مقاله کاربردی

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

وحید عباس زاده نرمیقی[۱]، سروش آوخ دارستانی[۲*]، حامد سلیمانی [۳]، رعنا ایمان نژاد [۴]

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 گرفته‌شده 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

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

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. ایمیل:Vahidabbaszade65@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

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

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. درنتیجه 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 بعدازاین دهه به جنبه‌های غیراقتصادی فعالیت‌های توسعه‌ای توجه شد تا اینکه در دهه ۱۹۸۰ مفهوم «توسعه پایدار[1]» مطرح شد. به‌طورکلی توسعه پایدار توسعه‌ای است که هم‌زمان سه بعد محیطی، اقتصادی و اجتماعی در آن در نظر گرفته‌شده 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 تعریف‌شده 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 آلایندگی‌های 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 آلایندگان 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 درنتیجه 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)[2] باهدف کمینه‌سازی هزینه (حداکثر سازی سود) یک مشکل استراتژیک شناخته‌شده است که با ارائه مدلی که شامل سه هدف اقتصادی، محیط‌زیستی، فناوری است این مشکل را برطرف نمود[۴].

صنایع معدنی به‌طورکلی و معدن سنگ مخصوص به

وظایف عمده بالاست به قرار زیر است:

- تحمل نیروهای قائم، افقی و جانبی وارده بر تراورس ها 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 درواقع، یک معدن سنگ در نظر گرفته‌شده است و یک شبکه حلقه بسته برای تعیین راهکارهای مناسب برای دفع ضایعات سنگ و پایان عمر سنگ ساختمان‌ها ارائه‌شده است. در معدن،

1-Sustainable Development
2-Supply Chain Network Design

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 تراورس ها، ریل‌ها و ادوات بر روی آن قرارگرفته 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 باصرفه 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[1] 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 درزمینه 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 Co2 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 ازجمله مسائل با درجه غیر چندجمله‌ای (NP-Hard) هستند، به‌صورت تقریبی با کامپیوترهای موجود قابل‌حل می‌باشند. ازجمله راه‌حل‌های موجود در برخورد با این‌گونه مسائل، استفاده از 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 داده‌شده است و در بخش ۵ و بخش ۶ مطالعه موردی این مقاله، ارزیابی عددی مربوطه ارائه‌شده است و در بخش ۷ و بخش ۸ بحث درباره نتایج و نتیجه‌گیری و پیشنهادات تحقیقات آینده نشان داده‌شده است.

۲- مرور ادبیات

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

نورگیت و هاکو[2] (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 رسیدن 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

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].

گالانته و همکاران[1] (۲۰۱۰) مکان و ابعاد ایستگاه‌های انتقال که سطح متوسط لازم را در زنجیره لجستیک جریان پسماند جامد را تشکیل می‌دهند را موردتوجه قرار داده‌اند. تعیین تعداد و نوع وسایل نقلیه مورداستفاده 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 موردبررسی قرار می‌دهد[۹].

ژانگ و همکاران[2] (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 مورداستفاده قرار دادند که نتایج نشان داده که با افزایش نسبتاً کمی در هزینه‌ها می‌توان کاهش قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و زمان بین شروع و پایان فعالیت‌ها داشت. چارچوب پیشنهادی قادر می‌سازد تا روابط تجاری را تعیین کنند و درنتیجه تصمیمی بگیرند که عملکرد پایدار زنجیره تأمین را بهبود بخشند[۱۰].

گان و چنگ[3] (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 تجزیه‌وتحلیل 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[4] (۲۰۱۷) یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه را برای طراحی زنجیره تأمین کاهش انتشار Co2 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 Co2 از طریق حمل‌ونقل و عملیات اجرایی ۳- هدف فناوری از طریق کارایی فرآیند کارخانه می‌باشد. این مسئله به روش فرا ابتکاری MOPSO[5]حل گردید و جواب به‌دست‌آمده با روش محدودیت اپسیلون[6] مورد مقایسه قرار گردید و نتیجه نشان داد که روش فرا ابتکاری بهتر از روش محدودیت اپسیلون می‌باشد[۴].

