

دسترسی در سایت <http://jnrm.srbiau.ac.ir>

سال پنجم، شماره بیست و دوم، بهمن و اسفند ۱۳۹۸

شماره شاپا: ۲۵۸۸-۵۸۸۸



پژوهش‌های نوین در ریاضی



دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

برنامه‌ریزی عملیات و طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن استخدام و آموزش نیروی انسانی

رضا وکیلی مطیع^{۱*}، رضا توکلی مقدم^۲، علی حاجی آقا بزرگی امیری^۳

^(۱) دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پردیس البرز، دانشگاه تهران، ایران

^(۲و۳) دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۹۷/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۸/۰۳

چکیده

مدلسازی و حل بهینه مسائل مدیریت زنجیره تأمین موجب تصمیم‌گیری کارا در برنامه‌ریزی استراتژیک و عملیات زنجیره می‌شود که در پی آن مزیت رقابتی ایجاد می‌شود و قدرت زنجیره افزایش می‌یابد. امروزه با برنامه‌ریزی زنجیره تأمین پایدار می‌توان علاوه بر تحقق اهداف اقتصادی، اهداف و ملاحظات اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز ارضاء نمود. در این تحقیق به مدل‌سازی و حل مسئله برنامه‌ریزی عملیات و طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار پرداخته می‌شود که در آن به استخدام و آموزش نیروی انسانی زنجیره تأمین نیز توجه می‌شود. ابتدا یک مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه ارائه می‌شود که در آن شبکه زنجیره تأمین طراحی می‌شود و متغیرهای استراتژیک (مثل مکان‌یابی و تعیین ظرفیت تسهیلات، انتخاب تکنولوژی، استخدام و آموزش نیروی انسانی ماهر و یا نیمه‌ماهر و غیره) تعیین می‌شود. سپس مدل چنددوره‌ای به منظور برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تأمین طراحی شده ارائه می‌شود که در آن مقدار تولید، موجودی، عرضه، کمبود، جذب موقت نیروی انسانی و غیره در هر دوره به صورت بهینه بدست آورده می‌شود. در مدل استراتژیک پیشنهادی، موازنه اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین (اقتصادی)، بیشینه‌سازی اشتغال (اجتماعی)، و کمینه‌سازی اثرات زیست محیطی، با روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته انجام می‌شود. همچنین الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسئله در ابعاد بزرگ بکار گرفته می‌شود. در بخش پایانی تحقیق به مطالعه عددی پرداخته می‌شود تا علاوه بر ارزیابی مدل و رویکردهای حل پیشنهادی، نتایج عددی تحلیلی و بینش‌های مدیریتی ارائه شود.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار، طراحی شبکه، برنامه‌ریزی عملیات، بهینه‌سازی چندهدفه، اپسیلون محدودیت تکامل یافته، تجزیه بندرز.

۱- مقدمه

طراحی شبکه زنجیره تأمین، به عنوان یک تصمیم استراتژیک، نقش مهمی را در بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین و افزایش قدرت رقابت‌پذیری آن‌ها ایفا می‌کند. در این مرحله، تصمیمات مختلفی از انواع استراتژیک آن، در ارتباط با تعیین مکان، تعداد و ظرفیت تسهیلات شبکه و همچنین جریان مواد و جابه‌جایی‌های آن‌ها اتخاذ می‌گردد [۱، ۲].

در حالی که در طول سالیان متمادی از پیاده‌سازی مفهوم زنجیره‌های تأمین در حوزه کسب و کار، اهداف اقتصادی چون کمینه‌سازی هزینه کل و یا بیشینه‌سازی سودآوری زنجیره‌های تأمین، به عنوان اهداف غایی و نهایی از توسعه هر زنجیره تأمین مورد توجه بوده است، امروزه افزایش توجهات نسبت به پیامدهای اجتماعی و زیست محیطی فعالیت‌های کسب و کار موجب شده تا شرکت‌ها بیش از گذشته نسبت به تأثیرات زیست محیطی محصولات و عملیات خود و همچنین ایمنی کارمندان و کل جامعه، متعهد و پاسخگو باشند. وجود فشارهای بین المللی بر کاهش تأثیرات گازهای گلخانه‌ای و نگرانی‌ها بر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، همه و همه زنجیره‌های تأمین را به سوی مدیریت زنجیره تأمین پایدار (SSCM^۱) سوق داده‌اند [۳]. مدیریت زنجیره تأمین پایدار در تعریف خود، به ملاحظه تأثیرات اجتماعی، زیست محیطی عملیات زنجیره تأمین و همچنین عملکرد اقتصادی آن در مدیریت اطلاعات، مواد و جریان سرمایه در سراسر زنجیره تأمین اشاره دارد [۴].

توسعه زنجیره‌های تأمین با در نظرگیری همزمان "زنجیره تأمین روبه جلو" و "زنجیره تأمین بازگشتی" رویکرد یکپارچه‌ای را ایجاد می‌کند که به عنوان "زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC)" شناخته می‌شود [۵]. زنجیره‌های تأمین بسته شده که با هدف جذب ارزش از محصولات مصرف شده و کاهش تأثیرات مخرب زیست محیطی از آن‌ها به عنوان زنجیره‌های تأمین دوست دار طبیعت یاد می‌شود، به واقع در مسیر پایداری در حرکتند. این

زنجیره‌ها با بازیابی و بازیافت کالاهای مصرف شده به جای انهدام آن‌ها، به عنوان یک معیار اثبات شده در جهت بهبود پایداری زنجیره‌های تأمین شناخته شده‌اند [۳]. بسته‌بودن حلقه زنجیره تأمین در مقایسه با زنجیره‌های تأمین مرسوم، سیستم پیچیده‌تری را ایجاد می‌نماید. این پیچیدگی را می‌توان به دو علت مربوط دانست. دلیل نخست به مسائلی چون مدیریت انبارهای مواد، جریان‌های بازگشت و حمل و نقل، مدیریت و بازتولید همزمان در یک مجموعه از تسهیلات تولید، اشاره دارد که هماهنگ‌سازی و مدیریت شبکه را با چالش‌های گوناگون مواجه می‌سازد. همچنین دلیل دوم این پیچیدگی را می‌توان در وجود عدم قطعیت بالا در ساختار این زنجیره‌های تأمین، جستجو کرد. عدم قطعیت در این نوع از زنجیره‌های تأمین، نه تنها از سمت تقاضای مشتریان، بلکه به واسطه عدم قطعیت در عملکرد جمع آوری و بازیابی و همچنین به علت وجود مشکلات موجود در جریان‌های اطلاعاتی و ارتباطاتی بین فرآیندهای بازگشتی و فرآیندهای رو به جلو افزایش می‌یابد [۶، ۷].

مدیریت و تصمیم‌گیری بهینه در ارتباط با چنین زنجیره تأمینی، ایجاد می‌کند تا سازمان‌ها بر مسئله طراحی و سازماندهی هر دو شبکه زنجیره تأمین بازگشتی و همچنین زنجیره تأمین پیشرو، برنامه‌ریزی دقیق داشته باشند، زیرا بر خلاف گذشته که مبحث زنجیره تأمین حلقه بسته به عنوان رویکردی در جهت کاهش هزینه‌ها شناخته می‌شد، امروزه توسعه این رویکرد به یک فرصت درآمدزا برای تولیدکنندگان تبدیل شده است که می‌تواند با سازگاری بالا با اهداف مدیریت زنجیره تأمین پایدار، مورد اقبال و توجه بیشتر پژوهشگران و فعالان کسب‌وکار قرار گیرد [۸].

در این تحقیق، مسئله برنامه‌ریزی عملیات و طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار (SCLSC^۳) مدل سازی و حل می‌گردد که در آن به استخدام و آموزش نیروی انسانی زنجیره تأمین نیز توجه می‌شود. تصمیمات دوره‌ای برنامه‌ریزی عملیات همچون مقدار تولید،

1. Sustainable Supply Chain Management (SSCM)
2. Closed Loop Supply Chain (CLSC)

مسئله مکانیابی را در یک سیستم لجستیک معکوس بازیافت مورد بررسی قرار می‌دهد. از مهمترین نوآوری‌های ارائه شده در این تحقیق می‌توان به تحلیل رفتار هزینه در ساختارهای مختلف شبکه و همچنین هزینه حمل و نقل به عنوان عامل تعیین کننده در طراحی شبکه جمع آوری، اشاره نمود [۹].

پیشوایی و همکاران [۱۰]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی استوار آمیخته را جهت کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل و هزینه ثابت استقرار در یک شبکه لجستیک معکوس چندسطحی با استفاده از الگوریتم‌های شبیه سازی ارائه کردند. همچنین این نویسندگان در سال ۲۰۱۲، با ارائه مدلی به بررسی مسئولیت‌های اجتماعی در طراحی زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. مدل آن‌ها کاهش هزینه‌ها و افزایش مسئولیت اجتماعی را در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین در برمی‌گرفت. همچنین آن‌ها از تکنیک بهینه سازی استوار برای حل مدل خود استفاده کردند [۱۱]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۳ ارائه شد، نویسندگان [۱۲] از منطق فازی جهت مدل‌سازی فعالیت‌ها در یک زنجیره تأمین حلقه بسته با تعریف اهداف چندگانه استفاده کردند. مدل پیشنهادی اهدافی چون بهینه‌سازی سطوح خدمات، بهینه‌سازی رضایت‌مندی خریداران و فروشنده‌گان در زنجیره و کاهش هزینه کل در زنجیره تأمین را شامل می‌شد. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۴ به انجام رسیده است، نویسنده پژوهشی را با تمرکز بر ارتباط بین مواد بازیافتی و جدید با در نظرگیری هزینه‌های تولید، بهره‌وری ماشین و مصرف انرژی متغیر به انجام رسانده است. در آن تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی فازی چندهدفه خطی به منظور تحلیل ارتباط بین فاکتورهای درگیر در هزینه‌های موثر و انتشار CO₂ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

گوانین و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی مسئله تخصیص سفارش را به عنوان یک تصمیم استراتژیک در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی و پژوهش قرار داده‌اند. مسئله با هدف کمینه‌سازی هزینه کل و تاثیرات زیست‌محیطی زنجیره‌تأمین در قالب یک مسئله ریاضی چندهدفه مدل‌سازی شده و در آن انواع تصمیمات عملیاتی و تاکتیکی در کنار تصمیمات استراتژیکی فوق،

موجودی، توزیع، بازیافت، کمبود، بعد از تصمیمات استراتژیک شبکه و وابسته به شبکه زنجیره تأمین طراحی شده و ظرفیت تسهیلات آن صورت می‌پذیرد. از این رو، در این تحقیق ابتدا یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه به منظور تحقق اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شبکه ارائه می‌شود؛ و پس از تعیین طرح بهینه شبکه، مدل برنامه‌ریزی دوره‌ای به منظور اخذ تصمیمات تاکتیکی/عملیاتی شبکه ارائه می‌شود. از روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته برای موازنه اهداف استفاده می‌شود و الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسئله در ابعاد بزرگ بکارگرفته می‌شود.

از جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: پرداختن همزمان تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی مسئله برنامه‌ریزی SCLSC؛ تعریف سه هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و بکارگیری روش حل چندهدفه جدید برای موازنه آن‌ها، توجه به استخدام و آموزش نیروی انسانی زنجیره‌تأمین در سطح استراتژیک و همچنین جذب موقت نیروی انسانی در سطوح دوره‌ای؛ و نهایتاً ارائه یک روش حل کارا مبتنی بر تکنیک‌های تجزیه برای حل مسئله برنامه‌ریزی SCLSC در ابعاد بزرگ.

