مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۱-۳۸، شماره‌ی ۱، ص. ۸۱-۹۴، (پژوهشی)

Original Article

بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته طلا با تأکید بر مسئولیت‌های اجتماعی در شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: کارخانه طلای زرشوران)

محسن شفیعی نیکابادی* **(دانشیار)**
علیرضا مقدم (استادیار)
مرتضی خیری (کارشناس ارشد)
هانیه شامبیاتی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان

اهمیت مدیریت زنجیره‌ی تأمین، به‌ویژه در معادن، بدان سبب است که پیاده‌سازی موفق زنجیره موجب کم‌تر شدن هزینه‌ها، افزایش سود و بهره‌وری و کاهش ریسک می‌شود. استحصال این معادن و فرآوری محصولات معدنی با وجود تأثیرات مثبت در اقتصاد و ایجاد اشتغال، آثار منفی بسیاری بر محیط زیست نیز دارد. ضرورت توجه به اثرات مثبت اقتصادی و اجتماعی و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی زنجیره‌های تأمین در صنایع معدنی، محققین را به سمت مدل‌سازی مسئولیت‌های اجتماعی سوق داده است. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین معدن طلای زرشوران با هدف بیشینه‌سازی هم‌زمان سود اقتصادی و مسئولیت‌های اجتماعی در شرایط عدم قطعیت با استفاده از دو الگوریتم‌های فراابتکاری است. نتایج نشان داد که ارتباط معکوسی میان سود اقتصادی زنجیره‌ی تأمین و مسئولیت‌های اجتماعی شرکت وجود دارد. تجزیه و تحلیل حساسیت ظرفیت فروش طلا نشان داد که با افزایش فروش، سود اقتصادی و مسئولیت اجتماعی افزایش می‌یابد. در حقیقت، با افزایش تولید، میزان تولید گازهای گلخانه‌یی و میزان تولید خاک باطله و همچنین میزان مصرف آب افزایش می‌یابد، اما مزایای رفاهی تقسیم شده در منطقه و اشتغال ایجاد شده بر این عوامل منفی غلبه می‌کند و منجر به افزایش مسئولیت اجتماعی می‌شود.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایدار، مسئولیت اجتماعی، زنجیره‌ی تأمین طلا، صنایع معدنی، عدم قطعیت.

shafiei@semnan.ac.ir
moghaddam@semnan.ac.ir
kheyrimorteza@gmail.com
h.shambayati@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

در دنیای کنونی، اقتصاد و صنعت با سرعت زیادی در حال تغییر و تحول هستند. همچنین کشورها به دلیل روند جهانی شدن موجود، کوچک‌تر شدن جهان (به دلیل ارتباطات گسترده و نزدیک) افزایش رقابت را بیشتر احساس می‌کنند. مشتریان به دنبال کالاها و خدماتی هستند که به نیازهای خاص آن‌ها بیشتر پاسخ دهد؛ از سوی دیگر شرکت‌ها نیز به دنبال حفظ سود و خلق مزیت‌های رقابتی با هدف دوام بیشتر در بازار هستند. همه‌ی عوامل فوق منجر به توجه بیشتر به زنجیره‌ی تأمین شده است.[۱] زنجیره‌ی تأمین به‌عنوان سیستمی یکپارچه از تسهیلات و فعالیت‌ها تعریف می‌شود که وظایف و فعالیت‌های داخل کسب‌وکار ازجمله تدارک مواد اولیه، تبدیل مواد به محصول نهایی و توزیع این محصولات به مشتریان نهایی را شامل می‌شود.[۲و۳] طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تامین نقشی مهم در عملکرد زنجیره‌ی تأمین و مزیت‌های رقابتی آن و همچنین بر سایر تصمیم‌گیری‌های سطوح عملیاتی و فنی زنجیره‌ی تأمین در طول زمان دارد.[۲] ایجاد ارزش افزوده برای مشتریان و همچنین سهام‌داران سازمان، هدف اولیه‌ی یک زنجیره‌ی تأمین است.[۴] طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته شامل فعالیت‌های مستقیم و معکوس در زنجیره‌ی تأمین برای بیشینه‌سازی ارزش دوره‌ی عمر یک محصول با طراحی، کنترل و اجرای یک سیستم است.[۳] شرکت‌ها نیز با توجه به مزایای اقتصادی که از زنجیره‌ی تأمین معکوس به دست می‌آورند، از ایجاد و مدیریت این شبکه‌ها استقبال کرده‌اند. یکی دیگر از دلایل اهمیت زنجیره‌ی تأمین معکوس توجه به مواد اولیه‌ی با ارزش و گران‌بها یا غیر قابل تجدیدی است که در ساخت محصولات استفاده می‌شود.[۵] اصلی‌ترین دلیل برای استفاده‌ی مجدد از مواد، قطعات و محصولات

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۹، پذیرش ۱۴۰۰/۶/۲۴.
DOI:10.24200/J65.2021.57209.2188

به‌دلیل صرفه‌ی اقتصادی این کار نسبت به حذف این محصولات و مواد است. علاوه بر مسائل اقتصادی، نگرانی‌های محیط‌زیستی نیز عامل دومی برای افزایش و توسعه‌ی فعالیت‌های حلقه‌بسته است.[۶] یک‌پارچه‌سازی جنبه‌های محیط‌زیستی و اجتماعی با ملاحظات اقتصادی، که به سه بعد پایداری سازمانی شناخته می‌شوند، به‌طور عام با تصمیم‌گیری‌های روزافزون مدیریتی و به طور خاص با مدیریت زنجیره‌ی تأمین و مدیریت عملیات رابطه برقرار کرده است[۷] و شرکت‌ها به استفاده‌ی روزافزون از شاخص‌های محیط‌زیستی، سلامتی و امنیت و شاخص‌های اجتماعی می‌پردازند.[۸] یکی از مفاهیم مهم در پایداری، مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها و مسائل اجتماعی زنجیره‌های تأمین است.[۹] در نظرگرفتن مسائل جنبه‌های اجتماعی در تصمیمات زنجیره‌ی تأمین، ارزیابی بهتر تأثیرات زنجیره‌ی تأمین بر ذی‌نفعان را ممکن می‌سازد. ضمن این که نقش کمک‌کننده‌یی در هماهنگی بین تصمیمات کمی و کیفی ایفا می‌کند.[۱۰]

شرکت‌های معدن‌کاری برای غلبه بر مسئولیت‌های اجتماعی و اقتصادی هم‌زمان با برداشت سود از فرایندهای مدیریت ضایعات، مجبورند با مسائل پایداری در فعالیت‌های خودشان درگیر شوند.[۱۱] طلا، فلز پراهمیتی است که بررسی زنجیره‌ی تأمین این فلز موضوع پراهمیت و مؤثری در اقتصاد و صنعت است. علی‌رغم این که به استناد آژانس‌های متعدد دولتی، معدن‌کاری و به‌طور خاص‌تر معدن‌کاری طلا جزو آلاینده‌ترین صنایع هستند، مطالعات بسیارکمی روی آثار زیست‌محیطی و اجتماعی آن‌ها صورت گرفته است.[۱۲] در این تحقیق با بهینه‌سازی متغیرهای میزان جریان مواد و ظرفیت تولید کارخانه، سود حاصل از درآمد کارخانه بیشینه و با توجه به تأثیر متغیرهای فیزیکی بر مسئولیت اجتماعی کارخانه، مسئولیت اجتماعی کارخانه نیز بهینه می‌شود. این تصمیم‌گیری با توجه به عدم قطعیت ذاتی موجود در مسئله انجام می‌شود. این مدل بهینه‌سازی دوهدفه از زنجیره‌ی تأمین جزو مسائل سخت به شمار می‌رود که نمی‌توان با استفاده از روش‌های دقیق به حل این مسائل پرداخت. بنابراین از الگوریتم NSGA-II و الگوریتم SPEA-II در بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین استفاده می‌شود.

هدف این تحقیق توسعه‌ی مدلی کارا برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی طلا با در نظرگرفتن مسائل اجتماعی در شرایط عدم قطعیت است؛ سوال اصلی پژوهش نیز این است که وضعیت بهینه‌ی عملکرد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با تأکید بر مسئولیت‌های اجتماعی شرکت کارخانه‌ی طلای زرشوران در شرایط عدم قطعیت چگونه است؟

۲. ادبیات تحقیق

۱.۲. زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی پایدار

زنجیره‌ی تأمین شبکه‌یی یکپارچه از واحدهای تأمین‌کننده کارخانه‌های تولیدی، انبارها، مشتریان و کانال‌های توزیع است که برای دریافت مواد خام، تبدیل این مواد به محصولات نهایی، مکان‌یابی مراکز توزیع و انتخاب روش‌های حمل و نقل مناسب، چنان طراحی می‌شود که محصولات در مقدار، مکان و زمان مناسب به دست مشتریان برسد. در طراحی زنجیره‌ی تأمین‌های سنتی، انتقال کالاها از یک لایه به لایه‌ی دیگر زنجیره‌ی تأمین به گونه‌یی انجام می‌شود که هدف کمینه‌سازی هزینه‌های استراتژیکی و عملیاتی زنجیره‌ی تأمین ارضا شود.[۱۳] در زنجیره تامین تنها عملکرد اقتصادی مورد توجه می‌باشد و به سایر جنبه‌ها توجه بسیارکمی شود.[۱۴] از آن‌جا که چرخه‌ی زندگی یک محصول کوتاه‌تر از قبل شده و مصرف محصولات در جهان به طور تصاعدی افزایش یافته است، کمبود مواد اولیه بر قیمت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، بازیافت محصولات دست دوم و تولید مجدد به یکی از گزینه‌های رایج در دنیای امروز تبدیل شده است. تولید مجدد درآمد مناسب و رشد اقتصادی را فراهم می‌کند و همچنین انگیزه‌های زیست‌محیطی برای تولیدکنندگان دارد.[۱۵] یکی از نتایج جهانی‌سازی، رقابت شدید و همچنین آگاهی مشتریان، بازنگری بسیاری از شرکت‌ها برای کنترل ردپای محیطی خود از نظر استراتژیک است. دوستدار محیط زیست بودن دیگر یک مزیت رقابتی محسوب نمی‌شود، بلکه برای ماندگاری و جذابیت تجاری برای ذی‌نفعان یک ضرورت است.[۱۶] از طرفی، اهمیت جنبه‌ی اجتماعی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین برای دستیابی به مزیت‌های رقابتی برای رهبران شبکه روشن است. در نظرگرفتن تأثیرات اجتماعی شبکه منجر به کسب یک تصویر عمومی خوب از سازمان می‌شود که می‌تواند یک مزیت رقابتی برای شرکت به دست آورد.[۱۷] در طول تاریخ صنعتی‌سازی و توسعه‌ی اقتصاد جوامع را بهتر کرده است و باعث افزایش ایجاد شغل شده و مزایایی برای افراد و سازمان‌ها به ارمغان آورده است. از سوی دیگر توسعه‌ی صنعتی سبب مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی شده است؛ در نتیجه توجه همگان به پایداری در توسعه افزایش یافته است.[۱۸] توسعه‌ی پایدار، رویکردی یکپارچه است که وابستگی متقابل سه بعد عملکردهای ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی یک سازمان در یک سازمان بازشناسایی می‌کند.[۱۹] فلئوری و دیویس (۲۰۱۲) توسعه‌ی پایدار را یکپارچه‌سازی چهار عاملِ توسعه‌ی اقتصادی، نگرانی‌های اجتماعی، فشارهای زیست‌محیطی و حاکمیت عنوان می‌کند که با رویکردی عادلانه و بدون از بین بردن نیازها و مقتضیات نسل‌های آینده، به رفاه نسل کنونی توجه دارد و کمک می‌کند.[۲۰] مسائل اجتماعی در زنجیره‌های تأمین جنبه‌هایی از عملیات و فعالیت‌های زنجیره‌ی تأمین هستند که امنیت و ورفاه انسانی و توسعه‌ی جوامع را تحت تأثیر قرار می‌دهند و مدیریت مسائل اجتماعی شامل تصمیم‌هایی هستند که باعث پیشگیری شرکت از اتخاذ اقدامات غیراخلاقی یا غیرقابل قبول از طرف جامعه می‌شوند.[۲۱]

