

## طراحی و بهینه‌سازی یک مدل مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پایدار در معدن

وحید عباس زاده نرمیقی<sup>۱</sup>، سروش آوخ دارستانی<sup>۲\*</sup>، حامد سلیمانی<sup>۳</sup>، رعنا ایمان نژاد<sup>۴</sup>  
دانشگاه آزاد اسلامی قزوین  
دانشگاه آزاد اسلامی بندر انزلی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

### چکیده

صنایع معدنی از گذشته تاکنون نقش مهم و اساسی در تمام ابعاد اقتصادی و اجتماعی بشر داشته است. توسعه و پیشرفت در این صنعت می‌تواند یکی از عوامل کلیدی توسعه در هر کشوری باشد. اگرچه توسعه این صنعت می‌تواند تأثیرات مثبت زیادی داشته باشد ولی این توسعه تأثیرات منفی بر محیط‌زیست پیرامون در پی دارد که همواره لازم است در جهت کاهش این اثرات منفی بر محیط‌زیست تلاش کرد. زنجیره تأمین بر تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله استخراج مواد معدنی تا تحویل به مصرف‌کننده نهایی و نیز جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌ها را شامل می‌شود. در این پژوهش سعی شده که یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه‌سازی مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پایدار با بررسی موردی معدن سنگ بالاست طراحی گردد که شامل سه هدف می‌باشد: ۱- کمینه کردن هزینه نصب و حمل‌ونقل به‌عنوان هدف اقتصادی ۲- کمینه کردن تولید گاز Co2 از طریق حمل‌ونقل و فرآیند تولید محصول به‌عنوان هدف زیست‌محیطی ۳- کاهش انحراف کیفیت محصول به‌عنوان هدف تکنولوژیکی در نظر گرفته شده است. مدل ذکرشده در نرم‌افزار GAMZ به روش الپیمتریک حل می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد طبق درخواست مشتری چه هزینه‌ای با توجه به هزینه‌های ثابت و هزینه‌های حمل‌ونقل صرف تولید سنگ بالاست و پسماند (بیس) جهت ارسال آن به مشتری می‌گردد و چه مقدار گاز Co2 تولید می‌شود و همچنین مقدار انحراف‌های کلی از اهداف کیفی هر پارامتر بین مواد معدنی استخراجی از معدن و محصول تحویلی به مشتری چه میزان می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تأمین پایدار، صنایع معدنی، سنگ بالاست، مدیریت پسماند، بهینه‌سازی چندهدفه

### ۱- مقدمه

بهره‌وری و پاسخگویی زنجیره، یکی از مهم‌ترین مباحث استراتژیک است [۱]. معرفی تولید با چرخه عمر کوتاه‌تر و انتظارات افزایش‌یافته مشتریان، شرکت‌های تجاری را مجبور به سرمایه‌گذاری و توجه به زنجیره‌های عرضه خودکرده است. این به همراه پیشرفت‌های مداوم در ارتباطات و

امروزه فضای رقابتی و تجاری باعث افزایش همکاری بین شرکت‌ها به‌عنوان بخشی از شبکه زنجیره تأمین شده است. در این راستا، طراحی زنجیره تأمین با توجه به تأثیر آن در

۳- استادیار گروه مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. ایمیل: Hd\_soleimani@yahoo.com

۴- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، مرکز بین الملل بندر انزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندر انزلی، ایران. ایمیل: Imannezhadrana@gmail.com

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. ایمیل: Vahidabbasazade65@gmail.com

۲\* - استادیار گروه مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، نویسنده پاسخگو، ایمیل: avakh@qiau.ac.ir

فن‌آوری‌های حمل‌ونقل، اینترنت و تحویل شبانه، تکامل مداوم زنجیره عرضه و تکنیک‌های مدیریت آن را به‌طور مؤثر ترویج کرده است. در زنجیره تأمین مواد اولیه معمولی هستند. تهیه و اقلام در یک یا چند کارخانه تولید، برای ذخیره‌سازی متوسط به انبار حمل و سپس به خرده‌فروشان و یا مشتریان عرضه می‌شود. در نتیجه برای کاهش هزینه و بهبود سطح خدمات، راهبردهای زنجیره تأمین مؤثر باید در سطوح مختلف در زنجیره تأمین توجه داشته باشند. زنجیره تأمین نیز به‌عنوان شبکه تدارکاتی شامل تأمین‌کننده، مرکز تولید، انبار، مرکز توزیع و خرده‌فروشی و همچنین مواد خام در موجودی فرایند و محصولات تکمیل‌شده بین امکانات می‌باشد. تا پیش از دهه ۱۹۶۰ تلاش‌های توسعه‌ای بیشتر معطوف به جنبه‌های اقتصادی می‌شد، اما بعد از این دهه به جنبه‌های غیراقتصادی فعالیت‌های توسعه‌ای توجه شد تا اینکه در دهه ۱۹۸۰ مفهوم «توسعه پایدار» مطرح شد. به‌طور کلی توسعه پایدار توسعه‌ای است که هم‌زمان سه بعد محیطی، اقتصادی و اجتماعی در آن در نظر گرفته شده باشد. در گزارشی با عنوان «آینده مشترک ما» در کمیسیون جهانی توسعه و محیط‌زیست مفهوم توسعه پایدار به‌صورت شناخته‌شده و عمومی درآمد. در این گزارش توسعه پایدار به‌صورت زیر تعریف شده است: «توسعه پایدار توسعه‌ای است که نیازهای نسل حاضر را تأمین می‌کند، بدون اینکه توانایی نسل‌های بعدی را در برآورده ساختن نیازهایشان تضعیف کند» [۲].

مدیریت زنجیره تأمین پایدار شامل مدیریت جریان‌های مواد، اطلاعات و سرمایه همچون همکاری میان سازمان‌ها در طول زنجیره تأمین ضمن توجه به اهداف سه بعد توسعه پایدار یعنی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی که برگرفته از سوی مشتری و نیازمندی‌های ذینفعان می‌باشد [۳].

در صنایع معدنی بازدهی زنجیره تأمین و محدودیت هزینه و آلاینده‌های محیط‌زیستی بدون ایجاد تغییر در هدف اصلی (بهبود کیفیت و رضایت مشتری) امری بسیار حیاتی می‌باشد که دستیابی به آن به دلیل افزایش زنجیره عرضه و پیچیدگی شبکه نیازمند تکنولوژی پیشرفته پیچیده‌ای است. صنایع معدنی یکی از بزرگ‌ترین منتشرکنندگان آلاینده‌ها کربنی هستند. در این شرایط جهانی، شرکت‌های استخراج معدن به دنبال استراتژی برای کاهش انتشار آن هستند. آن‌ها

متوجه شده‌اند که مدیریت زنجیره تأمین می‌تواند دیدگاه سیستماتیکی را فراهم نماید که در نتیجه کل عملیات خود برای دستیابی به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی بازطراحی نمایند. مسائل زیست‌محیطی صنایع استخراجی و به‌ویژه معادن از مسائل شایع و مخربی هستند. راه مؤثر برای مدیریت مشکلات زیست‌محیطی از طریق اقدامات سازمانی به‌وسیله مدیریت زنجیره تأمین امکان‌پذیر می‌باشد. در این مشکل، محل مطلوب، ظرفیت و تعداد امکانات برای باز کردن (بستن) و جریان مواد خام / کالاها از طریق شبکه تعریف می‌شود. طراحی شبکه زنجیره تأمین (SCND) باهدف کمینه‌سازی هزینه (حداکثر سازی سود) یک مشکل استراتژیک شناخته شده است که با ارائه مدلی که شامل سه هدف اقتصادی، محیط‌زیستی، فناوری است این مشکل را برطرف نمود [۴].