ماتیاژاگان و همکاران[7] (۲۰۱۷) در این مقاله تلاش کردن به مدیران کمک می‌کنند تا فشار اولیه را در میان‌فشارهای موجود برای تصویب زنجیره تأمین سبز GSCM[8] شناسایی کنند. رتبه‌بندی این فشارها بر اساس نظر متخصصان از طریق یک روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP[9]) درزمینه معدن و صنایع معدنی می‌باشد[۱۲].

سائر و سیورینگ[10] (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[11] 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 Managemen
9- Analytical Hierarchy process
10- Sauer & Seuring
11- The sustainable supply chain management

چاند و همکاران[1] (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[2] رانندگان به دلیل ذهنیت رانندگان، از تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM[3]) 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 (lap-SAP[4][5]) 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 موردبررسی قرارگرفته 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 اجراشده 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، انجام‌شده است[۱۵].

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

بوستوس و همکاران[6] (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[7] (۲۰۱۸) مدلی را با تمرکز بر روی سنگ‌های تزیینی 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. درواقع مدل جامع و مناسبی که بتواند تمامی معیارها را پوشش دهد دیده نمی‌شود. در پژوهش حاضر تلاش شده است علاوه بر تمامی اهداف ذکرشده 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 آلایندگی محیط‌زیست را به همراه دارد در این تحقیق نه‌تنها 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

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 بهینه یابی 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 ازاین‌روش‌هایی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چندهدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم‌های چندهدفه مورداستفاده قرارگرفته است. روش مبتنی بر پارتو می‌باشد. یک مفهوم مهم درروش 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 دریکی از توابع هدف از جواب j بدتر باشد.

یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$Min\ or\ Max\ f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots fk(\quad (1)$$
$$s.t.$$
$$g_i(x) \leq or \geq or\ = 0; 1,2,3, \dots, m$$

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 این‌گونه 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 به‌عنوان مقاله پایه استفاده‌شده است در این مقاله سه هدف برای بهینه‌سازی و کمینه کردن مدل مورداستفاده قرار گرفت شامل ۱- کمینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری جهت استخراج سنگ معدنی و تولید محصول ۲- کمینه کردن تولید گاز Co2 در حین فرآیند استخراج سنگ معدنی و تولید محصول ۳- کمینه کردن انحراف از کیفیت محصول می‌باشد با بررسی که بر روی مواد معدنی مورداستفاده در صنعت و جامعه متوجه گردید که در بعضی از مواد معدنی پسماند یا ضایعات می‌تواند مورد تقاضای مشتری قرار گیرد درنتیجه می‌توان در مدل ارائه‌شده توسط بوستوس و همکاران اثر تولید، حمل و ارسال پسماند به مشتری را در هزینه سرمایه‌گذاری و تولید گاز Co2 موردبررسی قرارداد. ازجمله 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 تولیدشده در فرآوری کارخانه.
- انحراف از کیفیت محصول.

۲-۳- فرضیه‌های تحقیق

- مقدار هر محصول موردنظر باید برآورده شود.
- محصولات خانواده‌های مختلف به‌عنوان 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.

• امکانات نمی‌تواند مقدار بیشتری ازآنچه دریافت می‌کنند ارسال کنند (موجودی مجاز نیست).
• امکانات محدودیت ظرفیت دارند.
• تعداد امکانات موجود در هر بخش با مقادیر از پیش تعیین‌شده محدودشده است.
• در میان تسهیلات در همان ستون جریان وجود ندارد.

$$COI: \sum_{m\in M} TFM\,m \times Am + \sum_{l\in L} TF\,Pl \times Bl + \sum_{p\in P} TFPO\,p \times Op \quad (2)$$

$$COI: \sum_{m\in M}\sum_{l\in L} EOP\,ml \times IPml \times Kml + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} EOPO\,nlp \times IPOlp \times LLlp + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} EOWPO\,LP \times IPOlp \times Wlp + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C}\sum_{n\in N} EOC\,npc \times ICpc \times MMnpc + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C} EOWC\,pc \times ICpc \times OOspc$$

$$COI: Minimize\ COI + COT$$

(۲) اهداف محیط‌زیستی

$$EBT: \sum_{m\in M}\sum_{l\in L} EFP\,ml \times IPml \times Kml + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} EFPO\,lp \times IPOlp \times LLlp + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} EFWPO\,lp \times IPOlp \times Wlp + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C}\sum_{n\in N} EFC\,pc \times ICpc \times MMnpc + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C}\sum_{s\in S} EFWC\,pc \times ICpc \times OOspc \quad (3)$$