۲.۲. پایداری در صنایع معدنی

معدن‌کاری را می‌توان از فعالیت‌های مهمی دانست که با فراهم کردن مواد اولیه برای تولید اقلام روزمره، سبب رشد و توسعه‌ی جامعه می‌شود. اگر این صنعت به‌درستی مدیریت شود، ثروت برآمده از معدن‌کاری و نفت می‌تواند منبع مالی برجسته‌یی فراهم کند. از این رو می‌تواند سبب ارتقای استانداردهای زندگی جمعیت فقیر کشور و نیز راه‌اندازی و پیشرفت بخش تولید و خدمات کشورهای در حال توسعه شود. صنایع معدنی به دلیل مدیریت ضعیف ضایعات، نبودن یا ضعف در احیای زمین‌ها و ترجیح تولید بر مسائل زیست‌محیطی، تأثیرات زیادی بر محیط زیست گذاشته است. بیماری‌های شغلی مانند پنوموکونیوز، سیلیکوزیس، آزبستوز و سرطان ریه؛ سایر مشکلات سلامتی ساکنان بومی و کارکنان به دلیل افت شرایط زیست‌محیطی، افزایش حجم ترافیک، ایمنی کار و آموزش، برخی از مسائل اجتماعی مرتبط با معدن‌کاری هستند.[۱۹] شدت یافتن بحران‌های ناشی از معدن‌کاری و هزینه‌های ناشی از آن، در جامعه این تصور را ایجاد کرده است که معدن‌کاری فعالیتی پرریسک برای تمامی جامعه، کارکنان و حتی محیط زیست است.[۲۲] با افزایش آگاهی از آثار زیان‌بار معدن‌کاری فشار بر شرکت‌های معدنی از طرف جامعه و دولت برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی در حال افزایش است. در کنار این، شرکت‌های معدنی به تازگی دریافته‌اند که موفقیت بلندمدت آنها به توانایی‌شان برای مطابقت

دادن منافع خود با ارزش‌های جامعه است. در نتیجه، به طور خاص در طول دهه‌ی گذشته، بحث‌های روزافزونی حول نیاز به انتقال یافتن از معدن‌کاری مدرن به سمت یک چارچوب پایدارتر به وجود می‌آید که در نتیجه آن در حال حاضر بسیاری از شرکت‌های معدن‌کاری سالانه گزارش‌های عملکرد پایداری خود را هم‌زمان با نتایج مالی خود عرضه می‌کنند.[۱۹]

۳. پیشینه‌ی تحقیق

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ی خود به بررسی ابعاد اقتصادی و اجتماعی پایداری یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته در عین توجه به محیط‌زیست و همچنین بیشینه‌سازی میزان پاسخ‌گویی زنجیره‌ی تأمین پرداختند. در بعد اجتماعی برای بیشینه‌سازی مسئولیت اجتماعی شرکت، میزان روزهای کاری از دست رفته به دلیل آسیب‌های کاری کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی میزان رضایت مشتری را در نظر گرفتند. برای بهینه‌سازی این مدل از زنجیره‌ی تأمین، از الگوریتم ژنتیک و با توجه به سناریوهای مختلف در محیط فازی استفاده شده است.[۲۳] سلیمانی (۲۰۱۸) مدل زنجیره‌ی تأمین پایدار یک معدن سنگ در ایران را با در نظرگرفتن سود (جنبه‌ی اقتصادی)، مصرف انرژی (جنبه‌ی محیط‌زیستی) و انتظارات سطح خدمت ارائه می‌دهد. در این مقاله، از روش محدودیت ε برای دست یافتن به راه‌حل‌های پارتو و غیرغالب استفاده شده است.[۱۱] صمدی و همکاران (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته پایدار چندهدفه با در نظرگرفتن هر سه بعد پایداری و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم «گوزن سرخ» در شرایط قطعی پرداختند. در تابع هدف اجتماعی این مطالعه تنها از دو شاخص تعداد مشاغل ایجاد شده و همچنین صدمات کاری به وجود آمده در فرایند تولید استفاده شده است. در شاخص فرصت‌های شغلی ایجاد شده هم به بحث مشاغل ثابت ایجاد شده و همچنین به تعداد مشاغل متغیر پرداخته شده است.[۲۲] طلائی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌یی مسئله‌ی برنامه‌ریزی یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته پایدار چندمرحله‌یی چنددوره‌یی را بررسی کردند. اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی با استفاده از شاخص‌های راهنمای GRI ارزیابی می‌شوند. این مدل سه‌هدفه با استفاده از الگوریتم فرابتکاری در مطالعه‌ی موردی یک زنجیره‌ی تأمین تولید لامپ‌های CFL حل می‌شود.[۱۸] صاحب‌جام‌نیا و همکاران (۲۰۱۸) مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی چندهدفه را برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایدار در صنعت تایر در ایران ارائه کردند. آنها برای حل این مدل ۴ روش‌فرابتکاری ترکیبی معرفی کردند. در این مدل بهینه‌سازی هزینه‌ی کل، اثرات محیط‌زیستی فعالیت کارخانه‌ها و فرآوری تایرها و همچنین اثرات اجتماعی چون فرصت‌های شغلی و اثرات سوء کاری دنبال می‌شود.[۲۵] ژن و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه‌ی یک چشم‌انداز یکپارچه‌سازی برای توسعه‌ی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین سبز و پایدار حلقه‌بسته تحت تقاضای نامطمئن پرداختند و مدل بهینه‌سازی دوهدفه با دو هدف کاهش انتشار CO_2 و هزینه‌ی عملیاتی کل با روش آرام‌سازی لاگرانژ حل کردند و برای نشان دادن تقاضای نامشخص از روش مبتنی بر سناریو در مدل برنامه‌نویسی تصادفی استفاده کردند.[۲۶] نیری و همکاران (۲۰۲۰) مدل ریاضی چندهدفه برای پیکربندی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی پایدار برای مخزن آب با در نظر گرفتن اقدامات پایداری ارائه کردند. آنها بهینه‌سازی تأثیرات مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی در شرایط عدم اطمینان هزینه‌های حمل و نقل و تقاضا با استفاده از رویکرد برنامه‌نویسی آرمانی را انجام دادند و برای مقابله با عدم اطمینان، از بهینه‌سازی فازی استوار استفاده کردند.[۱۷] ولی‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) مدل بهینه‌سازی استوار برای زنجیره‌ی تأمین پایدار برای تولید و توزیع لوله پلی‌اتیلن را در شرایط عدم‌قطعیت ارائه دادند. آنها تصمیمات کلیدی در طراحی شبکه‌ی سبز زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته و تأثیر نوع فنّاوری در تولید محصولات و بازیافت زباله‌ها که باعث کاهش انتشار آلاینده‌های محیطی می‌شود را مورد بررسی قرار دادند.[۲۷] پیش‌تر محققان مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای زنجیره‌ی تأمین گاز طبیعی پایدار چنددوره‌یی را با استفاده از الگوریتم بهبودیافته و محدودیت ε تقویت شده برای تولید راه حل‌های بهینه‌ی پارتو حل کردند. اهداف بیشینه‌سازی درآمد کل، کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و هزینه‌های زیست‌محیطی در این پژوهش در نظرگرفته شده است.[۲۸]

۴. تعریف مسئله

زنجیره‌ی تأمین مورد بحث در این تحقیق «چندمحصولی و چنددوره‌یی» در نظر گرفته شده است که شامل مراکز تأمین، مرکز تولید و مرکز عرضه و مشتریان نهایی است که در بازارهایی با تقاضا و قیمت غیرقطعی برای به دست آوردن بهترین مقدار جریان مواد و ظرفیت تولید با در نظرگرفتن فرایندهای مختلف تولید برای هر محصول طراحی می‌شود. در سطح اول زنجیره‌ی تأمین مراکز تأمین مواد اولیه وجود دارند که کارخانه‌ی طلا با در نظرگرفتن برنامه‌ی تولید و خاک‌طلاهای موجود، اقدام به تأمین مواد اولیه مورد نیاز و با کیفیت مشخص می‌کند. خاک‌طلاهای به دست آمده از معدن طلا را با هم ترکیب می‌کنند و با توجه به ترکیب این خاک‌ها، مواد اولیه‌ی انبار شده را به همراه خاک طلا وارد فرایند تولید در کارخانه می‌کنند. با استحصال شمش‌های طلا در کارخانه، این محصولات خروجی آماده‌ی فروش خواهند بود. این شمش‌های طلا ابتدا در بانک مرکزی انبار می‌شوند و سپس مدیران کارخانه، در بورس کالای تهران اقدام به فروش این شمش‌های طلا می‌کنند. علاوه بر این که فروش باید به گونه‌یی باشد که سود بیشینه شود، هزینه‌های پرداختی به تأمین‌کنندگان و کارکنان نیز باید در هر ماه پرداخت شود. ساختار کلی این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است.

هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با تأکید بر مسئولیت‌های اجتماعی کارخانه‌ی طلای زرشوران در شرایط عدم قطعیت است. بدین ترتیب مسائل در نظرگرفته شده عبارت‌اند از:

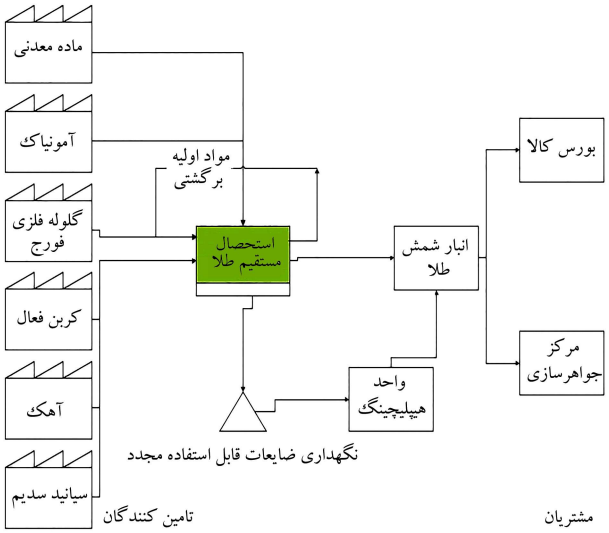
- مقدار بهینه‌ی تولید؛
- مقدار جریان بهینه بین سطوح متوالی: تأمین‌کنندگان، مجموعه‌ی تولیدی و جریان فروش به مشتریان؛
- وجود یا عدم وجود واحدهای بالقوه و مقدار ظرفیت واحدهای تأسیس شده؛
- زمان عملیاتی بهینه با توجه به فرایند تولید؛
- مقدار هزینه‌های رفاهی اختصاص یافته به منطقه.

۱.۴. مدل ریاضی

۱.۱.۴. مفروضات و ابعاد مدل در زنجیره‌ی تأمین

با توجه به شرایط واقعی این مسئله، مفروضات این زنجیره‌ی تأمین عبارت است از:

- برای هرکدام از مواد اولیه تنها یک تأمین‌کننده در نظرگرفته شده است؛



شکل ۱. مدل زنجیره‌ی تأمین مجموعه‌ی تولید طلای زرشوران.