صنایع معدنی به‌طور کلی و معدن سنگ مخصوص به

وظایف عمده بالاست به قرار زیر است:

- تحمل نیروهای قائم، افقی و جانبی وارده بر تراورس‌ها به‌منظور نگه‌داشتن خط در موقعیت معین خود
- تأمین بخشی از برجهندگی و جذب انرژی خط
- پخش و انتقال بارها به لایه‌های تحتانی
- زهکشی آب‌های سطحی
- تنظیم و تراز نمودن سطح ریل حین ریل‌گذاری و تعمیرات
- میرایی و استهلاک ضربات، ارتعاشات و صداهای حاصل از حرکت وسایل نقلیه ریلی
- عایق یخبندان برای لایه زیر خود
- جلوگیری از رشد گیاهان در خط

دلیل تأثیرات وسیع آن در بخش‌های دیگر مانند ساخت‌وساز، تولید و حتی بانکی نقش مهمی در زیرساخت هر اقتصاد ایفا می‌کنند. بررسی جنبه‌های پایداری صنعت معدن و معدن سنگ‌های تزئینی در ایران و در واقع، یک معدن سنگ در نظر گرفته شده است و یک شبکه حلقه بسته برای تعیین راهکارهای مناسب برای دفع ضایعات سنگ و پایان عمر سنگ ساختمان‌ها ارائه شده است. در معدن،

1-Sustainable Development  
2-Supply Chain Network Design

الگوریتم‌های تقریبی یا ابتکاری است. این الگوریتم‌ها تضمینی نمی‌دهند که جواب به‌دست‌آمده بهینه باشد و تنها با صرف زمان بسیار می‌توان جواب نسبتاً دقیقی به دست آورد و در حقیقت بسته به زمان صرف شده، دقت جواب تغییر می‌کند.

سؤال تحقیق این است که چگونه می‌توان یک مدل چندهدفه مدیریت پسماند که شامل اهداف ذیل باشد ارائه گردد:

۱- هدف اقتصادی جهت کاهش هزینه کل که شامل هزینه سرمایه‌گذاری، حمل‌ونقل می‌باشد.

۲- هدف محیط‌زیستی جهت کاهش سطح آلودگی کربن دی‌اکسید تولیدشده در فرآیند تولید و حمل‌ونقل است.

۳- هدف سوم برای بهبود عملکرد کارخانه با کاهش انحراف از کیفیت هدف محصول می‌باشد.

در بخش ۲ به بررسی ادبیات به منظور روشن شدن شکاف و نقش این مقاله پرداخته شد. در بخش ۳ و بخش ۴ روش تحلیلی و مدل ریاضی توضیح داده شده است و در بخش ۵ و بخش ۶ مطالعه موردی این مقاله، ارزیابی عددی مربوطه ارائه شده است و در بخش ۷ و بخش ۸ بحث درباره نتایج و نتیجه‌گیری و پیشنهادات تحقیقات آینده نشان داده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

تحقیقات متعددی در زمینه معدن توسط محققین مطالعه و بررسی شده است که ما بر روی آن‌ها تمرکز داریم.

نورگیت و هاکو<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) به ارزیابی چرخه عمر استخراج معادن و مواد معدنی با توجه به انرژی تجدید شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که تلاش برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از معادن و پردازش مواد معدنی صورت می‌گیرد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که باید برای مواد معدنی مانند سنگ‌آهن و بوکسیت بر روی بارگیری و تخلیه آن باید تمرکز کند و برای مواد معدنی مانند مس باید بر روی عملیات سنگ‌زنی متمرکز شوند. مشاهده نشان داده است که بارگیری و تخلیه مواد

بلوک‌های سنگی را از کوه استخراج می‌کند و سپس آن‌ها را با دستگاه‌های سیم زنی به قطعات مناسب می‌برند. علاوه بر این، در معدن سنگ‌های تزئینی، بر اساس مشاهدات بینایی، خروجی‌ها در چهار نمره بر اساس کیفیت آن‌ها بستگی به شکستگی و شکاف سنگ‌های برش تعیین می‌شوند و مراکز بازیافت نقش عمده‌ای در جمع‌آوری، پردازش و فروش ضایعات سنگ‌ها دارند [۵].

بالاست به لایه‌ای از مصالح سنگی شکسته با قطر متوسط ۲۰ تا ۶۰ میلی‌متر که مجموعه تراورس‌ها، ریل‌ها و ادوات بر روی آن قرار گرفته اطلاق می‌شود. لایه بالاست یکی از اجزاء تأثیرگذار روسازی خطوط سنتی راه‌آهن است که مهم‌ترین وظیفه آن تأمین برجهندگی و جذب انرژی خط و پخش و انتقال بارها به لایه‌های تحتانی می‌باشد [۶].

سنگ بالاست بایستی از لایه‌هایی که دارای ضخامت قابل‌قبول هستند، تأمین شود. همچنین بایستی از منابعی تهیه شود که دارای ذخیره مناسبی بوده تا تولید بالاست با صرفه اقتصادی همراه باشد [۷].

بررسی وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهد که پس از انقلاب صنعتی (در قرن ۱۸) و به دلیل توسعه صنایع و استفاده از سوخت‌های فسیلی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای شدت بیشتری یافته است.

گزارش IPCC<sup>۱</sup> نیز نشان می‌دهد که بر اساس داده‌های زمینی و ماهواره‌ای، تأثیر عوامل انسانی برافزایش گازهای گلخانه‌ای بیشتر از سهم عوامل طبیعی بوده است. اگرچه توافق جامع نظری در زمینه علل گرمایش جهانی میان محققین وجود ندارد، اما آنچه امروزه در جوامع علمی مورد تأیید بیشتری است، اثر گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌ویژه Co<sub>2</sub> بر گرمایش جهانی است. بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین‌کننده در طراحی ساختاری است. طراحان زمانی قادر خواهند بود طرح‌های بهتری تولید کنند که بتوانند با روش‌های بهینه‌سازی در صرف زمان و هزینه طراحی صرفه‌جویی نمایند. امروزه بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی که اغلب از جمله مسائل با درجه غیر چندجمله‌ای (NP-Hard) هستند، به‌صورت تقریبی با کامپیوترهای موجود قابل‌حل می‌باشند. از جمله راه‌حل‌های موجود در برخورد با این‌گونه مسائل، استفاده از

1- Intergovernmental Panel on Climate Change

2- Norgate & Haque

معدنی بزرگ‌ترین کمک (حدود ۵۰٪) به انتشار گازهای گلخانه‌ای در معدن و فرآیند مواد معدنی می‌باشد [۸].

گلانته و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) مکان و ابعاد ایستگاه‌های انتقال که سطح متوسط لازم را در زنجیره لجستیک جریان پسماند جامد را تشکیل می‌دهند را مورد توجه قرار داده‌اند. تعیین تعداد و نوع وسایل نقلیه مورد استفاده در یک رویکرد بهینه‌سازی یکپارچه انجام می‌شود. آن‌ها مدلی را ارائه داده‌اند هم سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی مربوط به ایستگاه‌های حمل‌ونقل و انتقال را در نظر می‌گیرد و به حداقل رساندن هزینه کل و به حداقل رساندن تأثیرات محیطی که دو هدف متضادی می‌باشد که مورد بررسی قرار می‌دهد [۹].

ژانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) سه جنبه و چارچوب بهینه‌سازی چندمنظوره را برای بهینه‌سازی یک زنجیره تأمین پایدار پیشنهاد کردند که شامل هزینه کل و انتشار گازهای گلخانه‌ای و زمان بین شروع و پایان فرآیند می‌باشد. این چهارچوب را در یک مورد صنعتی مورد استفاده قرار دادند که نتایج نشان داده که با افزایش نسبتاً کمی در هزینه‌ها می‌توان کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و زمان بین شروع و پایان فعالیت‌ها داشت. چارچوب پیشنهادی قادر می‌سازد تا روابط تجاری را تعیین کنند و در نتیجه تصمیمی بگیرند که عملکرد پایدار زنجیره تأمین را بهبود بخشند [۱۰].

گان و چنگ<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) زنجیره تأمین مواد پرکننده برای استفاده مجدد را ارائه کردند، با توجه به اینکه زنجیره تأمین مواد پرکننده شامل بسیاری از فرآیندهای پویا است که پیچیدگی تجزیه و تحلیل و حل مسئله لجستیک را افزایش می‌دهد. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی متمرکز و یک مدل مبتنی بر عامل بنیان (agent-based) را پیشنهاد و اجرا کردند و عملکرد آن‌ها مقایسه می‌گردید که مطالعه مقایسه‌ای نشان داد که به دلیل عدم تمرکز بهینه‌سازی و واکنش سریع به اختلالات غیرمنتظره مدل عامل بنیان بیشتر قادر به مطالعه زنجیره تأمین دینامیک مواد پرکننده است [۱۱].

