



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## ارزیابی محیط‌زیستی مرحله استخراج سنگ معدن آهن گهرزمین سیرجان با استفاده از رویکرد چرخه زندگی

فائزه صادقی، سکینه شکوهیان\*، محسن حیدری

گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### اطلاعات مقاله:

### چکیده

**زمینه و هدف:** معدن گهرزمین سیرجان بیشترین ذخیره سنگ آهن را در منطقه گل‌گهر داشته و با توجه به گستردگی فعالیت و نبود مطالعه جامع در این زمینه، هدف از این مطالعه، ارزیابی چرخه زندگی (LCA) مرحله استخراج سنگ آهن از این معدن بوده است.

**روش بررسی:** هدف از LCA، ارزیابی اثرات استخراج سنگ آهن از معدن گهرزمین بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع بوده و مرز سیستم نیز فرایند حفاری و انفجار انتخاب شد و براساس مدل گهواره-تا-دروازه و رویکرد نسبت‌دادنی، تولید ۱ ton سنگ آهن به‌عنوان واحد عملکردی در نظر گرفته شد. از نرم‌افزار سیماپرو و روش ReCiPE در دو نقطه میانی و پایانی برای ارزیابی اثرات و آسیب‌ها استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که بیشترین بار محیط‌زیستی مخرب در تمامی رده‌ها مربوط به حمل‌ونقل با کامیون با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton (۵۱/۱ درصد) بوده که برای باطله‌برداری استفاده می‌شود. اثرات مخرب حمل‌ونقل بر رده اثرات تشعشعات یونیزان (اثرگذار بر سلامت انسان)، کاربری زمین و اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین (اثرگذار بر کیفیت اکوسیستم) بیش از ۹۵ درصد بوده است. آلاینده مسئول در رده اثرات ذکرشده به‌ترتیب کربن-۱۴، نابودی زمین کشاورزی و BOD<sub>5</sub> و COD رها شده در نتیجه استخراج سنگ آهن به محیط‌زیست بوده است. متوسط آسیب وارد شده از نهاده‌ها بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع به‌ترتیب برابر با ۵/۵، ۴/۶ درصد بوده است.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به اثرات منفی حمل‌ونقل، پیشنهاد می‌گردد جهت افزایش پایداری محیط‌زیستی از کامیون‌های با استانداردهای یورو ۵ و بالاتر و یا از سوخت‌های تجدیدپذیر استفاده گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

**واژگان کلیدی:** ارزیابی چرخه زندگی، سنگ معدن آهن، محیط زیست، سیرجان

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
s.shekoohiyan@modares.ac.ir

Please cite this article as: Sadeghi F, Shekoohiyan S, Heidari M. Environmental assessment of iron ore extraction stage of Sirjan Goharzamin using the life cycle approach. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;17(2):377-96.

## مقدمه

اگرچه افزایش جمعیت و سطح استانداردهای زندگی تمرکز اصلی را به سمت تلاش برای حفظ پایداری امنیت غذایی و آب سوق داده است، حفظ پایداری فلزات به عنوان یکی از مهم‌ترین ارکان‌های رشد و توسعه اجتماع نباید مورد غفلت واقع شود (۱). آهن چهارمین عنصر فراوان و در حدود ۵ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد (۲). ذخایر جهانی تخمینی این کالای معدنی حدود ۱۷۰۰۰۰ میلیون تن سنگ آهن خام است و ایران از نظر میزان ذخایر سنگ آهن، نهمین کشور دنیا و دارای ۲/۷ میلیارد تن سنگ آهن بوده که در حدود ۲ درصد از ذخایر کل جهان را در خود جای داده و این ذخایر در نقاط زیادی از کشور شناسایی شده است (۳). بر اساس سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)، کل تولید سالانه بیش از ۶۰۷ میلیون تن در سال ۲۰۰۰ بوده که به مقدار ۱۶۷۰ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ رسیده است که بدون شک تأثیرات ناشی از این فعالیت را افزایش خواهد داد (۴). برزیل، استرالیا، هند، چین، روسیه، آفریقای جنوبی، آمریکا و ایران بزرگترین و مهم‌ترین معادن سنگ آهن را دارند که نیاز ۹۰ درصد از جهان را تامین می‌کنند (۴).

منابع آهن تجدیدناپذیر بوده و زیرساخت بسیاری از صنایع دیگر بوده و بهره‌برداری بیش از حد آنها منجر به بحران جدی برای تأمین آهن در سال‌های آینده خواهد شد. مطالعات نشان داده‌اند که از نقطه نظر محیط‌زیستی، استخراج سنگ آهن، غلظت این عنصر را در بسیاری از زیست‌بوم‌های آبی افزایش داده و باعث کاهش تنوع گونه‌ای و فراوانی بی‌مهرگان و ماهیان شده است (۵). علاوه بر منابع آبی، افزایش آهن موجود در خاک می‌تواند بر درصد سبز شدن بذر و ارتفاع گیاهان اثرگذار باشد (۶). به دلیل خاصیت ماندگاری و تجمع‌پذیری زیستی آهن، ورود آن در رژیم غذایی انسان از طریق سبزیجات و غذاهای دریایی سبب افزایش اثرات سمی این عنصر می‌شود (۵، ۷). اثبات شده است که مرگ و میر ناشی از سرطان ریه در افراد شاغل در معادن زیرزمینی آهن، ۷۰ درصد بیشتر از حد معمول بوده است که می‌تواند به دلیل پرتوهای رادیواکتیو در فضای معادن یا در اثر سرطان‌زایی اکسید آهن باشد (۸). با توجه

به موارد ذکر شده می‌توان گفت که بررسی دقیق محیط‌زیستی فرایند استخراج سنگ آهن به منظور شناسایی نقطه داغ (Hot spot) محیط‌زیستی برای حذف یا کاهش مشکلات موجود ضروری به نظر می‌رسد.

به منظور آگاهی از چشم انداز محیط‌زیستی محصولات، خدمات و فرایندها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که ارزیابی محیط‌زیستی براساس رویکرد ارزیابی چرخه زندگی (Life cycle assessment (LCA)) یکی از جذاب‌ترین رویکرد مورد استفاده برای رسیدن به این هدف است (۹). یکی از مهم‌ترین نقاط قوت این رویکرد شناسایی نقاط داغ محیط‌زیستی در هر مرحله از چرخه زندگی یک محصول است که به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند به راحتی محدودیت‌های محیط‌زیستی را شناسایی کرده و راه‌حلی را برای حذف یا کاهش آنها ارائه دهند (۱۰، ۱۱). LCA با نرم‌افزارهای متفاوتی از جمله عمران در راستای محیط‌زیست و اقتصاد پایدار (environmental and economic sustainability (BEES))، یکپارچه (Building for Model for Integrated Systems (GEMI))، Global Emission، Open LCA، GABI و SimaPro با روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. یک فرایند استاندارد رسمی تحت نظارت سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO) برای LCA مصوب گردیده که از جمله آنها ISO ۱۴۰۴۰، ISO ۱۴۰۴۱، ISO ۱۴۰۴۲ و ISO ۱۴۰۴۳ است. مراحل اجرای LCA برطبق ISO ۱۴۰۴۰ عبارت است از: (۱) تعریف هدف و محدوده (Goal and scope definition)، که در این مرحله دلیل انجام مطالعه، سیستم تحت مطالعه، مرزهای سیستم و واحدهای فرایندی مشخص می‌شوند. (۲) تجزیه و تحلیل فهرست موجودی (Life cycle inventory (LCI))، که این مرحله شامل جمع‌آوری داده‌های ورودی و خروجی و آنالیز آنها است. (۳) ارزیابی اثرات چرخه زندگی (Life cycle impact assessment (LCIA)) که تعیین ارتباط میان اطلاعات و نتایج فراهم شده از مرحله قبل با دسته‌بندی‌های تأثیرات محیط‌زیستی و شاخص‌های این دسته‌بندی‌ها در جهت درک نوع و میزان تأثیر این عوامل بر

از ضایعات آهن قراضه در فرایند تولید فولاد به جای سنگ آهن، باعث کاهش مقدار پتانسیل سمیت در انسان و مصرف منابع معدنی شده است. در مطالعه LAC صورت گرفته توسط Ramezani-Mooziraji و همکاران (۱۸) بر روی تولید فولاد بیان شد که صنعت آهن و فولاد با وجود تأثیر بسزایی که بر اقتصاد جهانی دارند، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شوند و در میان اثرات محیط زیستی انرژی غیرتجدیدشونده، گرمایش جهانی و تنفس ذرات معدنی به ترتیب بیشترین اثرات را داشتند؛ به طوری که این سه دسته، تأثیر ۸۶/۵ درصد از کل اثرات محیط زیستی را شامل می‌شدند. براساس نتایج مطالعات صورت گرفته می‌توان بیان داشت که معدن کاری منجر به ناپایداری قابل توجهی در محیط زیست، اجتماع و اقتصاد گردیده، از این رو، انجام LCA و آگاهی از وضعیت موجود بسیار کمک‌کننده خواهد بود.