۳-۳- مدل ریاضی مسئله

مدل‌سازی اهداف مدل ریاضی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

(۱) اهداف اقتصادی

$$\text{EOP: } \sum_{m\in M}\sum_{l\in L} \text{EFM m} \times \text{Kml} + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} \text{EFP l} \times \text{LLlp} + \sum_{l\in L}\sum_{p\in P} \text{EFWP l} \times \text{Wlp} + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C}\sum_{n\in N} \text{EFPO p} \times \text{MMnpc} + \sum_{p\in P}\sum_{c\in C}\sum_{s\in S} \text{EFWPO p} \times \text{OOspc}$$

$$\boldsymbol{Minimize\ EBT + EOP}$$

(۳) هدف کارایی

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

(۴) محدودیت‌ها

$$\sum_{m\in M} K\,ml \le VPl \times Bl \quad (5)$$

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

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

$$F\,W_l \times rr_l = U1_l$$

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

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

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

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

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

$$\sum_{p\epsilon P} OO_{pc}^{s} = DW_{c}^{s}$$

$$\sum_{m\epsilon M}\sum_{l\epsilon L} QM1_{m}^{q} \times K_{ml} - \sum_{n\epsilon N} d_{nq}^{+} + \sum_{n\epsilon N} d_{nq}^{-} = \sum_{c\epsilon C}\sum_{n\epsilon N} QM2_{c}^{nq} \times \sum_{p\epsilon P} MM2_{pc}^{n}$$

$$\sum_{l\epsilon L} B_1 \le F_{Max}$$

$$\sum_{p\epsilon P} Q_p \le Y_{Max}$$

$$\sum_{m\epsilon M} A_m \le M_{Max}$$

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

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

$$U_2, U_l, rr_l \ge 0$$

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

۴-۳- شاخص‌ها

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

L: مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای کارخانه فراوری $l\epsilon L$.

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

C: مجموعه‌ای از مشتری‌ها $c\epsilon C$.

N: مجموعه‌ای از محصولات $n\epsilon N$.

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

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

۵-۳. 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 $l\epsilon L$.

$VP2_p$: ظرفیت کل بارانداز $p\epsilon P$.

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

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

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

EOC_{PC}: هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از بارانداز $p\epsilon P$ به مشتری $c\epsilon C$.

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

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

TFP_l: هزینه ثابت استقرار کارخانه فراوری در مکان کاندید $l\epsilon L$.

$TFPO_p$: هزینه ثابت استقرار بارانداز جدید $p\epsilon P$.

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

IPO_{lp}: فاصله بین کارخانه فرآوری $l\epsilon L$ و بارانداز‌معدن $p\epsilon P$.

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

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

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

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 Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول از تسهیلات $m\epsilon M$ به فرآوری کارخانه $l\epsilon L$.

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

$EFWPO_{lp}$: 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 $c\epsilon C$.

۶-۳. 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 $l\epsilon L$ ۱در 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 $c\epsilon C$.

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

EFP_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 می گردد. هزینه اجرای عملیات تولید در معدن طبق مطالعات انجام شده مشخص می گردد. سپس پس از انجام محاسبات لازم، مجموع هزینه های ثابت مشخص گردیدکه در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول (۱): مجموع هزینه های ثابت

هزینه ثابت	مجموع هزینه
هزینه ثابت بازکردن معدن برای معدن M۱ و M۲	۴۰۳۵۰۰۰۰۰ تومان
هزینه ثابت استقرار کارخانه فرآوری در مکان کاندید	۱۵۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان
هزینه ثابت اسقرار بارانداز	۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان

پس از محاسبه های هزینه های ثابت، محاسبات مربوط به زمان رفت و برگشت (دقیقه) ، زمان لازم جهت بارگیری (دقیقه)، زمان جهت بارانداز (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 درهر تن. کیلومتر ازحمل‌ونقل مصالح از معدن M۱ به کارخانه	۰/۰۵۰
میزان Co2 تولیدی درهر تن. کیلومتر ازحمل‌ونقل مصالح از معدن M۲ به کارخانه	۰/۰۷۴
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) حاصل از حمل ونقل محصول از کارخانه به بار انداز	۰/۱۱۱
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل‌ونقل پسماند از کارخانه به بارانداز	۰/۱۱۹
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل‌ونقل محصول از بارانداز به مشتری	۰/۰۴۰۲
میزان Co2 تولیدی در هر (تن. کیلومتر) از حمل‌ونقل پسماند از بارانداز به مشتری	۰/۰۳۴۴
میزان Co2 تولیدی در هر تن از فرآیند تولید مصالح در معدن M۱ و M۲ (کیلوگرم)	۱/۹۵
میزان Co2 تولیدی در هر تن پسماند تولید شده در در معدن M۱ و M۲ (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

درصد کیفیت پارامتر $q\epsilon Q$ از مواد معدنی در معدن $m\epsilon M$ (m۱ و m۲) به شرح زیر می‌باشد:

$\boldsymbol{q_1}$: رنج دانه‌بندی ۱۰-۴۰ cm ٪۲۰

$\boldsymbol{q_2}$: رنج دانه‌بندی ۴۰-۶۰ cm ٪۳۰

$\boldsymbol{q_3}$: رنج دانه‌بندی ۶۰-۸۰ cm ٪۲۰

$\boldsymbol{q_4}$: رنج دانه‌بندی ۸۰-۱۰۰ cm ٪۲۰

$\boldsymbol{q_5}$: رنج دانه‌بندی ۱۰۰-۱۲۰ cm ٪۱۰

درصد کیفیت پارامتر $q\epsilon Q$ از تقاضای محصول $\boldsymbol{n_1}$ توسط مشتری $\boldsymbol{c_1}$ به شرح زیر می‌باشد:

$\boldsymbol{q_1}$:: رنج دانه‌بندی ۱۰-۴۰ cm ٪۳۰

$\boldsymbol{q_2}$: رنج دانه‌بندی ۴۰-۶۰ cm ٪۴۰

$\boldsymbol{q_3}$: رنج دانه‌بندی ۶۰-۸۰ cm ٪۱۰

$\boldsymbol{q_4}$: رنج دانه‌بندی ۸۰-۱۰۰ cm ٪۱۰

$\boldsymbol{q_5}$: رنج دانه‌بندی ۱۰۰-۱۲۰ cm ٪ ۰

با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده این اطلاعات را در پارامترها جاگذاری می‌گردد.

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

L: مجموعه ای از مکان‌های کاندید برای کارخانه فراوری $l\epsilon L$. $l = 1$

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

C: مجموعه ای از مشتری ها $c\epsilon C$. $C = 2$

N: مجموعه ای از محصولات $n\epsilon N$. $N = 1$

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

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

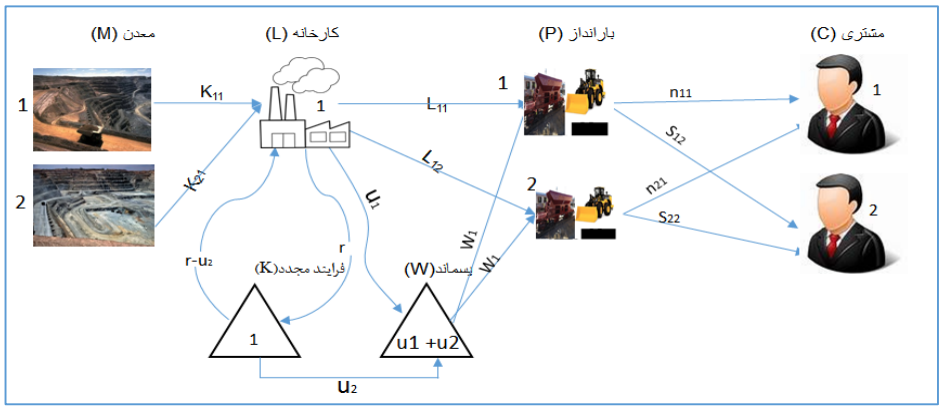
مدلی سه هدفه را برای حل این مسئله تعریف گردید که دارای اهداف اقتصادی، محیط‌زیستی و کیفی می‌باشد مدل موردنظر طراحی شد و در ادامه شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل مشخص گردید و سپس برای حل مدل نیاز به جمع‌آوری اطلاعات برای شاخص‌ها و پارامترها بود که برای به دست آوردن این اطلاعات با مراجعه به معدن سنگ بالاست 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 جمع‌آوری‌شده 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.