بوستوس و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه را برای طراحی زنجیره تأمین کاهش انتشار CO<sub>2</sub> در معدن را پیشنهاد کردند؛ که این مدل سه هدف را در برمی‌گرفت که شامل ۱- هدف اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه‌های نصب و حمل‌ونقل ۲- هدف محیط‌زیستی با در نظر گرفتن کاهش گاز CO<sub>2</sub> از طریق حمل‌ونقل و عملیات اجرایی ۳- هدف فناوری از طریق کارایی فرآیند کارخانه می‌باشد. این مسئله به روش فرا ابتکاری MOPSO<sup>۵</sup> حل گردید و جواب به‌دست‌آمده با روش محدودیت اپسیلون<sup>۶</sup> مورد مقایسه قرار گردید و نتیجه نشان داد که روش فرا ابتکاری بهتر از روش محدودیت اپسیلون می‌باشد [۴].

ماتیازگان و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) در این مقاله تلاش کردن به مدیران کمک می‌کنند تا فشار اولیه را در میان فشارهای موجود برای تصویب زنجیره تأمین سبز GSCM<sup>۸</sup> شناسایی کنند. رتبه‌بندی این فشارها بر اساس نظر متخصصان از طریق یک روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP<sup>۹</sup>) در زمینه معدن و صنایع معدنی می‌باشد [۱۲].

سائر و سیورینگ<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۷) پیشنهاد کردن که علاوه بر مداخلات دولت و اقدامات خاص معدنی مانند مدیریت ریسک و فعالیت حرفه‌ای به‌عنوان شیوه‌های ضروری برای بهبود پایداری در زنجیره تأمین مواد معدنی شناخته می‌شوند. مفهوم خریدار و عرضه‌کننده سنتی در SSCM<sup>۱۱</sup> با اضافه کردن رابطه دوم خریدار و تأمین‌کننده توسط یک شرکت کانون بالادست برای مدیریت مداوم پایداری است. مفهوم خریدار و عرضه‌کننده سنتی جریان پایین‌دست در SSCM با اضافه کردن رابطه دوم خریدار و تأمین‌کننده توسط یک جریان بالادست برای مدیریت مداوم پایداری است. این طرح یکپارچه‌سازی استخراج و فرآوری مواد معدنی را به یک رویکرد جامع SSCM و پیشنهاد عملی برای تحقق پایداری مدیریت زنجیره تأمین جامع عمل می‌پوشاند [۱۳].

1- Galante  
2- Zhang  
3- Gan, & Cheng  
4- Bustos  
5- Multi-Objective Particle Swarm Optimization  
6- Epsilon-Constraint

7- Mathiyazhang  
8- Green Supply Chain Management  
9- Analytical Hierarchy process  
10- Sauer & Seuring  
11- The sustainable supply chain management

بوستوس و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) یک مدل سه هدفه طراحی نمودن که دارای سه هدف اقتصادی و محیط‌زیستی و کیفی بود و این مدل را با روش فرا ابتکاری MOPSO و روش محدودیت اپسیلون حل کردند [۴]. سلیمانی<sup>۷</sup> (۲۰۱۸) مدلی را با تمرکز بر روی سنگ‌های تزئینی ارائه کرد، به‌منظور دستیابی به رویکرد پایدار، به حداقل رساندن مصرف انرژی و به حداکثر رساندن سود در توابع هدف مدل و الزامات سطح خدمات در نظر گرفته می‌شود [۵].

با توجه به تحقیقات فوق در زمینه مدیریت پسماند در معادن پژوهش انجام‌نشده و تمرکز بیشتر مقالات بیشتر بر روی پایداری زنجیره تأمین، کاهش هزینه، کاهش اثرات محیط‌زیستی انجام‌گرفته شده است. در واقع مدل جامع و مناسبی که بتواند تمامی معیارها را پوشش دهد دیده نمی‌شود. در پژوهش حاضر تلاش شده است علاوه بر تمامی اهداف ذکر شده مدیریت پسماند را نیز به مدل اضافه کرده و مدل جامع‌تری نسبت به تحلیل زنجیره تأمین در معدن را در نظر گرفته تا تصمیم‌گیرنده بتواند بهترین سطح را برای هر هدف انتخاب و چارچوبی قابل‌استفاده و درعین‌حال فراگیر برای انتخاب بهترین سطح از هر هدف فراهم آورد. به دلیل این‌که در این صنعت استفاده از پسماند می‌تواند باعث درآمدزایی برای معدن باشد؛ و نیز کاهش آلاینده‌گی محیط‌زیست را به همراه دارد در این تحقیق نه تنها به دنبال بهینه‌سازی مقدار تولید هستیم بلکه می‌توان با مدیریت درست مقادیر پسماند سوددهی زنجیره تأمین را به حداکثر برسانیم. در این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه برای حل مسئله مدل مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پایدار در برای معدن در حالت قطعیت استفاده خواهد شد. این مدل با اهداف اقتصادی، محیط‌زیستی، تکنولوژیکی و مدیریت پسماند تلاش می‌کند مسئله را مدل‌سازی و جواب بهینه را به دست آورد.

### ۳- توسعه مدل

بهینه‌سازی به دنبال یافتن بهترین مقدار قابل‌دستیابی از یک تابع هدف تعریف‌شده بر یک دامنه معین از مقادیر است. در ساده‌ترین حالت، هدف، حداقل یا حداکثر سازی یک تابع

چاند و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) تلاش کردن تا تحقیقی را در شرکت‌های تولید تجهیزات حفاری و حمل‌ونقل در هند انجام دهند تا پیچیدگی‌های زنجیره تأمین برای صنایع تجهیزات معدنی و جاده‌ای را درک کنند. در اولویت‌بندی پیچیدگی زنجیره تأمین SCC<sup>۲</sup> رانندگان به دلیل ذهنیت رانندگان، از تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM<sup>۳</sup>) استفاده می‌شود. این مطالعه به توسعه اولویت‌بندی پیچیدگی زنجیره تأمین SCC رانندگان بر اساس تأثیر آن بر روی SCC کلی که اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین دارد. با استفاده از ترکیب رویکرد کیفی (SAP<sup>۴</sup>-lap<sup>۵</sup>) و کمی (AHP) برای اولویت‌بندی SCC رانندگان بر اساس تأثیر آن بر روی SCC در برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه به‌طور کامل محرک‌های SCC مانند ریسک resourcing عرضه‌کننده، صلاحیت تأمین‌کنندگان، استراتژی‌های منطقه‌ای، کوتاه شدن چرخه عمر محصول، تغییر انتظارات خدمات مشتری را مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۴].

فتاحی و همکاران (۲۰۱۸) یک برنامه تصادفی چندمرحله‌ای کارآمد را ارائه کردند که در آن تصمیمات برنامه‌ریزی استراتژیک و تاکتیکی تلفیق می‌شوند. در مدل ارائه‌شده، در کنار هدف اقتصادی، انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق شبکه کاهش‌یافته و تأثیر اجتماعی زنجیره تأمین با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات اجتماعی در نظر گرفته می‌شود. یک مطالعه موردی واقعی در ایران مربوط به تولید کنسانتره روی از معادن به‌منظور اثبات کاربردی بودن مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در ارزیابی اهداف اقتصادی، مسائل پایداری و نیازهای زیرساختی برای یکپارچه‌سازی انرژی تجدید پذیر اجرا شده است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اصلی مسئله برای هدایت برخی بینش‌های مدیریتی که به تصمیم‌گیرندگان در برنامه‌ریزی پایدار زنجیره‌های تأمین معدن کمک می‌کنند، انجام شده است [۱۵].

مطالعات زیادی که هر ساله در زمینه زنجیره تأمین با رویکردهای مختلف انجام می‌شود ضرورت و اهمیت بررسی مسئله زنجیره تأمین پایدار در معدن آشکار می‌گردد.

1-chand  
2-Supply Chain Complexity  
3- Multi-Objective Particle Swarm Optimization  
4-Situation-Actors-Process  
5-Learning-Action-Performance

6- Fatahi  
7-Soleymani

حقیقی با انتخاب نظام‌مند مقادیر حقیقی یا اعداد صحیح از یک مجموعه از مقادیر ممکن است.

امروزه با توجه به اینکه پارامترهای زیادی در فرآیند تصمیم‌گیری وارد می‌شوند، از هدف‌های چندگانه برای نیل به مطلوبیت موردنظر استفاده می‌شود [۱۶]. درحالی‌که دنیای واقعی نیازمند بهینه‌سازی هم‌زمان چندین هدف و دستیابی به چندین معیار متضاد می‌باشد، معمولاً برای پیدا کردن جواب مسائل چندهدفه، از ترکیب اهداف برای بهینه‌یابی استفاده می‌شود.