- مدل ارائه شده چنددوره‌یی است و طول تمامی دوره‌ها یکسان است؛
- تعداد و محل استقرار تأمین‌کنندگان از قبل مشخص است؛
- مواد اولیه‌ی انبار برای نیاز یک‌ماهه خریداری و در همان ماه مصرف می‌شود. با توجه به این که نگهداری یک‌ماهه‌ی مواد، نیاز به انبار یا محل خاصی ندارد، هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه و همچنین خاک باطله صفر در نظر گرفته شده است؛
- نیازی به رفع کامل تقاضای مشتریان نیست و میزان فروش توسط کارخانه مشخص می‌شود.

۲.۴. اندیس‌ها

$m \in \{1, \ldots, M\}$: اندیس مواد اولیه؛

$s \in \{1, \ldots, S\}$: اندیس نوع خاک طلا؛

$t \in \{1, \ldots T\}$: اندیس دوره‌های زمانی؛

$k \in \{1, \ldots, K\}$: اندیس مشتریان؛

$q \in \{1, \ldots, Q\}$: اندیس واحدهای تولیدی در کارخانه.

۳.۴. پارامترها

- **هزینه‌های تولید و پارامترهای فرایند:**

$Proc^m$: هزینه‌ی خرید هر واحد ماده‌ی اولیه m؛

NM^{ms}: مقدار ماده‌ی اولیه m مورد نیاز در فرایند استحصال طلا برای هر واحد از خاک نوع s؛

NM^{ws}: مقدار آب مورد نیاز در فرایند استحصال طلا برای هر واحد از خاک نوع s؛

$flow^{mT}$: مقدار کل ماده‌ی اولیه m مورد نیاز در دوره زمانی T؛

$ETRC$: هزینه‌ی تعمیراتی که هر تن خاک بر مجموعه وارد می‌کند؛

RC^s: ضریب استهلاک به‌ازای هر واحد خاک نوع s؛

RFC: هزینه‌ی ثابت تعمیراتی در هر دوره زمانی؛

RC^T: هزینه‌ی استهلاک و تعمیرات در دوره T؛

$EPower$: میزان برق مورد نیاز برای هر ساعت کاری؛

KW: هزینه‌ی هر کیلووات برق مصرفی؛

EC^T: هزینه‌های انرژی برق در دوره T؛

$BoilerF^{sT}$: میزان مصرف سوخت به‌ازای هر واحد خاک نوع s در دوره زمانی T؛

$Fuel\,Cost$: هزینه‌ی هر واحد سوخت مصرفی بویلر؛

BC^T: هزینه‌ی عملیاتی بویلر در دوره زمانی T؛

$SoildeP^s$: درصد جامد (درصد خاک از پالپ) به‌ازای خاک نوع s؛

$SoilAlloy^s$: عیار طلای خاک نوع s؛

RR_m: نرخ بازگشت ماده‌ی اولیه m؛

IN^T: درآمد حاصل از فروش طلا به مشتریان در دوره زمانی T؛

PV^s: سرعت فرایند کارخانه برای خاک نوع s.

- **هزینه‌ی ثابت استقرار تسهیلات:**

Fix_{sd}: هزینه‌ی استقرار جواهرسازی؛

Fix_{hl}: هزینه‌ی استقرار مرکز هیپ‌لیچینگ.

- **متغیرهای حمل و نقل:**

$VehC$: ظرفیت حمل و نقل برای هر بار انتقال از تأمین‌کننده مواد اولیه به کارخانه؛

$TransC$: هزینه‌ی حمل و نقل برای هر واحد ماده‌ی اولیه در هر یک واحد مسافت به کارخانه تولیدی.

- **فواصل مکانی:**

$Dist^m$: فاصله بین تأمین‌کننده ماده‌ی اولیه m و مجموعه تولیدی.

- **زمان انجام کار:**

PT_q^s: زمان انجام فرایند در واحد q کارخانه برای خاک نوع s؛

AH^T: زمان کاری در دسترس در دوره زمانی T برحسب ساعت که با توجه به برخی عوامل نظیر زمان از کار افتادگی آسیاب برای هر دوره زمانی مقدار زمان کاری متغیر است؛

$Milvel$: سرعت واحد آسیاب؛

$LchVel$: سرعت واحد لیچینگ؛

$OxVel^s$: سرعت واحد اکسایش برای خاک نوع s؛

$FlVel^s$: سرعت واحد فیلتراسیون برای خاک نوع s؛

$MHum^T$: میزان رطوبت خاک در دوره زمانی T؛

$FlCap$: میزان ظرفیت واحد فیلتراسیون برای فیلترکردن خاک خشک در هر روز.

- **میزان آلایندگی:**

$TrPoll$: میزان انتشار CO_2 از حمل و نقل در هر واحد مسافت؛

Pr Poll: میزان انتشار CO_2 از سوخت هر واحد سوخت مصرفی کارخانه.

- **فروش:**

$\tilde{D}_k^T$: مقدار تقاضای احتمالی مشتری k در دوره زمانی T؛

α_d^T: ضریب خوش‌بینی مقدار تقاضای مشتری در دوره زمانی T؛

$G\tilde{P}^T$: قیمت فازی طلا در دوره T؛

α_p^T: ضریب خوش‌بینی قیمت طلا در دوره زمانی T؛

$Cash^T$: میزان نقدینگی در دسترس کارخانه؛

$Cash^*$: میزان نقدینگی در دسترس کارخانه در دوره زمانی صفر؛

Pr^{T}: میزان محصول تولید شده در کارخانه در دوره زمانی T؛
$\mathrm{Pr\ Inv}^{\mathrm{T}}$: میزان موجودی محصول در کارخانه در دوره زمانی T.

- **پارامترهای اجتماعی:**

Job_{HL}: میزان مشاغل ایجاد شده به‌ازای هر واحد هیپ‌لیچینگ؛
Job_{SD}: میزان مشاغل ثابت ایجاد شده برای هر واحد جواهرسازی؛
SRC_{Max}: بیشینه مقدار هزینه‌ی رفاهی تخصیص یافته به منطقه؛
θ_P: ضریب اهمیت تقسیم هزینه‌ی رفاهی در مسئولیت اجتماعی شرکت؛
$Co۲_{Max}$: بیشینه مقدار گازهای گلخانه‌یی انتشاریافته در زنجیره‌ی تأمین؛
$\theta_{co۲}$: ضریب اهمیت انتشار گازهای گلخانه‌یی در مسئولیت اجتماعی شرکت؛
$Water_{Max}$: بیشینه مقدار آب مصرفی در زنجیره‌ی تأمین؛
θ_{Water}: ضریب اهمیت مصرف آب در مسئولیت اجتماعی شرکت؛
$Waste_{Max}$: بیشینه مقدار خاک باطله ایجاد شده در مجموعه‌ی تولیدی؛
θ_{Waste}: ضریب اهمیت مقدار تولید خاک باطله در مسئولیت اجتماعی شرکت؛
Job_{Max}: بیشینه مقدار شغل ایجاد شده در زنجیره‌ی تأمین؛
θ_{job}: ضریب اهمیت تعداد مشاغل ایجاد شده در مسئولیت اجتماعی شرکت.

- **متغیرهای تصمیم:**

$flow^{sT}$: میزان جریان خاک نوع s در دوره زمانی T برحسب تن؛
$flow_k^T$: میزان فروش محصول به مشتری k در دوره زمانی T برحسب کیلوگرم؛
$flowW^T$: میزان بازگشتی باطله‌ی موجود برای استحصال طلا در هیپ‌لیچینگ در دوره زمانی T برحسب تن؛
X_{sd}: متغیر باینری احداث جواهرسازی (اگر جواهرسازی احداث شود ۱ و در غیر این صورت صفر)؛
X_{hl}: متغیر باینری احداث مرکز هیپ‌لیچینگ (اگر مرکز هیپ‌لیچینگ احداث شود ۱ و در غیر این صورت صفر)؛
P: درصدی از فروش که به رفاه منطقه اختصاص داده می‌شود. این عدد بین صفر تا ۲ درصد می‌تواند متغیر باشد.

۴.۴. توابع هدف

اولین تابع هدف در این زنجیره‌ی تأمین بیشینه‌سازی سود است. در این تابع هدف سود حاصل از فروش طلا، هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات و همچنین هزینه‌های متغیر تولید در نظرگرفته شده است.

$$IN^T = \sum_k flow_k^T(\alpha_p^T G\tilde{P}^T) \qquad (۱)$$

معادله‌ی ۱ درآمد حاصل از فروش طلا به مشتریان است. بخشی از این طلا از طریق بورس فروخته می‌شود که مقدار تقاضای آن یک متغیر فازی است. بخشی از طلای تولید شده نیز به مراکز جواهرسازی بالقوه فروخته می‌شود. ضمناً قیمت طلا در هر دوره‌ی زمانی به‌صورت فازی در نظرگرفته شده است. یک ضریب خوش‌بینی نیز برای در نظرگرفتن خوش‌بینی یا بدبینی عدد فازی مربوط به قیمت طلا در نظر گرفته شده است.

$$IC = Fix_{hl} + Fix_{sd} \qquad (۲)$$

معادله‌ی ۲ میزان هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات از جمله مراکز جواهرسازی و مرکز هیپ‌لیچینگ را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} TC^T = &\left[\sum_m \sum_s proc^m \times flow^{mT}\right] \\ &+ \left[\sum_m TransC \times Dist^m \times \tfrac{flow}{VehC}\right] \\ &+ [BC^T + EC^T + RC^T] \end{aligned} \qquad (۳)$$

معادله‌ی ۳ نیز هزینه‌های متغیر زنجیره‌ی تأمین را نشان می‌دهد. عبارت اول در این معادله هزینه‌ی خرید مواد اولیه را محاسبه می‌کند. $flow^{mT}$ میزان ماده‌ی اولیه‌ی مورد نیاز برای فرایند استحصال طلا از میزان خاک $flow^{sT}$ است.

$$flow^{mT} = NM^{ms} flow^{sT} - RR_m NM^{ws} flow^{s(T-۱)} \qquad (۴)$$

مطابق معادله‌ی ۴ بخشی از مواد اولیه به‌صورت مستقیم وارد فرایند می‌شود، در حالی که بخشی از آن به دلیل حلقه‌بسته بودن سیستم با توجه به نرخ بازگشت ماده‌ی اولیه RR_m از دوره زمانی قبلی تأمین می‌شود. عبارت دوم معادله‌ی ۳ هزینه‌ی حمل و نقل مواد اولیه را محاسبه می‌کند. عبارت سوم هزینه‌های عملیاتی زنجیره‌ی تأمین را محاسبه می‌کند.

$$BC^T = \sum_s Fuel\cos t \times BoilerF^{sT} \times \left(\frac{flow^{sT}}{PV^s}\right) \qquad (۵)$$

$$EC^T = \sum_s KW \times EPower \times \left(\frac{flow^{sT}}{PV^s}\right) \qquad (۶)$$

$$RC^T = RFC + \sum_s ETRC \times RC^s \times flow^{sT} \qquad (۷)$$

متغیر BC^T هزینه‌های مصرفی بویلر است. برای محاسبه‌ی این متغیر، در فرمول ۵ هزینه‌ی هر لیتر سوخت بویلر، میزان سوخت مصرفی بویلر در هر دوره زمانی برای هر نوع خاک و میزان ساعت کاری در هر دوره زمانی لحاظ شده است. میزان ساعت کاری در هر دوره زمانی از طریق معادله‌ی $\left(\frac{flow^{sT}}{PV^s}\right)$ محاسبه می‌شود که در واقع میزان جریان هر نوع خاک در هر دوره زمانی با واحد ton تقسیم بر سرعت فرایند کارخانه برای آن نوع خاک با واحد ton/h است.