در بخش بعد به مرور ادبیات تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش ۳، به تبیین مسئله و مدل‌سازی آن پرداخته می‌شود. در بخش ۴ نحوه حل مسئله و بکارگیری مدل‌های پیشنهادی توضیح داده می‌شود. در بخش ۵ به آزمایشات عددی و تحلیل نتایج و همچنین ارزیابی مدل و روش حل پیشنهادی این تحقیق پرداخته می‌شود. نهایتاً، در بخش ۶ جمع‌بندی و پیشنهاد تحقیقات آتی آورده می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش بررسی اجمالی در ادبیات موضوع "طراحی زنجیره های تأمین حلقه بسته پایدار" در طی سال‌های اخیر صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه کروز و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته را جهت استقرار سیستم جمع آوری اتومبیل‌های از رده خارج در مکزیک ارائه کردند. مدل پیشنهادی در این تحقیق

در فرآیند مدل‌سازی وارد می‌شود [۱۴].

بابازاده و همکاران (۲۰۱۷) به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین باز تولید بیودیزل پرداخته‌اند. در مدل پیشنهادی آن‌ها کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین بیودیزل و کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از آن در شرایط عدم قطعیت در قالب یک مدل برنامه‌نویسی احتمالی چند هدفه مدل‌سازی می‌شود. در مسئله ارائه شده در این تحقیق، تصمیمات استراتژیکی و عملیاتی مانند تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت تسهیلات استقرار یافته، گردش موجودی و ... تحت مفروضات واقعی تعیین می‌شود [۱۵].

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فازی پایدار، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز پرداخته است. در مدل‌سازی و تعریف اهداف این مسئله، هر سه بعد از ابعاد پایداری تعریف و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک در سناریوهای مختلف استفاده شده است. نتایج حاصل از حل این مدل پیشنهادی تصمیمات بهینه‌ای را در مورد باز/بسته بودن مراکز مختلف تولید، انبار، بازیافت و جریان بهینه محصول بین آن‌ها فراهم می‌آورد [۸]. مدل‌سازی و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار با در نظرگیری ملاحظات و ابعاد پایداری در مقاله ورسی و همکاران (۲۰۱۷) مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان در این مقاله، مدل خود را در ابعاد بزرگ و با استفاده از یک مسئله برنامه‌نویسی آمیخته چندهدفه ارائه داده و برای حل آن از روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته و تحت سناریوهای مختلف استفاده کرده‌اند [۱۶]. فرد و حاجی‌آقایی در سال ۲۰۱۸ یک مدل تصمیم‌گیری سه سطحی را جهت فرموله کردن مسئله "طراحی شبکه زنجیره تأمین پیشرو/معکوس" ارائه کرده‌اند. نویسندگان مقاله نشان دادند که مدل ارائه شده توسط آن‌ها قابل توسعه در دنیای واقعی است و از روش‌های مختلف متاهوریستیک در جهت نزدیک کردن شکاف نتایج با مطالعه در دنیای

واقعی استفاده کردند [۱۷].

یادگاری و همکاران در سال ۱۳۹۷ در مقاله خود، مسئله طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته را با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح آمیخته مدل‌سازی و حل نموده‌اند. مدل ارائه شده در این پژوهش، چندمحصولی و چند دوره‌ای و به صورت پویا در نظر گرفته شده است [۱۸].

در مقاله ارائه شده توسط حاجی‌آقایی و فرد (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح آمیخته جدید به منظور فرموله کردن مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظرگیری فرض تخفیف (برای اولین بار) توسعه یافته است. نویسندگان در این مقاله با هدف ارزیابی رویکردهای مختلف روش‌های فراابتکاری در حل مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار، از ۹ روش فراابتکاری مختلف به منظور حل مدل پیشنهادی خود استفاده کرده‌اند [۱۹]. صاحب‌جمع و همکاران در سال ۲۰۱۸، مسئله "بازیافت لاستیک‌های فرسوده" را با مدل‌سازی ابعاد سه‌گانه پایداری در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار مورد بررسی قرار داده‌اند. محققان در این مقاله از ۴ الگوریتم فراابتکاری جدید به منظور مدل‌سازی زنجیره‌های تأمین در مقیاس بزرگ بهره برده‌اند [۲۰].

جدول ۱ به منظور مقایسه پژوهش با برخی از پژوهش‌هایی که اخیر در حوزه SCLSC ارائه شده است.

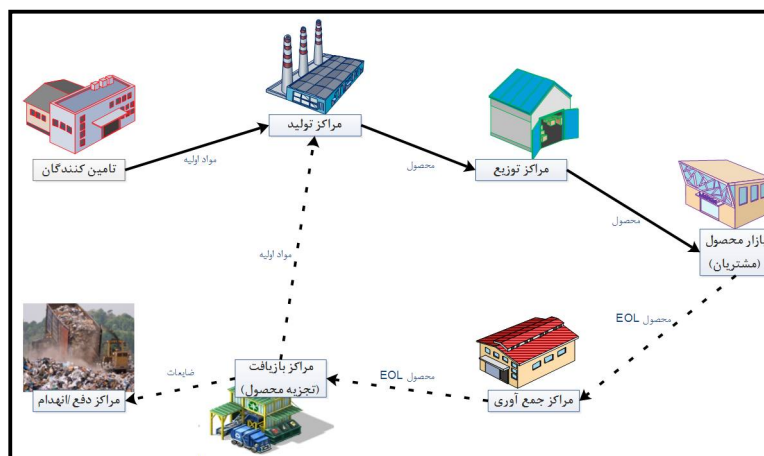
۳- بیان مسئله و مدل‌سازی ریاضی

یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر بگیرد (شکل ۱). مدیریت این زنجیره تأمین در پی آن است که با طراحی شبکه و برنامه‌ریزی بهینه عملیات آن، کل هزینه‌های شبکه عرضه محصول خود را کمینه گرداند تا مزیت رقابتی بیشتری در بازار داشته باشد و هدف اقتصادی محقق گردد و همچنین اهداف و ملاحظات اجتماعی و زیست محیطی تحقق یابند.

جدول ۱. مقایسه پژوهش جاری با برخی از مقالات منتشرشده

روش حل ابعاد بزرگ	شبهه مثل سازی	شبکه زنجیره تأمین		تصمیمات تاکتیکیال و عملیاتی							تصمیمات استراتژیک				مقالات اخیر در حوزه SCLSC
		حلقه بسته پایدار	زنجیره تأمین رو به جلو پایدار / لجستیک معکوس پایدار / زنجیره تأمین رو به جلو / لجستیک معکوس	جریان بین تسهیلات	بازریافت	جذب موفق نیروی انسانی	حمل و نقل	کمبود	موجودی	تولید	استخدام و آموزش نیروی انسانی	انتخاب تکنولوژی	اندازه ظرفیت	مکانیابی	
*	MILP		RL			*	*	*	*			*	*	[۹]	
×	MILP		RL	*	*	*	*	*	*			*	*	[۱۰]	
×	FMIP		F	×			×		×	×	×	×	×	[۱۱]	
×	FMOLP	F/RL		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	[۱۲]	
×	FMOLP		F	×	×		×	×	×	×	×	×	×	[۱۳]	
×	MINLP		F	×			×		×	×		×	×	[۱۴]	
×	MINLP		F	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	[۱۵]	
×	MILP	F/RL		×		×	×	×	×	×	×	×	×	[۸]	
×	MILP	F/RL		×		×	×		×	×		×	×	[۱۶]	
×	MILP		F/RL	×	×		×		×	×		×	×	[۱۷]	
×	MINLP		F/RL	×	×		×		×	×		×	×	[۱۸]	
×	MINLP	F/RL		×	×		×	×	×	×	×	×	×	[۱۹]	
×	MILP	F/RL		×	×		×	×	×	×	×	×	×	[۲۰]	
×	MILP	F/RL		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	پژوهش جاری	

(R: Reverse Logistic و F: Forward Supply Chain Network)



شکل ۱: نمای شماتیک زنجیره تأمین حلقه بسته مورد نظر تحقیق

دوم صورت می‌گیرد. سطح سوم مراکز توزیع محصول را شامل می‌شود که جریان مستقیم دوم از تولیدکنندگان به آنها صورت می‌گیرد. در سطح چهارم مشتریان/بازار محصول قرار دارد که جریان مستقیم سوم از مراکز توزیع محصول به آنها صورت می‌گیرد. از این سطح بعد جریان معکوس کالا رخ می‌دهد؛ در سطح پنجم مراکز جمع

۳-۱- مثال‌های عددی

شکل ۱، جریان شماتیک این زنجیره تأمین حلقه بسته را نشان می‌دهد که ۷ سطح، ۳ جریان مستقیم و ۴ جریان معکوس را در بر می‌گیرد. در سطح اول تأمین‌کنندگان مواد اولیه هستند و سطح دوم تولیدکنندگان محصول می‌باشد که جریان مستقیم اول از سطح اول به سطح

مهمترین مفروضات مسئله SCLSC تعریف شده عبارتند از:

- مکان استقرار تأمین‌کنندگان مواد اولیه، مراکز تولید موجود و بالقوه، مراکز توزیع بالقوه، مشتریان/بازارها، مراکز جمع‌آوری و بازیافت بالقوه از پیش مشخص است.
- برآورد سالانه داده‌ها برای برنامه‌ریزی استراتژیک در اختیار است و برای برنامه‌ریزی عملیات، داده‌ها بر حسب دوره‌های به طول مساوی (مثلاً ماهانه) افراز می‌شود.
- دو نوع نیروی انسانی ماهر و نیمه ماهر برای استخدام در نظر گرفته می‌شود و برای نیروی انسانی نیمه ماهر هزینه آموزش صرف می‌شود.
- چند نوع تکنولوژی تولید و بازیافت با ظرفیت و اثرات زیست محیطی (انتشار گاز CO₂) ناهمگون در نظر گرفته می‌شود.
- ظرفیت اسمی هر نوع تکنولوژی تولید و بازیافت محدود است.
- تعداد نیروی انسانی ماهر (بر حسب نفر سال) برای فعالیت روی هر نوع تکنولوژی تولید و بازیافت محدود است.
- اثرات زیست محیطی (انتشار گاز CO₂) در هر نوع تکنولوژی تولید محدود است.
- امکان نگهداری مواد اولیه در مراکز تولید وجود دارد ولی محصولات تولیدشده در هر دوره، در همان دوره به مراکز توزیع ارسال می‌شوند (نگهداری محصول در مراکز تولید انجام نمی‌شود و مقدار تولید هر دوره به مراکز توزیع منتقل می‌شود).
- کمبود در هر دوره به صورت فروش از دست رفته است.
- محصول EOL در مراکز جمع‌آوری انباشته نمی‌شود و در هر دوره به مراکز بازیافت منتقل می‌شود.
- در هر دوره امکان جذب/استخدام نیروی انسانی به صورت موقت وجود دارد (لیدتایم در استخدام ناچیز در نظر گرفته می‌شود و استخدام موقت برای افراد ماهر است)
- در این شبکه فقط یک مد حمل‌ونقل صورت می‌پذیرد (مثلاً فقط حمل و نقل جاده‌ای) و وسایل نقلیه در نظر گرفته شده در این مد از لحاظ ظرفیت و اثرات

آوری محصول مستقر هستند و محصولی که عمر مصرف آنها تمام شده است (به اختصار EOL^۱) از مشتریان جمع‌آوری و به این مراکز منتقل می‌شود. در سطح ششم مراکز بازیافت قرار دارند که جریان معکوس دوم از مراکز جمع‌آوری به آنها صورت می‌پذیرد. در این سطح، توسط نیروی انسانی و تجهیزات موجود، بازیافت محصول EOL به مواد اولیه سازنده آن صورت می‌پذیرد و در جریان معکوس سوم، این مواد اولیه به مراکز تولید (سطح دوم) برای تولید مجدد محصول انتقال می‌یابد. در مراکز بازیافت، طی فرآیند بازیافت محصولات EOL (تجزیه محصول به قطعات یا مواد اولیه تشکیل‌دهنده آن)، ضایعات و مواد پرت نیز ایجاد می‌شود که این ضایعات طی جریان معکوس چهارم به مراکز دفع/انهدام ضایعات مستقر در سطح هفتم شبکه حمل می‌شود. ابتدا باید تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه زنجیره تأمین همچون نحوه تأمین مواد اولیه، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت تسهیلات تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت، انتخاب تکنولوژی تولید و بازیافت، استخدام نیروی انسانی ماهر و یا نیمه‌ماهر، آموزش نیروی انسانی، و ... تعیین شود. تصمیمات استراتژیک مذکور، باید به صورت بهینه اخذ شوند تا هدف استراتژیک اصلی بنگاه، یعنی کمینه‌سازی هزینه کل فعالیت‌های شبکه (از تأمین مواد اولیه تا تولید، توزیع و ...) محقق گردد. علاوه بر این هدف، به منظور پایداری این شبکه، دو هدف دیگر نیز در نظر گرفته می‌شود؛ اول آنکه بیشینه‌سازی اشتغال فعالیت‌های این شبکه مورد توجه است (هدف اجتماعی)، و دوم آنکه کمینه‌سازی اثرات زیست محیطی یا آلودگی‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای طی فعالیت‌های این شبکه مهم است (هدف زیست‌محیطی/سبزبودن). پس از اخذ تصمیمات استراتژیک و تعیین طرح کلی شبکه و ظرفیت تسهیلات آن، مسئله برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تأمین باید حل شود و در آن تصمیمات دوره‌ای همچون مقدار تولید، موجودی، عرضه، کمبود، جذب موقت نیروی انسانی و غیره در هر دوره به صورت بهینه بدست آورده شود.