در مسائل چندهدفه برای هر دسته از متغیرهای ورودی، چندین تابع هدف وجود دارد. پیدا کردن جواب بهینه در چنین فضایی برای روش‌هایی بر پایه گرادیان کاری دشوار خواهد است. یکی از این روش‌هایی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چندهدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم‌های چندهدفه مورد استفاده قرار گرفته است. روش مبتنی بر پارتو می‌باشد. یک مفهوم مهم در روش بهینه‌سازی مبتنی بر پارتو مفهوم غالب بودن است و جواب  $i$  بر جواب  $j$  غالب می‌باشد. اگر دو شرط زیر برقرار باشد:

۱- جواب  $i$  از دید هیچ‌یک از توابع هدف از جواب  $j$  بدتر نباشد.

۲- جواب  $i$  حداقل در یکی از توابع هدف از جواب  $j$  بدتر باشد.

یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} & \text{Min or Max } f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_k(x) \quad (1) \\ & \text{s. t.} \\ & g_i(x) \leq \text{or } \geq \text{or } = 0; 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned}$$

$K$  نشان‌دهنده تعداد توابع هدفی است که باید بیشینه یا کمینه شود. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه گاهی اوقات در یک راستا هستند و گاهی با یکدیگر در تعارض هستند. در این گونه موارد یکی از توابع هدف از نوع بیشینه‌سازی است و دیگری از نوع کمینه‌سازی است [۱۷].

در این پژوهش از مقاله که توسط بوستوس و همکاران (۲۰۱۷) با عنوان مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین کربن‌زدایی مؤثر در معدن به عنوان مقاله پایه استفاده شده است در این مقاله سه هدف برای بهینه‌سازی و

کمینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت شامل ۱- کمینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری جهت استخراج سنگ معدنی و تولید محصول ۲- کمینه کردن تولید گاز  $CO_2$  در حین فرآیند استخراج سنگ معدنی و تولید محصول ۳- کمینه کردن انحراف از کیفیت محصول می‌باشد با بررسی که بر روی مواد معدنی مورد استفاده در صنعت و جامعه متوجه گردید که در بعضی از مواد معدنی پسماند یا ضایعات می‌تواند مورد تقاضای مشتری قرار گیرد در نتیجه می‌توان در مدل ارائه شده توسط بوستوس و همکاران اثر تولید، حمل و ارسال پسماند به مشتری را در هزینه سرمایه‌گذاری و تولید گاز  $CO_2$  مورد بررسی قرار داد. از جمله مواد معدنی که از چنین ویژگی برخوردار است سنگ بالاست می‌باشد.

۱-۳. چهارچوب نظری و مدل تحلیلی

- وجود یا عدم وجود تسهیلات معدن.
- نصب یا عدم نصب کارخانه فرآوری.
- نصب یا عدم نصب بارانداز.
- جریان مواد خام از معدن به کارخانه فرآوری.
- جریان مواد فرآوری شده از کارخانه به بارانداز.
- جریان ضایعات از کارخانه به بارانداز.
- جریان محصول از بارانداز به مشتری.
- جریان فرآوری مجدد مواد معدنی در کارخانه فرآوری.
- جریان ضایعات از بارانداز به مشتری.
- جریان ضایعات از فرآوری مجدد کارخانه در فرآوری کارخانه.
- جریان ضایعات اولیه تولید در فرآوری کارخانه از جریان مواد خام معدن.
- مقدار کل ضایعات تولید شده در فرآوری کارخانه.
- انحراف از کیفیت محصول.

### ۲-۳- فرضیه‌های تحقیق

- مقدار هر محصول موردنظر باید برآورده شود.
- محصولات خانواده‌های مختلف به عنوان محصولات متفاوت با ویژگی‌های خاص خود در نظر گرفته می‌شود.
- در سه ستون اول مواد خام معدنی پردازش و ستون سوم (بارانداز) محصولات را به آخرین ستون (مشتریان) عرضه می‌کند.

### ۳-۳- مدل ریاضی مسئله

مدل سازی اهداف مدل ریاضی به صورت زیر تعریف می گردد:

(۱) اهداف اقتصادی

$$\begin{aligned} EOP: & \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} EFM_m \times K_{ml} \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EFP_l \times LL_{lp} \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EFWP_l \times W_{lp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} EFPO_{pc} \times MM_{npc} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} EFWPO_{psc} \times OO_{spc} \end{aligned}$$

**Minimize EBT + EOP**

(۳) هدف کارایی

$$\text{Minimize } \sum_{q \in Q} \sum_{n \in N} d + n_q + d - n_q \quad (4)$$

(۴) محدودیت ها

$$\sum_{m \in M} K_{ml} \leq VPl \times Bl \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} FP_l \times K_{ml} = rr_l$$

$$\sum_{m \in M} FW_l \times K_{ml} = \sum_{l \in L} U2_{lm}$$

$$FW_l \times rr_l = U1_l$$

$$\sum_{l \in L} U2_{lm} + U1_l = \sum_{p \in P} W_{lp}$$

$$\sum_{m \in M} K_{ml} = \sum_{l \in L} LL_{lp} + \sum_{p \in P} W_{lp}$$

$$\sum_{l \in L} L_{lp} = \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} MM_{pc}^n$$

$$\sum_{m \in M} K_{ml} = R_m \times A_m$$

$$\sum_{p \in P} MM_{pc}^n = D_c^n$$

• امکانات نمی تواند مقدار بیشتری از آنچه دریافت می کنند ارسال کنند (موجودی مجاز نیست).

• امکانات محدودیت ظرفیت دارند.

• تعداد امکانات موجود در هر بخش با مقادیر از پیش تعیین شده محدود شده است.

• در میان تسهیلات در همان ستون جریان وجود ندارد.

$$\begin{aligned} COI: & \sum_{m \in M} TFM_m \times A_m + \sum_{l \in L} TFl \\ & \times Bl + \sum_{p \in P} TFPO_p \\ & \times Op \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} COI: & \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} EOP_{ml} \times IP_{ml} \\ & \times K_{ml} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EOP_{nlp} \times IPO_{lp} \\ & \times LL_{lp} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EOWPO_{LP} \\ & \times IPO_{lp} \times W_{lp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} EOC_{npc} \times IC_{pc} \\ & \times MM_{npc} + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} EOWC_{pc} \\ & \times IC_{pc} \times OO_{spc} \end{aligned}$$

**COI: Minimize COI + COT**

(۲) اهداف محیط زیستی

$$EBT: \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} EFP_{ml} \times IP_{ml} \quad (3)$$

$$\times K_{ml} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EFPO_{lp} \times IPO_{lp}$$

$$\times LL_{lp} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} EFWPO_{lp} \times IPO_{lp}$$

$$\times W_{lp} + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} EFC_{pc} \times IC_{pc}$$

$$\times MM_{npc} + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} EFWC_{psc}$$

$$\times IC_{pc} \times OO_{spc}$$

$EOP_{ml}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/ کیلومتر از تسهیلات معدن  $m \in M$  به کارخانه فرآوری  $l \in L$

$EOP_{lp}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از کارخانه فرآوری  $p \in P$  به بارانداز  $l \in L$

$EOWP_{lp}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از کارخانه  $l \in L$  به بارانداز  $p \in P$

$EOC_{pc}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از بارانداز  $p \in P$  به مشتری  $c \in C$

$EOWC_{pc}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از بارانداز  $p \in P$  به مشتری  $c \in C$

$TFM_m$ : هزینه ثابت باز کردن تسهیلات معدن جدید  $m \in M$

$TFP_l$ : هزینه ثابت استقرار کارخانه فرآوری در مکان کاندید  $l \in L$

$TFPO_p$ : هزینه ثابت استقرار بارانداز جدید  $p \in P$

$IP_{ml}$ : فاصله بین معدن  $m \in M$  و کارخانه فرآوری  $l \in L$

$IPO_{lp}$ : فاصله بین کارخانه فرآوری  $l \in L$  و بارانداز معدن  $p \in P$

$IC_{pc}$ : فاصله بین بارانداز  $p \in P$  و مشتری  $c \in C$

$FP_l$ : فاکتور بازفرآوری مواد معدنی در کارخانه  $l \in L$

$FW_l$ : فاکتور ضایعات مواد معدنی در بازفرآوری کارخانه  $l \in L$

$F_{max}$ : حداکثر تعداد کارخانه فرآوری که جاگذاری می‌شود.

$Y_{max}$ : حداکثر تعداد بارانداز که باید نصب شود.

$M_{max}$ : حداکثر تعداد معدنی که باید باز شود.