در معادله‌ی ۶، متغیر EC^T هزینه‌ی مصرفی برق است. برای محاسبه‌ی این متغیر، هزینه‌ی هر کیلووات مصرفی برق، میزان کیلووات مصرفی کارخانه در یک ساعت و میزان ساعت کاری در هر دوره زمانی لحاظ شده است.

در معادله‌ی ۷، متغیر RC^T هزینه‌های استهلاک و تعمیرات است. در این فرمول هر تن از خاک به میزان پارامتر $ETRC$ ریال به هزینه‌های تعمیراتی اضافه می‌کند که البته با توجه نوع خاک که در ضریب RC^S قرار داده شده است، مقدار این هزینه‌ها تغییر می‌یابد. ضمناً یک هزینه‌ی RFC ریال به‌عنوان هزینه‌ی ثابت تعمیرات در هر دوره زمانی در نظرگرفته شده که حتی اگر کارخانه فعالیتی هم نداشته باشد، این هزینه‌ی ثابت وجود دارد.

بنابراین تابع هدف اقتصادی این زنجیره‌ی تأمین برابر است با:

$$Max\ Z_۱ = \sum_T IN^T - TC^T - IC \qquad (۸)$$

در تابع هدف اجتماعی این زنجیره‌ی تأمین، شاخص‌های میزان هزینه‌ی رفاهی اختصاص‌یافته به منطقه، میزان ایجاد اشتغال با توجه به تأسیس مراکز هیپ‌لیچینگ و جواهرسازی، میزان خاک باطله‌ی باقیمانده، میزان گازهای گلخانه‌یی ایجاد شده ناشی از حمل و نقل و سوخت کارخانه و میزان استفاده از آب مورد توجه قرار می‌گیرد.

بنابراین تابع هدف مسئولیت اجتماعی زنجیره‌ی تأمین مطابق معادله‌ی ۹ است. برای این که تمام متغیرهای اجتماعی منظور شده در تابع هدف اجتماعی هم‌واحد شوند، هرکدام از این متغیرها بر بیشینه مقدار آن متغیر تقسیم می‌شوند تا این متغیرها به بازه [۰،۱] نگاشت شوند. در این صورت امکان این که این متغیرها با یکدیگر قابل جمع شوند، حاصل می‌شود.

در معادله‌ی ۹ اولین عبارت مسئولیت اجتماعی حاصل شده از تقسیم هزینه‌ی رفاهی در منطقه است. با توجه به عبارت دوم، تعداد مشاغل ایجاد شده ترکیبی از تعداد مشاغل ایجاد شده از تأسیس واحد هیپ‌لیچینگ و تعداد مشاغل ایجاد شده ناشی از استقرار جواهرسازی است. عبارت سوم نشان‌دهنده‌ی کاهش مسئولیت اجتماعی حاصل از مصرف آب است. عبارت چهارم نیز کاهش مسئولیت اجتماعی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی است. عبارت پنجم نشان‌دهنده کاهش مسئولیت اجتماعی حاصل از باقی‌ماندن خاک باطله در سد باطله است.

در عبارت پنجم با توجه به این که بخش زیادی از باطله‌ی تولید شده، همان خاک وارد شده (متغیر $flow^{sT}$) به فرایند استحصال طلاست و بخشی نیز از طریق جریان $flowW^T$ به فرایند استحصال طلا بازگشت داده می‌شود، می‌توان گفت باطله‌ی باقیمانده در هر دوره زمانی برابر تفاضل این دو جریان است.

$$\begin{aligned} Max\, Z_۲ = {} & \theta_P \left(\frac{P\times\sum_T IN^T}{SRC_{Max}}\right)+\theta_{job}\left(\frac{X_{hl}\times JOB_{HL}+X_{sd}\times JOB_{SD}}{Job_{Max}}\right) \\ & -\theta_{water}\left(\frac{\sum_T\sum_s NM^{ws}\times flow^{sT}}{Water_{Max}}\right) \\ & -\theta_{Co۲}\left(\frac{\sum_T\sum_s\left(flow^{sT}\times BoilerF^{st}\times \mathrm{Pr}\,Poll+\frac{flow^{mT}}{VehC}\times Dis^m\times TrPoll\right)}{CO۲_{\max}}\right) \\ & -\theta_{Waste}\left(\frac{\sum_T([\sum_s flow^{sT}]-flowW^T)}{Waste_{\max}}\right) \end{aligned} \tag{۹}$$

محدودیت ۱۰ بدین معناست که متغیر مربوط به وجود یا عدم وجود جواهرسازی یا هیپ‌لیچینگ صفر یا ۱ می‌تواند باشد که در صورتی که این واحد استقرار یابد، ۱ و در صورتی که تأسیس نشود صفر است.

$$SubjectTo:$$

$$X_{sd}, X_{hl} = ۰, ۱ \tag{۱۰}$$

محدودیت ۱۱ بیان‌می‌کند که زمان فرآوری انواع خاک s در بازه زمانی T، از زمان در دسترس کارخانه در بازه زمانی T باید کم‌تر باشد.

$$\sum \frac{flow^{sT}}{PV^s} \le AH^T \tag{۱۱}$$

$$PV^s = \min(MilVel, OxVel^s, LchVel, FlVel^s) \tag{۱۲}$$

معادله‌ی ۱۲ مربوط به محاسبه‌ی سرعت کارخانه است که طی آن ابتدا سرعت واحدهای چهارگانه محاسبه می‌شود و کمینه‌ی سرعت در بین این واحدها به‌عنوان سرعت کارخانه برای هر نوع خاک s در نظرگرفته می‌شود.

سرعت واحد آسیاب ($MilVel$) برای خاک‌های مختلف یکسان است و توسط اتاق کنترل تعیین می‌شود. سرعت واحد اکسایش ($OxVel^s$) بر اساس زمان ماند هر نوع خاک و ظرفیت تانک‌های هر واحد تعیین می‌شود. سرعت واحد لیچینگ ($LchVel$) برای خاک‌های مختلف یکسان است. سرعت واحد فیلتراسیون ($FlVel^s$) به درصد جامد مشخص شده برای هر نوع خاک بستگی دارد و همچنین ظرفیت واحد فیلتراسیون بستگی دارد که در هر روز قابلیت فیلتر کردن چه مقدار خاک خشک دارد. زمان در دسترس کارخانه (AH^T) تابعی از میزان از کارافتادگی واحدهای آسیاب و فیلتراسیون است.

با توجه به این که هزینه‌های متغیر زنجیره‌ی تأمین از قبیل هزینه‌های خرید مواد اولیه و هزینه‌های تولید و حمل و نقل، در هر ماه پرداخت می‌شود، در هر ماه باید نقدینگی موجود بیشتر از هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین باشد.

$$Cash^T = Cash^{T-۱} + IN^T - TC^T \tag{۱۳}$$

میزان نقدینگی در دوره زمانی صفر به میزان $Cash^{۰}$ در نظرگرفته شده است.

$$۰ \le Cash^T \tag{۱۴}$$

$$۰ \le \mathrm{Pr}\,Inv^T \tag{۱۵}$$

محدودیت ۱۵ نشان‌دهنده این است که میزان فروش محصول در هر دوره زمانی باید از میزان موجودی محصول در آن دوره زمانی کم‌تر باشد.

$$\mathrm{Pr}\,Inv^T = \mathrm{Pr}\,Inv^{T-۱} + \mathrm{Pr}^T - \sum_k flow_k^T \tag{۱۶}$$

میزان موجودی محصول در هر دوره زمانی، برابر با برآیند میزان موجودی مانده از دوره قبلی و اختلاف میزان تولید و فروش در دوره فعلی است.

$$\begin{aligned} \mathrm{Pr}^T = {} & \mathrm{Pr}\,Rndm \times SoilAlloy^s \times flow^{sT} \\ & + WstAlloy \times X_{HP} \end{aligned} \tag{۱۷}$$

Pr^T یا همان متغیر میزان تولید در دوره زمانی Tام، از طریق معادله‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود. در واقع میزان تولید در هر دوره زمانی برابر با حاصل جمع میزان تولید طلای استحصال شده از خاک‌های طلا و میزان طلای استحصال شده در مرکز هیپ‌لیچینگ از باطله جمع شده از فیلتراسیون است.

$$\sum_k flow_k^T \le \tilde{D}_k^T \tag{۱۸}$$

محدودیت ۱۸ به این معناست که میزان فروش کوچک‌تر یا مساوی میزان تقاضاست. در واقع بدین صورت این الزام ایجاد می‌شود که ابتدا باید تقاضایی صورت گیرد تا محصول فروخته شود.

$$flow^{sT} \ge ۰ \tag{۱۹}$$

$$flow_k^T \ge ۰ \tag{۲۰}$$

$$flowW^T \ge ۰ \tag{۲۱}$$

$$۰٫۰۲ \ge P \ge ۰ \tag{۲۲}$$

محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۲ برای محدود کردن علامت متغیرهای جریان‌ها در نظر گرفته شده است. ضمناً محدودیت ۲۲ برای این است که تنها بین صفر تا ۲ درصد از درآمد فروش برای توسعه و رفاه منطقه اختصاص داده شود.

۵. روش تحلیل داده‌ها

پس از انتخاب زنجیره‌ی تأمین مورد مطالعه، اقدام به جمع‌آوری اطلاعات در مورد این زنجیره‌ی تأمین شده است. این اطلاعات با استفاده از منابع کتابخانه‌یی

تکمیل می‌شود و توابع هدف زنجیره‌ی تأمین با توجه به پارامترهای مهم زنجیره مشخص می‌شود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II انجام می‌شود. برای حل مسائل مدل که در آن برخی از پارامترهای ورودی به‌صورت فازی در نظر گرفته می‌شود، از روش ژیمنز استفاده شده است. در این روش ابتدا پارامترهای ورودی به‌صورت فازی وارد می‌شوند، ولی در مدل به‌صورت دی‌فاز شده مورد استفاده قرار می‌گیرد و جواب نهایی مسئله جواب قطعی است. متغیرهای فازی در این مسئله به‌صورت متغیر فازی گوسی در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن مختصات مرکز این متغیرهای فازی، ابتدا با توجه داده‌های میزان تقاضا در سال‌های گذشته که با استفاده از سایت بورس کالا به دست آمده، گستره‌ی میزان تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف به‌صورت $[LowDemand\ HighDemand]$ به دست می‌آید. با توجه به این گستره، مرکز متغیر فازی به دست می‌آید.

$$c^{\alpha_d^T} = (1-\alpha_d^T) \times LowDemand + \alpha_d^T \times HighDemand \quad (۲۳)$$

با توجه به این که $c^{\alpha_d^T}$ مرکز متغیر فازی گاوسی است، بنابراین در صورتی که متغیر فازی گاوسی را به‌صورت مرکزگرا دی‌فاز کنیم، مقدار دی‌فاز شده برابر همان مقدار $c^{\alpha_d^T}$ خواهد بود. بنابراین محدودیت مربوط به میزان فروش و تقاضا بدین ترتیب تغییر می‌کند.

$$\sum_k flow_k^T \le c^{\alpha_d^T} \qquad \forall T \quad (۲۴)$$

قیمت طلا نیز متغیری فازی است که در دوره‌های زمانی مختلفی دو عدد به صورت [LowGoldPrice HighGoldPrice] در نظر گرفته شده است. مشابه دی‌فاز کردن متغیر فازی تقاضا، متغیر فازی قیمت طلا نیز قابل دی‌فاز شدن است. منتها درمورد قیمت طلا، ضریب خوش‌بینی آن نیز به صورت متغیر در نظر گرفته شده است. در واقع ضریب خوش‌بینی قیمت طلا یا همان α_p^T، به‌صورت تصادفی در هر تکرار از الگوریتم تغییر می‌کند. به این ترتیب بهینه‌سازی برای هر حالتی از قیمت طلا انجام می‌شود.