خروجی این مدل و تعیین طرح کلی شبکه، مدل بهینه سازی چنددوره‌ای به منظور برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تامین ارائه می‌شود.

۳-۲- مدل بهینه‌سازی سه هدفه مسئله طراحی SCLSC

نماد و علائم ریاضی بکارگرفته شده در مدل پیشنهادی برای طراحی SCLSC عبارتند از:

زیست‌محیطی (انتشار گاز CO₂) همگن در نظر گرفته می‌شوند.

در ادامه برای مسئله SCLSC تعریف شده به ارائه مدل‌های بهینه‌سازی/برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته می‌شود. به منظور اخذ تصمیمات استراتژیک و برنامه‌ریزی عملیات، یک رویه سلسله مراتبی طی می‌شود؛ به این معنا که ابتدا مدلسازی برای یافتن پاسخ بهینه متغیرهای استراتژیک و تحقق اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی صورت می‌پذیرد؛ سپس، با استفاده از

مجموعه و اندیس

مجموعه تأمین‌کنندگان مواد اولیه	$S = \{1, 2, \dots, s, \dots, S \}$
مجموعه مواد اولیه	$M = \{1, 2, \dots, m, \dots, M \}$
مجموعه کارخانه‌های در دسترس (موجود)	$F^a = \{1, 2, \dots, f, \dots, F^a \}$
مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث کارخانه جدید	$F^b = \{1, 2, \dots, f, \dots, F^b \}$
مجموعه کارخانه‌های موجود و بالقوه	$F = F^a \cup F^b$
مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز توزیع	$D = \{1, 2, \dots, d, \dots, D \}$
مجموعه مشتریان/بازارهای متقاضی محصول	$C = \{1, 2, \dots, c, \dots, C \}$
مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز جمع‌آوری	$I = \{1, 2, \dots, i, \dots, I \}$
مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز بازیافت	$J = \{1, 2, \dots, j, \dots, J \}$
مجموعه مراکز انهدام/دفع ضایعات	$K = \{1, 2, \dots, k, \dots, K \}$
مجموعه تکنولوژی‌های تولید	$P = \{1, 2, \dots, p, \dots, P \}$
مجموعه تکنولوژی‌های بازیافت	$R = \{1, 2, \dots, r, \dots, R \}$

پارامترها/داده‌های مسئله

هزینه واحد خرید مواد اولیه m از تأمین کننده S	$rc_{m,s}^S$
ظرفیت تأمین سالانه تأمین کننده S در عرضه مواد اولیه m	$cap_{m,s}^S$
هزینه واحد حمل و نقل از مواد اولیه m از تأمین کننده S به کارخانه f	$tr_{m,s,f}^{S \rightarrow F}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO ₂) به ازای واحد حمل و نقل مواد اولیه m از تأمین کننده S به کارخانه f	$e_{m,s,f}^{S \rightarrow F}$
هزینه واحد تولید محصول از طریق تکنولوژی p	pc_p^F
ظرفیت تولید سالانه تکنولوژی تولید p	cap_p^F
مقدار واحد مواد اولیه نوع m مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نهایی	r_m^F
تعداد نیروی انسانی ماهر برای فعالیت روی تکنولوژی تولید p در حد ظرفیت اسمی	h_p^F
هزینه احداث کارخانه در مکان f با تکنولوژی تولید p	$fc_{f,p}^F$
دستمزد سالانه هر نیروی انسانی ماهر برای فعالیت در کارخانه‌های تولیدی	in^{F1}
دستمزد سالانه هر نیروی انسانی نیمه ماهر برای فعالیت در کارخانه‌های تولیدی	in^{F2}
هزینه آموزش هر نیروی انسانی نیمه ماهر برای فعالیت در کارخانه‌های تولیدی	ed^F
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO ₂) به ازای هر واحد تولید محصول با تکنولوژی p	e_p^F
هزینه واحد حمل و نقل محصول از کارخانه f به مرکز توزیع مستقر در مکان d	$tr_{fd}^{F \rightarrow D}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO ₂) به ازای واحد حمل و نقل محصول از کارخانه f به مرکز توزیع مستقر در مکان d	$e_{f,d}^{F \rightarrow D}$
هزینه استقرار مرکز توزیع در مکان d	fc_d^D
ظرفیت عرضه سالانه مراکز توزیع مستقر در مکان d	cap_d^D

هزینه واحد حمل و نقل محصول از مرکز توزیع d به بازار/مشتري c	$tr_{d,c}^{D \rightarrow C}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO2) به ازای واحد حمل و نقل محصول از مرکز توزیع d به بازار/مشتري c	$e_{d,c}^{D \rightarrow C}$
مقدار تقاضای سالانه بازار c	dem_c^C
نسبت بازگشت محصولات EOL از بازار c	α_c
هزینه واحد خرید/جمع‌آوری محصول EOL از بازار c	p_c
هزینه واحد حمل و نقل محصول EOL از بازار c به مرکز جمع‌آوری i	$tr_{c,i}^{C \rightarrow I}$
هزینه استقرار مرکز جمع‌آوری در مکان i	fc_i^I
ظرفیت سالانه مراکز جمع‌آوری مستقر در مکان i	cap_i^I
هزینه واحد حمل و نقل محصول EOL از مرکز جمع‌آوری i به مرکز بازیافت j	$tr_{i,j}^{I \rightarrow J}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO2) به ازای واحد حمل و نقل محصول EOL از مرکز جمع‌آوری i به مرکز بازیافت j	$e_{i,j}^{I \rightarrow J}$
هزینه احداث مرکز بازیافت در مکان j با تکنولوژی بازیافت r	$fc_{j,r}^J$
ظرفیت بازیافت سالانه تکنولوژی بازیافت r	cap_r^J
هزینه واحد بازیافت محصولات EOL متغیر با تکنولوژی r	rcc_r^J
دستمزد سالانه هر نیروی انسانی ماهر برای فعالیت در مراکز بازیافت	in^{J1}
دستمزد سالانه هر نیروی انسانی نیمه ماهر برای فعالیت در مراکز بازیافت	in^{J2}
هزینه آموزش هر نیروی انسانی نیمه ماهر برای فعالیت در مراکز بازیافت	ed^F
تعداد نیروی انسانی ماهر برای فعالیت روی تکنولوژی بازیافت در حد ظرفیت اسمی	h_r^J
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO2) به ازای واحد بازیافت محصول EOL با تکنولوژی r	e_r^J
نرخ بازیافت مواد اولیه m از تجزیه محصول EOL	β_m
هزینه واحد حمل و نقل مواد اولیه m از مرکز بازیافت j به کارخانه f	$tr_{m,j,f}^{J \rightarrow F}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO2) به ازای واحد حمل و نقل مواد اولیه m از مرکز بازیافت j به کارخانه f	$e_{m,j,f}^{J \rightarrow F}$
هزینه واحد حمل و نقل ضایعات از مرکز بازیافت j به مرکز انهدام/دفع k	$tr_{j,k}^{J \rightarrow K}$
اثرات زیست محیطی (مقدار نشر CO2) به ازای واحد حمل و نقل ضایعات از مرکز بازیافت j به مرکز انهدام/دفع k	$e_{j,k}^{J \rightarrow K}$
متغیرها/خروجی‌های مدل استراتژیک SCLSC	
اگر در مکان $f \in F^b$ کارخانه با تکنولوژی p احداث شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.	$x_{f,p}^F$
اگر در مکان d مرکز توزیع مستقر شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.	x_d^D
اگر در مکان i مرکز جمع‌آوری مستقر شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.	x_i^I
اگر در مکان j مرکز بازیافت با تکنولوژی r احداث شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است	$x_{j,r}^J$
مقدار مواد اولیه نوع m از تأمین کننده s به کارخانه f	$y_{m,s,f}$
مقدار تولید کل (سالانه) در کارخانه f تحت تکنولوژی p	$Q_{f,p}$
نسبت استخدام افراد ماهر به ظرفیت اسمی موجود در کارخانه f تحت تکنولوژی p	$em_{f,p}^{F1}$
نسبت استخدام افراد نیمه ماهر به ظرفیت اسمی موجود در کارخانه f تحت تکنولوژی p	$em_{f,p}^{F2}$
نسبت استخدام افراد ماهر به ظرفیت اسمی موجود در مرکز بازیافت j تحت تکنولوژی r	$em_{j,r}^{J1}$
نسبت استخدام افراد نیمه ماهر به ظرفیت اسمی موجود در مرکز بازیافت j تحت تکنولوژی r	$em_{j,r}^{J2}$
مقدار محصول ارسالی از کارخانه f به مرکز توزیع d	$v_{f,d}$
مقدار محصول ارسالی از مرکز توزیع d به بازار c	$u_{d,c}$
مقدار محصولات EOL بازار c که از طریق مرکز جمع‌آوری i به مرکز بازیافت j تحت تکنولوژی r ارسال می‌شود.	el_{cijr}
مقدار مواد اولیه m که در مرکز بازیافت j از محصولات EOL تجزیه و به کارخانه f ارسال می‌شود.	$rm_{m,j,f}$
مقدار ضایعات ارسالی از مرکز بازیافت j به مرکز دفع k	$w_{j,k}$