$EFP_{ml}$ : فاکتور آلودگی  $CO_2$  در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول از تسهیلات  $m \in M$  به فرآوری کارخانه  $l \in L$

$EFPO_{lp}$ : فاکتور آلودگی  $CO_2$  در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین فرآوری کارخانه  $l \in L$  به بارانداز  $p \in P$

$$\sum_{p \in P} OO_{pc}^s = DW_c^s$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{l \in L} QM1_m^q \times K_{ml} - \sum_{n \in N} d_{nq}^+$$

$$+ \sum_{n \in N} d_{nq}^-$$

$$= \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} QM2_c^{nq}$$

$$\times \sum_{p \in P} MM2_{pc}^n$$

$$\sum_{l \in L} B_l \leq F_{Max}$$

$$\sum_{p \in P} Q_p \leq Y_{Max}$$

$$\sum_{m \in M} A_m \leq M_{Max}$$

$$K_{ml}, L_{lp}, M_{pc}^n \geq 0$$

$$A_m, B_l, O_p \in \{0, 1\}$$

$$U_2, U_l, rr_l \geq 0$$

$$d_{nq}^+, d_{nq}^- \geq 0$$

#### ۳-۴- شاخص‌ها

M: مجموعه‌ای از معادن در دسترس  $m \in M$ .

L: مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای کارخانه فرآوری  $l \in L$ .

P: مجموعه‌ای از باراندازها  $p \in P$ .

C: مجموعه‌ای از مشتری‌ها  $c \in C$ .

N: مجموعه‌ای از محصولات  $n \in N$ .

Q: مجموعه‌ای از پارامترهای کیفیت  $q \in Q$ .

S: مجموعه‌ای از ضایعات یا پسماند  $s \in S$ .

#### ۳-۵- پارامترها

$R_m$ : مقدار ارائه‌شده از ROM جریان مواد معدنی در تسهیلات.

$D_c^N$ : مقدار تقاضا از یک محصول N توسط مشتری C.

$VP1_l$ : ظرفیت فرآیند مواد معدنی در کارخانه مستقر در  $l \in L$

$VP2_p$ : ظرفیت کل بارانداز  $p \in P$



$EFPP_l$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید در پیش فرآوری تسهیلات  $l\epsilon L$ .

$EFWP_l$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید که باعث تولید ضایعات درپیش فرآوری تسهیلات  $l\epsilon L$ .

$EFPO_p$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولیدی در بارانداز  $p\epsilon P$ .

$EFWPO_p$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از ضایعات تولیدی در بارانداز  $p\epsilon P$ .

$OO_{pc}^S$ : جریان ضایعات از بارانداز  $p\epsilon P$  به مشتری  $c\epsilon C$ .

$U1_l$ : جریان ضایعات از فرآوری مجدد کارخانه در فرآوری کارخانه  $l\epsilon L$ .

$U2_{lm}$ : جریان ضایعات اولیه تولید در فرآوری کارخانه  $l\epsilon L$  از جریان مواد خام ROM معدن  $m\epsilon M$ .

$W_{lp}$ : مقدار کل ضایعات تولیدشده در فرآوری کارخانه  $l\epsilon L$ .

$d_{np}^+$ : انحراف مثبت از هدف کیفیت برای پارامتر  $q\epsilon Q$  از محصول  $n\epsilon N$ .

$d_{np}^-$ : انحراف منفی از هدف کیفیت برای پارامتر  $q\epsilon Q$  از محصول  $n\epsilon N$ .

#### ۴. روش حل توسعه مدل

با استفاده از داده‌های های جمع‌آوری شده از معدن بالاست شرکت ساختمان و تأسیسات راه‌آهن (بالاست) اقدام به حل مدل می‌گردد. هزینه اجرای عملیات تولید در معدن طبق مطالعات انجام شده مشخص می‌گردد. سپس پس از انجام محاسبات لازم، مجموع هزینه های ثابت مشخص گردید که در جدول (۱) ارائه شده است:

$EFWPO_{lp}$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین فرآوری کارخانه  $l\epsilon L$  به بارانداز  $p\epsilon P$ .

$EFc_{pc}$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین بارانداز  $p\epsilon P$  به مشتری  $c\epsilon C$ .

$EFWC_{pc}$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین بارانداز  $p\epsilon P$  به مشتری  $c\epsilon C$ .

$EFM_m$ : فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید در معدن  $m\epsilon M$ .

$QM1_m^q$ : درصد کیفیت پارامتر  $q\epsilon Q$  از مواد خام ROM معدنی در معدن  $m\epsilon M$ .

$QM2_c^{nq}$ : درصد کیفیت پارامتر  $q\epsilon Q$  از تقاضای محصول  $n\epsilon N$  توسط مشتری  $c\epsilon C$ .

۳-۶. متغیرها

$A_m$ : اگر تسهیلات معدن  $m\epsilon M$  باشد ۱ و در غیر این صورت ۰.

$B_l$ : اگر کارخانه فرآوری نصب شود در  $l\epsilon L$  ۱ در غیر این صورت ۰.

$O_p$ : اگر بارانداز  $p\epsilon P$  نصب شود ۱ در غیر این صورت ۰.

$K_{ml}$ : جریان مواد خام ROM (در تن) از معدن  $m\epsilon M$  به فرآوری کارخانه  $l\epsilon L$ .

$LL_{lp}$ : جریان مواد فرآوری شده از محل فرآوری  $l\epsilon L$  به بارانداز  $p\epsilon P$ .

$MM_{pc}^n$ : جریان محصول  $n\epsilon N$  از بارانداز  $p\epsilon P$  به مشتری  $c\epsilon C$ .

$TT_l$ : جریان فرآوری مجدد مواد معدنی در کارخانه فرآوری  $l\epsilon L$ .

جدول (۱): مجموع هزینه های ثابت

هزینه ثابت	مجموع هزینه
هزینه ثابت بازکردن معدن برای معدن M1 و M2	۴۰۳۵۰۰۰۰۰ تومان
هزینه ثابت استقرار کارخانه فرآوری در مکان کاندید	۱۵۰۰۰۰۰۰۰ تومان
هزینه ثابت استقرار بارانداز	۲۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان

پس از محاسبه های هزینه های ثابت، محاسبات مربوط به زمان رفت و برگشت (دقیقه)، زمان لازم جهت بارگیری (دقیقه)، زمان جهت باراندازی (دقیقه)، زمان جهت توقف

(دقیقه)، راندمان حرکتی در روز (تن. کیلومتر) و.. انجام شد، سپس با توجه به محاسبات انجام شده، فاکتور آلودگی Co2 محاسبه گردید که نتایج در جدول (۲) ارائه شده است:

جدول (۲): فاکتور آلودگی Co2

میزان آلودگی Co2	هر (تن. کیلوگرم)
میزان Co2 تولیدی در هر تن. کیلومتر از حمل و نقل مصالح از معدن M1 به کارخانه	۰/۰۵۰
میزان Co2 تولیدی در هر تن. کیلومتر از حمل و نقل مصالح از معدن M2 به کارخانه	۰/۰۷۴
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) حاصل از حمل و نقل محصول از کارخانه به بار انداز	۰/۱۱۱
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل و نقل پسماند از کارخانه به بارانداز	۰/۱۱۹
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل و نقل محصول از بارانداز به مشتری	۰/۰۴۰۲
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل و نقل پسماند از بارانداز به مشتری	۰/۰۳۴۴
میزان Co2 تولیدی در هر تن از فرآیند تولید مصالح در معدن M1 و M2 (کیلوگرم)	۱/۹۵
میزان Co2 تولیدی در هر تن پسماند تولید شده در معدن M1 و M2 (کیلوگرم)	۰/۹۱
میزان Co2 تولیدی در هر تن از فرآیند تولیدی محصول در بارانداز	۰/۷۳۹
میزان Co2 تولیدی در هر تن از فرآیند تولیدی پسماند در بارانداز	۰/۷۹۱

$C = 2$ . مجموعه ای از مشتری ها  $C \in C$

$N = 1$ . مجموعه ای از محصولات  $n \in N$

$S = 1$ . مجموعه ای از ضایعات یا پسماند  $s \in S$

$Q = 5$ . مجموعه ای از پارامترهای کیفیت  $q \in Q$

مدلی سه هدفه را برای حل این مسئله تعریف گردید که دارای اهداف اقتصادی، محیط‌زیستی و کیفی می‌باشد مدل موردنظر طراحی شد و در ادامه شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل مشخص گردید و سپس برای حل مدل نیاز به جمع‌آوری اطلاعات برای شاخص‌ها و پارامترها بود که برای به دست آوردن این اطلاعات با مراجعه به معدن سنگ بالاست شرکت ساختمان و تأسیسات راه‌آهن (بالاست) واقع در شهرستان شهریار استان تهران اقدام به جمع‌آوری این اطلاعات نموده که با قرار دادن آن‌ها در مدل و حل آن در نرم‌افزار GAMZ به روش الپیمتیریک جواب‌های قطعی مدل مشخص می‌گردد.