۱.۵. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲

الگوریتم NSGA-II یا همان الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲، الگوریتمی تکاملی است که روش مرتب‌سازی نامغلوب سریع را با رویکرد برگزیدن بهترین پاسخ‌ها ترکیب می‌کند.[۲۹] این روش توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شد. این الگوریتم در واقع تعمیمی از الگوریتم ژنتیک برای مسائل چندهدفه و ایده‌ی اصلی این روش از الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل‌دهی پارتو گرفته شده است.[۳۰]

در الگوریتم NSGA-II دو سازوکار جدید به الگوریتم ژنتیک ساده اضافه شده است. در یکی از این سازوکارها رتبه‌ی هر پاسخ بر اساس تعداد پاسخ‌هایی که آن پاسخ بر آن‌ها غلبه دارد محاسبه می‌شود. این سازوکار که به آن «مرتب‌سازی نامغلوب سریع» گفته می‌شود، پاسخ‌ها را در جبهه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند؛ در بین این جبهه‌ها جبهه‌ی اول به‌عنوان پاسخ برگزیده می‌شود. پاسخ‌های مختلف در سه جبهه تقسیم‌بندی شده‌اند که جبهه‌ی اول یا پارتو، به‌عنوان پاسخ‌های بهینه‌ی الگوریتم انتخاب می‌شود. برای رسیدن به هدف دوم که تنوع پاسخ‌هاست، عملگر دیگری به نام فاصله‌ی تجمعی (CD) در الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته شده است که میزان تمرکز پاسخ‌های الگوریتم حول یک پاسخ را نشان می‌دهد. مقدار بزرگ‌تر CD نشان‌دهنده تنوع زیاد پاسخ‌هاست.

۲.۵. الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو

نسخه‌ی دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II)، الگوریتم کارایی است که از یک آرشیو خارجی برای ذخیره‌ی پاسخ‌های نامغلوبی که در طی جست‌وجوی الگوریتم یافت می‌شود، استفاده می‌کنند. زیتزلر و همکاران (۲۰۰۱) نسخه‌ی دوم الگوریتم SPEA را برای رفع مشکلات موجود در نسخه‌ی اولیه آن ارائه کردند. الگوریتم SPEA-II نیز همانند الگوریتم NSGA-II از عملگرهای جهش و ترکیب برای جست‌وجو در بین پاسخ‌ها استفاده می‌کند. در الگوریتم NSGA-II از دو معیار «رتبه» و «فاصله‌ی ازدحامی» برای مقایسه‌ی بین پاسخ‌های نامغلوب استفاده می‌شود، در حالی که در الگوریتم SPEA-II از معیار برازندگی برای این هدف استفاده می‌شود. در این الگوریتم مقدار قوت پاسخ i که به‌صورت $s(i)$ نشان داده می‌شود، برابر با تعداد پاسخ‌هایی است که توسط پاسخ i مغلوب می‌شوند. سپس برای هر پاسخ مقدار برازندگی خام هر پاسخ تعیین می‌شود.[۳۱]

می‌توان گفت این که پاسخی برازندگی خام صفر داشته باشد، معادل این است که در الگوریتم NSGA-II رتبه‌ی اول را داشته باشد. در ضمن به جای معیار فاصله ازدحامی در الگوریتم NSGA-II، از معیار فاصله هر پاسخ نسبت به پاسخ‌های کناری استفاده می‌شود.

۶. مطالعه‌ی موردی

مدل ارائه شده در این تحقیق، بر اساس مطالعه‌ی موردی واقعی از زنجیره‌ی تأمین کارخانه‌ی طلای زرشوران است. در شکل ۱ شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مورد مطالعه که شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، سایت جمع‌آوری، سایت انبارش ضایعات و بازار فروش است، ارائه شده است. در مجتمع طلای زرشوران ابتدا سنگ‌های معدنی از معدن جمع‌آوری شده و به واحد سنگ‌شکن منتقل می‌شود. خاک خروجی از واحد سنگ‌شکن با استفاده از نوار نقاله به واحد آسیاب منتقل می‌شود. در واحد آسیاب آهک، با توجه به میزان اسیدی بودن خاک و به‌صورت قابل تنظیم با دریچه، برای تنظیم PH خاک به آن اضافه می‌شود. در واحد آسیاب برای خرد کردن هر چه بیشتر خاک از گلوله‌های فلزی استفاده می‌شود. پس از این که خاک از دو واحد سنگ‌شکن و آسیاب گذشت و اندازه آن به میزان قابل قبول ۴۵ میکرون رسید، وارد مرحله‌ی اکسایش می‌شود. اغلب خاک‌های معادن دیگر به اکسایش نیازی ندارند و مستقیماً وارد مرحله‌ی لیچینگ می‌شوند؛ اما به‌دلیل نوع خاک معدن زرشوران، طلای این خاک در شبکه‌ی کانی‌های سولفوری مثل اورپیمنت، پریت و آرسنوپریت و ... محبوس شده است که این امر سبب شده ذرات طلا به آسانی در معرض تماس با عامل‌های لیچینگ قرار نگیرد. بدین ترتیب نیاز به یک واحد جهت آماده‌سازی ماده‌ی معدنی برای فرایند لیچینگ و افزایش راندمان لیچینگ ضروری است. این کار در واحد اکسایش انجام می‌شود. هدف واحد اکسایش انحلال سولفورها و آزادسازی طلا از ساختار این سولفیدهاست. پس از واحد اکسایش، مواد وارد مرحله‌ی لیچینگ می‌شوند. هدف این واحد انحلال طلا در محلول سیانور و متعاقب آن جذب طلای حل شده به روی کربن فعال است. سپس این کربن‌های باردار وارد واحد شست‌وشو می‌شوند و در این واحد طلای جذب شده بر روی کربن‌ها شست‌وشو(الوشن) داده می‌شود و وارد محلول می‌شود. در واحد اتاق طلا نیز طلای شست‌وشو شده در واحد الوشن با انجام فرایندهایی به‌صورت فلزی شکل می‌گیرد و در کوره‌ها به‌صورت شمش در می‌آیند. مقادیر

جدول ۱. پارامترهای اصلی مدل زنجیره‌ی تأمین کارخانه طلای زرشوران.

پارامتر	مقدار
تعداد دوره زمانی	۱۲
بازدهی فرآوری کارخانه	۰/۸
بازدهی هیپ لیچینگ	۰/۵
مقدار طلای موجودی اولیه	۰
مقدار باطله موجود اولیه	۰
میزان نقدینگی موجود اولیه (میلیون تومان)	۱
ضریب خوش‌بینی	۰/۵
ظرفیت فروش تعیین شده (کیلوگرم طلا)	۴۰۰
مقدار موجود از هر نوع خاک در هر دوره زمانی (تن)	عدد بسیار بزرگ
ظرفیت واحد فیلتراسیون (تن در روز)	۴۰۰۰

پارامترهای اصلی مدل زنجیره‌ی تأمین کارخانه طلای زرشوران در جدول ۱ آورده شده است.

سرعت واحد اکسایش طبق فرمول ۲۶ تعیین می‌شود. PT_2^s به معنای زمان فرایند برای هر نوع از خاک s در واحد دوم یعنی واحد اکسایش است. در واحد اکسایش کارخانه طلا زرشوران ۱۲ تانک با ظرفیت ۲۶۵ تن وجود دارد.

$$OxVel^s = {}^{۱۲ \times ۲۶۵}/_{PT_2^s} \quad (۲۵)$$

سرعت واحد لیچینگ از فرمول ۲۶ به دست می‌آید. PT_3^s به معنای زمان فرایند برای هر نوع از خاک s در واحد سوم یعنی واحد لیچینگ است که با توجه به ظرفیت مخازن، این زمان برای انواع خاک یکسان و برابر ۳۲ ساعت است. در واحد لیچینگ نیز ۱۲ تانک با ظرفیت ۲۶۰ تن وجود دارد.

$$LchVel = \frac{۱۲ * ۲۶۰}{PT_3^s} \quad (۲۶)$$

سرعت واحد فیلتراسیون مطابق معادله‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود. $FlCap$ میزان ظرفیت واحد فیلتراسیون برای فیلترکردن خاک خشک در هر روز است که با توجه به این که سرعت واحدهای دیگر برحسب ساعت محاسبه شده است، با تقسیم این ظرفیت به ۲۴ می‌توان ظرفیت معادل این واحد در ساعت را به دست آورد. ضمناً با توجه به این که این ظرفیت بر اساس خاک خشک و سرعت واحدهای دیگر بر اساس پالپ است، با ضرب این ظرفیت در درصد جامد هر نوع خاک، می‌توان ظرفیت معادل در پالپ را به دست آورد.

$$FlVel^s = \frac{FlCap \times SolidP^s}{۲۴} \quad (۲۷)$$

زمان در دسترس کارخانه (AH^T) در معادله‌ی ۲۸ به‌عنوان تابعی نشان داده شده که در آن میزان از کارافتادگی واحدهای آسیاب و فیلتراسیون از کل ساعات در دسترس کارخانه در یک ماه (به عنوان یک دوره زمانی و به میزان ۷۲۰ ساعت) کم شده است. ضمناً با توجه به این که با کارخانه برای رطوبت ۷ طراحی شده است، بیشتر شدن رطوبت از این مقدار و چسبنده بودن خاک باعث می‌شود تا در دستگاه‌های موجود در واحد سنگ‌شکن توقف بیشتری صورت گیرد

جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم NSGA − II و SPEA − II.

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت (n)	۲۵
نرخ جهش (mu)	۰/۱
نرخ ترکیب (gamma)	۰/۱۵
تعداد تکرار (MaxIt)	۱۰۰۰۰

و در نتیجه به مقداری از میزان ساعات در دسترس کارخانه برای فعالیت کم‌تر شود.

$$AH^T = ۷۲۰ - ۵(MHum^T - ۷) - ۱۰e^{MilVel/۷۰} - ۱۰e^{FlCap/۴۰۰۰} \quad (۲۸)$$

هاپت (۲۰۰۰) به صراحت نرخ پیشنهادی جهش برای الگوریتم ژنتیک را از ۰/۰۵ تا ۰/۲ عنوان کرده است.[۳۲] با این حال این مقادیر برای هر مسئله با تابع هدف خاص و با محدودیت‌های آن مسئله قابل تغییر است. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی با توجه به نرخ‌های پیشنهادی این الگوریتم‌ها در سایر منابع تحقیقاتی و همچنین تکرار با مقدارهای مختلف و مشاهده نتایج به دست آمده است. در مشاهده و مقایسه‌ی بین نتایج نیز دو فاکتور سرعت رسیدن پاسخ‌ها به ناحیه پاسخ‌های دست‌یافتنی و مقدار توابع هدف، مد نظر قرار گرفت. مقادیر پارامترها در این تکرارها هم به‌صورت مجزا و هم به‌صورت گروهی تغییر داده شدند تا مقدار بهینه‌ی این پارامترها به دست آید. پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II مطابق جدول ۲ است.