در استان کرمان ۲۴۲ معدن فعال در استخراج مواد معدنی ارزشمند وجود دارد که ۳۱ محل آن، به استخراج کانی‌های حاوی سنگ آهن اختصاص دارد. در معدن گهرزمین سیرجان، فرایندهای باطله‌برداری (هدف جابجایی خاک و سنگ‌های باطله)، چال‌زنی و انفجار، خرد کردن (هدف جدا شدن ذرات آهن از خاک با کمک سنگ‌شکن)، کنسانتره (تغلیظ و جداسازی ذرات آهن توسط جداکننده مغناطیسی) و گندله‌سازی (تولید گلوله‌های آهن با کمک مواد چسبنده نرم مانند بنتونیت) انجام می‌شود (۱۹، ۲۰). با توجه به اینکه بیشترین ذخیره سنگ آهن در منطقه گل‌گهر کرمان در معدن گهرزمین قرار گرفته و ظرفیت تولید ۴ و ۵ میلیون تن کنسانتره و گندله در سال را دارد و همچنین در طی این فرایند، منابع معدنی، فسیلی، انرژی الکتریسیته، مواد شیمیایی و غیره استفاده شده که انتشارات گوناگونی به اتمسفر، خاک و آب داشته و می‌تواند منجر به اثرات بهداشتی و محیط‌زیستی معکوسی بر سلامت انسان و کیفیت اکوسیستم گردد، لازم است ارزیابی اثرات صورت گیرد. از سوی دیگر، گرچه ایران در جایگاه مناسبی از لحاظ ذخایر سنگ آهن در دنیا قرار گرفته است، اما تاکنون یک پژوهش جامع که چشم‌اندازی از وضعیت محیط‌زیستی چرخه زندگی استخراج و بهره‌برداری سنگ آهن از معادن آهن در

محیط است و اطلاعات مورد نیاز برای مرحله تفسیر نتایج مطالعه را فراهم می‌کند. (۴) تفسیر نتایج (Result interpretation) که مرحله پایانی LCA است، نتایج مرحله ارزیابی داده‌ها برپایه رهیافتی نسبی بیان می‌گردد و نشانگر اثرات بالقوه محیط‌زیستی است که می‌تواند به صورت توصیه‌هایی متناسب با هدف و محدوده مطالعه برای تصمیم‌گیران به کار رود (۱۲-۱۴).

مطالعات LAC انجام شده در دنیا بر روی معادن آهن محدوده بوده و برای مثال، در مطالعه LCA استخراج سنگ آهن در برزیل، نتایج نشان داد که مصرف سوخت دیزل در تجهیزات مورد استفاده برای فعالیت‌های معدن یک نقطه داغ محیط‌زیستی جدی بوده و پیشنهاد افزایش استفاده از بیودیزل به عنوان جایگزین سوخت دیزل برای به حداقل رساندن اثرات "تغییرات اقلیم" و "مصرف سوخت‌های فسیلی" ارائه شده است (۲). در پژوهشی دیگر در رابطه با ارزیابی محیط‌زیستی استخراج سنگ آهن در استرالیا نشان داده شده است که بارگیری و حمل‌ونقل، بیشترین سهم را در کل انتشار گازهای گلخانه‌ای از استخراج و فرآوری سنگ آهن به خود اختصاص داده و با استفاده از فناوری‌های جدید و نوظهور مانند موتورهای دیزل پیشرفته‌تر برای کاربردهای بارگیری و حمل‌ونقل می‌توان انتظار داشت که انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد (۱۵). در چین نیز یک مدل چرخه زندگی برای استخراج و فرآوری سنگ‌های آهن به منظور تخمین نشر گازهای گلخانه‌ای توسعه یافت. نتایج پژوهش همچنین نشان داد که عیار سنگ آهن پارامتر کلیدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده و با کاهش عیار سنگ آهن، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تشدید می‌گردد (۱۶). در ایران نیز نتایج مطالعه LCA تولید فولاد از آهن قراضه انجام شده توسط Khoshyomn و همکاران (۱۷) نشان داد که از بین گروه‌های تأثیر، سمیت برای اکوسیستم زمینی با مقدار  $1,4DCB-eq$   $1439$  kg و گرمایش جهانی با مقدار  $CO_2-eq$   $5289$  kg به ازای هر تن فولاد به ترتیب بزرگترین تأثیرات محیط زیستی این فرایند بودند. مهم‌ترین زیربخش تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای مربوط به مصرف الکتریسیته با مقدار  $CO_2-eq$   $2900$  kg به ازای هر تن فولاد بود. استفاده

## مواد و روش‌ها

– نوع مطالعه و منطقه مطالعاتی

این مطالعه از نوع توصیفی- تحلیلی بوده که در سال ۱۴۰۲ بر روی سنگ آهن معدن گهرزمین سیرجان انجام شده است. این معدن در کیلومتر ۶۰ جاده سیرجان- شیراز قرار دارد؛ دارای ظرفیت تولید ۴ میلیون تن کنسانتره و ۵ میلیون تن گندله در سال است. کانسار سنگ آهن گل‌گهر در ۶ آنومالی مجزا در مجموع با ذخیره‌ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن در محدوده‌ای به طول تقریبی ۱۰ km و عرض تقریبی ۴ km قرار گرفته است که آنومالی شماره ۳ به عنوان بزرگترین آنومالی با ذخیره‌ای بالغ بر ۶۴۰ میلیون تن به شرکت سنگ آهن گهرزمین واگذار گردیده است که در شکل ۱، تصویری از معدن گهرزمین برگرفته از وبسایت این شرکت ارائه شده است (۲۰).

ایران را نشان دهد، وجود ندارد. براساس نتایج سایر مطالعات در بخش‌های دیگر جهان، این صنعت به شدت آلوده بوده و ایران برای پیشرفت خود ناچار به توسعه معادن است و فعالیت‌های معدن‌کاوی زمینه تشدید آلودگی خاک به فلزات را افزایش داده و موجب گسترش بیابان‌زایی در استان کرمان شده است. در همین راستا، معدن آهن گهرزمین در شهر سیرجان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب و اثرات این فعالیت بر آلودگی خاک، کیفیت اکوسیستم و سلامت عموم توسط LCA مورد بررسی قرار گرفت. امید است که نتایج بدست‌آمده مورد استفاده تصمیم‌گیران و مدیران قرار گیرد. هدف از مطالعه، LCA فرایند استخراج سنگ آهن معدن گهرزمین سیرجان به روش ReCiPE در دو نقطه میانی و پایانی و همچنین آگاه کردن سیاست‌گذاران از تأثیرات محیط‌زیستی این فرایند بوده است و همچنین نهاده‌های ورودی (Input Variables) با بیشترین اثر مخرب و آلاینده مسئول در هر رده اثر نیز تعیین شده است.



شکل ۱- تصویری از معدن گهرزمین سیرجان (۲۰)

LCA، از مدل گهواره-تا-دروازه (Cardle-to-gate) و از رویکرد نسبت‌دادنی استفاده شد و از مجموعه عملیات صورت گرفته بر روی معدن، فرایند استخراج سنگ آهن (حفاری و انفجار) مدنظر بوده است.

– مرز سیستم و واحد عملکردی

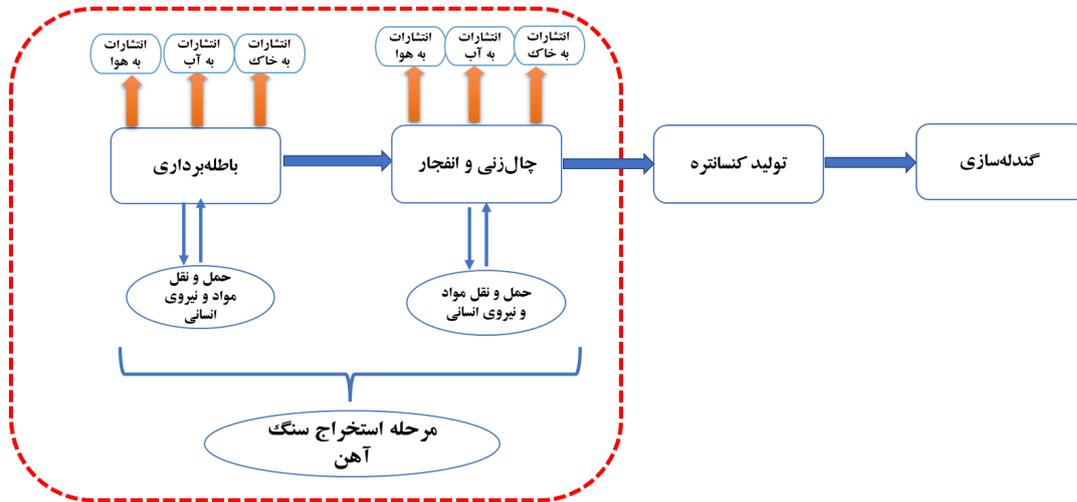
شکل ۲ فرایند کلی مورد استفاده در معدن گهرزمین سیرجان را نشان می‌دهد که مرز سیستم (فرایند استخراج) با خط چین

– هدف مطالعه و محدوده مطالعه LCA

هدف از این مطالعه LCA، ارزیابی اثرات محیط‌زیستی استخراج سنگ آهن از معدن گهرزمین سیرجان و همچنین آگاه کردن سیاست‌گذاران از تأثیرات بهداشتی و محیط‌زیستی این فرایند بوده است. این نتایج می‌تواند برای بررسی ملاحظات در هنگام اجرای طرح‌های توسعه و انجام اقدامات جهت رسیدن به پایداری در آینده مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه

قرمز نشان داده شده است. با توجه به اینکه همه ورودی‌ها و خروجی‌ها در فرایند معدن کاری قابل ردیابی نیستند، با مشخص کردن مرز سیستم، امکان برآورد دقیق‌تر اثرات ناشی از فرایند یا واحد موردنظر وجود دارد. واحد عملکردی

Functional unit (FU) منظور مقدار محصولی است که به ازای آن مواد مصرفی و انتشارات برآورد می‌گردد. برای این مطالعه، تولید ۱ ton آهن با خلوص ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- شماتیک کلی فرایند و مرز سیستم (خط چین قرمز) استخراج سنگ آهن گهرزمین

شیمیایی، الکتریسته، آب، تولید زائدات و انتشارات بوده که از کارشناسان حاضر در این واحدها اطلاعات جمع‌آوری شد. برحسب نوع فرایندها، مراحل پردازش سنگ آهن بررسی شد و مواد و انرژی‌های مصرفی آن مانند مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایندها، انرژی مورد نیاز تجهیزات مورد استفاده یا موارد دیگر بررسی شد. آماده‌سازی سطح پیت معدن برای انجام عملیات حفاری، انفجار، بارگیری و باربری معمولاً بوسیله بولدوزر، گریدر یا لودر صورت می‌پذیرد. با توجه به اینکه کتابخانه‌های مربوط به گریدر و بولدوزر در کتابخانه موجود نبودند، سوخت مصرفی این تجهیزات به همراه خروجی آگزوز دستگاه‌ها از مقالات استخراج و به عنوان نهاده‌ی ورودی در نظر گرفته شد (۲۲-۲۴). برای عملیات انفجار از ماده منفجره آنفو استفاده می‌شود که برای ۱ ton سنگ آهن از ترکیب ۳۳۶ g

تجزیه و تحلیل فهرست موجودی  
منظور از فهرست موجودی تمام مواد مصرفی و انتشارات تولیدی در یک فرایند تولید محصول بوده که از طریق سنجش و در صورت عدم دسترسی به داده‌ها، از مطالعات مشابه استخراج می‌شود. در این مطالعه برای آنالیز مرحله استخراج سنگ آهن از داده‌های پس‌زمینه و پیش‌زمینه استفاده شده است. داده‌های پس‌زمینه به‌عنوان داده‌هایی که از پایگاه داده اکواینونت (Ecoinvent) که نتیجه تلاش مشترک موسسات مختلف سوئسی برای به‌روزرسانی و ادغام چندین پایگاه داده موجودی چرخه عمر بوده که در صورت فقدان داده‌های مورد نیاز، در این مطالعه استفاده شده‌اند (۲۱). داده‌های پیش‌زمینه به‌عنوان داده‌هایی که از محل مورد مطالعه با مصاحبه، پرسشنامه و مشاهده به دست آمده‌اند. این داده‌ها مربوط به مصرف مواد

جهت روشنایی به ازای هر تن محصول برآورد شد. سنگ‌های استخراجی توسط کامیون با ظرفیت بیشتر از ۲۰ ton به منظور خردایش بیشتر به سنگ‌شکن و کارخانه فرآوری منتقل شده و باطله در محل‌های از پیش تعیین‌شده تخلیه می‌گردند. در جدول ۱، فهرست موجودی به ازای استخراج هر ۱ ton سنگ آهن و کتابخانه‌های مورد استفاده از نرم‌افزار سیماپرو (SimaPro) ارائه شده است.

آمونیم نیترات و ۱۴ g مشتقات نفت سنگین استفاده می‌شود. جهت حمل‌ونقل مواد لازم جهت انفجار، از کامیون با ظرفیت کمتر از ۱۰ ton استفاده و برای بارگیری سنگ آهن و باطله استخراج شده در معدن از شاول (Shovel) یا بیل مکانیکی یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شود. با توجه به اینکه شاول‌ها و دریل‌های مورد استفاده از الکتریسیته استفاده می‌کنند، الکتریسیته مصرفی این تجهیزات به همراه الکتریسیته مصرفی

جدول ۱- فهرست موجودی و کتابخانه سیماپرو مورد استفاده در معدن گهرزمین به ازای استخراج ۱ ton سنگ آهن

مواد مصرفی			
نام ماده	مقدار	واحد	کتابخانه مورد استفاده در سیماپرو
نیترات آمونیم	۳۳۶	g	Ammonium nitrate  market for ammonium nitrate   Cut-off, U
هیدروکربن سنگین	۱۴	g	Heavy fuel oil  market for heavy fuel oil   Cut-off, U
الکتریسیته	۰/۰۰۱۰۶۶	MWh	Electricity, high voltage  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U
دیزل مصرفی	۰/۰۶۶۲	kg	Diesel  market group for diesel   Cut-off, U
حمل‌ونقل با کامیون <10t	۰/۰۰۱۷۱	tkm	Transport, truck <10t, EURO4, 80%LF, default Economic, U
حمل‌ونقل با کامیون >20t	۲۲/۱۸۴	tkm	Transport, truck >20t, EURO4, 80%LF, default Economic, U
بیل مکانیکی	۰/۰۰۴۴	h	Delimiting/sorting, excavator-based processor  market for delimiting/sorting, excavator-based processor   Cut-off, U
لودر	۰/۰۴۶۶	L	Excavation, skid-steer loader  market for excavation, skid-steer loader   Cut-off, U
انتشارات خروجی به اکوسیستم			
هیدروکربن‌ها	$۴/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	kg	Hydrocarbons, unspecified
مونوکسید کربن	۰/۰۲۴۱	kg	Carbon monoxide
دی‌اکسید کربن	۱/۸۶۵	kg	Carbon dioxide
دی‌اکسید نیتروژن	۰/۰۱۱۷	kg	Nitrogen dioxide
ذرات ریز	$۲/۰۷ \times ۱۰^{-۶}$	kg	Particulates

عبارتند از: ۱) رده اثر پتانسیل گرمایش جهانی (Global warming potential (GWP)) برای تغییرات اقلیم استفاده شده و برحسب  $\text{kg CO}_2\text{-eq}$  بیان می‌شود. ۲) رده اثر اسیدی شدن (Terrestrial acidification potential (TAP)) کاهش pH به علت اثر اسیدی حاصل از انتشارات آنتروپوژنیک که با واحد  $\text{kg SO}_2\text{-eq}$  بیان می‌شود. ۳) رده اثر پتانسیل

نرم‌افزار و ارزیابی اثرات چرخه زندگی - LCA با نرم‌افزار سیماپرو نسخه ۹/۵/۰/۲ و به روش ReCiPE (Mid-point) با بررسی ۱۸ رده اثر از نقطه نظر میانی (End-point) شامل سلامت انسان و ۳ رده اثر پایانی (Human health)، کیفیت اکوسیستم (Ecosystem quality) و تقلیل منابع (Resource depletion) انجام شده است. رده اثرات در روش ReCiPE در نقطه میانی

آب ((Water consumption potential (WCP)) که برحسب  $m^3$  آب مصرف شده بیان می‌شود. (۱۶) پتانسیل کاربری زمین ((Land use potential (LUP)) به از دست رفتن گونه‌های نسبی ناشی از یک نوع کاربری خاص اشاره داشته و برحسب مترمربع زمین زراعی ( $m^2a$  crop) بررسی می‌شود. (۱۷) کمبود منابع معدنی ((Mineral scarcity resource potential (MSRP)) به کمبود منابع معدنی تحت عنوان پتانسیل سنگ معدن مازاد اشاره دارد و برحسب  $kg$  Cu-eq بیان می‌شود. (۱۸) کمبود منابع فسیلی ((Fossil scarcity resource potential (FSRP)) به مصرف منابع فسیلی اشاره دارد و برحسب  $kg$  Oil-eq محاسبه می‌شود (۲۵).

#### تفسیر نتایج

در این مرحله اثرات استخراج سنگ آهن در نقطه پایانی بر سه بعد سلامت انسان، محیط‌زیست و منابع به صورت کمی برآورد شده است و دو مرحله نرمال‌سازی و وزن‌دهی نیز به منظور مقایسه بهتر نتایج استفاده شده و همچنین نقطه داغ فرایند مشخص گردیده است.