- توابع هدف

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \left[\sum_{f \in F^b} \sum_p f c_{f,p}^F \cdot x_{f,p}^F + \sum_d f c_d^D \cdot x_d^D + \sum_i f c_i^I \cdot x_i^I + \sum_j \sum_r f c_{j,r}^J \cdot x_{j,r}^J \right] + \left[\sum_m \sum_s \sum_f r c_{m,s}^S \cdot y_{m,s,f} \right] \\ & + \left[\sum_f \sum_p p c_p^F \cdot Q_{f,p} \right] \\ & + \left[\sum_f \sum_p in^{F1} \cdot h_p^F \cdot em_{f,p}^{F1} + \sum_f \sum_p in^{F2} \cdot h_p^F \cdot em_{f,p}^{F2} + \sum_f \sum_p ed^F \cdot h_p^F \cdot em_{f,p}^{F2} \right. \\ & + \sum_j \sum_r in^{J1} \cdot h_r^J \cdot em_{j,r}^{J1} + \sum_j \sum_r in^{J2} \cdot h_r^J \cdot em_{j,r}^{J2} + \sum_j \sum_r ed^J \cdot h_r^J \cdot em_{j,r}^{J2} \left. \right] \quad (1) \\ & + \left[\sum_j \sum_r \sum_i \sum_c p_c e l_{cijr} \right] + \left[\sum_j \sum_r \sum_i \sum_c r c c_r^J e l_{cijr} \right] \\ & + \left[\sum_m \sum_s \sum_f t r_{m,s,f}^{S \rightarrow F} \cdot y_{m,s,f} + \sum_f \sum_d t r_{f,d}^{F \rightarrow D} \cdot v_{f,d} + \sum_d \sum_c t r_{d,c}^{D \rightarrow C} \cdot u_{d,c} \right. \\ & + \sum_c \sum_i \sum_j \sum_r (t r_{c,i}^{C \rightarrow I} + t r_{i,j}^{I \rightarrow J}) e l_{cijr} + \sum_m \sum_j \sum_f t r_{m,j,f}^{J \rightarrow F} \cdot r m_{m,j,f} + \sum_j \sum_k t r_{j,k}^{J \rightarrow K} \cdot w_{j,k} \left. \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \left[\sum_f \sum_p e_p^F \cdot Q_{f,p} \right] + \left[\sum_j \sum_r \sum_i \sum_c e_r^J e l_{cijr} \right] \\ & + \left[\sum_m \sum_s \sum_f e_{m,s,f}^{S \rightarrow F} \cdot y_{m,s,f} + \sum_f \sum_d e_{f,d}^{F \rightarrow D} \cdot v_{f,d} + \sum_d \sum_c e_{d,c}^{D \rightarrow C} \cdot u_{d,c} \right] \quad (2) \\ & + \left[\sum_c \sum_i \sum_j \sum_r (e_{c,i}^{C \rightarrow I} + t r_{i,j}^{I \rightarrow J}) e l_{cijr} + \sum_m \sum_j \sum_f e_{m,j,f}^{J \rightarrow F} \cdot r m_{m,j,f} + \sum_j \sum_k e_{j,k}^{J \rightarrow K} \cdot w_{j,k} \right] \end{aligned}$$

$$\max Z_3 = \left[\sum_f \sum_p h_p^F \cdot em_{f,p}^{F1} + \sum_f \sum_p h_p^F \cdot em_{f,p}^{F2} \right] + \left[\sum_j \sum_r h_r^J \cdot em_{j,r}^{J1} + \sum_j \sum_r i h_r^J \cdot em_{j,r}^{J2} \right] \quad (3)$$

سطوح شبکه کمینه می‌گردد. برای فعالیت در کارخانه‌های تولید و مراکز بازیافت است که هزینه سالانه استخدام نیروی انسانی ماهر و نیمه ماهر و همچنین هزینه آموزش نیروی انسانی نیمه ماهر را در بر می‌گیرد. بخش پنجم هزینه جمع‌آوری/خرید محصولات EOL از بازارها است. بخش ششم هزینه تجزیه محصولات EOL یا بازیافت را نشان می‌دهد، نهایتاً بخش هفتم هزینه‌های حمل نقل در این شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را نشان می‌دهد. در رابطه (۳)، هدف اجتماعی این شبکه SCLSC آورده شده است که مبتنی بر اشتغال در جامعه است؛ بر این اساس، استخدام نیروی انسانی در کارخانه‌های تولید و مراکز بازیافت بیشینه می‌شود.

در رابطه (۱)، هدف اقتصادی شبکه SCLSC تعریف شده است که بر اساس آن مجموع کل هزینه‌ها کمینه می‌گردد. همانطور که مشخص شده است، هزینه‌ها از هفت بخش اصلی تشکیل شده است؛ بخش اول هزینه احداث و استقرار تسهیلات شبکه شامل کارخانه‌ها، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و بازیافت را نشان می‌دهد. بخش دوم هزینه خرید مواد اولیه را نشان می‌دهد، بخش هزینه تولید محصولات است، بخش چهارم هزینه نیروی انسانی. در رابطه (۲)، هدف زیست محیطی این شبکه SCLSC تعریف شده است که بر اساس آن اثرات زیست محیطی (نشر CO2) از فعالیت‌های تولید در کارخانه‌ها، تجزیه در مراکز بازیافت و حمل و نقل بین

- قیود و محدودیت‌ها

$$\sum_f y_{m,s,f} \leq \text{cap}_{m,s}^S; \forall m \in M, s \in S \quad (۳)$$

$$Q_{f,p} \leq \text{cap}_p^F \cdot x_{f,p}^F; \forall f \in F, p \in P \quad (۴)$$

$$r_m^F \cdot Q_{f,p} \leq \sum_s y_{m,s,f} + \sum_j r m_{m,j,f}; \forall m \in M, f \in F, p \in P \quad (۵)$$

$$Q_{f,p} \leq \text{cap}_p^F (em_{f,p}^{F1} + em_{f,p}^{F2}); \forall f \in F, p \in P \quad (۶)$$

$$em_{f,p}^{F1} + em_{f,p}^{F2} \leq 1; \forall f \in F, p \in P \quad (۷)$$

$$em_{f,p}^{F1} \geq 0.5; \forall f \in F, p \in P \quad (۸)$$

$$\sum_p Q_{f,p} = \sum_d v_{f,d}; \forall f \in F \quad (۹)$$

$$\sum_f v_{f,d} \leq \text{cap}_d^D \cdot x_d^D; \forall d \in D \quad (۱۰)$$

$$\sum_f v_{f,d} = \sum_c u_{d,c}; \forall d \in D \quad (۱۱)$$

$$\sum_d u_{d,c} = \text{dem}_c^C; \forall c \in C \quad (۱۲)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r el_{cijr} = \alpha_c \sum_d u_{d,c}; \forall c \in C \quad (۱۳)$$

$$\sum_c \sum_j \sum_r el_{cijr} \leq \text{cap}_i^I \cdot x_i^I; \forall i \in I \quad (۱۴)$$

$$\sum_c \sum_i el_{cijr} \leq \text{cap}_r^J \cdot x_{j,r}^J; \forall j \in J, r \in R \quad (۱۵)$$

$$\sum_c \sum_i el_{cijr} \leq \text{cap}_r^J (em_{j,r}^{J1} + em_{j,r}^{J2}); \forall j \in J, r \in R \quad (۱۶)$$

$$em_{j,r}^{J1} + em_{j,r}^{J2} \leq 1; \forall j \in J, r \in R \quad (۱۷)$$

$$em_{j,r}^{J1} \geq 0.5; \forall j \in J, r \in R \quad (۱۸)$$

$$\beta_m \sum_c \sum_i \sum_r el_{cijr} = \sum_f r m_{m,j,f}; \forall j \in J, m \in M \quad (۱۹)$$

$$\sum_c \sum_i \sum_r (1 - \beta_m) \sum_m el_{cijr} = \sum_k w_{j,k}; \forall j \in J \quad (۲۰)$$

$$\begin{cases} x_{f,p}^F, x_d^D, x_i^I, x_{j,r}^J \in \{0,1\} \\ y_{m,s,f}, v_{f,d}, u_{d,c}, el_{cijr}, r m_{m,j,f}, w_{j,k} \geq 0 \\ 0 \leq em_{f,p}^{F1}, em_{f,p}^{F2}, em_{j,r}^{J1}, em_{j,r}^{J2} \leq 1 \end{cases} \quad (۲۱)$$

رابطه (۶) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصول در کارخانه‌ها اشاره دارد. مواد اولیه مورد نیاز، یا از طریق تأمین‌کنندگان مواد اولیه خریداری می‌شود و یا از مراکز بازیافت (پس از فرآیند جمع‌آوری محصولات EOL و تجزیه آنها) دریافت می‌شود. رابطه (۷) به نیاز نیروی انسانی برای تولید محصول در

رابطه (۴) ظرفیت محدود تأمین‌کنندگان مواد اولیه را نشان می‌دهد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که مقدار تولید در هر کارخانه (در صورت احداث شدن/بودن) از ظرفیت آن بیشتر نمی‌شود. لازم به توضیح است که کارخانه آن بیشتر نمی‌شود. لازم به توضیح است که کارخانه $f \in F^a$ با تکنولوژی p از قبل در این شبکه موجود باشد، آنگاه قبل از حل مدل قرار می‌دهیم $x_{f,p}^F = 1$

رابطه (۲۰) مقدار بازیافت مواد اولیه در هر مرکز بازیافت و ارسال آن به کارخانه‌های تولید را نشان می‌دهد. و رابطه (۲۱) مقدار ضایعات حاصل از تجزیه محصولات EOL در مراکز بازیافت محاسبه می‌شود که برابر است با مقدار خروجی به مراکز انهدام. نهایتاً در رابطه (۲۲) متغیرهای مدل برنامه‌ریزی استراتژیک طراحی شبکه SCLSC و دامنه تغییرات آنها مشخص شده است.

۳-۳- مدل بهینه‌سازی چنددوره‌ای مسئله برنامه‌ریزی عملیات SCLSC

همانطور که اشاره شد در مدل برنامه‌ریزی استراتژیک برای طراحی شبکه SCLSC، پارامترهای مسئله به صورت سالانه بیان شدند (تقاضا سالانه، ظرفیت تولید سالانه و ...). در ارائه مدل بهینه‌سازی چنددوره‌ای برای حل مسئله برنامه‌ریزی عملیاتی، فرض می‌کنیم تقاضای سالانه در T دوره طول ثابت به مشتریان عرضه می‌شود (مثلاً ۱۲ دوره ماهانه) و مقدار دوره‌ای پارامترهای مسئله برابر با مقدار سالانه آنها تقسیم بر تعداد دوره‌ها است (مثلاً $\frac{cap_p^F}{T=12}$ ظرفیت تولید دوره‌ای/ماهانه هر تکنولوژی تولید را نشان می‌دهد). همچنین توجه می‌کنیم که ممکن است تقاضا در دوره‌های مختلف با هم برابر نباشد، لذا با نماد $dem_{c,t}^C$ تقاضای دوره $t = 1, 2, 3, \dots, T$ نشان داده می‌شود.

در مدل برنامه‌ریزی عملیاتی، طرح کلی شبکه از پیش (با استفاده از خروجی مدل استراتژیک) مشخص شده است و مشخص شده است که مقدار تأمین سالانه مواد اولیه از هر تأمین کننده به چه مقدار است (S^*)؛ موقعیت استقرار تسهیلات تولید (F^*)، توزیع (D^*)، جمع‌آوری (I^*) و بازیافت (J^*) به چه صورت است؛ تکنولوژی و ظرفیت تعیین شده برای تسهیلات تولید و بازیافت به چه اندازه است (P^*, R^*)؛ استخدام و آموزش نیروی انسانی به چه میزان صورت گرفته است و نیروی انسانی شاغل در کارخانه‌های تولیدی و بازیافت زنجیره تأمین به چه تعداد است؛ و نهایتاً اهداف اجتماعی و زیست محیطی باید در چه سطحی ارضاء شود. خروجی/متغیرهای مدل بهینه‌سازی چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی عملیاتی SCLSC عبارتند از:

کارخانه‌ها اشاره دارد. نیروی انسانی ماهر و یا نیمه ماهر آموزش دیده، متناسب با مقدار تولید و ظرفیت اسمی تولید در هر کارخانه تغییر می‌کند. لازم به توضیح است که اگر مقدار تولید دقیقاً برابر ظرفیت تکنولوژی باشد ($\frac{Q_{f,p}}{cap_p^F} = 1$)، آنگاه استخدام به اندازه ظرفیت اسمی (h_p^F) صورت پذیرد چرا که $em_{f,p}^{F1} + em_{f,p}^{F2} = 1$ می‌گردد. روابط (۸) و (۹) به حداکثر نسبت اشتغال (استخدام افراد ماهر و نیمه ماهر) در هر کارخانه، و همچنین قید حداقل نسبت نیروی انسانی ماهر در هر کارخانه اشاره دارد. رابطه (۱۰) تعادل مقدار تولید و جریان خروجی از هر کارخانه تولیدی را تضمین می‌کند. رابطه (۱۱) بیان می‌کند که انتقال محصول از کارخانه به مراکز توزیع مستلزم استقرار مرکز توزیع در مکان مورد نظر است. ظرفیت عرضه سالانه محصول از طریق هر مرکز توزیع نیز در این رابطه کنترل می‌شود. رابطه (۱۲) تعادل مقدار جریان محصول ورودی و خروجی در مرکز توزیع را تضمین می‌کند. رابطه (۱۳) به تأمین تقاضای مشتریان اشاره دارد.