۷. نتایج و یافته‌ها

پس از وارد کردن داده‌های ورودی، مدل در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده و با توجه به پارامترهای ورودی مدل با دو الگوریتم حل شده است و نتایج بهینه‌سازی مدل زنجیره‌ی تأمین با استفاده از دو الگوریتم نسخه‌ی دوم ژنتیک مرتب شده‌ی نامغلوب و نسخه‌ی دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو به دست آمده است.

مقادیر توابع هدف و اجزا آن در پاسخ با بیشترین میزان سود اقتصادی و با استفاده از الگوریتم SPEA-II و NSGA-II در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نتایج بیشترین میزان سود اقتصادی و کم‌ترین میزان مسئولیت اجتماعی را نشان می‌دهد.

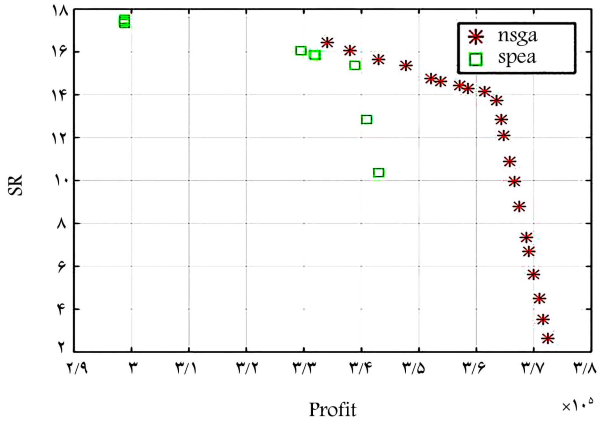
با دقت در دو جبهه پارتو موجود در شکل ۴ می‌توان فهمید که دو تابع هدف سود اقتصادی و مسئولیت اجتماعی به نوعی متضاد یکدیگرند. این به دلیل ماهیت سیستم است؛ چرا که برای بیشتر شدن سود اقتصادی، باید تولید نیز افزایش یابد. با این که با افزایش تولید می‌توان درآمد بیشتری کسب کرد و به این ترتیب سود بیشتری به رفاه منطقه اختصاص داد و می‌توان مشاغل بیشتری نیز ایجاد کرد که فاکتورهای مثبتی هستند، در مسیر افزایش تولید، افزایش میزان گازهای گلخانه‌یی تولید شده، افزایش میزان مصرف آب و همچنین افزایش میزان خاک باطله تولید شده به وجود خواهد آمد که میزان مسئولیت اجتماعی را پایین‌تر می‌آورد. همچنین از این نمودار مشخص است که اغلب پاسخ‌های الگوریتم NSGA-II پاسخ‌هایی هستند که بر پاسخ‌های SPEA-II غلبه می‌کنند، چرا که در هر دو تابع هدف مقدار بیشتری نسبت به آنها دارند.

۱	وجود یا عدم وجود هیپ لیچینگ	۶	متوسط درصد خاک اول
۱	وجود یا عدم وجود جواهرسازی	۹	متوسط درصد خاک دوم
۲/۲۱ E+۰۳	مقدار طلای تولید شده	۲۵	متوسط درصد خاک سوم
۳۳	تعداد مشاغل ایجاد شده (نفر)	۴۰	متوسط درصد خاک چهارم
۴/۳۷ E+۰۳	مقدار هزینه های رفاهی (میلیون تومان)	۲۰	متوسط درصد خاک پنجم
۴/۳۰ E+۰۹	مقدار گازهای گلخانه یی ایجاد شده (ton)	۴/۱۹ E+۰۵	میزان درآمد (میلیون تومان)
۴/۵۱ E+۰۳	مقدار باطله بودن مصرف ایجاد شده (ton)	۵/۹ E+۰۴	جمع هزینه های متغیر (میلیون تومان)
۹/۴۱ E+۰۵	مقدار آب استفاده شده (ton)	۱۳۰۰۰	جمع هزینه های ثابت (میلیون تومان)
۱۰/۳۶	میزان مسئولیت اجتماعی	۳/۴۳ E+۰۵	میزان سود (میلیون تومان)

شکل ۲. مقادیر توابع هدف و اجزای آن در پاسخ با بیشترین سود اقتصادی (الگوریتم SPEA – II).

۱	وجود یا عدم وجود هیپ لیچینگ	۴	متوسط درصد خاک اول
۱	وجود یا عدم وجود جواهرسازی	۱۶	متوسط درصد خاک دوم
۲/۴۴ E+۰۳	مقدار طلای تولید شده	۳۴	متوسط درصد خاک سوم
۲۸	تعداد مشاغل ایجاد شده (نفر)	۲۹	متوسط درصد خاک چهارم
۰ E+۰۰	مقدار هزینه های رفاهی (میلیون تومان)	۱۷	متوسط درصد خاک پنجم
۴/۷۲ E+۰۹	مقدار گازهای گلخانه یی ایجاد شده (ton)	۴/۵۱ E+۰۵	میزان درآمد (میلیون تومان)
۳/۴۵ E+۰۲	مقدار باطله بودن مصرف ایجاد شده (ton)	۶/۵۸ E+۰۴	جمع هزینه های متغیر (میلیون تومان)
۱/۰۷ E+۰۶	مقدار آب استفاده شده (ton)	۱۳۰۰۰	جمع هزینه های ثابت (میلیون تومان)
۲/۶۲۲۶۸	میزان مسئولیت اجتماعی	۳/۷۲ E+۰۵	میزان سود (میلیون تومان)

شکل ۳. مقادیر توابع هدف و اجزا آن در پاسخ با بیشترین سود اقتصادی (الگوریتم NSGA – II).



شکل ۴. جبهه‌ی پارتو به دست آمده از اجرای الگوریتم‌های SPEA – II و NSGA – II.

اما چیزی که می‌توان از روی شکل نیز متوجه شد این است که گستردگی پاسخ‌های NSGA-II بسیار بیشتر است و همین تصمیم‌گیری را برای فرد تصمیم‌گیر سخت‌تر می‌کند. در حالی که پاسخ‌های SPEA-II بسیار به هم نزدیک‌ترند.

مقادیر توابع هدف و اجزا آن در پاسخ با با کم‌ترین میزان سود اقتصادی و با استفاده از الگوریتم SPEA-II و NSGA-II در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج کم‌ترین میزان سود اقتصادی و بیشترین میزان مسئولیت اجتماعی را نشان می‌دهد.

از جمله مواردی که سبب تناقض در این رابطه می‌شود، می‌توان به سود تقسیم شده به منطقه و میزان ایجاد شغل اشاره کرد. در واقع با افزایش تولید می‌توان به درآمد بیشتری رسید و درنتیجه می‌توان میزان سود بیشتری نیز برای رفاه منطقه تخصیص داد و از این طریق به رشد و افزایش مسئولیت اجتماعی کمک کرد. ضمناً با افزایش تولید می‌توان مشاغل بیشتری نیز ایجاد کرد و در نتیجه به مسئولیت اجتماعی بیشتری دست یافت.

۸. تحلیل حساسیت

در این بخش، با تغییر پارامترها میزان تأثیر این پارامترها بر توابع هدف با استفاده از الگوریتم SPEA-II سنجیده می‌شود.

۱.۸. تحلیل حساسیت متغیر میزان خاک قابل استفاده موجود برای فرآوری

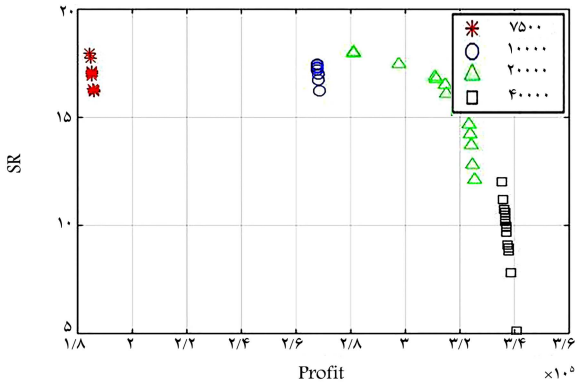
یکی از پارامترهای موجود، مقدار خاک موجود از هر نوع برای فرآوری است. در صورتی که برای مثال این مقدار برابر ۷۵۰۰ باشد، به این معناست که در هر دوره

۱	وجود یا عدم وجود هیپ لیچینگ	۱۱	متوسط درصد خاک اول
۱	وجود یا عدم وجود جواهرسازی	۱۰	متوسط درصد خاک دوم
۱/۸۸ E+۰۳	مقدار طلای تولید شده	۲۷	متوسط درصد خاک سوم
۲۸	تعداد مشاغل ایجاد شده (نفر)	۳۳	متوسط درصد خاک چهارم
۷/۴۱ E+۰۳	مقدار هزینه های رفاهی (میلیون تومان)	۱۷	متوسط درصد خاک پنجم
۳/۷۶ E+۰۹	مقدار گازهای گلخانه یی ایجاد شده (ton)	۳/۷ E+۰۵	میزان درآمد (میلیون تومان)
۲/۹۷ E+۰۲	مقدار باطله بودن مصرف ایجاد شده (ton)	۵/۱۱ E+۰۴	جمع هزینه های متغیر (میلیون تومان)
۸/۲۵ E+۰۵	مقدار آب استفاده شده (ton)	۱۳۰۰۰	جمع هزینه های ثابت (میلیون تومان)
۱۷/۵۰۰۲	میزان مسئولیت اجتماعی	۲/۹۹ E+۰۵	میزان سود (میلیون تومان)

شکل ۵. مقادیر توابع هدف و اجزای آن در پاسخ با کم‌ترین سود اقتصادی (الگوریتم SPEA – II).

۱	وجود یا عدم وجود هیپ لیچینگ	۴	متوسط درصد خاک اول
۱	وجود یا عدم وجود جواهرسازی	۱۵	متوسط درصد خاک دوم
۲/۱۹ E+۰۳	مقدار طلای تولید شده	۳۴	متوسط درصد خاک سوم
۳۳	تعداد مشاغل ایجاد شده (نفر)	۲۸	متوسط درصد خاک چهارم
۸/۲۹ E+۰۳	مقدار هزینه های رفاهی (میلیون تومان)	۱۹	متوسط درصد خاک پنجم
۴/۲۸ E+۰۹	مقدار گازهای گلخانه یی ایجاد شده (ton)	۴/۱۵ E+۰۵	میزان درآمد (میلیون تومان)
۴/۰۰ E+۰۱	مقدار باطله بودن مصرف ایجاد شده (ton)	۵/۹۲ E+۰۴	جمع هزینه های متغیر (میلیون تومان)
۹/۵۳ +۰۵	مقدار آب استفاده شده (ton)	۱۳۰۰۰	جمع هزینه های ثابت (میلیون تومان)
۱۶/۴۲۶۸۹۳	میزان مسئولیت اجتماعی	۳/۳۴ E+۰۵	میزان سود (میلیون تومان)

شکل ۶. مقادیر توابع هدف و اجزای آن در پاسخ با کم‌ترین سود اقتصادی (الگوریتم NSGA – II).



شکل ۷. تحلیل حساسیت متغیر مقدار خاک قابل استفاده برای فرآوری در الگوریتم SPEA – II.

زمانی از هر نوع خاک تنها ۷۵۰۰ تن برای فرآوری کردن قابل استفاده است. با تغییر این پارامتر به مقادیر ۷۵۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ در الگوریتم SPEA-II شکل ۷ به دست می‌آید.