#### یافته‌ها

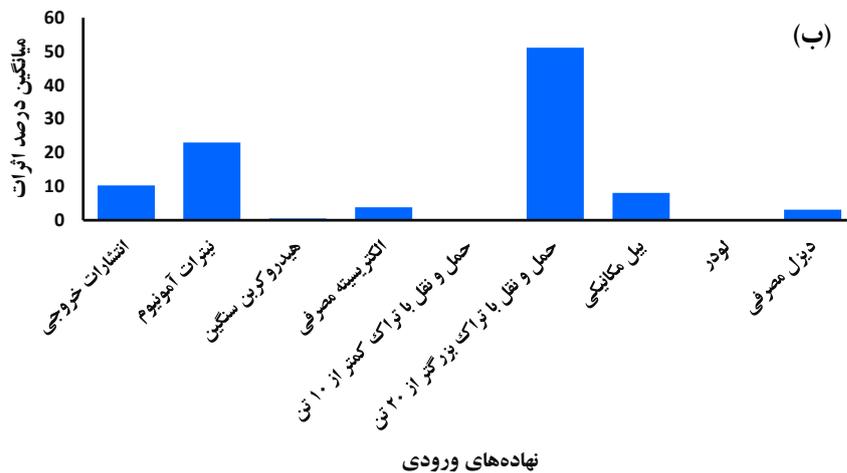
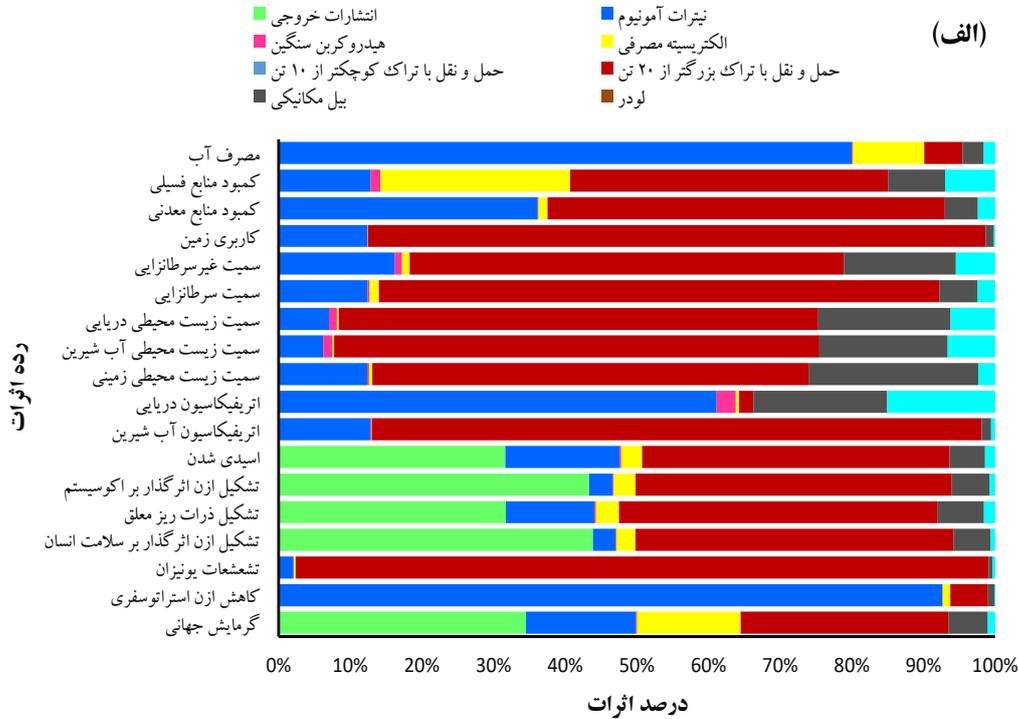
نتایج حاصل از رده اثرات ناشی از استخراج سنگ آهن از نقطه نظر میانی

اثرات محیط زیستی ایجاد شده ناشی از استخراج ۱ ton سنگ آهن از معدن گهرزمین از نقطه نظر میانی در نمودار ۱-الف نشان داده شده است. برطبق بخش (الف) نمودار ۱، بیشترین بار محیط زیستی مخرب در تمامی رده اثرات مربوط به حمل‌ونقل با کامیون با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton است که برای باطله‌برداری استفاده می‌شود. اثرات مخرب حمل‌ونقل بر رده اثرات محیط زیستی تشعشعات یونیزان، کاربری زمین و اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین بیش از ۹۵ درصد بوده است. در حالیکه در رده اثرات سمیت محیط زیستی زمینی، آب شیرین، دریایی، سمیت سرطانزایی و غیرسرطانزایی، اثرات مخرب حمل‌ونقل بیش از ۹۰ درصد بوده است. در نمودار ۱-ب نیز میانگین اثرات مخرب هر یک از نهاده‌های ورودی

تخریب لایه ازن استراتوسفری ((Stratospheric ozone depletion potential (SODP)) و برحسب  $kg$  CFC11-eq بیان می‌شود. (۴) پتانسیل تشعشعات یونیزان ((Ionizing radiation potential (IRP))، دوز جمعی حاصل از یک رادیونوکلوئید به هوا بوده و برحسب  $kBq$ -Co-60-eq بیان می‌شود. (۵) پتانسیل تشکیل ذرات ریز ((Fine particulate matter formation potential (FPMFP))، تشکیل ذرات ریز و مصرف توسط جمعیت انسانی را برحسب  $kg$   $PM_{2.5}$ -eq معادل بیان می‌کند. (۶) پتانسیل تشکیل ازن فتوشیمیایی و تاثیر بر اکوسیستم زمینی ((potential- terrestrial ecosystem (OFP- TE)) و (۷) اثر بر انسان ((Ozone formation potential- human health (OFP-HH)) برحسب  $kg$  NOx-eq بیان می‌شود. (۸) پتانسیل اوتریفیکاسیون آب شیرین ((Freshwater eutrophication potential (FEuP)) سرنوشت فسفر در اوتریفیکاسیون آب شیرین برحسب  $kg$  P-eq (۹) و پتانسیل اوتریفیکاسیون دریایی ((Marine eutrophication potential (MEuP)) که سرنوشت نیتروژن در اوتریفیکاسیون آب دریا را برحسب  $kg$  N-eq بیان می‌کند. پتانسیل سمیت ((Human toxicity potential (HTP)) که سمیت بر روی انسان و اکوسیستم بررسی می‌شود و سمیت انسانی در دو شاخه (۱۰) سرطانزایی ((Human carcinogen toxicity potential (HCTP)) و (۱۱) غیرسرطانزایی ((Human non-carcinogen toxicity potential (HnCTP)) و سمیت اکوسیستم از جمله (۱۲) سمیت محیط زیستی آب شیرین ((Freshwater ecotoxicity potential (FEP))، (۱۳) سمیت محیط زیستی دریایی ((Marine ecotoxicity potential (MEP)) و (۱۴) سمیت محیط زیستی زمینی ((Terrestrial ecotoxicity potential (TEP)) برحسب  $kg$  1,4DCB-eq محاسبه می‌شود. (۱۵) پتانسیل مصرف

بعدی به ترتیب نیترات آمونیوم، سنگ آهن، بیل مکانیکی و الکتربسته مصرفی با مقادیر ۲۳/۱، ۱۰/۳، ۸/۱ و ۳/۸ درصد قرار گرفته‌اند.

نشان داده شده است. برطبق نمودار، حمل‌ونقل با کامیون با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton دارای بیشترین اثر مخرب و به طور متوسط ۵۱/۱ درصد را به خود اختصاص داده است. در رده‌های



نمودار ۱- اثرات محیط زیستی ناشی از نهاده‌های ورودی مورد استفاده در مرحله استخراج سنگ آهن از نقطه نظر میانی (الف)، میانگین درصد اثرات (ب)

در جدول ۲، مقادیر رده اثرات مختلف ناشی از استخراج ۱ ton سنگ آهن از معدن گهرزمین سیرجان در نقطه میانی ارائه شده است. برطبق جدول ۲، کل مقدار پتانسیل گرمایش جهانی فرایند استخراج ۱ ton سنگ آهن برابر با  $5/40 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  بوده که انتشارات خروجی از لودر و وسایل حمل و نقل مورد استفاده بیشترین سهم را داشته و برابر با  $1/865 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  بوده و در رتبه بعدی حمل و نقل با کامیون با ظرفیت بیشتر از ۲۰ ton با مقدار  $20 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  قرار گرفته است. کاهش ازن استراتوسفری نیز یکی دیگر از رده اثرات مورد بررسی در روش ReCiPE بوده که در طی فرایند استخراج سنگ آهن معادل  $1/3 \times 10^{-5} \text{ kg CFC11-eq}$  کاهش داشته که بیشترین مقدار آن ناشی از نیترات آمونیوم مصرف شده در طی فرایند انفجار است. در رده اثر تشعشعات یونیزان نیز کل میزان منتشر شده معادل  $\text{kBq Co-60-eq}$  آزاد شده است. ازن فوتوشیمیایی تولید شده نیز رده اثر مخرب دیگری بوده که در طی این فرایند اتفاق افتاده و بر سلامت انسان و اکوسیستم اثر منفی گذاشته است. کل ازن منتشر شده موثر بر سلامت انسان  $0/266 \text{ kg-NOx-eq}$  بوده که بیشترین مقدار از انتشارات خروجی و حمل و نقل با کامیون بزرگتر از ۲۰ ton رخ داده است. ازن اثرگذار بر اکوسیستم نیز معادل  $0/27 \text{ kg-NOx-eq}$  بوده که مشابه ازن موثر بر سلامت انسان، سهم انتشارات خروجی و حمل و نقل بیشتر بوده است. تشکیل ذرات ریز معلق نیز در فرایند استخراج ۱ ton سنگ آهن معادل  $0/041 \text{ kg PM}_{2.5}\text{-eq}$  بوده که طبیعی است بیشترین مقدار ناشی از انتشارات خروجی و حمل و نقل رخ داده باشد. اسیدی شدن زمین نیز یکی دیگر از پیامدهای استخراج معادن بوده که در این فرایند  $0/133 \text{ kg SO}_2\text{-eq}$  بوده که سهم حمل و نقل با کامیون بزرگتر از ۲۰ ton