#### ۵. مطالعه موردی سنگ بالاست

سنگ بالاست با استفاده از داده‌های های جمع‌آوری شده از معدن بالاست شرکت ساختمان و تأسیسات راه‌آهن (بالاست) واقع در شهرستان شهریار، استان تهران مطابق با شکل (۱) که تصاویر ماهواره‌ای از محل معدن می‌باشد، اقدام به حل مدل گردید.

درصد کیفیت پارامتر  $q \in Q$  از مواد معدنی در معدن  $m \in M$  ( $m_1$  و  $m_2$ ) به شرح زیر می‌باشد:

- $q_1$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰-۴۰ ۲۰٪
- $q_2$ : رنج دانه‌بندی cm ۴۰-۶۰ ۳۰٪
- $q_3$ : رنج دانه‌بندی cm ۶۰-۸۰ ۲۰٪
- $q_4$ : رنج دانه‌بندی cm ۸۰-۱۰۰ ۲۰٪
- $q_5$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰۰-۱۲۰ ۱۰٪

درصد کیفیت پارامتر  $q \in Q$  از تقاضای محصول  $n_1$  توسط مشتری  $c_1$  به شرح زیر می‌باشد:

- $q_1$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰-۴۰ ۳۰٪
- $q_2$ : رنج دانه‌بندی cm ۴۰-۶۰ ۴۰٪
- $q_3$ : رنج دانه‌بندی cm ۶۰-۸۰ ۱۰٪
- $q_4$ : رنج دانه‌بندی cm ۸۰-۱۰۰ ۱۰٪
- $q_5$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰۰-۱۲۰ ۰٪

با توجه به اطلاعات به دست آمده این اطلاعات را در پارامترها جاگذاری می‌گردد.

$M = 2$ . مجموعه ای از معادن در دسترس  $m \in M$

$L$ : مجموعه ای از مکان‌های کاندید برای کارخانه فراوری

$l = 1$ .  $l \in L$

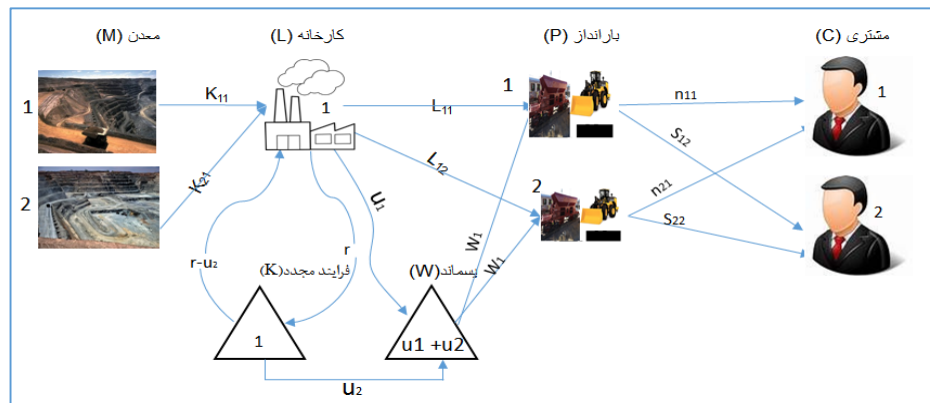
$P = 1$ . مجموعه ای از بار انداز ها  $p \in P$



شکل (۱): تصاویر ماهواره‌ای

به سنگ بالاست و بخشی دیگر به پسماند تبدیل می‌شود و در نهایت طبق درخواست و نیاز مشتری سنگ بالاست یا پسماند مورد تقاضا به بارانداز ارسال شده و از این بخش به مشتری فرستاده می‌شود که مراحل در شکل ۱ نمایش داده شده است:

نحوه استخراج سنگ بالاست به این صورت می‌باشد، مواد معدنی در معدن بالاست توسط ماشین‌آلات معدنی تولید می‌شوند و سپس به کارخانه فرستاده می‌شود تا فرایندهای خردایش و سرند روی آن انجام شود تا به کیفیت مورد نظر برسد در این مرحله بخشی از مواد خام ارسال شده به کارخانه

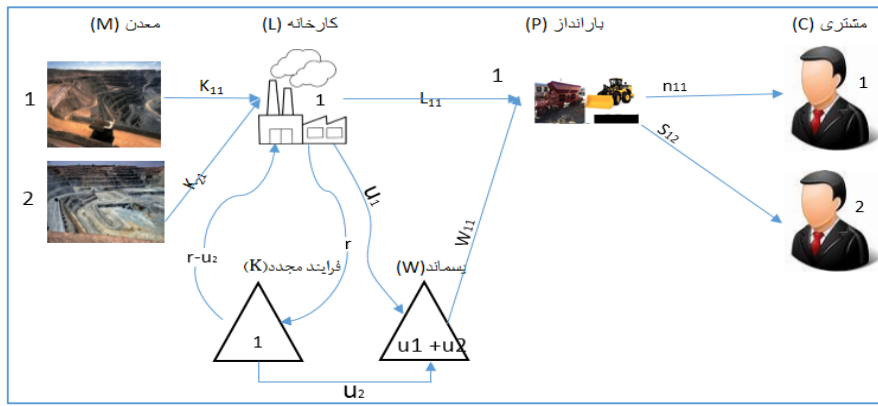


شکل (۲): مراحل استخراج سنگ بالاست

بر روی مصالح جهت تولید بالاست ۲۰٪ از مصالح ورودی فرآوری مجدد روی آن انجام می‌گردد و به‌طور متوسط ۲۱٪ از مصالح ورودی به کارخانه در مرحله اولیه و در حین فرآیند به پسماند تبدیل می‌شود، متوسط ظرفیت تولید محصول کارخانه ۴۰۰۰۰ تن در سال می‌باشد پس از تولید، بالاست و پسماند به باراندازی با ظرفیت ۳۳۰۰۰ تن ارسال می‌شود، حداکثر تعداد بارانداز نصب شده یک بارانداز می‌باشد، محصول از طریق شبکه خطوط ریلی به مشتریان فرستاده می‌شود مقدار تقاضای مشتری اول برای محصول سنگ بالاست ۲۶۱۸۰ تن و مقدار تقاضای مشتری دوم برای پسماند (بیس) ۸۸۲۰ تن است. فاصله کارخانه تا بارانداز ۲۵۰ متر می‌باشد و فاصله بارانداز تا مشتری اول ۴۰ کیلومتر و با مشتری دوم ۵۰ کیلومتر می‌باشد.

فاصله دو معدن  $M_1$  و  $M_2$  تا کارخانه سنگ‌شکن به ترتیب ۰/۵ و ۱/۵ کیلومتر می‌باشد و حداکثر تعداد معدنی که در این ناحیه باز شده است ۲ معدن می‌باشد، سنگ‌ها پس از آنکه توسط ماشین‌آلات بیل پیکور خرد شده و به سایزهای مناسب خرد می‌شود توسط لودر در کامیون بارگیری شده و به کارخانه فرستاده می‌شود ماشین‌آلات فعال در معدن شامل بولدوزر، بیل پیکور، لودر و کامیون می‌باشد.

پس از آنکه سنگ‌ها به کارخانه ارسال شد عملیات خردایش و سرند روی آن‌ها انجام می‌شود، حداکثر تعداد کارخانه‌ای فرآوری که جاگذاری شده است مطابق شکل ۳ یک کارخانه می‌باشد و انرژی مورد نیاز برای راه‌اندازی کارخانه توسط یک ژنراتور ۲۰۰ KV تأمین می‌گردد در عملیات‌های انجام‌شده



شکل (۳): عملیات خریدایش و سرند

بهینه‌سازی مقدار تولید هستیم بلکه می‌توان با مدیریت درست مقادیر پسماند سوخته‌ی زنجیره تأمین را به حداکثر برسانیم.

