaei M., Hajizadeh A., Zahedizadeh P., Azin R., Zendehboudi S., Evaluation of Hybridized Performance of Amine Scrubbing Plant Based on Exergy, Energy, Environmental, and Economic Prospects: A Gas Sweetening Plant Case Study, *Energy*, **214**: 118715 (2021).

[2] Eliceche A.M., Corvalán S.M., Martínez P., Environmental Life Cycle Impact as a Tool for Process Optimisation of a Utility Plant, *Computers & chemical engineering*, **31(5-6)**: 648-656 (2007).

[3] Jolliet O., Myriam S., Pierre C., Analyse Du Cycle De Vie: Comprendre et Réaliser un Écobilan, *EPFL Press*, **23** (2010).

[4] Telenko C., Seepersad C.C., Webber M.E.A., Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines, *In International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, **43291**: 289-301(2008).

[5] Harold M.P., Ogunnaike B.A., Process Engineering in the Evolving Chemical Industry, *AIChE journal*, **46(11)**: 2123-2127 (2000).

[6] Anastas P.T., Lankey R.L., Life Cycle Assessment and Green Chemistry: The Yin and Yang of Industrial Ecology, *Green Chemistry*, **2(6)**: 289-295 (2000).

[7] Seager T.P., Theis T.L., A Uniform Definition and Quantitative Basis for Industrial Ecology, *Journal of Cleaner Production*, **10(3)**: 225-235 (2002).

[8] Gillani S.T., Belaud J.P., Sablayrolles C., Vignoles M., Le Lann J.M., Review of Life Cycle Assessment in Agro-Chemical Processes, *Chemical Product and Process Modeling*, **5(1)**: (2010).

[9] Dudley B., BP Statistical Review of World Energy 2018. Energy Economic, CENTRE for Energy Economics Research and Policy, *British Petroleum*, **5**: (2018).

[10] Namvar H., Ramezanpoor G., Aramesh A., Nasrabadi A.M., Pirzadeh M. Increase of Bandar Abbas Oil Refinery Feedstocks and Products by Performing Direct Injection of Gas Condensate to the Atmospheric Tower, *Farayandno*, **7(39)**: 15-22 (2012).

[11] Rikhtegar F., Strategies for Reforming the Pattern of Energy Consumption in the Oil Industry, *QJ Res, Educ, News Info Energy Consump Optim*, (2014).

[12] Tamazian A., Rao B.B., Do Economic, Financial and Institutional Developments Matter for Environmental Degradation? Evidence from Transitional Economies, *Energy economics*, **32(1)**: 137-145. (2010).

[13] Raimi D., Zhu Y., Newell R.G., Prest B.C., Global Energy Outlook 2024: Peaks or Plateaus, *Resources for the Future: Washington*, DC, USA, (2024).

[14] Naseri K., Noorpoor A., Razavian F., Khoshmaneshzadeh B., Life Cycle Assessment of Crude Oil Processing by Energy Management Approach, *Pollution*, **9(1)**: 183-194. (2023).

[15] Dargahi H., Bahrami Gholami M., The GHGs Emissions Determinants in Selected OECD and OPEC Countries and the Policy Implications for Iran: (Panel Data Approach), *Iranian Energy Economics*, **1(1)**: 73-99 (2011).

[۱۶] خلیلی گرکانی، امیرحسین.، بازیابی گازهای همراه نفت و فلر به منظور تولید سوخت و انرژی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۴۱(۳):** ۲۹۳-۳۰۴ (۲۰۲۲).

[۱۷] مسعودنیا، محمد.، کشوری، محمد.، حق پرست خانکهدانی، حسن.، فهندژ، مهدی.، کاهش میزان فلرینگ: مطالعه موردی یک پالایشگاه گازی، *کنفرانس مدیریت انرژی در صنایع نفت و انرژی*، ۱ تا ۹، (۱۳۹۱).

[18] Krishna I.M., Manickam V., Environmental Management: Science and Engineering for Industry, *Butterworth-Heinemann*, (2017).

[19] McIntosh A., Jennifer P., Science and the Global Environment: Case Studies for Integrating Science and the Global Environment, *Elsevier*, 2016.

[20] Ross S., Evans D., Use of Life Cycle Assessment in Environmental Management, *Environmental Management*, **29(1)**: 132-142 (2002).

[21] Hellweg S., Fischer U., Scheringer M., Hungerbühler K., Environmental Assessment of Chemicals: Methods and Application to a Case Study of Organic Solvents, *Green Chemistry*, **6(8)**: 418-427 (2004).

[22] Sikdar S.K., Journey Towards Sustainable Development: A Role for Chemical Engineers, *Environmental Progress*, **22(4)**: 227-232. (2003).

[23] Domènech X., Ayllón J.A., Peral J., Rieradevall J., How Green is a Chemical Reaction? Application of LCA to Green Chemistry, *Environmental science & technology*, **36(24)**: 5517-5520 (2002).