شکل (۱): تصاویر ماهواره‌ای

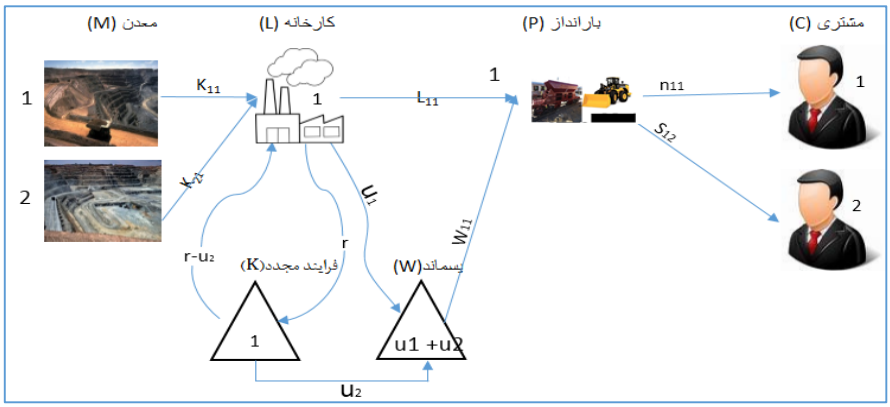
نحوه استخراج سنگ بالاست به این صورت می‌باشد، مواد معدنی در معدن بالاست توسط ماشین‌آلات معدنی تولید می‌شوند و سپس به کارخانه فرستاده می‌شود تا فرایندهای خردایش و سرند روی آن انجام شود تا به کیفیت موردنظر برسد در این مرحله بخشی از مواد خام ارسال‌شده به کارخانه به سنگ بالاست و بخشی دیگر به پسماند تبدیل می‌شود و درنهایت طبق درخواست و نیاز مشتری سنگ بالاست یا پسماند موردتقاضا به بارانداز ارسال‌شده و از این بخش به مشتری فرستاده می‌شود که مراحل در شکل ۱ نمایش داده‌شده است:



شکل (۲): مراحل استخراج سنگ بالاست

فاصله دو معدن M۱ و M۲ 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 پس‌ازآنکه 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 معادن 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 موردنیاز برای راه‌اندازی کارخانه توسط یک ژنوراتور ۲۰۰ Kv تأمین می‌گردد در عملیات‌های انجام‌شده 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 بارانداز 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.



شکل (۳): عملیات خردایش و سرند

به دلیل این که در این صنعت استفاده از پسماند می‌تواند باعث درآمدزایی برای معدن باشد؛ و نیز کاهش آلایندگی محیط‌زیست را به همراه دارد در این تحقیق نه‌تنها به دنبال بهینه‌سازی مقدار تولید هستیم بلکه می‌توان با مدیریت درست مقادیر پسماند سوددهی زنجیره تأمین را به حداکثر برسانیم.

۶-جمع آوری اطلاعات و مطالعه عددی

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

پارامتر های کیفیت برای محصول اول n۱: بالاست و میزان دانه‌بندی محصول در معدن M1 و M2برابر است با:

q_1: میزان دانه‌بندی ۱۰-۴۰cm
q_2: میزان دانه‌بندی ۴۰-۶۰cm
q_3: میزان دانه‌بندی ۶۰-۸۰cm
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 $m\epsilon M$. Rm۱ =۳۵۰۰۰۰۰، ۳۵۰۰۰۰۰ = Rm ۲.

DNC: مقدار تقاضا از یک محصول n۱ توسط مشتری C۱ D۱۱ = ۲۶۱۸۰ تن.