به دلیل این که در این صنعت استفاده از پسماند می‌تواند باعث درآمدزایی برای معدن باشد؛ و نیز کاهش آلاینده‌ی محیط‌زیست را به همراه دارد در این تحقیق نه تنها به دنبال

$EOP_{ml}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/ کیلومتر از تسهیلات معدن  
 $m \in M$  به کارخانه فرآوری  $I \in l$ ،  $EOP_{11} = 600$  و  $21 = 1800$   
 $EOP$  تومان.

$EOPO_{IP}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از کارخانه فرآوری  
 $I \in l$  به بارانداز  $p \in P$ ،  
 $EOPO_{11} = 300$  تومان.

$EOW_{POIP}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از  
 کارخانه  $I \in l$  به بارانداز  $p \in P$ ،  $EOW_{PO11} = 300$  تومان.  
 $EOC_{PC}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از بارانداز  $p \in P$  به  
 مشتری  $c \in C$ ،  
 $EOC_{11} = 96$  تومان.

$EOW_{CPC}$ : هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از  
 بارانداز  $p \in P$  به مشتری  $c \in C$   
 $EOW_{C12} = 96$  تومان.

$TFM_{m}$ : هزینه ثابت بازکردن تسهیلات معدن جدید  
 $m \in M$ ،  
 $TFM_1 = 40350000$  تومان و  $TFM_2 = 40350000$   
 تومان.

$TFP_I$ : هزینه ثابت استقرار کارخانه فرآوری در مکان  
 کاندید  $I \in l$ ،  $TFP_1 = 150000000$  تومان.

### ۶- جمع آوری اطلاعات و مطالعه عددی

پس از مشخص شدن درصد کیفیت پارامترها، اطلاعات بدست آمده جایگذاری گردید.

پارامترهای کیفیت برای محصول اول  $n_1$ : بالاست و میزان دانه‌بندی محصول در معدن  $M_1$  و  $M_2$  برابر است با:

- $q_1$ : میزان دانه‌بندی ۱۰-۴۰ cm
  - $q_2$ : میزان دانه‌بندی ۴۰-۶۰ cm
  - $q_3$ : میزان دانه‌بندی ۶۰-۸۰ cm
  - $q_4$ : میزان دانه‌بندی ۸۰-۱۰۰ cm
  - $q_5$ : میزان دانه‌بندی ۱۰۰-۱۲۰ cm
- پارامترها

$R_m$ : مقدار ارائه‌شده از ROM جریان مواد معدنی در تسهیلات  $m \in M$ ،  $Rm_1 = 3500000$  و  $Rm_2 = 3500000$ .

$DNC$ : مقدار تقاضا از یک محصول  $n_1$  توسط مشتری  $C_1$   
 $D_{11} = 26180$  تن.

$DW_{SC}$ : مقدار تقاضا از برای پسماند  $S_1$  توسط مشتری  $C_2$ ،  $DW_{12} = 8820$  تن.

$VP_{11}$ : ظرفیت فرآیند مواد معدنی در کارخانه مستقر در  $I \in l$ ،  
 $VP_{11} = 40000$  تن.

$VP_{2P}$ : ظرفیت کل بارانداز  $p \in P$ ،  $VP_{2P} = 33000$  تن.

EFMm: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید در معدن  $m \in M$  ،

$EFM_1 = 1/95$  و  $EFM_2 = 1/95$  کیلوگرم در هر تن.

EFPI: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید در پیش فرآوری تسهیلات

$IEl$   $IEl_1 = 0/91$  کیلوگرم در هر تن.

EFWPI: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید که باعث تولید ضایعات در پیش فرآوری تسهیلات  $IEl$  ،  $0/91$  ،  $EFWP_1 =$  کیلوگرم در هر تن.

EFPOp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولیدی محصول در بارانداز  $p \in P$  ،  $EFPO_1 = 0/739$  کیلوگرم در هر تن.

EFWPOp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از ضایعات تولیدی در بارانداز  $p \in P$  ،  $EFWPO_1 = 0/791$  کیلوگرم در هر تن.

QM1qm: درصد کیفیت پارامتر  $q \in Q$  از مواد خام ROM معدنی در معدن  $m \in M$  در معدن  $m_1$  و  $m_2$  .

- $q_1$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰-۴۰ ۲۰٪
- $q_2$ : رنج دانه‌بندی cm ۴۰-۶۰ ۳۰٪
- $q_3$ : رنج دانه‌بندی cm ۶۰-۸۰ ۲۰٪
- $q_4$ : رنج دانه‌بندی cm ۸۰-۱۰۰ ۲۰٪
- $q_5$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰۰-۱۲۰ ۱۰٪

QM2nqc: درصد کیفیت پارامتر  $q \in Q$  از تقاضای محصول  $n \in N$  توسط مشتری  $c \in C$  .

- $q_1$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰-۴۰ ۳۰٪
- $q_2$ : رنج دانه‌بندی cm ۴۰-۶۰ ۴۰٪
- $q_3$ : رنج دانه‌بندی cm ۶۰-۸۰ ۱۰٪
- $q_4$ : رنج دانه‌بندی cm ۸۰-۱۰۰ ۱۰٪
- $q_5$ : رنج دانه‌بندی cm ۱۰۰-۱۲۰ ۰٪

با توجه به اطلاعات جاگذاری شده در پارامترها، مدل نوشته‌شده به روش الپمتریک در نرم‌افزار GAMZ حل گردید و جواب متغیرها به دست آورده شد. نتایج حل مدل در نرم‌افزار مطابق جدول (۳) می‌باشد.

TFPOp: هزینه ثابت استقرار بارانداز جدید  $p \in P$  ،  $TFPO_1 = 200000000$  تومان.

IPml: فاصله بین معدن  $m \in M$  و کارخانه فرآوری  $IEl$  و  $IP_1 = 0/500$

$IP_2 = 1/500$  کیلومتر.

IPOlp: فاصله بین کارخانه فرآوری  $IEl$  و بارانداز معدن  $p \in P$  ،  $IPO_1 = 0/250$  کیلومتر.

ICpc: فاصله بین بارانداز  $p \in P$  و مشتری  $c \in C$  ،  $IC_1 = 40$  و  $IC_2 = 50$  کیلومتر.

FPI: فاکتور بازفرآوری مواد معدنی در کارخانه  $IEl$  ،  $FP_1 = 20$  .

FWI: فاکتور ضایعات مواد معدنی در بازفرآوری کارخانه  $IEl$  ،  $FW_1 = 21$  .

Fmax: حداکثر تعداد کارخانه فرآوری که جاگذاری می‌شود،  $Fmax = 1$  .

ymax: حداکثر تعداد بارانداز که باید نصب شود،  $ymax = 1$  .

Mmax: حداکثر تعداد معدنی که باید باز شود،  $Mmax = 2$  .

EFPlml: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول از تسهیلات  $m \in M$  به فرآوری کارخانه  $IEl$  ،  $EFPI_1 = 0/050$  کیلوگرم تن کیلومتر و  $EFPI_2 = 0/074$  کیلوگرم تن کیلومتر.

EFPOllp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین فرآوری کارخانه  $IEl$  به بارانداز  $p \in P$  ،  $EFPO_1 = 0/111$  کیلوگرم در هر تن کیلومتر.

EFWPOLlp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین فرآوری کارخانه  $IEl$  به بارانداز  $p \in P$  ،  $EFWPOL_1 = 0/119$  کیلوگرم در هر تن کیلومتر.

EFCpc: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین بارانداز  $p \in P$  به مشتری  $c \in C$  ،  $EFC_1 = 0/0402$  .

EFWCpc: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین بارانداز  $p \in P$  به مشتری  $c \in C$  ،  $EFWC_1 = 0/0344$  .