[۲۴] کارگری، نرگس.، مستوری، رضا.، اقدامی، افسانه.، ارزیابی چرخه حیات نیروگاه اتمی بوشهر از دیدگاه اثر برتغییر اقلیم، *ویژه نامه پژوهش‌های محیط زیست*، **۱**: ۵۵ تا ۶۲ (۱۳۹۳).

[25] Hischier R., Weidema B., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R, Hellweg S, Humbert S, Jungbluth N, Koellner T, Loerincik Y, Margni M, Nemecek T., Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, *Final report ecoinvent v2*, **2**: (2010).

[26] Bösch M.E., Hellweg S., Huijbregts M.A., Frischknecht R., Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database, *The international journal of life cycle assessment*, **12(3)**: 181-190 (2007).

[27] Bahmannia G., Life Cycle Assessment of a Natural Gas Plant: Case Study - Sarkhoon Gas Treating Plant in Iran, *In 23rd Natural Gas Conference*, Amsterdam, Netherlands, (2006).

[۲۸] رضایی راد، راضیه.، علمی، محمدرضا.، صمدی، رضا.، نژاد کورکی، فرهاد.، ارزیابی محیطزیستی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با استفاده از روش LCA، پژوهش‌های محیطزیست، **۱۰(۱۹)**: ۶۷ تا ۷۷ (۱۳۹۸).

[29] Kheiralipour K., Tashanifar E., Hemati A., Motaghed S., Golmohammadi A., Environmental impact Investigation of Natural Gas Refinery Process Based on LCA CML-IA Baseline Method, *Gas Processing Journal*, **9(2)**: 53-60 (2021).

[۳۰] مؤید کاظمی، هانیه.، جلیلی قاضی‌زاده، مهدی.، پناهی، مصطفی.، عابدی، زهرا.، غفارزاده، حمیدرضا.، بررسی اثرات محیط زیستی فرایند دفع لجن صنعتی پالایشگاه روغن با رویکرد ارزیابی چرخه حیات با استفاده از مدل ارزیابی اثرات CML-Baseline، *فصلنامه علمی-پژوهشی علوم محیطی*، **۲۰(۲)**: ۲۴۵-۲۶۰ (۱۴۰۱).

[31] Afkhami F., Ardestani M., Mehrdadi N., Environmental Impact Assessment of Asaluyeh Gas Refinery Products Based on Blue Water Footprint Measurement, *Jundishapur Journal of Health Sciences*, **14(3)**: e127834 (2022).

[32] Naseri K., Noorpoor A., Razavian F., Khoshmaneshzadeh B., Life Cycle Assessment of Crude Oil Processing by Energy Management Approach, *Pollution*, **9(1)**: 183-194 (2023).

[33] Biswas W., Rosano M., A Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Remanufactured Refrigeration and Air Conditioning Compressors, *International Journal of Sustainable Manufacturing*, **2(2-3)**: 222-236 (2011).

[34] Shi J., Li T., Zhang H., Peng S., Liu Z., Jiang Q., Energy Consummation and Environmental Emissions Assessment of a Refrigeration Compressor Based on Life Cycle Assessment Methodology, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **20(7)**: 947-956 (2015).

[35] Roda-Stuart D.J., A Life-Cycle Assessment of Canadian-produced Liquefied Natural Gas for Consumption in China, *A Report Submitted to the Department of Energy Resources Engineering of Stanford University*, (2018).

[36] Rossi M., Favi C., Germani M., Omicioli M., Comparative Life Cycle Assessment of Refrigeration Systems for Food Cooling: Eco-Design Actions Towards Machines with Natural Refrigerants, *International Journal of Sustainable Engineering*, **14(6)**: 1623-1646 (2021).

[37] Macheggiani S., Life Cycle Environmental Impact of Refrigeration in Supermarkets: A Comparative Study Under Different Operational Conditions, (2024).

[38] https://www.iso.org/standard/37456.html

[۳۹] ویژه نامه اداره توسعه محصول، فناوری و نوآوری شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج‌فارس، **۱**: ۱ تا ۸۲ (۱۴۰۲).

[۴۰] متاعی مقدم، علی.، ساعی مقدم، مجتبی.، ناصحی، پدرام.، ایزدی، ریحانه.، سنتز کاتالیست نیکل/UIO-66 برای به‌کارگیری در فرایند ODH پروپان در دمای پایین، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۴۱(۳)**: ۴۳-۵۶ (۲۰۲۲).

[41] Herrmann I.T., Moltesen A., Does it Matter Which Life Cycle Assessment (LCA) Tool You Choose?–A Comparative Assessment of Simapro and GaBi, *Journal of Cleaner Production*, **86**: 163-169 (2015).

[42] Ryding S.O., ISO 14042 Environmental Management• Life Cycle Assessment• Life Cycle Impact Assessment, *The International Journal of life cycle assessment*, **4(6)**: 307-307 (1999).

[43] Mazyan W.I., Ahmadi A., Ahmed H., Hoorfar M., Increasing the COP of a Refrigeration Cycle in Natural Gas Liquefaction Process using Refrigerant Blends of Propane-NH3, Propane-$SO_2$ and Propane-$CO_2$, *Heliyon*, **6(8)**: (2020).