رابطه (۱۴) مقدار جمع‌آوری محصول EOL از هر بازار را محاسبه می‌کند که از طریق مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند. رابطه (۱۵) و (۱۶) به ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری استقرار یافته و مراکز بازیافت احداث شده را کنترل می‌کنند. رابطه (۱۷) به نیاز نیروی انسانی برای تجزیه محصولات EOL و فعالیت در کارخانه‌های بازیافت محصول اشاره دارد. نیروی انسانی ماهر و یا نیمه ماهر آموزش دیده، متناسب با مقدار محصول EOL جمع‌آوری شده برای بازیافت و ظرفیت اسمی هر مرکز بازیافت تغییر می‌کند. لازم به توضیح است که اگر مقدار محصول EOL تحت بازیافت دقیقاً برابر ظرفیت تکنولوژی باشد ($\frac{\sum_c \sum_i e_{cijr}}{cap_r^F} = 1$)، آنگاه استخدام به اندازه ظرفیت اسمی (h_p^F) صورت پذیرد چرا که $em_{j,r}^{J1} + em_{j,r}^{J2} = 1$ می‌گردد. روابط (۱۸) و (۱۹)، مشابه به استخدام نیروی انسانی در کارخانه‌های عمل می‌کند و بر اساس آنها اولاً حداکثر نسبت اشتغال (استخدام افراد ماهر و نیمه ماهر) در هر مرکز بازیافت، و در ثانی حداقل نسبت نیروی انسانی ماهر در هر مرکز بازیافت کنترل می‌شود.

متغیرها/خروجی‌های مدل عملیاتی SCLSC

مقدار مواد اولیه نوع m از تأمین کننده منتخب S به کارخانه فعال f در دوره t	$y_{m,s,f,t}$
مقدار تولید در کارخانه فعال f دوره t	$Q_{f,t}$
مقدار موجودی در کارخانه فعال f از ماده اولیه m دوره t	$Inv_{f,m,t}^F$
مقدار موجودی محصول در مرکز توزیع فعال d در دوره t	$Inv_{d,t}^D$
درصد افزایش موقت نیروی انسانی برای کارخانه فعال f در دوره t	$em_{f,t}^F$
درصد افزایش موقت نیروی انسانی در مرکز بازیافت فعال j در دوره t	$em_{j,t}^J$
مقدار محصول ارسالی از کارخانه فعال f به مرکز توزیع فعال d در دوره t	$v_{f,d,t}$
مقدار محصول ارسالی از مرکز توزیع فعال d به بازار c در دوره t	$u_{d,c,t}$
مقدار کمبود محصول در بازار c در دوره t	$sl_{c,t}$
مقدار محصولات EOL بازار c که از طریق مرکز جمع‌آوری فعال i به مرکز بازیافت فعال j در دوره t ارسال می‌شود.	el_{cijt}
مقدار مواد اولیه m که در مرکز بازیافت فعال j از محصولات EOL تجزیه و به کارخانه فعال f در دوره t ارسال می‌شود.	$rm_{m,j,f,t}$
مقدار ضایعات ارسالی از مرکز بازیافت فعال j به مرکز دفع w در دوره t	$w_{j,k,t}$

$$\begin{aligned} \min Z = & \left[\sum_m \sum_s \sum_f \sum_t r c_{m,s}^S \cdot y_{m,s,f,t} \right] + \left[\sum_f \sum_t p c_f^F \cdot Q_{f,t} \right] + \left[\sum_f \sum_m \sum_t h c_m \cdot Inv_{f,m,t}^F + \sum_d \sum_t h c^D \cdot Inv_{d,t}^D \right] \\ & + \left[b \cdot \sum_c \sum_t s l_{c,t} \right] + \left[\sum_f \sum_t h r c_f^F e m_{f,t}^F \cdot H_f^F + \sum_f \sum_t h r c_t^J e m_{j,t}^J \cdot H_j^J \right] \\ & + \left[\sum_j \sum_t \sum_c \sum_t r c c_r^J e l_{cijt} \right] \\ & + \left[\sum_m \sum_s \sum_f \sum_t t r_{m,s,f}^{S \rightarrow F} \cdot y_{m,s,f,t} + \sum_f \sum_d \sum_t t r_{f,d}^{F \rightarrow D} \cdot v_{f,d,t} + \sum_d \sum_c \sum_t t r_{d,c}^{D \rightarrow C} \cdot u_{d,c,t} \right. \\ & + \sum_c \sum_t \sum_j \sum_r \sum_t (t r_{c,i}^{C \rightarrow I} + t r_{i,j}^{I \rightarrow J}) e l_{cijt} + \sum_m \sum_j \sum_f \sum_t t r_{m,j,f}^{J \rightarrow F} \cdot r m_{m,j,f,t} \\ & \left. + \sum_j \sum_k \sum_t t r_{j,k}^{J \rightarrow K} \cdot w_{j,k,t} \right] \end{aligned} \tag{23}$$

$$\sum_f y_{m,s,f,t} \leq \frac{cap_{m,s}^S}{T}; \forall m \in M, s \in S^*, t \in T \tag{22}$$

$$Q_{f,t} \leq \frac{cap_f^F}{T}; \forall f \in F^*, t \in T \tag{23}$$

$$r_m^F \cdot Q_{f,t} \leq Inv_{f,m,t-1}^F + \sum_s y_{m,s,f,t} + \sum_j r m_{m,j,f,t}; \forall m \in M, f \in F^*, t \in T \tag{24}$$

$$Q_{f,t} \leq \frac{cap_f^F}{T} \cdot h_f^F (1 + e m_{f,t}^F) \cdot H_f^F; \forall f \in F^*, t \in T \tag{25}$$

$$Q_{f,t} = \sum_d v_{f,d,t}; \forall f \in F^*, \forall t \in T \tag{26}$$

$$\sum_f v_{f,d,t} \leq \frac{cap_d^D}{T}; \forall d \in D^*, t \in T \tag{27}$$

$$\sum_f v_{f,d,t} = Inv_{d,t}^D + \sum_c u_{d,c,t}; \forall d \in D^*, t \in T \tag{28}$$

$$\sum_d u_{d,c,t} = dem_{c,t}^C + s l_{c,t}; \forall c \in C, t \in T \tag{29}$$

$$\sum_i \sum_j e l_{cijt} = \alpha_c \sum_d u_{d,c,t}; \forall c \in C, t \in T \tag{30}$$

$$\sum_c \sum_j e l_{cijt} \leq \frac{cap_i^I}{T}; \forall i \in I^*, t \in T \tag{31}$$

$$\sum_c \sum_i el_{cijt} \leq \frac{cap_r^j}{T} \cdot x_{j,r}^j; \forall j \in J^*, t \in T \quad (۳۲)$$

$$\sum_c \sum_i el_{cijt} \leq \frac{cap_r^j}{T \cdot h_j^j} (1 + em_{j,t}^j) \cdot H_j^j; \forall j \in J^*, t \in T \quad (۳۳)$$

$$\beta_m \sum_c \sum_i el_{cijt} = \sum_f rm_{m,j,f,t}; \forall j \in J^*, m \in M, t \in T \quad (۳۴)$$

$$\sum_c \sum_i (1 - \beta_m) \sum_m el_{cijt} = \sum_k w_{j,k}; \forall j \in J \quad (۳۵)$$

$$\left[\sum_f e_f^F \cdot Q_{f,t} \right] + \left[\sum_j \sum_i \sum_c e_j^j el_{cijt} \right] + \left[\sum_m \sum_s \sum_f e_{m,s,f}^{S \rightarrow F} \cdot y_{m,s,f,t} + \sum_f \sum_d e_{f,d}^{F \rightarrow D} \cdot v_{f,d,t} + \sum_d \sum_c e_{d,c}^{D \rightarrow C} \cdot u_{d,c,t} \right] + \left[\sum_c \sum_i \sum_j (e_{c,i}^{C \rightarrow I} + tr_{i,j}^{I \rightarrow J}) el_{cijt} + \sum_m \sum_j \sum_f e_{m,j,f}^{J \rightarrow F} \cdot rm_{m,j,f,t} + \sum_j \sum_k e_{j,k}^{J \rightarrow K} \cdot w_{j,k,t} \right] \leq \frac{Z_2^*}{T} \quad (۳۶)$$

$$y_{m,s,f,t}, Q_{f,t}, Inv_{f,m,t}^F, Inv_{d,t}^D, em_{f,t}^F, em_{j,t}^J, v_{f,d,t}, u_{d,c,t}, sl_{c,t}, el_{cijr,t}, rm_{m,j,f,t}, w_{j,k,t} \geq 0 \quad (۳۷)$$

بر اساس رابطه (۳۳)، ملاحظه می‌شود که تابع هدف مدل برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تامین از هفت جزء هزینه می‌شود:

جزء اول مربوط به هزینه تأمین دوره‌ای مواد اولیه برای تولید محصولات است؛ جزء دوم هزینه تولید در هر دوره را محاسبه می‌کند (PCF^F هزینه تولید در هر کارخانه فعال است و متناظر است با تکنولوژی انتخاب شده برای آن کارخانه با توجه به خروجی مدل استراتژیک)؛ در جزء سوم، نگهداری مواد اولیه و محصول نهایی در کارخانه‌ها و مراکز توزیع بیان شده است (جایی که hc^D و hc^m به ترتیب نشان‌دهنده هزینه نگهداری هر واحد مواد اولیه و محصول نهایی در هر دوره است)؛ در جزء چهارم به هزینه کمبود محصول یا فروش از دست رفته اشاره شده است (جایی که b هزینه هر واحد فروش از دست رفته در هر دوره را نشان می‌دهد)؛ جزء پنجم هزینه استخدام موقت نیروی انسانی در هر دوره را نشان می‌دهد (جایی که hrc_t^J و hrc_t^F به ترتیب هزینه واحد استخدام دوره‌ای هر نیروی انسانی برای فعالیت در مراکز تولید و بازیافت را نشان می‌دهد. همچنین دو متغیر H_f^J و H_f^F نیز به ترتیب نیروی انسانی فعال در هر مرکز تولید و بازیافت را نشان می‌دهد که از خروجی‌های مدل استراتژیک است که از معادلات ریاضی

بر اساس رابطه (۳۳)، ملاحظه می‌شود که تابع هدف مدل برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تامین از هفت جزء هزینه می‌شود:

جزء اول مربوط به هزینه تأمین دوره‌ای مواد اولیه برای تولید محصولات است؛ جزء دوم هزینه تولید در هر دوره را محاسبه می‌کند (PCF^F هزینه تولید در هر کارخانه فعال است و متناظر است با تکنولوژی انتخاب شده برای آن کارخانه با توجه به خروجی مدل استراتژیک)؛ در جزء سوم، نگهداری مواد اولیه و محصول نهایی در کارخانه‌ها و مراکز توزیع بیان شده است (جایی که hc^D و hc^m به ترتیب نشان‌دهنده هزینه نگهداری هر واحد مواد اولیه و محصول نهایی در هر دوره است)؛ در جزء چهارم به هزینه کمبود محصول یا فروش از دست رفته اشاره شده است (جایی که b هزینه هر واحد فروش از دست رفته در هر دوره را نشان می‌دهد)؛ جزء پنجم هزینه استخدام موقت نیروی انسانی در هر دوره را نشان می‌دهد (جایی که hrc_t^J و hrc_t^F به ترتیب هزینه واحد استخدام دوره‌ای هر نیروی انسانی برای فعالیت در مراکز تولید و بازیافت را نشان می‌دهد. همچنین دو متغیر H_f^J و H_f^F نیز به ترتیب نیروی انسانی فعال در هر مرکز تولید و بازیافت را نشان می‌دهد که از خروجی‌های مدل استراتژیک است که از معادلات ریاضی

رابطه (۲۴) ظرفیت محدود تأمین‌کنندگان منتخب برای تأمین مواد اولیه در هر دوره را نشان می‌دهد. ظرفیت محدود تأمین‌کنندگان مواد اولیه را نشان می‌دهد. رابطه (۲۵) تضمین می‌کند که مقدار تولید دوره‌ای در هر کارخانه فعال از ظرفیت تولید دوره‌ای آن نباید تجاوز کند (cap_r^F ظرفیت تولید سالانه هر کارخانه فعال است و متناظر است با تکنولوژی انتخاب شده برای آن کارخانه با توجه به خروجی مدل استراتژیک).