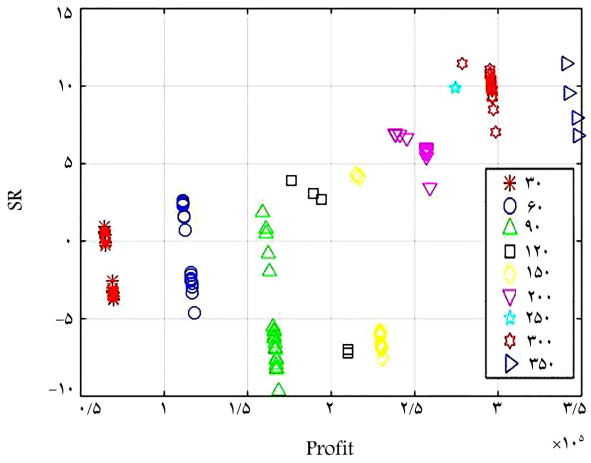
۲.۸. تحلیل حساسیت بر پارامتر مقدار ظرفیت فروش کیلوگرم طلا

از پارامترهای مهم دیگر مقدار ظرفیت فروش طلا است. پارامتری که مشخص می‌کند که در هر دوره زمانی مجموعاً چند کیلوگرم شمش طلا و جواهر می‌توان فروخت. برای این منظور ظرفیت فروش در مقادیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ تغییر داده شده است تا میزان تغییرات توابع هدف بر اساس تغییر این پارامتر درک شود. شکل ۸ مربوط به این تغییرات در الگوریتم SPEA-II است.

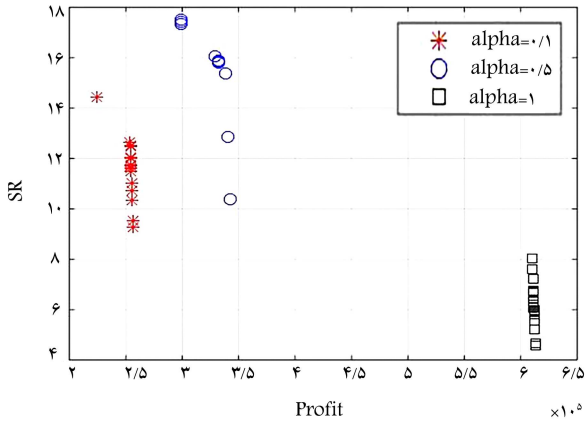
نکته‌ی قابل مشاهده این است که با افزایش میزان فروش، هر دو تابع سود اقتصادی و مسئولیت اجتماعی به‌صورت محسوسی افزایش می‌یابد. این به‌دلیل افزایش میزان شغل و افزایش هزینه‌های رفاهی است که مسئولیت اجتماعی نیز افزایش می‌یابد. در برخی از پاسخ‌های الگوریتم‌ها با توجه به این که اثر منفی تأثیرات زیست‌محیطی بیشتر است، مسئولیت اجتماعی عددی منفی نیز می‌پذیرد.

۳.۸. تحلیل حساسیت پارامتر ضریب خوش‌بینی

ضریب خوش‌بینی پارامتری است که میزان خوش‌بینی یا بدبینی احتمالاتی با آن سنجیده می‌شود. به عبارتی این پارامتر که مقدار آن عددی بین صفر و ۱ است، هر قدر به صفر نزدیک‌تر شود به معنای بدبینی به آینده، و هرقدر به ۱ نزدیک‌تر شود، به معنای خوش‌بینی به آینده است. در این مدل زنجیره‌ی تأمین دو عامل مقدار تقاضای طلا در بورس کالا و قیمت طلا بر اساس ضریب خوش‌بینی مقدار می‌گیرند. به این ترتیب سه عدد ۰/۱، ۰/۵ و ۱ به این پارامتر داده شده است تا تأثیر این تغییرات بر دو تابع هدف سود اقتصادی و مسئولیت اجتماعی سنجیده شود. در شکل ۹ نتایج



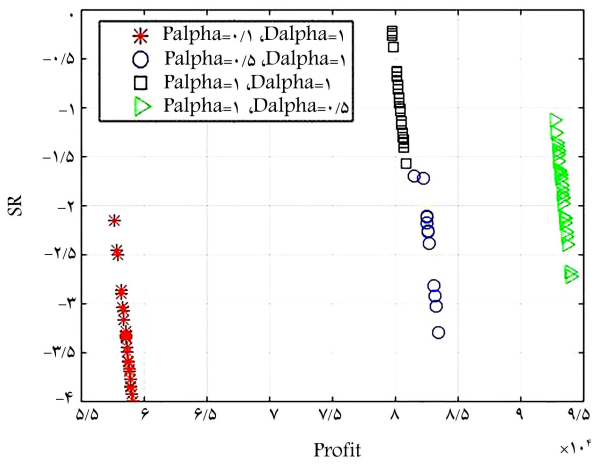
شکل ۸. تحلیل حساسیت متغیر ظرفیت فروش در الگوریتم $SPEA-II$.



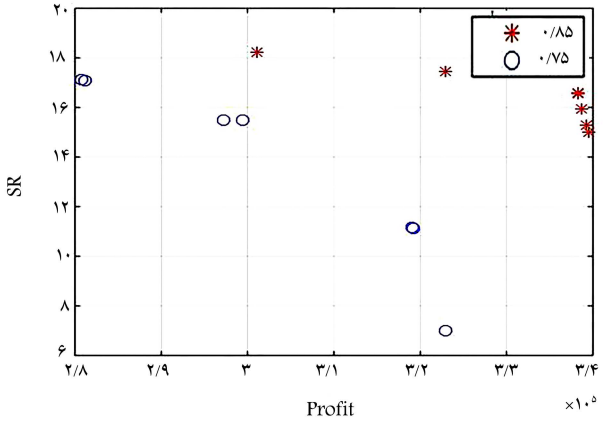
شکل ۹. تحلیل حساسیت پارامتر ضریب خوش‌بینی در الگوریتم $SPEA-II$.

به دست آمده از الگوریتم SPEA-II قابل مشاهده است. بر این اساس می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضریب خوش‌بینی میزان سود اقتصادی بسیار افزایش می‌یابد. اما برای مثال با افزایش ضریب خوشی‌بینی از ۰/۱ تا ۰/۵ افزایش زیادی در مقادیر مسئولیت اجتماعی دیده نمی‌شود. درواقع وضعیتی است که با تغییر یک پارامتر تفاوت خاصی در یکی از دو تابع هدف مشاهده نمی‌شود. این به دلیل عدم تأثیرگذاری این فاکتور بر آن تابع هدف است.

اما با ۱ شدن ضریب خوش‌بینی، میزان مسئولیت اجتماعی نیز افزایش پیدا می‌کند. چرا که با افزایش میزان سود، می‌توان میزان هزینه‌ی رفاهی اختصاص یافته به منطقه را نیز افزایش داد و در نتیجه تأثیر مثبتی بر مسئولیت اجتماعی شرکت گذاشت. مقدار ضریب خوش‌بینی دو پارامتر قیمت طلا و مقدار تقاضای طلا مساوی هم در نظر گرفته شده بودند. در صورتی که این دو پارامتر مقادیر متفاوتی بپذیرند، می‌توان پارامتر مهم‌تری را نیز تحلیل کرد. در این حالت ضریب خوش‌بینی قیمت طلا با Palpha و ضریب خوش‌بینی تقاضای طلا در بورس کالا را با Dalpha نشان داده می‌شود. ضمناً در این تحلیل حساسیت مقدار ظرفیت فروش طلا را برابر ۳۰ کیلوگرم تعیین شد تا اثرات هر دو پارامتر به خوبی مشخص شود. چراکه در مقادیر بالای ظرفیت فروش، مقدار تقاضای طلا در بورس کالا عامل تعیین‌کننده‌یی نیست و مقدار فروش از محل جواهرسازی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقدار فروش در بورس کالاست. در شکل ۱۰ این تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم SPEA-II انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب خوش‌بینی



شکل ۱۰. تحلیل حساسیت به دو پارامتر ضریب خوش‌بینی در الگوریتم $SPEA-II$.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت تغییر پارامتر راندمان کارخانه بر توابع هدف در الگوریتم $SPEA-II$.

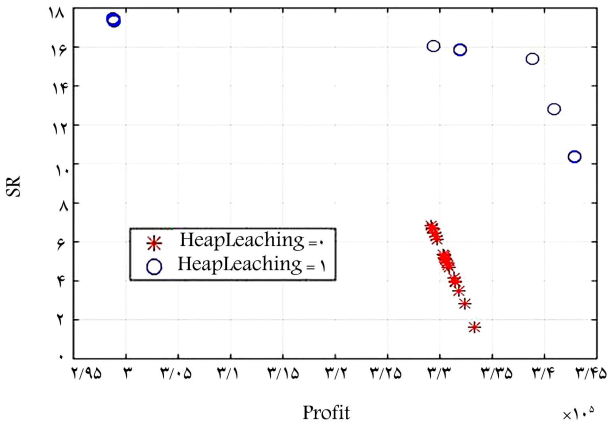
قیمت طلا عامل مهم‌تری نسبت به ضریب خوش‌بینی مقدار تقاضای طلا در بورس کالاست.

۴.۸. تحلیل حساسیت پارامتر راندمان تولید کارخانه

درصد راندمان تولید کارخانه طلای زرشوران به معنای توانایی این کارخانه در استحصال طلا از خاک است. برای مثال در صورتی که راندمان کارخانه را ۸۰ درصد در نظر بگیریم، فرآوری موجود در این کارخانه تنها ۸۰ درصد طلای موجود در خاک را تولید خواهد کرد و ۲۰ درصد مابقی با خاک باطله موجود به سد باطله سرازیر خواهد شد. در این حالت با در نظر گرفتن دو حالت راندمان کاری ۷۵ درصد و ۸۵ درصد به تحلیل حساسیت توابع هدف بر اثر تغییر این پارامتر پرداخته خواهد شد. در شکل ۱۱ نتایج این تحلیل حساسیت در الگوریتم SPEA-II آورده شده است.

۵.۸. تحلیل حساسیت وجود یا عدم وجود هیپ‌لیچینگ

هیپ‌لیچینگ واحدی است که می‌توان در آن طلای موجود در خاک باطله را نیز با یک راندمان ۵۰ درصدی استحصال کرد. در شکل ۱۲ تأثیر وجود یا عدم وجود واحد هیپ‌لیچینگ در توابع هدف در الگوریتم SPEA-II نشان



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت وجود یا عدم وجود هیپ‌لیچینگ بر توابع هدف در الگوریتم SPEA – II.

داده شده است. می‌توان دید که در حالت هیپ‌لیچینگ مسئولیت اجتماعی به میزان زیادی افزایش پیدا می‌کند. این به دلیل تعداد مشاغل ایجاد شده در این مرکز و استفاده از خاک باطله‌ی دپو شده برای تولید طلاست. با وجود این نکات مثبت، هزینه‌ی استقرار واحد هیپ‌لیچینگ سبب می‌شود بخشی از سود اقتصادی صرف تأسیس این واحد شود و در نتیجه سود اقتصادی کاهش یابد.