DWSC: مقدار تقاضا از برای پسماند S۱ توسط مشتری C۲، DW۱۲ = ۸۸۲۰ تن.

VP1l: ظرفیت فرآیند مواد معدنی در کارخانه مستقر در $I\epsilon l$ ، VP1l=۴۰۰۰۰ تن.

VP2P: ظرفیت کل بارانداز $p\epsilon P$ ، VP2P= ۳۳۰۰۰ تن.

EOPml: هزینه حمل‌ونقل تن/ کیلومتر از تسهیلات معدن $m\epsilon M$ به کارخانه فرآوری $I\epsilon l$ ، EOP۱۱= ۶۰۰ و EOP= ۱۸۰۰ ۲۱ تومان.

EOPOlP: هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از کارخانه فرآوری $I\epsilon l$ به بارانداز $p\epsilon P$ ،

EOPO۱۱=۳۰۰ تومان.

EOWPOlP: هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از کارخانه $I\epsilon l$ به بارانداز $p\epsilon P$ ، EOWPO۱۱ =۳۰۰ . تومان.

EOCPC: هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر از بارانداز $p\epsilon P$ به مشتری $c\epsilon C$ ،

EOC۱۱ =۹۶ تومان.

EOWCPC: هزینه حمل‌ونقل تن/کیلومتر ضایعات از بارانداز $p\epsilon P$ به مشتری $c\epsilon C$

EOWC۱۲=۹۶ تومان.

TFMm: هزینه ثابت بازکردن تسهیلات معدن جدید $m\epsilon M$ ،

TFM۱= ۴۰۳۵۰۰۰۰۰ تومان و TFM۲= ۴۰۳۵۰۰۰۰۰ تومان.

TFPl: هزینه ثابت استقرار کارخانه فراوری در مکان کاندید $I\epsilon l$ ، TFP۱ =۱۵۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان.

TFPOp: هزینه ثابت استقرارباراندار جدید $p\epsilon P$ ، TFPO۱=۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان.

IPml: فاصله بین معدن $m\epsilon M$ و کارخانه فرآوری $I\epsilon l$ ، IP۱۱= ۰/۵۰۰ و

IP۲۱= ۱/۵۰۰ کیلومتر.

IPOlp: فاصله بین کارخانه فرآوری $I\epsilon l$ و بارانداز معدن $p\epsilon P$ ، IPO۱۱=۰/۲۵۰ کیلومتر.

ICpc: فاصله بین بارانداز $p\epsilon P$ و مشتری $c\epsilon C$ ، IC۱۱=۴۰ و IC۱۲=۵۰ کیلومتر.

FPl: فاکتور بازفرآوری مواد معدنی در کارخانه $I\epsilon l$ ، FP۱=٪۲۰.

FWl: فاکتور ضایعات مواد معدنی در بازفرآوری کارخانه $I\epsilon l$ ، FW۱=٪۲۱.

Fmax: حداکثر تعداد کارخانه فرآوری که جاگذاری می‌شود، Fmax=۱ .

ymax: حداکثر تعداد بارانداز که باید نصب شود، ymax=۱ .

Mmax: حداکثر تعداد معدنی که باید باز شود، Mmax=۲ .

EFPlml: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول از تسهیلات $m\epsilon M$ به فرآوری کارخانه $I\epsilon l$ ، EFPl۱۱=۰/۰۵۰ کیلوگرم تن. کیلومتر و EFPl۲۱=۰/۰۷۴ کیلوگرم تن. کیلومتر.

EFPOllp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین فرآوری کارخانه $I\epsilon l$ به بارانداز $p\epsilon P$ ، EFPOl۱۱=۰/۱۱۱ کیلوگرم در هر تن. کیلومتر.

EFWPOLlp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین فرآوری کارخانه $I\epsilon l$ به بارانداز $p\epsilon P$ ، EFWPOL۱۱=۰/۱۱۹ کیلوگرم در هر تن. کیلومتر.

EFCpc: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل محصول بین بارانداز $p\epsilon P$ به مشتری $c\epsilon C$ ، EFC۱۱=۰/۰۴۰۲.