رابطه (۲۶) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصول در کارخانه‌ها در هر دوره اشاره دارد. مواد اولیه موجود در کارخانه در هر دوره برابر است با مجموع موجودی دوره قبل بعلاوه دریافتی دوره جاری از تأمین‌کنندگان و مراکز بازیافت. رابطه (۲۷) به نیاز نیروی انسانی برای تولید محصول در کارخانه‌ها اشاره دارد. h_p^F ظرفیت اسمی تولید سالانه هر کارخانه فعال است و و متناظر است با

$$H_f^F = cap_p^F (em_{f,p}^{F1*} + em_{f,p}^{F2*})$$

عمل عملیات زنجیره تامین با استفاده از CPLEX در نرم‌افزار GAMS بسادگی قابل اجرا و حل است. اما پیش از این مدل، باید مدل چندهدفه استراتژیک پیشنهادی حل شود و طرح بهینه شبکه زنجیره تامین بدست آورده شود. بر خلاف مسئله برنامه‌ریزی عملیات، مدل پیشنهادی مسئله طراحی SCLCS از پیچیدگی بالایی برخوردار است؛ چرا که اولاً باید بین سه هدف موازنه ایجاد شود و در ثانی تعداد زیاد متغیرهای پیچیده ساز (باینری/گسسته)، ممکن است حل مسئله در ابعاد بزرگ را با خطا مواجه کند و از حالت بهینگی شکاف ایجاد شود. در ادامه، نخست به ارائه یک روش حل کارا برای موازنه اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تعریف‌شده در مدل سه‌هدفه مسئله طراحی SCLSC پرداخته می‌شود. سپس یک رویکرد تجزیه آورده می‌شود که با استفاده از آن حل این مسئله در ابعاد بزرگ نیز مقدور شود.

۴-۱ روش اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته موازنه بین اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی

در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه زیر:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{array} \right. \quad (38)$$

فرض کنید هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و سایر اهداف به حد بالای اپسیلون محدود می‌شوند و در قیود مسئله اعمال می‌شوند. در این صورت بر اساس روش اپسیلون محدودیت، مدل تک هدفه زیر حاصل می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} f_1(x) \\ f_i(x) \leq \varepsilon_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \end{array} \right. \quad (39)$$

که در آن هدف اول، به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم تا n ام به مقدار حداکثر ε_i محدود می‌شوند. در مدل (۴۱) با تغییر مقادیر ε_i جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که ممکن است کارا نباشند. با اصلاح مدل اخیر، می‌توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته

تکنولوژی انتخاب‌شده برای آن کارخانه با توجه به خروجی مدل استراتژیک).

رابطه (۲۸) تعادل مقدار تولید و جریان خروجی از هر کارخانه تولیدی را در هر دوره نشان می‌دهد. رابطه (۲۹) ظرفیت عرضه محصول به مشتریان از طریق هر مرکز توزیع را در هر دوره کنترل می‌کند. رابطه (۳۰) تعادل مقدار جریان محصول ورودی و خروجی در مرکز توزیع را در هر دوره تضمین می‌کند.

رابطه (۳۱) مقدار تأمین تقاضا و کمبود در عرضه تقاضا مشتریان را در هر دوره محاسبه می‌کند. رابطه (۳۲) مقدار جمع‌آوری محصول EOL از هر بازار را در هر دوره محاسبه می‌کند که از طریق مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند. روابط (۳۳) و (۳۴) به ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری و بازیافت محصولات EOL در هر دوره را کنترل می‌کند که در مکان‌های بالقوه استقرار می‌یابند. رابطه (۳۵) به نیاز نیروی انسانی برای بازیافت محصولات EOL در مراکز بازیافت محصول اشاره دارد (h_j^l ظرفیت اسمی بازیافت سالانه محصولات EOL در هر مرکز بازیافت است و متناظر است با تکنولوژی انتخاب‌شده برای آن مرکز با توجه به خروجی مدل استراتژیک).

در رابطه (۳۶) مقدار بازیافت مواد اولیه در هر مرکز بازیافت فعال و ارسال آن به کارخانه‌های تولید در هر دوره محاسبه می‌کند. در رابطه (۳۷) نیز مقدار ضایعات حاصل‌شده در مراکز بازیافت و ارسال‌شده به مراکز انهدام را نشان می‌دهد. در رابطه (۳۸) قید زیست محیطی به صورت دوره‌ای نیز اعمال می‌شود. لازم به توضیح است که Z_2^* حداکثر مقدار مجاز انتشار CO2 در این زنجیره تأمین بر اساس مدل استراتژیک است. نهایتاً در رابطه (۳۹) متغیرهای مدل برنامه‌ریزی عملیاتی SCLSC آمده است که همگی نامنفی هستند.

۴- حل مسئله و بکارگیری مدل‌های پیشنهادی

در بخش قبل برای مسئله طراحی SCLCS یک مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته چندهدفه، و برای مسئله برنامه‌ریزی عملیات SCLCS یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه شد. مدل خطی ارائه شده برای برنامه‌ریزی

نظر می‌گیریم. برای $\bar{y} \in S$; زیرمسئله زیر حاصل می‌شود که مقدار بهینه آن کران بالای مسئله اصلی است.

$$\left\{ f^t \bar{y} + \underset{x}{\text{Min}} c^t x \mid Ax \geq b - D\bar{y}, x \geq 0 \right\} \quad (42)$$

واضح است فضای شدنی زیرمسئله به مقدار \bar{y} وابسته است؛ این در صورتی است که فضای مدل دوگان زیر مسئله (رابطه (45))، مستقل از \bar{y} است جواب بهینه آن نیز یک کران بالا برای مسئله اصلی است.

$$\left\{ UB = f^t \bar{y} + \underset{u}{\text{Max}} u^t (b - D\bar{y}) \mid A^t u \geq c, u \geq 0 \right\} \quad (43)$$

مدل (43) به صورت نقطه گوشه‌ای زیر نیز قابل تبدیل است:

$$\left\{ \underset{y \in S}{\text{Min}} f^t y + \text{Max} \{ u^t (b - Dy) \mid u^t \in E(U) \} \right\} \quad (44)$$

جایی که $E(U) = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_K^*\}$ مجموعه نقاط گوشه‌ای چندوجهی $(A^t u \geq c, u \geq 0)$ است. فرض کنید: $e(U) = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_{k \leq K}^*\} \subseteq E(U)$ واضح است جواب بهینه مدل زیر یک کران پایین برای مسئله اصلی است، که آن را به عنوان مدل آزادشده در نظر می‌گیریم.

$$\left\{ \begin{array}{l} RMP : \\ \underset{y \in S}{\text{Min}} f^t y + \text{Max} \{ u^t (b - Dy) \mid u^t \in e(U) = \\ \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_{k \leq K}^*\} \subseteq E(U) \} \end{array} \right\} \quad (45)$$

الگوریتم تجزیه بندرز یک روش تکراری برای حل مسئله اصلی (43) با تجزیه آن به دو زیر مسئله (45) و (47) است؛ به این صورت که ابتدا $\bar{y}_0 \in S$ به عنوان یک مقدار آغازین در نظر گرفته می‌شود، از حل مدل (45) به ازای $\bar{y}_0 \in S$ ، $u_1^* \in E(U)$ و کران بالای UB_1 برای مسئله اصلی حساب می‌شود، سپس $\{u_1^*\} \subseteq e(U)$ در مدل (45) قرار می‌گیرد که از حل آن $\bar{y}_1 \in S$ و کران پایین LB_1 برای مسئله اصلی حساب می‌شود، سپس این بار $\bar{y} = \bar{y}_1$ در مدل (45) قرار می‌گیرد و $u_2^* \in E(U)$

(AEC¹) معروف است [22]. در روش AEC، مدل (41) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_1(x) - \sum_{i=2}^n \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = \varepsilon_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (40)$$

جایی که در آن s_i ها متغیرهای نامنفی کمکی ϕ_i یک پارامتر برای نرمال‌سازی اهداف هستند. با بدست آوردن ماتریس پی‌آمد اهداف مسئله با روش لکسیکوگرافیک، چندین مقدار مختلف $\varepsilon_i \in [\text{Min}(f_i), \text{Max}(f_i)]$ انتخاب می‌شود و جبهه پارتو بدست می‌آید [23].

به منظور بکارگیری روش AEC برای بدست آوردن جبهه پارتو و موازنه بین اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در مدل برنامه‌ریزی استراتژیک SCLSC، هدف اقتصادی (Z1) به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و اهداف اجتماعی و زیست‌محیطی به مقادیر مختلف اپسیلون در بازه بهینه آنها محدود می‌شود. لازم به ذکر است که هرچه ϕ مقدار بزرگتری باشد، اهداف اجتماعی و زیست‌محیطی مقدار بهتر خواهند داشت و به سمت بهینگی میل می‌کنند؛ و هرچه $\phi \rightarrow 0$ ، هدف اقتصادی به بهینگی میل می‌کند.

۲-۴ الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسائل SCLSC در ابعاد بزرگ

بخش اصلی مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی استراتژیک SCLSC متغیرهای باینری مربوط به طراحی شبکه است. مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی خطی آمیخته است که در صورت کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } c^t x + f^t y \\ s.t. \\ Ax + Dy \geq b \\ x \geq 0, y \in S = \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (41)$$

جایی که y بردار متغیرهای پیچیده‌کننده مسئله هستند و در صورت آزاد/ثابت بودن آنها مسئله به صورت کاراتری قابل حل است. مسئله (43) را به عنوان مسئله اصلی در

می‌دهیم و از جواب بهینه آن برش شدنی را به مجموعه قیود $\{Feasibility\ Cut\}$ مدل مسئله آزاد شده اضافه می‌کنیم:

گام ۷: برش بهینگی حاصل از "گام ۵" یا برش شدنی حاصل از "گام ۶" را به مجموعه قیود مدل مسئله اصلی آزاد شده اضافه کرده و آن را حل نموده و مقدار کران پایین (LB) برای مسئله اصلی دست می‌آوریم.

گام ۸: اگر $|UB-LB| < tol$ بود، آنگاه به "گام ۹" می‌رویم؛ در غیر اینصورت جواب بهینه مدل مسئله اصلی آزاده شده در "گام ۶" را به عنوان جواب شدنی متغیرهای گسسته در نظر می‌گیریم و به "گام ۴" می‌رویم. (مقدار tol یک تolerانس اختیاری است)

گام ۹: الگوریتم متوقف می‌شود و گزارش جواب بهینه (یا نزدیک به بهینه با خطای حداکثر به اندازه tol).

۵- آزمایشات عددی و تحلیل نتایج

در این بخش نخست یک مطالعه عددی از مسئله برنامه ریزی عملیات و طراحی SCLSC آورده شده و نتایج محاسباتی بر اساس آن گزارش و تحلیل می‌شود و از طریق آن نتیجه مدیریتی مستخرج می‌شود که در ایجاد بینش مدیریتی در حل مسئله SCLSC سودمند است. نهایتاً چند مسئله آزمایشی ابعاد بزرگ آورده می‌شود و عملکرد مدل و رویکرد حل پیشنهادی تحقیق ارزیابی می‌گردد. به منظور مطالعه عددی مسئله مورد نظر تحقیق، یک شبکه SCLSC بالقوه (شکل ۲) آورده شده که داده‌های در جدول ۲ ملاحظه می‌شود. فرض شده است این زنجیره تأمین در حال حاضر ۲ کارخانه تولیدی فعال دارد که هر یک از آنها مجهز به تکنولوژی تولید با ظرفیت و استاندارد مشخصی است؛ ۵ مکان بالقوه برای احداث مراکز تولید، ۱۰ مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع، ۱۰ بازار/مشتري موجود، ۵ مکان بالقوه برای مراکز جمع‌آوری و ۳ مکان بالقوه برای مراکز بازیافت در نظر گرفته شده است. ۵ نوع تکنولوژی تولید و ۳ نوع تکنولوژی بازیافت با ظرفیت و استاندارد برای مراکز تولید و بازیافت وجود است. نهایتاً از طریق ۳ تأمین‌کننده مواد اولیه تأمین می‌شود و ۲ مرکز انهدام برای دفع ضایعات محصولات EOL بازیافت شده موجود است.