جدول (۳): نتایج حل مدل به روش الیمتریک

----	288 VARIABLE Z1.L	= 4.546992E+9			
	VARIABLE Z2.L	= 188565.370			
	VARIABLE Z3.L	=13146.000			
	VARIABLE Zf L	= 4.061507E+8			
----	288 VARIABLE A.L				
	m1 1.000, m2 1.000				
----	288 VARIABLE B.L				
	l1 1.000				
----	288 VARIABLE O.L				
	p1 1.000				
----	288 VARIABLE K.L				
	l1				
	m2 35000.000				
----	288 VARIABLE LL.L				
	p1				
	l1 26180.000				
----	288 VARIABLE MM.L				
	c1				
	n1.p1 26180.000				
----	288 VARIABLE rr.L				
	l1 7000.000				
----	288 VARIABLE OO.L				
	s1				
	p1.c2 8820.000				
----	288 VARIABLE U1.L				
	l1 1470.000				
----	288 VARIABLE U2.L				
	m2				
	l1 7350.000				
----	288 VARIABLE W.L				
	p1				
	l1 8820.000				
----	288 VARIABLE d_Plus.L				
	q2 q3 q4 q5				
	n1 28.000 4382.000 4382.000 3500.000				
----	288 VARIABLE d_Mines.L				
	q1				
	n1 854.000				

## ۷- بحث در مورد نتایج

می‌کند. به منظور دستیابی به رویکرد پایدار، به حداقل رساندن مصرف انرژی و به حداکثر رساندن سود در توابع هدف مدل و الزامات سطح خدمات در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، به دلیل الزامات واقعی، هزینه ثابت در حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. نتایج اصلی اثبات می‌کند که رویکرد حلقه بسته پایدار می‌تواند با موفقیت در صنعت معدن اجرا شود. نتیجه اصلی این مطالعه به‌ویژه در مورد مطالعه موردی نشان می‌دهد که زنجیره تأمین حلقه بسته معادن سنگ تزئینی می‌تواند هم سودآور و هم شدنی باشد.

اما در مطالعه حاضر یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت پسماند زنجیره تأمین پایدار در صنایع معدنی ارائه شده است که ابعاد اقتصادی و محیط‌زیستی این مدل و همچنین افزایش کارایی فرآیند کارخانه با کاهش انحراف کیفیت محصول معیارهایی هستند که در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه در حین تولید محصول معدنی پسماند نیز تولید می‌گردد با استفاده از پسماند و وارد کردن آن در زنجیره تأمین، حمل و ارسال آن به مشتری می‌تواند تأثیر قابل توجهی در سوددهی صنایع معدنی و حفظ محیط‌زیست می‌تواند داشته باشد.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد طبق درخواست مشتری از محصول و پسماند چه هزینه‌ای با توجه به هزینه‌های ثابت و هزینه‌های حمل‌ونقل صرف تولید محصول و پسماند جهت ارسال آن به مشتری می‌گردد و چه مقدار گاز  $CO_2$  تولید می‌شود و همچنین مقدار انحراف‌های کلی از اهداف کیفی هر پارامتر بین مواد معدنی استخراجی از معدن و محصول تحویلی به مشتری چه میزان می‌باشد.

برای مطالعات آتی در خصوص این تحقیق می‌توان با جدا کردن حالت حمل‌ونقل با استفاده از متغیرهای تصمیمی که با انتخاب نوع حمل‌ونقل استفاده شده بین هر جفت کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد به مطالعه پرداخته شود که تأثیر مستقیمی بر آلودگی تولیدشده و هزینه دارد. در این مطالعه دو تا از ابعاد پایداری مورد بررسی قرار گرفته شده است که می‌توان برای مطالعات آتی ابعاد اجتماعی مورد بررسی قرار گیرد.

همان‌طور که از حل مدل مشخص است برای پاسخ به تقاضای مشتری اول به مقدار ۲۶۱۸۰ تن سنگ بالاست و مشتری دوم به مقدار ۸۸۲۰ تن پسماند (بیس)، مدل با حداقل نمودن هدف اول یعنی هزینه کل سرمایه‌گذاری و حمل‌ونقل به جواب ۴۵۴۶۹۹۲۰۰۰ تومان رسیده است. با حداقل نمودن سطح آلودگی  $CO_2$  در فرآیند تولید و حمل‌ونقل به جواب ۱۸۸۵۶۵/۳۷۰ کیلوگرم تولید گاز  $CO_2$  رسیده است و همچنین به منظور بهینه‌سازی کارایی کارخانه با کاهش انحرافات پارامترهای کیفی اهداف، اقدام به کمینه‌سازی آن‌ها نموده که نتیجه آن بهینه‌سازی هر کدام از پارامترهای کیفی بین مواد معدنی استخراج شده و محصول ارسالی به مشتری می‌شود که نتیجه آن ۱۳۱۴۶ تن می‌شود.

## ۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این فصل به بررسی نتیجه تحقیق انجام شده در خصوص طراحی و بهینه‌سازی یک مدل مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پایدار در صنایع معدنی پرداخته می‌شود؛ و نتیجه به‌دست‌آمده در این تحقیق را با نتایج به‌دست‌آمده توسط بوستوس و همکاران (۲۰۱۷) همچنین با نتایج مقاله‌ای با عنوان یک مدل زنجیره تأمین پایدار جدید برای صنایع معدنی با در نظر گرفتن حمل‌ونقل با هزینه ثابت که مطالعه موردی آن در خصوص معدن سنگ تراورتن می‌باشد که توسط سلیمانی (۲۰۱۸) نوشته شده است به مقایسه پرداخته می‌شود.

بوستوس و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل سه هدفه طراحی نمودن که دارای سه هدف اقتصادی و محیط‌زیستی و کیفی بود. آن‌ها مدل به‌دست‌آمده را یک‌بار با روش فرا ابتکاری MOPSO و یک‌بار با روش محدودیت اپسیلون حل کردند و نتایج نشان داد که روش MOPSO در حل زمانی که تعداد نمونه افزایش پیدا می‌کند سرعت عمل بیشتری دارد. سلیمانی (۲۰۱۸) مدلی را با تمرکز بر روی سنگ‌های تزئینی ارائه کرد، مراکز بازیافت نقش مهمی در جمع‌آوری، فرآوری و فروش ضایعات و پایان چرخه عمر سنگ‌ها بازی

- management", *Waste Management*, 30: PP 1720–1728, 2010.
- [10]Zhang, Q., Shah, N., Wassick, J., Helling, R., Egerschot, P., "Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study", *Computers & Industrial Engineering*, 74: PP 68–83, 2014.
- [11]Gan, V., Cheng, J., "Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling", *Advanced Engineering Informatics*, 29: PP 878-888, 2015.
- [12]Mathiyazhagan, K., Diabat, A., Al-Refaie, A., Xu L., "Application of analytical hierarchy process to evaluate pressures to implement green supply chain management", *Journal of Cleaner Production*, 107: 229-236, 2015.
- [13]Sauer P, C., Seuring, S., "Sustainable supply chain management for minerals", *Journal of Cleaner Production*, 151: PP 235-249, 2017.
- [14]Chand, P., Thakkar, J., Ghosh, K., "Analysis of supply chain complexity drivers for Indian mining equipment manufacturing companies combining SAP-LAP and AHP", *Resources Policy*.59: PP 389-410, 2018
- [15]Fattahia, M., Mosadegh, H., Hasania, A, "Sustainable planning in mining supply chains with renewable energy", *journal of Resources Policy*, 2018.
- [16]Arab, R., "A review of optimization methods with emphasis on multi-objective optimization. Computer Simulation Application Seminar in Civil Engineerin", University of Khaje Nasiruddin Tusi, 2005.
- [17]Bozorgi Amiri, A., Jebel Ameli, M.S., Heidari, M., Karimi Rad, Z., "Providing a single-objective feasibility planning approach for humanitarian logistics modeling", *Tomorrow's Issue of Management Science* No. 25. PP 83-96, 2010.
- [1]Avakh Darestani, S., Hemmati, M., "Robust Optimization of a bi-objective closed-loop supply chain network for perishable goods considering queue system", *Computers & Industrial Engineering*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.018>
- [2]Cowell, S. J., Parkinson, S., "Localization of UK food production: an analysis using land area and energy as indicators", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 94: PP 221-236, 2003.
- [3]Carter, C. R., Rogers, D. S., "A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory", *International journal of physical distribution & logistics management*, 38: 360-387, 2008.
- [4]Bustos L, C., Gonzalez E, S., Vejar A, C., "A multi-objective optimization model for the design of an effective decarbonized supply chain in mining". *International Journal of Production Economics*. 193: PP 449–464, 2017.
- [5]Soleimani, H., "A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: A case study in a travertine quarry". *The International Journal of Minerals Policy and Economics*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.07.006>
- [6]Waters .M, John, Selig, Ernest. T., "Track Geotechnology & Substructure Management", 1994.
- [7]Helmi, F., "Specialized Glossary of Stones", Amirkabir Publications Institute, 2006.
- [8]Norgate, T.,Haque, N., "Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations", *Journal of Cleaner Production*, 18: PP 266–274, 2009.
- [9]Galante, G., Aiello, G., Enea, M, Panascia, E., "A multi-objective approach to solid waste



طراحی و بهینه‌سازی یک مدل مدیریت پسماند...