EFWCpc: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن کیلومتر از حمل‌ونقل ضایعات بین بارانداز $p\epsilon P$ به مشتری $c\epsilon C$ ، EFWC۱۱ =۰/۰۳۴۴ .

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

EFM۱=۱/۹۵ و EFM۲=۱/۹۵ کیلوگرم در هر تن.

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

$I\epsilon l$ EFP۱= ۰/۹۱ کیلوگرم در هر تن.

EFWPl: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولید که باعث تولید ضایعات درپیش فرآوری تسهیلات $I\epsilon l$ ، ۰/۹۱ =EFWP۱ کیلوگرم در هر تن.

EFPOp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از فرآیند تولیدی محصول در بارانداز $p\epsilon P$ ، EFPO۱=۰/۷۳۹ کیلوگرم در هر تن.

EFWPOp: فاکتور آلودگی Co2 در هر تن از ضایعات تولیدی در بارانداز $p\epsilon P$ ، EFWPO۱=۰/۷۹۱ کیلوگرم در هر تن.

QM1qm: درصد٪ کیفیت پارامتر $q\epsilon Q$ از مواد خام ROM معدنی در معدن $m\epsilon M$ در معدن m۱ و m۲.

q_1: رنج دانه‌بندی ۱۰-۴۰ cm ٪۲۰

q_2: رنج دانه‌بندی ۴۰-۶۰ cm ٪۳۰

q_3: رنج دانه‌بندی ۶۰-۸۰ cm ٪۲۰

q_4: رنج دانه‌بندی ۸۰-۱۰۰ cm ٪۲۰

q_5: رنج دانه‌بندی ۱۰۰-۱۲۰ cm ٪۱۰

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

q_1: رنج دانه‌بندی ۱۰-۴۰ cm ٪۳۰

q_2: رنج دانه‌بندی ۴۰-۶۰ cm ٪۴۰

q_3: رنج دانه‌بندی ۶۰-۸۰ cm ٪۱۰

q_4: رنج دانه‌بندی ۸۰-۱۰۰ cm ٪۱۰

q_5: رنج دانه‌بندی ۱۰۰-۱۲۰ cm ٪ ۰

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

جدول (۳): نتایج حل مدل به روش الپیمتریک

---- 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

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 Co2 در فرآیند تولید و حمل‌ونقل به جواب ۱۸۸۵۶۵/۳۷۰ کیلوگرم تولید گاز Co2 رسیده است و همچنین به‌منظور بهینه‌سازی کارایی کارخانه با کاهش انحرافات پارامترهای کیفی اهداف، اقدام به کمینه‌سازی آن‌ها نموده که نتیجه آن بهینه‌سازی هرکدام از پارامترهای کیفی بین مواد معدنی استخراج‌شده و محصول ارسالی به مشتری می‌شود که نتیجه آن ۱۳۱۴۶ تن می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این فصل به بررسی نتیجه تحقیق انجام‌شده 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) نوشته‌شده 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 تزیینی ارائه کرد، مراکز بازیافت نقش مهمی در جمع‌آوری، فرآوری و فروش ضایعات و پایان چرخه عمر سنگ‌ها بازی می‌کند. 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. علاوه بر این، به دلیل الزامات واقعی، هزینه ثابت در حمل‌ونقل در نظر گرفته‌شده است. نتایج اصلی اثبات می‌کند که رویکرد حلقه بسته پایدار می‌تواند با موفقیت در صنعت معدن اجرا شود. نتیجه اصلی این مطالعه به‌ویژه در موردمطالعه موردی نشان می‌دهد که زنجیره تأمین حلقه بسته معادن سنگ تزیینی می‌تواند هم سودآور و هم شدنی باشد.

اما در مطالعه حاضر یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت پسماند زنجیره تأمین پایدار در صنایع معدنی ارائه‌شده 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 گرفته‌شده‌اند. با توجه به اینکه در حین تولید محصول معدنی پسماند نیز تولید می‌گردد با استفاده از پسماند و واردکردن آن در زنجیره تأمین، حمل و ارسال آن به مشتری می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی 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 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.

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

۹-منابع و مأخذ

[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 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.