و UB_2 حساب می‌شود، با لحاظ کردن $e(U) = \{u^*_1, u^*_2\}$ در مدل (۴۷)، مقادیر $LB_2 \geq LB_1$ و $\bar{y}_2 \in S$ تعیین می‌شود، نهایتاً این پروسه با قرارگیری $\bar{y} = \bar{y}_2$ در مدل (۴۵) ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است این فرایند حداکثر به تعداد $k \leq K$ تکرار به طول می‌انجامد که طی آن $|UB_k - LB_k| < \epsilon$ می‌شود. در صورتی که به ازای $\bar{y} \in S$ از مدل (۴۵) نامتناهی گردد، مدل اصلاح‌شده (۴۸) استفاده می‌شود و از نقطه گوشه‌ای (u^*) آن، برش شدنی بودن $u^*(b-Dy) \leq 0$ به مدل (۴۷) اضافه می‌شود. که جایگزین برش بهینگی $LB \geq f^t y + u^*(b-Dy)$ است.

$$\begin{cases} UB = \text{Max } f^t \bar{y} + u^*(b - D\bar{y}) \\ u^*(b - D\bar{y}) = 1 \\ A^t u \geq 0, u \geq 0 \end{cases} \quad (44)$$

به منظور استفاده از روش تجزیه بندرز برای حل مسئله طراحی SCLCS گام‌های زیر طی می‌شود:

گام ۱: متغیرهای گسسته/باینری (مکان تسهیلات (طراحی شبکه)) را به عنوان متغیرهای پیچیده‌ساز در نظر می‌گیریم و زیرمسئله برای مسئله طراحی SCLSC مشخص می‌شود.

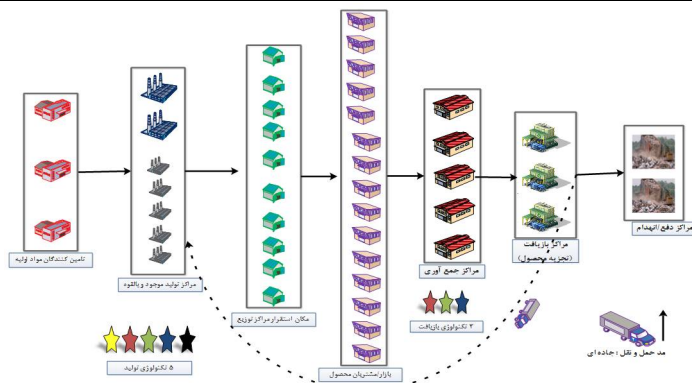
گام ۲: مدل دوگان زیرمسئله که فضای جواب آن مستقل از متغیرهای پیچیده‌ساز مسئله طراحی SCLSC است، بدست آورده می‌شود.

گام ۳: مدل مسئله آزاده برای طراحی SCLSC تشکیل می‌شود که مجموعه برش‌های بهینگی و شدنی در طی تکرارهای الگوریتم به آن افزوده می‌شود.

گام ۴: یک مقدار شدنی (مثلاً همگی ۱ باشند) برای متغیرهای طراحی SCLSC در نظر می‌گیریم و مدل دوگان زیرمسئله را حل می‌کنیم. اگر جواب بهینه آن متناهی باشد به "گام ۵"، و اگر جواب بهینه آن نامتناهی باشد به "گام ۶" می‌رویم.

گام ۵: مقدار بهینه متناهی دوگان زیر مسئله را کران بالا (UB) در نظر می‌گیریم. و با استفاده از آن برش بهینگی را به مجموعه قیود $\{Optimality\ Cut\}$ مدل مسئله آزاده اضافه می‌کنیم.

گام ۶: مدل دوگان زیر مسئله اصلاح‌شده تشکیل



شکل ۲: شبکه زنجیره تأمین مطالعه عددی مسئله SCLCS

جدول ۲. داده‌های مطالعه عددی مسئله SCLCS

$rc_{m,s}^S$	$cap_{m,s}^S$	$dis^{n1 \rightarrow n2}$	$fc_{f,p}^F$	pc_p^F	cap_p^F	fc_d^D
U(1,2)	U(500,3000)	U(20,300)Km	U(1000,1500)	U(0.2,0.5)	U(2000,5000)	U(300,500)
in^{F1}	in^{F2}	ed^F	p_c	fc_i^I	cap_i^I	cap_r^I
30	22	5	U(0.4,0.5)	U(200,250)	10000	U(8000,10000)
in^{J1}	in^{J2}	ed^J	rcc_r^J	dem_c^C	α_c	β_m
25	18	3	U(0.1,0.3)	U(5000,10000)	(0.2,0.5)	0.5
هزینه حمل و نقل: ۲ واحد بر Km. اثرات زیست محیطی: ۵- واحد بر Km. مواد اولیه: ۱ واحد برای هر واحد تولید. نیروی انسانی مورد نیاز: ۲٪ درصد ظرفیت اسمی تسهیلات تولید و بازیافت. هزینه استخدام موقت ماهانه: ۳ واحد هزینه. هزینه کمبود: ۰.۴ واحد هزینه سایر:						

$$ID = \frac{|Z_1 - Z_1^*|}{Z_1^*} + \frac{|Z_2 - Z_2^*|}{Z_2^*} + \frac{|Z_3 - Z_3^*|}{Z_3^*} \quad (45)$$

و هر جوابی که ID کمتری داشته باشد، بهتر است. نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به اهداف اجتماعی و زیست محیطی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده می‌شود. ابتدا مقادیر هدف اجتماعی و زیست محیطی در حالت بهینه خود تنظیم شده‌اند و مقدار هدف اقتصادی محاسبه شده است؛ سپس با انعطاف در اهداف اجتماعی و زیست محیطی، مقدار بهینه هزینه محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که در انعطاف‌های آغازین، بهبود در هزینه بشدت ملموس است ولی از جایی به بعد بهبود خاصی در هزینه رخ نمی‌دهد. این موضوع در جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به هدف زیست محیطی بیشتر دیده می‌شود.

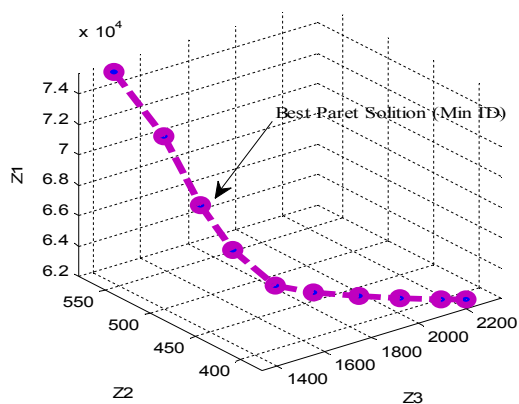
در صورتی که هر یک از اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به صورت جداگانه مورد توجه قرار گیرد، هر تابع هدف در مقدار بهینه خود قرار می‌گیرد. با توجه به جدول ۳، جواب $(Z_1^* = 52350, Z_2^* = 613, Z_3^* = 1436)$ جواب ایده‌آل تعریف می‌شود که با توجه به تناقض بین اهداف، تحقق این جواب ممکن نیست اما جواب کارایی که کمترین فاصله/انحراف را از این جواب داشته باشید به عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود. همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، با بکارگیری روش AEC، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو بدست آورده شده است که بر اساس معیار فاصله تا جواب ایده‌آل جواب پارتو منتخب مشخص شده است. به منظور انتخاب یک جواب از مجموعه جواب‌های پارتو روش AEC، معیار نرمال‌شده فاصله تا ایده‌آل به این صورت تعریف می‌شود:

جدول ۳. مقدار بهینه هر یک از اهداف استراتژیک

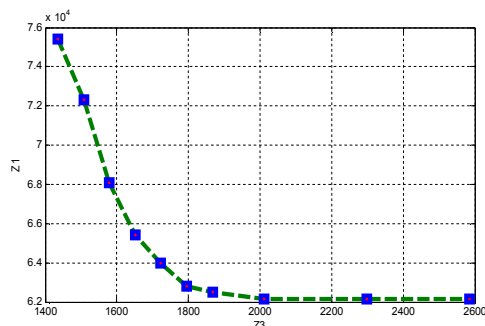
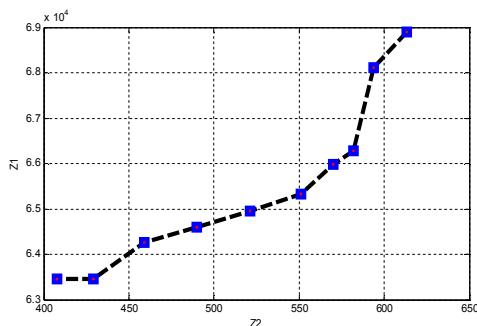
اهداف	Z1: کل هزینه زنجیره تأمین (کمینه‌سازی)	Z2: کل استخدام/آموزش نیروی انسانی در زنجیره تأمین (بیشینه‌سازی)	Z3: کل انتشار CO2 در زنجیره تأمین (کمینه‌سازی)
مقدار بهینه	52350	613	1436

جدول ۴. جواب‌های پارتو بهینه‌سازی سه‌هدفه برنامه‌ریزی استراتژیک SCLSC

Z1	Z2	Z3	انحراف از جواب ایده‌آل (ID)
75403	535	1436	0.5676
72356	520	1475	0.5610
68400	493	1525	0.5603
65504	480	1610	0.5894
63056	465	1732	0.6520
62797	445	1820	0.7410
62590	425	1934	0.8490
62484	408	2043	0.9507
62251	395	2164	1.0517
61996	390	2252	1.1162



شکل ۳. نمودار جبهه پارتو و جواب منتخب



شکل ۴: نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی (Z1) نسبت به هدف اجتماعی (Z2) و هدف زیست‌محیطی (Z3)

جدول ۵. موازنه بین هدف اقتصادی و اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی

موازنه هدف اقتصادی و زیست‌محیطی			موازنه هدف اقتصادی و اجتماعی				
هزینه	CO ₂	انحراف از CO ₂ بهینه (%)	بهبود هزینه (%)	هزینه	اشتغال	انحراف از اشتغال بهینه (%)	بهبود هزینه (%)
75403	1436	0	-	68903	613	0	-
72296.4	1507.8	5	4.12	68110.62	594	3	1.15
68066.29	1579.6	10	9.73	66284.69	582	5	3.8
65412.1	1651.4	15	13.25	65988.4	570	7	4.23
64002.07	1723.2	20	15.12	65326.93	551	10	5.19
62810.7	1795	25	16.7	64954.86	521	15	5.73
62509.09	1866.8	30	17.10	64603.45	490	20	6.24
62169.77	2010.4	40	17.55	64265.83	459	25	6.73
62169.77	2297.6	60	17.55	63452.77	429	30	7.91
62169.77	2584.8	80	17.55	63452.77	408	40	7.91

مقادیر مختلف δ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اگر این مقدار بیشتر از ۵۰٪ فعلی گردد، آنگاه به طور همزمان هزینه بیشتر می‌شود و استخدام و آموزش نیروی انسانی کاهش می‌یابد به طوری که درصد تغییرات هزینه‌ها و استخدام و آموزش نیروی انسانی به تغییرات این پارامتر به ترتیب روابط مستقیم و معکوس دارند. این نتایج کاملاً منطقی است؛ چراکه در حال حاضر $\Delta^F = (in^{F2} + ed^F) - in^{F1} = 3 > 0$ و $\Delta^J = (in^{J2} + ed^J) - in^{J1} = 4 > 0$ است و این یعنی استخدام و آموزش نیروی انسانی نیمه ماهر نه تنها هدف اجتماعی را بهبود می‌دهد بلکه صرفه اقتصادی دارد و هزینه کاهش می‌یابد. حال اگر $\delta > 50\%$ هم از صرفه اقتصادی کمتری بهره‌مند می‌شویم و هزینه کل بیشتر می‌شود، و هم استخدام و آموزش نیروی انسانی نیمه ماهر کمتر می‌شود و هدف اجتماعی نیز تنزیل می‌یابد ($\frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} > 0, \frac{\Delta Z_2}{Z_2^*} < 0$). این در حالی است که در مورد $\delta < 50\%$ در مقایسه با شرایط فعلی، نتیجه معکوس حالت مذکور رخ می‌دهد ($\frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} < 0, \frac{\Delta Z_2}{Z_2^*} > 0$). شکل ۵ به طور واضح درصد تغییرات هزینه و نیروی انسانی را نسبت به مقادیر مختلف δ نشان می‌دهد.