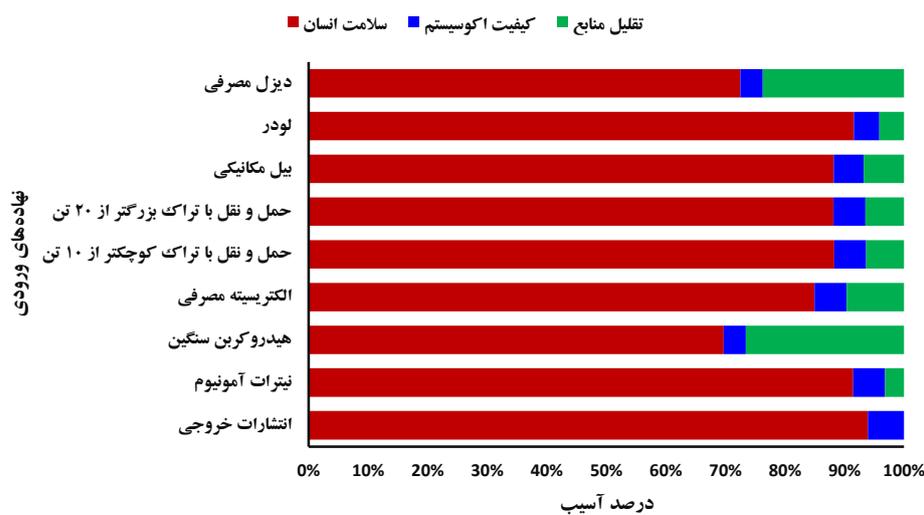
فرایند استخراج سنگ آهن معادل  $0/057 \text{ kg SO}_2\text{-eq}$  بوده است. اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین و شور نیز دو رده اثر دیگر مورد بررسی در روش ReCiPE بوده که در این فرایند به ترتیب  $7/2 \times 10^{-5} \text{ kg P-eq}$  و  $3/3 \times 10^{-5} \text{ kg N-eq}$  با کامیون بیشتر از ۲۰ ton و نیترات آمونیوم مصرفی در این دو رده اثر بیشتر بوده است. سمیت محیط زیستی بر روی اکوسیستم آب شیرین، شور و زمین اثرگذار بوده و سهم این فرایند به ترتیب برابر با  $0/058$ ،  $0/022 \text{ kg 1,4DCD-eq}$  و  $4/47$  بوده که بدلیل انتشارات خروجی سهم سمیت محیط خاکی از آبی بیشتر بوده و در هر سه رده اثر حمل و نقل با کامیون بزرگتر از ۲۰ ton بیشترین اثر مخرب را داشته است. سمیت برانسان به دو صورت سرطانزایی و غیرسرطانزایی بوده که سهم سمیت غیرسرطانزایی بیشتر از سرطانزایی بوده و به ترتیب  $0/137 \text{ kg 1,4DCB-eq}$  و  $0/032$  بوده است که باز هم گزینه مسئول حمل و نقل با کامیون بیش از ۲۰ ton بوده است. استخراج سنگ آهن سبب از بین رفتن زمین کشاورزی شده که در طی این فرایند معادل  $0/244 \text{ m}^2\text{a crop}$  از بین خواهد رفت که سهم حمل و نقل با کامیون بزرگتر از ۲۰ ton برابر با  $0/211 \text{ m}^2\text{a crop}$  بوده است. تقلیل منابع نیز از رده اثرات دیگر مورد بررسی بوده که در دو بعد منابع معدنی و سوخت فسیلی بررسی می‌شود. در این فرایند به ازای ۱ ton سنگ آهن استخراج شده میزان تقلیل منابع معدنی معادل  $0/007 \text{ kg Cu-eq}$  و منابع فسیلی  $1/13 \text{ kg Oil-eq}$  بوده است که مطابق رده اثرات گذشته سهم حمل و نقل با کامیون بیش از ۲۰ ton بیشتر بوده است. آب مصرف شده نیز در طی فرایند نیز از دیگر اثرات مخرب استخراج بوده که برابر با  $0/098 \text{ m}^3$  بوده که بیشترین اثر مخرب را نیترات آمونیوم مصرفی و در ادامه حمل و نقل داشته است.



آب شیرین بر کیفیت این ماتریکس اثر منفی گذاشته که جزو رده آسیب به کیفیت اکوسیستم هستند. علاوه بر این، وضعیت اکوسیستم حاکی به عنوان زیرمجموعه کیفیت اکوسیستم وابسته به رده اثراتی مانند گرمایش جهانی، مصرف آب، تشکیل ازن، سمیت محیط زیستی زمینی، اسیدی شدن و کاربری زمین بوده است. وضعیت اکوسیستم دریایی وابسته به اوتریفیکاسیون آب شور و سمیت محیط زیستی آب دریا بوده است. رده آسیب تقلیل منابع هم وابسته به دو رده اثر کاهش منابع فسیلی و معدنی بوده است (۲۵). نمودار ۲، تاثیر نهاده‌های ورودی بر این رده آسیب را نشان داده است. همانطور که در نمودار نشان داده شده است، بیشترین آسیب وارد شده ناشی از تمامی نهاده‌های ورودی بر روی سلامت انسان بوده است. اگر متوسط درصد آسیب وارد شده از نهاده‌های مصرفی را بر سه رده مذکور محاسبه کنیم مشخص می‌گردد که ۸/۸۹، ۵/۵ و ۶/۴ درصد از خسارات به ترتیب بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع بوده است. در جدول ۳ نیز مقادیر وزن‌دهی شده ناشی از هر یک از نهاده‌های ورودی بر روی این سه رده خسارت برحسب mPt ارائه شده است. براساس جدول ۳، مقدار خسارت وزن‌دهی شده بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع به ترتیب برابر با ۸/۹۵، ۵/۹ و ۴/۹ بوده است که نشان از بالاتر بودن خسارت وارد شده به سلامت انسان نسبت به دو رده دیگر است.

نتایج حاصل از رده آسیب ناشی از استخراج سنگ آهن از نقطه نظر پایانی

بررسی اثرات آسیب استخراج سنگ آهن نیز از نقطه نظر پایانی در روش ReCiPE مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در نمودار ۲ نشان داده شده است. در نقطه نظر میانی ۱۸ رده اثر مورد بررسی قرار گرفت، در حالیکه در نقطه پایانی ۳ رده آسیب سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به وجود رابطه علت و معلولی بین نقاط میانی و پایانی در روش ReCiPE، رده اثرات تشکیل ذرات ریز و تشکیل ازن اثرگذار بر سلامت انسان با افزایش بیماری‌های تنفسی سبب ایجاد اثرات معکوس بر سلامتی می‌گردد. رده اثرات تشعشعات یونیزان، کاهش ازن استراتوسفری و سمیت سرطانزایی نیز از طریق ایجاد سرطان سبب اثر معکوس بر سلامتی انسان شده، به غیر از بیماری‌های سرطانی، سایر بیماری‌های غیرواگیر نیز متأثر از رده اثراتی مانند تشعشعات یونیزان، سمیت سرطانزایی و غیرسرطانزایی و کاهش ازن استراتوسفری بوده که باز هم در نهایت منجر به نتایج منفی بر سلامت انسان می‌شوند. گرمایش جهانی و مصرف آب نیز از طریق سوء تغذیه، صدماتی را به سلامت انسان وارد می‌نمایند. علاوه بر رده آسیب سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم نیز متأثر از سایر رده اثرات است. برای مثال، رده اثراتی مانند گرمایش جهانی، مصرف آب، سمیت محیط زیستی و اوتریفیکاسیون



نمودار ۲- اثرات محیط زیستی ناشی از نهاده‌های ورودی مورد استفاده در مرحله استخراج سنگ آهن از نقطه نظر پایانی

جدول ۳- مقادیر وزن‌دهی شده ناشی از نهاده‌های ورودی بر رده آسیب‌های مورد بررسی

نهاده‌های ورودی											رده آسیب
دیزل	لودر	بیل مکانیکی	حمل و نقل با کامیون >20t	حمل و نقل با کامیون <10t	الکتریسیته مصرفی	هیدروکربن سنگین	نترات آمونیوم	انتشارات خروجی	مقدار کل	واحد	
											۱/۱۵
۰/۰۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۳۲	۲/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۶۴	۰/۰۱	۰/۸۲	۲/۱	۵/۹	mPt	کیفیت اکوسیستم
۰/۳۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۳	۲/۴۱	۰/۰۰۰۱	۱/۱۵	۰/۰۷	۰/۴۸	۰/۰۰۱	۴/۹	mPt	تقلیل منابع

### بحث

بررسی رده اثرات ناشی از استخراج سنگ آهن از نقطه نظر میانی

در این مطالعه مرحله استخراج سنگ آهن از معدن گهرزمین سیرجان با استفاده از رویکرد چرخه زندگی مورد بررسی قرار گرفت. از روش ReCiPE در دو نقطه میانی و پایانی برای ارزیابی رده اثرات و آسیب بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع استفاده شد. نتایج ۱۸ رده اثر در نقطه میانی نشان داد که در مرحله استخراج سنگ آهن، پس از استفاده از مواد منفجره و خروج سنگ آهن، این مواد بایستی جهت پردازش بیشتر و تولید کنسانتره و گندله، حمل گردند. برای حمل این مواد از کامیون‌های با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تعداد کامیون‌های ۲۰ ton بیشتر از ۱۰ ton بوده است، بیشترین اثرات معکوس و مخرب محیط زیستی در تمامی رده اثرات به جز رده اثر کاهش ازن استراتوسفری، مصرف آب و اوتریفیکاسیون دریایی، مربوط به حمل و نقل با این نوع کامیون‌ها است. با توجه به اینکه حمل و نقل بیش از ۹۰ درصد از سهم مخربی را در رده اثرات تشعشعات یونیزان، کاربری زمین، اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین و شور، سمیت محیط زیستی (آب شیرین، دریایی و زمینی) و سمیت سرطانزایی و غیرسرطانزایی داشته

است و در سایر رده اثرات نیز بر سایر نهاده‌های ورودی غالب بوده است، بنابراین، حمل و نقل با کامیون با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton به عنوان نهاده ورودی با اثرات منفی محیط زیستی و انسانی انتخاب شد. در مطالعه Haque و همکار (۱۵) بر روی استخراج و فرآوری سنگ آهن در استرالیا، نتایج نشان داد که بارگذاری و حمل و نقل بیشترین سهم (۵۰ درصد) را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته که ضرورت تلاش بیشتر برای کاهش ردپای ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای با پیشرفت در فناوری موتورهای دیزلی را ایجاب می‌کند. در مطالعه دیگری بر روی معدن مس در لائوس نیز بیان شد که حمل و نقل صورت گرفته پس از عملیات انفجار دارای بیشترین بار محیط زیستی بوده که دلیل آن انتشارات خروجی از این کامیون‌ها در طی فعالیت بوده است. آسیب کردن سنگ استخراجی و الکتریسیته مصرفی در رده‌های بعدی قرار گرفته است (۲۶).

یکی از راه‌های دستیابی به عامل مخرب در هر رده اثر، تجزیه و تحلیل فهرست موجودی (Inventory analysis) است. هدف از تجزیه و تحلیل فهرست موجودی، شناسایی عناصر کلیدی است که عمدتاً مسئول آن دسته تأثیر برای بالاترین میزان انتشار هستند (۲۷). برطبق فهرست موجودی، با بررسی دقیق‌تر، نشان داده شد که علت مخرب بودن استخراج سنگ آهن از لحاظ رده اثر تشعشعات یونیزان به آزادسازی

پتانسیل گرمایش جهانی در این مطالعه برابر با  $5/40 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  به ازای استخراج هر ۱ ton سنگ آهن بوده است، در حالیکه در مقایسه با متون این مقدار پایین تر است. در مطالعه Norgate و همکار (۲۹) و Ferreira و همکاران (۲)، مقادیر گرمایش جهانی به ترتیب برابر با  $13/32 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  و  $11/9$  به ازای هر ۱ ton سنگ آهن بوده است. پژوهشی در استرالیا در رابطه با ارزیابی محیط زیستی استخراج سنگ آهن نشان داده است که بارگیری و حمل و نقل، بیشترین سهم را در کل انتشار گازهای گلخانه‌ای از استخراج و فرآوری سنگ آهن به خود اختصاص داده‌اند. پتانسیل گرمایش جهانی در این مطالعه  $11/9 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  بوده که سهم حمل و نقل در حدود نیمی از آن و برابر با  $6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  بوده است. آنها برآورد کردند که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از فعالیت‌های استخراج و پردازش سنگ آهن در استرالیا در حدود  $5/8$  میلیون تن در سال بوده است (۱۵). این پژوهش گزارش کرد که به منظور پایداری بیشتر در استخراج سنگ آهن از معادن استرالیا، تلاش برای کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای ناشی از بارگیری و حمل سنگ آهن ضروری است. پژوهشگران این مطالعه ذکر کردند که استفاده از فناوری‌های نوظهور مانند موتورهای دیزل پیشرفته‌تر برای بارگیری و حمل و نقل در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کننده بوده است (۱۵). در مطالعه Ferreira و همکاران (۲)، حمل و نقل با استفاده از موتورهای دیزلی سبب تشدید رده اثرات کاهش منابع غیرزنده (مصرف سوخت فسیلی و معدنی) و گرمایش جهانی گردید و برای کاهش شدت اثرات استفاده از تسه نقلیه با انرژی الکتریسیته پیشنهاد شد.

در رده اثرات کاهش ازن استراتوسفری و مصرف آب، نیترات آمونیوم مصرفی به عنوان ماده منفجره دارای بیشترین اثرات منفی محیط زیستی بوده است. تجزیه و تحلیل فهرست موجودی نشان داد که در رده اثر کاهش ازن استراتوسفری، عامل اصلی مخرب، انتشار دی‌نیتروژن مونوکسید ناشی از نیترات آمونیوم به هوا بوده که سهمی در حدود  $91/9$  درصد را به خود اختصاص داده است. Oever van den و همکاران (۳۰) بررسی کردند که فعالیت‌های انسانی و صنعتی، غلظت موادی همچون اکسیدهای نیتروژن و هالون‌ها را به میزان

کربن-۱۴ و رادون-۲۲۲ برمی‌گردد که حمل و نقل بیشترین سهم را دارد. در رده اثر کاربری زمین نیز حمل و نقل بیشترین تاثیر را در از بین رفتن زمین کشاورزی و جنگل داشته است. علت اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین نیز COD و  $BOD_5$  رها شده در نتیجه استخراج سنگ آهن به محیط زیست بوده که برطبق نمودار ۱-الف سهم حمل و نقل دارای بیشترین مقدار بوده است. تجزیه و تحلیل فهرست موجودی نشان داد که علت سمیت محیط زیستی آب شیرین و دریا، عنصر روی وارد شده به منابع آب در طی حمل و نقل و استخراج بوده، در حالیکه علت سمیت محیط زیستی خاک، مس ( $72/3$  درصد)، آنتیموان ( $6/9$  درصد) و وانادیوم ( $6/7$  درصد) در طی این فرایند بوده است. مطالعه Ferreira و همکاران (۲) نشان داد که سهم اصلی پتانسیل سمیت محیط زیستی، انتشار فلزاتی مانند کروم، نیکل، روی و مس بوده است. فهرست موجودی نشان داد که عامل سمیت سرطانزایی در انسان در طی فرایند استخراج سنگ آهن به ترتیب کروم ۶ ظرفیتی ( $67$  درصد) و نیکل ( $15/9$  درصد) بوده است. در سمیت غیرسرطانزایی نیز عامل مخرب به ترتیب روی وارد شده به منابع آبی ( $61/7$  درصد)، سرب آزاد شده به هوا ( $8/3$  درصد)، آرسنیک رها شده به آب ( $6/6$  درصد) و روی وارد شده به خاک ( $5/8$  درصد) بوده است. تجزیه و تحلیل فهرست موجودی در مطالعه Farjana و همکاران (۲۱) نشان داد که عنصر روی مسؤل سمیت غیرسرطانزایی انسانی و سمیت محیط زیستی آب شیرین بوده، در حالیکه دی‌اکسید کربن مسؤل تأثیر گرمایش جهانی، اکسیدهای نیتروژن مسؤل تشکیل ازن فتوشیمیایی، اسیدی شدن، اوتریفیکاسیون آب شیرین و اوتریفیکاسیون دریایی بودند. سایر عناصر مسؤل اثرات محیط زیستی از دسته‌های مختلف عبارتند از کروم ۶ ظرفیتی، ذرات، هالون  $1301$ ، رادون  $222$ ، فسفات و منگنز که از بین تمام آلاینده‌های مسؤل، سهم دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و روی بیشتر بوده است. نتایج مقایسه‌ای با سایر مطالعات از لحاظ آلاینده‌های مسؤل در رده اثرات نشان داد که در فرایند استخراج سنگ آهن، تقریباً آلاینده‌های مخرب مشابه بوده و فقط درصد سهم آنها با یکدیگر متفاوت بوده که به ترکیب و ساختار شیمیایی خاک مناطق مختلف برمی‌گردد (۲۸).

زیادی در اتمسفر افزایش داده است که این مواد به وسیله چرخه‌های شیمیایی، از آن با سرعت بیشتری نسبت به میزان تولید آن از بین می‌برند. در اوتریفیکاسیون دریایی نیز نیترات آمونیوم بیشترین سهم را داشته و داده‌های اینتونتوری نشان داد که یون آمونیوم و نیترات آزاد شده به محیط آبی به ترتیب ۹۴/۶ و ۵/۰۵ درصد در این اثر تخریبی سهم داشته‌اند. استفاده از فولاد کروم ۸/۱۸، سوخت دیزل برای تولید انرژی مکانیکی و فرآیند انفجار مسئول ایجاد اوتریفیکاسیون آب شور دریا و آب شیرین در مطالعه Farjana و همکاران (۲۱) بوده است که سهم اکسیدهای نیتروژن در اوتریفیکاسیون  $10^{-3} \times 1/3 \text{ kg N-eq}$  بوده، در حالیکه در اوتریفیکاسیون آب شیرین نیز این فرایند  $10^{-6} \times 4/03 \text{ kg P-eq}$  سهم داشته است. نتایج نشان داد که در مرحله استخراج سنگ آهن، عامل مخرب در بیشتر رده اثرات مورد بررسی حمل‌ونقل بوده است. با توجه به اینکه کامیون‌های مورد استفاده یورو ۴ بوده است، پیشنهاد می‌گردد که برای بهبود شرایط و افزایش پایداری زیست محیطی، از کامیون‌های یورو ۵ و بالاتر استفاده گردد.

– بررسی رده آسیب ناشی از استخراج سنگ آهن از نقطه نظر پایانی

از نقطه نظر پایانی در روش ReCiPE سه رده آسیب سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع حائز اهمیت بوده است. نتایج تاثیر نهاده‌های ورودی بر روی رده آسیب نشان داد که بیشترین تاثیر مخرب همه نهاده‌های ورودی بر روی سلامت انسان بوده است. به طور میانگین، متوسط سهم آسیب نهاده‌های ورودی بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تقلیل منابع به ترتیب برابر با ۸۹/۱، ۵/۴۶ و ۵/۴۳ درصد بوده است. هیدروکربن سنگین و دیزل مصرفی نیز نسبت به سایر نهاده‌های ورودی تاثیر مخرب بیشتری بر روی تقلیل منابع داشته‌اند و با توجه به اینکه هر دو جزء سوخت‌های فسیلی هستند و یکی از رده اثرات مورد بررسی در روش ReCiPE نیز تقلیل منابع فسیلی است، بنابراین این دو ماده مصرفی در طی استخراج سنگ آهن نیز سبب شده‌اند که اثر منفی بر روی کاهش منابع فسیلی داشته باشند.

مصرف گازوئیل و هیدروکربن‌های سنگین در تجهیزات مورد

استفاده در فعالیت‌های معدن به طور قابل توجهی بر روی رده اثر تقلیل منابع فسیلی اثرگذار است. در مطالعه حاضر سهم خسارتی مربوط به مصرف گازوئیل و هیدروکربن سنگین بر تقلیل منابع فسیلی به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲۵ درصد از ۱۰۰ درصد کل بوده، در حالیکه در مطالعه Gan و Giffin (۱۶) سهم آسیب مربوط به گازوئیل مصرفی برابر با ۳۴ درصد از کل آسیب‌ها بوده است. از آنجاییکه تمام فرآیندهای مورد استفاده در استخراج معادن به انرژی بستگی دارند، انتظار می‌رود که اکثر این فرآیندها چه از طریق مصرف سوخت (گازوئیل، گاز طبیعی یا نفت کوره) یا با مصرف برق شبکه ملی به طریقی اثرگذار بر این رده اثر باشند. با توجه به اینکه مصرف سوخت‌های فسیلی از نهاده‌های مهم در فعالیت‌های معدنی بخصوص حمل‌ونقل است و درصدی از اثرات بر روی سلامت انسان و اکوسیستم به آن برمی‌گردد، بسیاری از مطالعات به منظور افزایش پایداری محیط زیستی پیشنهاد کرده‌اند که به جای سوخت‌های فسیلی از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده گردد (۳۱، ۳۲).

با توجه به اینکه بیشترین آسیب وارد شده به سلامت انسان بوده است و از طرفی نیز در نقطه نظر نهایی علاوه بر رده آسیب، رده اثرات نیز مهم بوده است، بنابراین به عوامل مخرب در هر رده اثر که سبب تاثیرگذاری منفی بر سلامت انسان شده است، پرداخته گردید. در رده اثر گرمایش جهانی، مراجعه به فهرست موجودی نشان داد که دی‌اکسیدکربن منتشر شده در طی فعالیت استخراج ناشی از حمل‌ونقل و دی‌اکسیدکربن ناشی از منابع فسیلی به ترتیب با مقادیر ۷۰/۹ و ۲۲/۲ درصد بیشترین سهم را بر سلامت انسان داشته‌اند. در رده اثر کاهش ازن استراتوسفری که منجر به آسیب به سلامت انسان شده است، دی‌نیتروژن مونوکسید منتشر شده از نیترات آمونیوم دارای بیشترین اثر مخرب (۹۱/۹ درصد) بوده است. رده اثر تشعشعات یونیزان نیز سبب وارد کردن خسارت به سلامت انسان شده است که داده‌های اینتونتوری نشان داد ۹۸/۴ درصد سهم مربوط به کربن-۱۴ آزاد شده در طی حمل‌ونقل بوده است. ازن فتوشیمیایی تشکیل شده در تروپوسفر نیز سبب خسارت به سلامت انسان شده که تجزیه و تحلیل فهرست موجودی نشان داد که اکسیدهای نیتروژن و نیتروژن دی‌اکسید

نتایج آنالیز چرخه زندگی استخراج سنگ معدن آهن نشان داد که انتشارات آزاد شده در طی انفجار و همچنین حمل و نقل توسط کامیون، بیشترین اثرات مخرب را بر روی رده اثرات مختلف داشته است. نتایج آسیب‌های وارد شده نشان داد که بیشترین آسیب متوجه سلامت انسان است که این اثرگذاری به انتشارات آزاد شده، فلزات سنگین رها شده به اکوسیستم‌های آبی و خاکی و مواد پرتوزای منتشر شده در طی حفاری مربوط است. با توجه به اینکه در این فرایند، حمل و نقل به عنوان عامل مخرب مشخص گردید، پیشنهاد می‌شود جهت افزایش پایداری محیط زیستی راهکارهایی مانند استفاده از وسایل نقلیه دارای استاندارد یورو ۵ و یا جایگزینی سوخت فسیلی با تجدیدپذیر به کار گرفته شود. از مهمترین محدودیت‌های این مطالعه، عدم دسترسی راحت به آمار و مواد مصرفی و همچنین نبود اطلاعات مربوط به ایران در کتابخانه سیماپرو بوده که در این شرایط از کتابخانه‌های جهانی (GLO) استفاده شد.

### نتیجه‌گیری

فرایند استخراج سنگ آهن در معدن گهرزمین سیرجان به روش چرخه زندگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حمل و نقل بخصوص استفاده از کامیون با وزن بیشتر از ۲۰ ton برای جابجایی مواد منفجر شده از معدن دارای بیشترین اثر مخرب بر محیط زیست است. رده اثراتی که بیش از ۹۰ درصد اثرپذیری را از حمل و نقل داشته‌اند، عبارتند از: تشعشعات یونیزان، کاربری زمین و اوتریفیکاسیون آب‌های شیرین، سمیت محیط زیستی زمینی، آب شیرین، دریایی، سمیت سرطانزایی و غیرسرطانزایی. حمل و نقل با کامیون با ظرفیت بزرگتر از ۲۰ ton دارای بیشترین اثر مخرب و به طور متوسط ۵۱/۱ درصد و در رده‌های بعدی به ترتیب نترات آمونیوم، انتشارات خروجی، بیل مکانیکی و الکتروسیته مصرفی با مقادیر ۲۳/۱، ۱۰/۳، ۸/۱ و ۳/۸ درصد قرار گرفته‌اند. بیش از ۸۹/۸ درصد از آسیب ایجاد شده ناشی از استخراج سنگ آهن، متوجه سلامت انسان بوده است. با توجه به اینکه حمل و نقل دارای بیشترین اثر منفی است، جهت افزایش پایداری محیط زیستی استفاده از کامیون‌های با استانداردهای یورو ۵ و بالاتر

آزاد شده به هوا طی انتشارات حمل و نقل به ترتیب با مقادیر ۷۹/۴ و ۱۹/۳ درصد دارای بیشترین اثر مخرب بوده است. ذرات ریز تشکیل شده نیز یکی دیگر از رده اثرات مخرب بر سلامت انسان هستند و تجزیه و تحلیل فهرست موجودی نشان داد که سهم نیتروژن اکسید، دی‌اکسید سولفور و نیتروژن دی‌اکسید در تشکیل ذرات به ترتیب برابر با ۵۷/۹، ۲۰/۵ و ۱۴/۱ درصد بوده است که همه این ترکیبات در طی حمل و نقل آزاد شده‌اند. مطالعه Li و همکاران (۳۳) بر روی استخراج سنگ آهن نشان داد که در تولید ۱ ton سنگ آهن، میزان انتشار دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، NOx و گردوغبار به ترتیب برابر با ۲۴۱/۵۳، ۲۲/۶۸، ۰/۲۹۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۸ بوده است که در رده اثرات پتانسیل گرمایش جهانی، اسیدی شدن، تشکیل ازن فتوشیمیایی و سمیت انسانی خود را نشان داده‌اند.

در مطالعه Ferreira و همکاران (۲)، علاوه بر ذرات PM<sub>2.5</sub> تولید شده در طی فرایند انفجار و خرد کردن سنگ آهن، اکسیدهای نیتروژن تولیدی ناشی از احتراق سوخت توسط تجهیزات حفاری و حمل و نقل و سوزاندن گاز طبیعی نقش عمده‌ای را در تولید ذرات ریز قابل تنفس داشته‌اند. سمیت سرطانزایی نیز یکی دیگر از رده اثرات بوده که بر سلامت انسان اثرگذار است و تجزیه و تحلیل فهرست موجودی نشان داد که کروم ۶ ظرفیتی، نیکل و فرمالدهید آزاد شده در طی حمل و نقل به ترتیب ۶۷، ۱۵/۹ و ۶/۶ درصد در سرطانزایی سهم داشته‌اند، در حالیکه در مطالعه Gan و همکار (۱۶) نیز به ترتیب کروم و آرسنیک ۳۶/۱ و ۳۵/۲ درصد در سرطانزایی انسانی نقش داشته‌اند. در رده اثر سمیت غیرسرطانزایی نیز روی، سرب و آرسنیک آزاد شده به هوا و آب در طی حمل و نقل به ترتیب ۶۱/۸، ۸/۲ و ۶/۶ درصد سهم داشته و دارای بیشترین اثر غیرسرطانزایی بوده‌اند. تجزیه و تحلیل فهرست موجودی مطالعه Ferreira و همکاران (۲) نیز نشان داد که یون‌های آرسنیک و کادمیوم با ۶۹ درصد سهم از کل، به عنوان عامل اصلی اثرگذار بر سمیت غیرسرطانزایی بوده که به دلیل فعالیت‌های استخراج و بازیابی سنگ آهن، این عناصر می‌توانند در خاک و منابع آب وارد شوند.

IR.MODARES.REC.1402.019 است.

و همچنین استفاده از تسمه نقاله جهت جابجایی مواد استخراج شده و همچنین سوخت‌های تجدیدپذیر به جای فسیلی پیشنهاد می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه با عنوان "ارزیابی محیط‌زیستی استخراج و پردازش سنگ معدن آهن گهرزمین سیرجان با استفاده از رویکرد چرخه زندگی" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۴۰۰ است که با حمایت دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس اجرا شده است.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی مانند عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. کد اخلاق این مقاله نیز

## References

1. Farjana SH, Huda N, Mahmud MAP, Lang C. Impact analysis of goldsilver refining processes through life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;228:867-81.
2. Ferreira H, Leite MGP. A life cycle assessment study of iron ore mining. *Journal of Cleaner Production*. 2015;108:1081-91.
3. MIMT. <https://www.mimt.gov.ir/> 2024.
4. Menzie WD, Soto-Viruet Y, Bermúdez-Lugo O, Mobbs PM, Perez AA, Taib M, Wacaster S. Review of selected global mineral industries in 2011 and an outlook to 2017. *Open-File Report*. 2013 (2013-1091).
5. Heikkinen K, Saari M, Heino J, Ronkanen AK, Kortelainen P, Joensuu S, et al. Iron in boreal river catchments: Biogeochemical, ecological and management implications. *Science of The Total Environment*. 2022;805:150256.
6. Wang Y, Kang Y, Zhong M, Zhang L, Chai X, Jiang X, et al. Effects of Iron deficiency stress on plant growth and quality in flowering Chinese cabbage and its adaptive response. *Agronomy*. 2022;12(4):875.
7. Achary MS, Panigrahi S, Panigrahy R, Pabhu R, Sekhar J. Concentration factor of metals in zooplankton and their seasonality in the Kalpakkam coast, southwest Bay of Bengal. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 2020;2:13-23.
8. Maher BA, González Maciel A, Reynoso Robles R, Torres Jardón R, Calderón Garcidueñas L. Iron-rich air pollution nanoparticles: An unrecognised environmental risk factor for myocardial mitochondrial dysfunction and cardiac oxidative stress. *Environmental Research*. 2020;188:109816.
9. Shekoohiyan S, Hadadian M, Heidari M, Hosseinzadeh Bandbafha H. Life cycle assessment of Tehran municipal solid waste during the COVID-19 pandemic and environmental impacts prediction using machine learning. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;7:100331.
10. Parsaee F, Shekoohiyan S, Moussavi G. Life cycle assessment of Tehran's COVID-19 facemasks and prediction of environmental impacts using machine learning. *Environment, Development and Sustainability*. 2024:1-20.
11. Dorostkar Ahmadi N, Shafie Nikabadi M, Babaie Kafaki S. Environmental assessment of vehicle lubricants by life cycle assessment approach. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2019;11(4):547-62 (in Persian).
12. Hauschild MZ, Rosenbaum RK, Olsen SI. *Life Cycle Assessment*. *Gewerbestrasse: Springer*; 2018.
13. Thonemann N, Schulte A, Maga D. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. *Sustainability*. 2020;12(3):1192.
14. Peña C, Civit B, Gallego Schmid A, Druckman A, Pires AC, Weidema B, et al. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2021;26:215-20.
15. Haque N, Norgate T. 20 - Life cycle

- assessment of iron ore mining and processing. *Iron Ore*. 2015;615-30.
16. Gan Y, Griffin WM. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China—Uncertainty and trends. *Resources Policy*. 2018;58:90-96.
17. Khoshyomn S, Heidari A, Heidari AR. Life cycle assessment of steel production from iron scrap: a case study at a steel plant. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2019;12(1):63-74 (in Persian).
18. Ramezani-Mooziraji M, Sabour M, Dezvareh G, Ehteshami M. Assessing the life cycle of steel production and its environmental effects. *Health System Research Journal*. 2023;19(1):85-94.
19. Zamani R, Lorestani B, Cheraghi M, Mohammadpour Q, Kazemini F. A survey on effect of mining activities on accumulation of Cd in feathers of common chukar (*Alectoris chukar*)(Case Study: Ahangaran Mine). *Journal of Environmental Science and Technology*. 2017;19(4):61-72.
20. [https://www.goharzamin.com/view\\_contact?news=10167](https://www.goharzamin.com/view_contact?news=10167).
21. Farjana SH, Huda N, Mahmud MP, Lang C. A global life cycle assessment of manganese mining processes based on EcoInvent database. *Science of the Total Environment*. 2019;688:1102-11.
22. Crowson P. Mining and sustainable development: measurement and indicators. *Minerals and Energy*. 1998;13(1):27-33.
23. <https://esfahanahan.com/mag/iron-ore-mines-of-iran/>.
24. Farjana SH, Huda N, Mahmud MAP. Life cycle assessment of cobalt extraction process. *Journal of Sustainable Mining*. 2019;18(3):150-61.
25. Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira M, et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017;22(2):138-47.
26. Islam K, Vilaysouk X, Murakami S. Environmental impacts of copper mining in Laos: Application of remote sensing and life cycle assessment. 2019.
27. Bjørn A, Moltesen A, Laurent A, Owsianiak M, Corona A, Birkved M, et al. Life cycle inventory analysis. In: Michael Z. Hauschild RKR, Stig Irving Olsen, editor. *Life cycle assessment: Theory and Practice*. Germany: Springer; 2018. p. 117-65.
28. Backes JG, Suer J, Pauliks N, Neugebauer S, Traverso M. Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: Actual environmental profile. *Sustainability*. 2021;13(6):3443.
29. Norgate T, Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18:266-74.
30. van den Oever A, Costa D, Messagie M. Revisiting the challenges of ozone depletion from a prospective LCA perspective. *Qeios*. 2023.
31. Parvez Mahmud MA, Hossain MJ, Nizami MSH, Rahman MS, Farjana SH, Huda N, et al. Advanced power routing framework for optimal economic operation and control of solar photovoltaic-based islanded microgrid. *IET Smart*

Grid. 2019;2(2):242-49.

32. Farjana SH, Huda N, Mahmud MAP, Lang C. Comparative life-cycle assessment of uranium extraction processes. *Journal of Cleaner Production*. 2018;202:666-83.
33. Li Zp, Fan Xh, Yang Gm, Wei Jc, Sun Y, Wang M. Life cycle assessment of Iron ore sintering process. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2015;22(6):473-77.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Environmental assessment of iron ore extraction stage of Sirjan Goharzamin using the life cycle approach

Faezeh Sadeghi, Sakine Shekoohiyan\*, Mohsen Heidari

Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 01 May 2024  
**Revised:** 26 June 2024  
**Accepted:** 30 June 2024  
**Published:** 16 September 2024

**Keywords:** Life cycle assessment, Iron ore, Environment, Sirjan

**\*Corresponding Author:**  
s.shekoohiyan@modares.ac.ir.

### ABSTRACT

**Background and Objective:** The Goharzamin iron mine in Sirjan has the largest iron ore reserves in the Gol Gohar area. This study aimed to assess the life cycle of iron ore extraction from this mine using the Life Cycle Assessment (LCA) method due to the extensive activities in the area and the lack of comprehensive studies.

**Materials and Methods:** The LCA evaluated the impacts of iron ore extraction from the Goharzamin mine on human health, ecosystem quality, and resource depletion. The boundary system included the drilling and blasting processes. Following the cradle-to-gate model and an attributional approach, the production of 1 ton of iron ore was considered a functional unit. Impact and damage assessment were conducted using SimaPro software and the ReCiPE method at mid and end-point levels.

**Results:** The findings revealed that transportation by trucks with a capacity exceeding 20 tons accounted for the highest environmental burden in all categories (51.1%), particularly in overburden removal. The detrimental impacts of transportation on ionizing radiation (human health), land use, and freshwater eutrophication potentials (ecosystem quality) exceeded 95%. Carbon-14 emissions, agricultural land occupation, and BOD5 and COD releases resulting from iron ore extraction were identified as the key pollutants in these impact categories. The average damage to human health, ecosystem quality, and resource depletion was found to be 89.8%, 5.5%, and 4.6%, respectively.

**Conclusion:** To mitigate the negative impacts of transportation, it is advisable to enhance environmental sustainability by utilizing trucks that adhere to Euro 5 standards or higher, as well as exploring the use of renewable energies.

Please cite this article as: Sadeghi F, Shekoohiyan S, Heidari M. Environmental assessment of iron ore extraction stage of Sirjan Goharzamin using the life cycle approach. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;17(2):377-96.