۹. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

اهداف دوگانه‌ی مدل پیشنهادی این زنجیره‌ی تأمین، کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و بیشینه‌سازی مسئولیت اجتماعی است. در بحث مسئولیت‌های اجتماعی شرکت با توجه به فعالیت‌های معدنی مرتبط با این کارخانه، ابتدا با استفاده از پیشینه‌ی تحقیق به بررسی و جمع‌بندی تأثیرات اجتماعی یک مجموعه‌ی معدنی پرداخته شد. بر اساس بررسی‌های انجام شده و با توجه به بیانیه‌ی خط‌مشی سازمان، متغیرهای تعداد مشاغل ایجاد شده و میزان کمک مالی کارخانه برای رفاه منطقه به‌عنوان متغیرهای اقتصادی ـ اجتماعی و متغیرهای میزان مصرف آب، میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و میزان تولید ضایعات به‌عنوان متغیرهای محیط‌زیستی ـ اجتماعی مؤثر در مسئولیت‌های اجتماعی انتخاب شد. به منظور طراحی مدل ابتدا با توجه به ویژگی‌های واقعی زنجیره‌ی تأمین مورد مطالعه، به فرموله کردن مجموعه‌یی از فرضیات، اهداف و محدودیت‌های مسئله پرداخته شد. در گام دوم مدل نظری طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار متلب کدنویسی شد و صحت مدل مورد تایید نخبگان مجموعه قرارگرفت. از دو الگوریتم نسخه‌ی دوم ژنتیک مرتب شده نامغلوب و نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو جهت حل مدل استفاده شد. با مقایسه‌ی دو الگوریتم با توجه به این که پارامترهای مربوط به جهش و ترکیب برای دو الگوریتم یکسان در نظرگرفته شده بودند، الگوریتم NSGA-II پاسخ‌های بهتری نسبت به الگوریتم SPEA-II ارائه داده بود. اما مزیتی که پاسخ‌های SPEA-II نسبت به پاسخ‌های NSGA-II دارد، در نزدیکی پاسخ‌های این الگوریتم به یکدیگر است. در واقع پاسخ‌های SPEA-II تمرکز بیشتری دارند. این تمرکز بیشتر سبب می‌شود تا تصمیم‌گیرنده با پاسخ‌های بسیار متفاوتی روبه‌رو نباشد و بنابراین تصمیم‌گیری راحت‌تری داشته باشد. علی‌رغم این که گزینه‌های متعدد یک مزیت به شمار می‌رود، محدود بودن گزینه‌ها نیز در صورتی که بهینه‌سازی تا حد خوبی انجام شده باشد، سبب راحتی در تصمیم‌گیری می‌شود. ضمناً یک مزیت الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم SPEA-II در این مسئله، این است که الگوریتم NSGA-II تقریب بهتری از جبهه‌ی پارتو ارائه می‌دهد در حالی که الگوریتم SPEA-II جبهه‌ی پارتو را به‌صورت یک خط نمایش می‌دهد. این خطی بودن نشان‌دهنده‌ی این است که الگوریتم SPEA-II نتوانسته است جبهه‌ی پارتو را با تقریب خوبی به دست آورد. با افزایش مقدار خاک قابل استفاده، می‌توان به سود اقتصادی بیشتری رسید. با توجه به تأثیر این عامل می‌توان گفت که در صورتی که چشم‌انداز درستی از مقدار خاک‌های قابل استفاده در ۱۲ دوره زمانی آتی وجود داشته باشد، می‌توان برنامه‌ریزی درستی برای تولید و فروش نیز داشت. از ملزومات پیش‌بینی بهتر برای موجودی خاک معدنی از هر نوع خاک و میزان عیار آنها، زمین‌شناسی و عکس‌برداری‌های دقیق معدنی است. عامل دیگر مؤثر بر مسئولیت‌های اجتماعی، تأثیر مرکز هیپ‌لیچینگ در مسئولیت اجتماعی است. با تأسیس این واحد از طلای خاک سد باطله استفاده می‌شود و به این ترتیب از میزان خاک باطله مورد استفاده کم می‌شود و علاوه بر این که موجودی طلا و میزان فروش افزایش می‌یابد، میزان اشتغال نیز افزایش پیدا می‌کند. ضمنا با توجه به تحلیل حساسیت ظرفیت فروش طلا، می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چه قدر مقدار فروش بیشتر باشد علاوه بر این که سود اقتصادی بیشتری وجود دارد، مسئولیت اجتماعی بیشتری نیز به دست می‌آید. در واقع علی رغم این که با افزایش تولید، میزان تولید گازهای گلخانه‌یی و میزان تولید خاک باطله و همچنین میزان مصرف آب افزایش پیدا می‌کند، اما سود رفاهی تقسیمی به منطقه و اشتغال ایجاد شده بر این عوامل منفی غلبه می‌کنند و سبب بیشتر شدن مسئولیت اجتماعی می‌شوند.

با توجه به اثرات بسیار زیاد ضریب خوش‌بینی در تقاضای طلا و قیمت طلا بر میزان سود اقتصادی و مسئولیت اجتماعی شرکت، باید برآورد احتمالی خوبی از این دو عامل داشت. به این ترتیب مجموعه می‌تواند برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای فروش طلا نیز داشته باشد. و با توجه به اثرات گسترده جواهرسازی بر سودسازی و افزایش مسئولیت اجتماعی، به نظر تأسیس یک واحد جواهرسازی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اثرات زیست‌محیطی خاک باطله، به نظر می‌رسد با تأسیس یک واحد هیپ‌لیچینگ می‌توان علاوه بر ایجاد شغل، میزان تولید طلا را نیز بیشتر کرد و به این ترتیب بر مسئولیت اجتماعی شرکت تأثیر مثبتی گذاشت. به سایر محققان پیشنهاد می‌شود هزینه‌های مربوط به مواد اولیه با توجه به تورم شدید و اثرات تحریمی می‌تواند به‌صورت احتمالی در نظرگرفته شود. همچنین می‌توان مسئله مکان‌یابی تأمین‌کننده‌ها و مراکز جواهرسازی را با توجه به دو تابع هدف مسئولیت اجتماعی و سود اقتصادی نیز به مسئله اضافه کرد و هر کدام از اثرات زیست‌محیطی و ایجاد شغل را به‌صورت هزینه و سود ریالی تبدیل کرد. با توجه به خاص بودن خاک معدن زرشوران و نیاز به واحد اکسایش که هزینه‌ی زیاد و زمان بسیار زیادی برای استحصال طلا صرف می‌کند، می‌توان مشابه این مدل را برای سایر معادن طلا که نیازی به واحد اکسایش ندارند پیاده‌سازی کرد. با توجه به این که قیمت طلا عاملی مؤثر بر میزان سود این مجموعه و نیز عاملی مؤثر برای برنامه‌ریزی فروش طلا در دوره‌های مختلف است، بهتر است قیمت احتمالی طلا بر اساس عواملی نظیر قیمت احتمالی دلار، قیمت احتمالی نفت، میزان تورم و سایر عوامل مؤثر به دست آید تا بتوان تأثیر این عوامل بر یک مجموعه تولیدی طلا را نیز به دست آورد. با توجه به این که قیمت دلار تأثیر زیادی بر قیمت مواد اولیه نیز دارد، بررسی این عامل حیاتی‌تر محسوب می‌شود.

منابع (References)

1. Fazli khalaf, M., Chaharsooghi, S.K. and Pishvaee, M.S. "A reliable closed-loop supply chain network design under uncertainty: a case study of a lead-acid battery manufacturer", *Journal of Modeling in Engineering*, **12**(39), pp. 45-60 (In Persian) (2015).
2. Hajiaghaei-Keshteli, M. and Fathollahi-Fard, A.M. "A set of efficient heuristics and metaheuristics to solve a two-stage stochastic bi-level decision-making model for the distribution network problem", *Computers & Industrial Engineering*, **123**, pp. 378-395 (2018).
3. Dehghan, E. and et al. "Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, **123**, pp. 220-231 (2018).
4. Feitó- Cespón, M. and et al. "Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: a case study", *Journal of Cleaner Production*, **151**, pp. 206-217 (2017).
5. Paydar, M.M. and Olfati, M. "Designing and solving a reverse logistics network for polyethylene terephthalate bottles", *Journal of Cleaner Production*, **195**, pp. 605-617 (2018).
6. Bazan, E., Jaber, M.Y. and Zanoni, S. "A review of mathematical inventory models for reverse logistics and the future of its modeling: an environmental perspective", *Applied Mathematical Modelling*, **40**(5), pp. 4151-4178 (2016).
7. Brandenburg, M. and et al. "Quantitative models for sustainable supply chain management: developments and directions", *European Journal of Operational Research*, **233**(2), pp. 299-312 (2014).
8. Dehghanian, F. and Mansour, S. "Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. Resources", *Conservation and Recycling*, **53**(10), pp. 559-570 (2009).
9. Eskandari-Khanghahi, M. and et al. "Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **71**, pp. 236-250 (2018).
10. Eskandarpour, M. and et al. "Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review", *Omega*, **54**, pp. 11-32 (2015).
11. Soleimani, H. "A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: a case study in a travertine quarry", *Resources Policy* (2018).
12. Rajeev, A. and et al. "Evolution of sustainability in supply chain management: a literature review", *Journal of Cleaner Production*, **162**, pp. 299-314 (2017).
13. Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A. and Asadi, K. "Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NRGA", *Information Sciences*, **292**, pp. 57-74 (2015).
14. Bals, L. and Tate, W.L. "Sustainable supply chain design in social businesses: advancing the theory of supply chain", *Journal of Business Logistics*, **39**(1), pp. 57-79. (2018).
15. Ranjbar, Y. and et al. "A competitive dual recycling channel in a three-level closed loop supply chain under different power structures: pricing and collecting decisions", *Journal of Cleaner Production*, **272**, pp. 1-20 (2020).
16. Govindan, K. and et al. "An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, **242**, pp. 1-16 (2020).
17. Nayeri, S. and et al. "Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, **148**, pp. 1-30 (2020).
18. Taleizadeh, A.A., Haghighi, F. and Niaki, S.T.A. "Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products", *Journal of Cleaner Production*, **207**, pp. 163-181 (2019).
19. Shen, L., Muduli, K. and Barve, A. "Developing a sustainable development framework in the context of mining industries: AHP approach", *Resources Policy*, **46**, pp. 15-26 (2015).
20. Fleury, A.-M. and Davies, B. "Sustainable supply chains-minerals and sustainable development, going beyond the mine", *Resources policy*, **37**(2), pp. 175-178 (2012).
21. Yawar, S.A. and Seuring, S. "Management of social issues in supply chains: a iterature review exploring social issues, actions and performance outcomes", *Journal of Business Ethics*, **141**(3), pp. 621-643 (2017).
22. Muduli, K. and et al. "Barriers to green supply chain management in Indian mining industries: a graph theoretic approach", *Journal of Cleaner Production*, **47**, pp. 335-344 (2013).
23. Soleimani, H. and et al. "Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, **109**, pp. 191-203 (2017).
24. Samadi, A. and et al. "Heuristic-based metaheuristics to address a sustainable supply chain network design problem", *Journal of Industrial and Production Engineering*, **35**(2), pp. 102-117 (2018).
25. Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A.M. and Hajiaghaei-Keshteli, M. "Sustainable tire closed-loop supply chain network design: hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks", *Journal of Cleaner Production*, **196**, pp. 273-296 (2018).
26. Zhen, L., Huang, L. and Wang, W. "Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, **227**, pp. 1195-1209 (2019).
27. Valizadeh, J. and et al. "Robust optimization model for sustainable supply chain for production and distribution of polyethylene pipe", *Journal of Modelling in Management*, **15**(4), pp. 1613-1653 (2020).
28. Zamanian, M.R. "Multi-objective optimization model for the sustainable natural gas supply chain", *Journal of Science and Engineering Elites*, **5**(4), pp. 22-39 (In Persian) (2020).

29. Liu, M. and et al. "A bi-objective green closed loop supply chain design problem with uncertain demand", *Sustainability*, **10**(4), p. 967 (2018).

30. Sarrafha, K. and et al. "A bi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of a multi-echelon supply chain network design: a new tuned MOEA", *Computers & Operations Research*, **54**, pp. 35-51 (2015).

31. Zitzler, E. and Laumanns, M. and Thiele, L. "SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm", *TIK-Report*, **103**, pp.1-21 (2001).

32. Haupt, R.L. "Optimum population size and mutation rate for a simple real genetic algorithm that optimizes array factors", *In IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium*, **2**, pp. 1034-1037 (2000).