در جدول ۷، نتایج حاصل از حل مدل با حذف روابط (۹) و (۱۹) و به ازای مقادیر مختلف Δ^F آورده شده است. ملاحظه می‌شود که اگر $\Delta^F > 0$ باشد (با ثابت بودن $\Delta^J = 4$)، آنگاه $\delta = 0$ می‌گردد و این معادل با آن است که در پاسخ بهینه به صرفه است که که نیروی نیمه

در نمودار جبهه پارتو شکل ۴ ملاحظه می‌شود که بین هدف اقتصادی مسئله (کمینه‌سازی هزینه) و هدف اجتماعی (بیشینه‌سازی استخدام نیروی انسانی) تناقض وجود دارد و بهبود در یک هدف باعث تنزیل در هدف دیگر می‌شود. همانطور که در جدول ۲ برای داده‌های مسئله اشاره شد، برنامه‌ریزی نیروی انسانی این زنجیره تأمین با فرض پارامترهای ($in^{F1} = 30, in^{F2} = 22, ed^F = 5$) و ($in^{J1} = 25, in^{J2} = 18, ed^J = 3$) حل می‌شود و بر اساس روابط (۹) و (۱۹) نیز به ترتیب روابط $em_{f,p}^{F1} \geq 0.5$ و $em_{j,r}^{J1} \geq 0.5$ بیان می‌کنند که حداقل $\delta = 50\%$ نیروی انسانی باید از افراد ماهر استخدام شود.

در ادامه به سه تحلیل در برنامه‌ریزی استخدام و آموزش نیروی انسانی پرداخته می‌شود: نخست آنگاه با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، پارامتر δ از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ با تغییر می‌دهیم و پاسخ را با پاسخ بهینه فعلی مقایسه و نتیجه را تحلیل می‌کنیم؛ دوم آنکه تعریف می‌کنیم $\Delta^F = (in^{F2} + ed^F) - in^{F1}$ که صرفه اقتصادی استخدام و آموزش نیروی انسانی ماهر به جای نیروی ماهر در کارخانه‌های تولیدی است و تحلیل می‌کنیم که تغییرات این مقدار چه تاثیری بر اهداف اقتصادی و اجتماعی دارد؛ نهایتاً در تحلیل سوم، مشابه با تحلیل قبل، تعریف می‌شود $\Delta^J = (in^{J2} + ed^J) - in^{J1}$ و این بار تحلیل قبل در کارخانه‌های بازیافت صورت می‌پذیرد.

جدول ۶ مقادیر اهداف اقتصادی و اجتماعی را به ازای

(بر اساس روش AEC) و همچنین با در نظر گرفتن معیار ID که پیش‌تر توضیح داده شد، $0 < \delta^* < 1$ حاصل می‌شود (شکل ۶). لازم به توضیح است که اگر $\Delta^F = 0$ باشد، مقدار $\delta = 0$ می‌گردد چراکه گرچه از لحاظ اقتصادی مقدار δ بی تاثیر است ولی از منظر اجتماعی با کاهش δ بهبود بیشتری در هدف اجتماعی رخ می‌دهد.

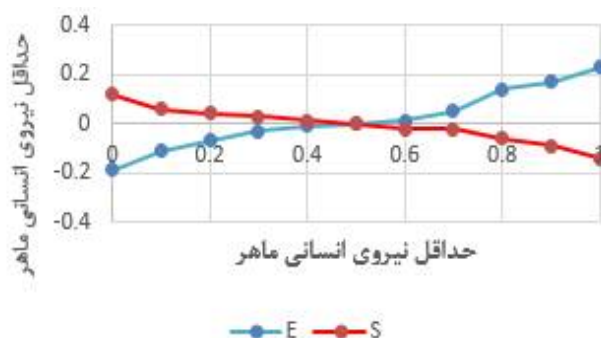
ماهر استخدام و آموزش دیده شود چراکه اهداف اقتصادی و اجتماعی به طور همزمان بهبود می‌یابند. اما، در صورتی که $\Delta^F < 0$ شود، از منظر اقتصادی $1 \rightarrow \delta$ چراکه به صرفه نیست افراد نیمه ماهر استخدام کرد و به آموزش آنها پرداخت. این در حالی است که از منظر اجتماعی، $\delta \rightarrow 0$ تا عملکرد اجتماعی (بیشینه‌سازی استخدام و آموزش نیروی انسانی) بهبود یابد. با موازنه این دو هدف

جدول ۶. تاثیر تغییرات نرخ حداقلی استخدام نیروی انسانی ماهر بر اهداف اقتصادی (E) و اجتماعی (S)

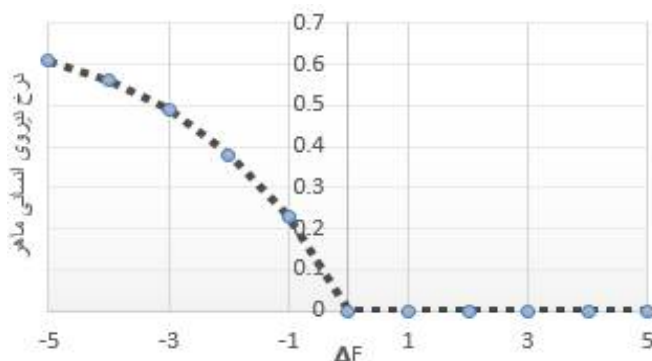
δ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
E	-0.19	-0.11	-0.07	-0.03	-0.007	0	0.01	0.5	0.14	0.17	0.23
S	0.12	0.06	0.04	0.03	0.01	0	-0.02	-0.02	-0.06	-0.09	-0.14

جدول ۷. مقدار بهینه δ^* به ازای مقادیر مختلف Δ^F

Δ^F	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
δ^*	0.61	0.56	0.49	0.38	0.23	0	0	0	0	0	0



شکل ۵. درصد تغییرات نسبی اهداف اقتصادی (E) و اجتماعی (S) نسبت به نرخ حداقلی استخدام نیروی انسانی ماهر



شکل ۶. نمودار مقدار بهینه نرخ استخدام نیروی انسانی ماهر نسبت به میزان صرفه اقتصادی استخدام و آموزش نیروی انسانی نیمه ماهر

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

مدیریت زنجیره تأمین به معنای توجه همزمان و تصمیمات یکپارچه به منظور عرضه اقتصادی یک محصول به بازار است که فعالیت‌های تأمین مواد اولیه، تولید، نگهداری، توزیع، حمل و نقل و ... را در برمی‌گیرد. در صورتی که علاوه بر هدف اقتصادی، هدف زیست محیطی دیده شود، مدیریت زنجیره تأمین سبز؛ و در صورتی که به هدف اجتماعی نیز توجه شود، مدیریت زنجیره تأمین پایدار اعمال می‌شود.

در این تحقیق به برنامه‌ریزی عملیات و طراحی شبکه SCLSC پرداخته شده است. برنامه‌ریزی در دو سطح استراتژیک و تاکتیکی/عملیاتی صورت گرفته است. از آنجا که متغیرهای استراتژیک تاثیر فراوانی بر متغیرهای عملیاتی دارد، ابتدا یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه ارائه شده است که در اخذ بهینه تصمیماتی استراتژیک از جمله مکان‌یابی تسهیلات، انتخاب تکنولوژی و تعیین اندازه ظرفیت تسهیلات مساعدت می‌کند و طراحی بهینه شبکه SCLSC صورت می‌پذیرد. سپس به نحوه برنامه‌ریزی عملیات این زنجیره پرداخته می‌شود که این برنامه‌ریزی بر مبنای یک مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای انجام می‌شود.

در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که اهداف اجتماعی دیگر همچون نزدیکی به محل کار، انتخاب تکنولوژی ایمن نیز در طراحی شبکه مورد توجه قرار گیرد. بعلاوه در نظر گرفتن رقابت بین زنجیره‌ها و همچنین توجه به مفاهیم تاب‌آوری در طراحی شبکه SCLSC موجب می‌شود که ریسک تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی عملیاتی کاهش یابد؛ لذا در توسعه مدل و رویکرد پیشنهادی این تحقیق، توجه به موارد مذکور سودمند واقع می‌شود.

management and control," ed: Elsevier, 2017.

[8] H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, and H. Jafari, "Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design", Computers & Industrial Engineering, vol. 109, pp. 191-203, 2017.

[9] R. Cruz-Rivera and J. Ertel, "Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico," European Journal of Operational Research, vol. 196, no. 3, pp. 930-9. 2009/ 01/ 08/ 2009, 39.

[10] M. S. Pishvae, K. Kianfar, and B. Karimi, "Reverse logistics network design using simulated annealing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 47, no. 1-4, pp. 269-281, 2010.

[11] M. S. Pishvae, J. Razmi, and S. A. Torabi, "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," Fuzzy sets and systems, vol. 206, pp. 1-20, 2012.

[12] V. Özkır and H. Başlıgil, "Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment," Journal of Cleaner Production, vol. 41, pp. 114-125, 2013.

[13] T.-S. Su, "Fuzzy multi-objective recoverable remanufacturing planning decisions involving multiple components and multiple machines," Computers & Industrial Engineering, vol. 72, pp. 72-83, 2014.

[14] K. Govindan, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh, "Bi-objective integrating sustainable order allocation and

فهرست منابع

[1] K. Devika, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh, "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques," European Journal of Operational Research, vol. 235, no.3, pp. 594-615, 2014.

[2] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi, Managing The Supply Chain: Definitive Guide. Tata McGraw-Hill Education, 2004.

[3] J. Quariguasi Frota Neto, G. Walther, J. Bloemhof, J. Van Nunen, and T. Spengler, "From closed-loop to sustainable supply chains: the WEEE case," International Journal of Production Research, vol. 48, no. 15, pp. 4463-4481, 2010.

[4] S. Seuring and M. Müller, "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management," Journal of cleaner production, vol. 16, no. 15, pp. 1699-1710, 2008.

[5] K. Govindan and H. Soleimani, "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus," Journal of Cleaner Production, vol. 142, pp. 3.2017, 71-384.

[6] J. Kim, B. Do Chung, Y. Kang, and B. Jeong, "Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty," Journal of Cleaner Production, 2018.

[7] D. Battini, M. Bogataj, and A. Choudhary, "Closed loop supply chain (CLSC): economics, modelling,

programming problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 213, no. 2, pp. 455-465, 2009.

[22] J. Aghaei, N. Amjady, and H. A. Shayanfar, "Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 4, pp. 3846-3858, 2011.

sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic," *Computers & Operations Research*, vol. 62, pp. 112-130, 2015.

[15] R. Babazadeh, J. Razmi, M. S. Pishvaei, and M. Rabbani, "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk," *Omega*, vol. 66, pp. 258-277, 2017/01/01/2017.

[16] M. Varsei and S. Polyakovskiy, "Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia," *Omega*, vol. 66, pp. 236-247, 2017.

[17] A. M. F. Fard and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A tri-level location-allocation model for forward/reverse supply chain," *Applied Soft Computing*, vol. 62, pp. 328-346, 2018.

[۱۸]. ا. یادگاری، ا. عالم تبریز، م. زندیه، ب. دری، "توسعه یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم آمیخته با اعداد صحیح برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته پویا،" پژوهش‌های نوین در ریاضی، ۱۳۹۶.

[19] M. Hajiaghaei-Keshteli and A. M. F. Fard, "Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition," *Neural Computing and Applications*, pp. 1-35, 2018.

[20] N. Sahebjamnia, A. M. F. Fard, and M. Hajiaghaei-Keshteli, "Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks," *Journal of Cleaner Production*, 2018.

[21] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical

