

توسعه شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته در فضای غیر قطعی

مهسا زارعی^۱، مهدی نصراللهی^{۲*} و امیر یوسفلی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳	در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت طراحی شده است. در مدل ارائه شده چهار تابع هدف شامل حداقل سازی هزینه های شبکه، حداقل سازی میزان انتشار گازهای گلخانه ای، حداقل سازی ریسک تولیدی-فنی و حداقل سازی زمان ارسال محصولات به مشتریان به طور همزمان در نظر گرفته شده است. با استفاده از شبکه پیشنهادی می توان در زمینه مدیریت میزان جریان مواد اولیه، محصولات دست اول و محصولات بازگشتی بین تسهیلات، برنامه ریزی تولید برای هر یک از مراکز تولید، نحوه تخصیص محصولات به هر یک از تسهیلات، تعیین تعداد نیروی انسانی مورد نیاز جهت استخدام و آموزش در هر یک از مراکز تولید، نحوه تخصیص ماشین آلات و تجهیزات، و همچنین مدیریت زمان با تعیین حداقل زمان قابل قبول برای ارسال محصولات به مشتریان به نحوی که شبکه دارای حداقل هزینه، حداقل میزان انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از فرایندهای عملیاتی تسهیلات و حمل و نقل و دارای کمترین ریسک تولیدی-فنی و حداقل زمان ممکن باشد، تصمیمات استراتژیکی گرفت. در این پژوهش به جهت افزایش کارایی مدل پارامترهایی همچون میزان محصول بازگشتی، نرخ بازیافت و انهدام به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و جهت رفع عدم قطعیت از منطق فازی بهره گرفته شده است. در نهایت به دلیل گستردگی مدل، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به اعتبارسنجی مدل پرداخته شده است. نتیجه حاصل از اعتبارسنجی، حاکی از کارآمدی مدل پیشنهادی در بهینه سازی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته می باشد.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹	
واژگان کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، زنجیره تأمین سبز، مدل سازی، بهینه سازی، عدم قطعیت.	

۱- مقدمه

پذیرند. به طور کلی دو نوع زنجیره تأمین شامل زنجیره تأمین رو به جلو^۴ و بازگشتی^۵ وجود دارد. زنجیره تأمین مستقیم از تأمین کننده شروع می شود و طی آن محصول تولید شده به مشتری نهایی می رسد. زنجیره تأمین معکوس از مشتری نهایی آغاز و طی آن محصول برگشتی از مشتری، یا توسط فرایند بازیافت و باز تولید به بازار ارسال می گردد و یا از زنجیره حذف می گردد. محصول ممکن است به دلایل مختلفی از جمله موجودی بیش از حد خرده فروشان، نارضایتی مصرف کننده و یا مزایای بالقوه حاصل از بازسازی و فروش مجدد برگشت داده شود [۱]. افزایش سطح صنعتی

زنجیره تأمین شبکه ای از فرایندها با هدف تأمین کالاها و خدمات مورد نیاز مشتریان شامل تولیدکنندگان، تأمین کنندگان، کانال های توزیع، عمده فروشان و خرده فروشان می باشد. طراحی زنجیره تأمین شامل تعیین ظرفیت، محل احداث تسهیلات شبکه و تخصیص جریان های مواد جهت برآورده کردن تقاضای مشتری در یک دوره زمانی می باشد. اصل مهم در طراحی شبکه زنجیره تأمین، طراحی بهینه ی شبکه است به طوری که فعالیت های شبکه با کمترین هزینه و کارآمدترین سطح عملکرد صورت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.nasrollahi@soc.ikiu.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۴ Forward logistics^۵ Reverse logistics

ریاضی تأکید داشته‌اند. در واقع مدل‌سازی ریاضی بخش جدایی ناپذیر ادبیات مربوط به زنجیره تأمین سبز گردیده است. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در شبکه زنجیره تأمین، مدل‌های بهینه‌سازی تأثیر بسزایی در حل مسائل واقعی مرتبط با شبکه دارند [۴]. تا کنون مدل‌های برنامه‌ریزی مختلفی جهت طراحی زنجیره تأمین سبز مورد استفاده قرار گرفته‌است، از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱، برنامه‌ریزی چند هدفه فازی^۲، مدل آرمانی^۳، و غیره اشاره نمود. امروزه با افزایش آگاهی از مسئولیت‌های زیست محیطی و نیاز به حفظ سودآوری در بازار رقابتی، زنجیره تأمین معکوس تبدیل به یک عنصر کلیدی از شبکه زنجیره تأمین سبز گردیده‌است [۵]. از آنجایی که مدیران ارشد و مدیر زنجیره تأمین شرکت‌ها به دنبال حداکثر سازی سود و کاهش هزینه‌های خود در تمامی سطوح زنجیره تأمین که جزء جدایی ناپذیر صنعت می‌باشند، هستند؛ برخورداری از یک شبکه زنجیره تأمین بهینه که قادر به تأمین هر دو نیاز اساسی و اولیه صنایع، شامل حداقل‌سازی هزینه‌های تولید و انتشار باشد، مسئله اصلی صنایع می‌باشد. با توجه به این مسئله هدف اصلی این مقاله طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با هدف افزایش سودآوری از طریق کاهش هزینه‌های کل و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرایندهای تولید، بازیافت، انهدام و بررسی محصولات در مراکز جمع‌آوری و حمل و نقل و همچنین کاهش ریسک تولیدی-فنی زنجیره تأمین سبز و زمان ارسال محصولات در فضای غیرقطعی می‌باشد.

۲- پیشینه پژوهش

امروزه تغییرات در عرصه اقتصاد و صنعت با سرعت بیشتری نسبت به گذشته در حال وقوع می‌باشد. هدف سازمان‌ها و شرکت‌ها، حفظ و افزایش سود و همچنین بقا و دوام بیشتر در بازار است. از جمله مزیت‌های رقابتی برای شرکت‌ها، کاراتر و اثربخش‌تر کردن فعالیت‌هایی نظیر زنجیره تأمین است. همچنین به دلیل قوانین دولتی، مسائل زیست‌محیطی و گسترش مفهوم مسئولیت اجتماعی، مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌است. محمدی و همکاران [۶] به بررسی یک شبکه

شدن کشورهای توسعه یافته در ارتباط با روند جهانی شدن چالش‌های جدیدی را برای مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است. در گذشته تمرکز اصلی مدیریت زنجیره تأمین، مدیریت اثر بخش جریان در شبکه‌های پیچیده تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان بوده است. امروزه به دلیل افزایش چشم‌گیر مصرف انرژی و مواد و انتشار گازهای گلخانه‌ای رویکرد جدیدی در مدیریت زنجیره تأمین تحت عنوان زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی علاوه بر مسائل اقتصادی به وجود آمده‌است [۲]. زنجیره تأمین سبز یک رویکرد پیش‌گیرانه برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی می‌باشد. این زنجیره ترکیبی از اندیشه‌های مدیریت زنجیره تأمین با اقداماتی مانند طراحی و خرید سبز، بازیافت و بازتولید، تکنولوژی‌های زیست‌محیطی به همراه مشارکت تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان می‌باشد. با توجه به انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست شامل آب، هوا و خاک و پدیده جهانی گرم شدن زمین توجه به مسائل زیست محیطی در کلیه فعالیت‌ها به ویژه فعالیت‌های صنعتی اجتناب ناپذیر است. بهره‌گیری از زنجیره تأمین سبز منافع زیادی از جمله کاهش تأثیرات مخرب فعالیت‌های صنایع، میزان آلاینده‌ها و ضایعات، صرفه‌جویی در مصرف منابع انرژی، حفاظت از منابع طبیعی، بهبود و ارتقای بهره‌وری و نوعی مزیت رقابتی را برای شرکت‌ها به ارمغان خواهد داشت. با توجه به جایگاه زنجیره تأمین در فعالیت‌های اقتصادی و صنایع و اهمیت روزافزون مسائل زیست محیطی، طراحی شبکه‌ای که علاوه بر مسائل اقتصادی، مسائل زیست محیطی را نیز پوشش دهد حائز اهمیت می‌باشد. امروزه شرکت‌ها و دولت از تأثیر فعالیت‌های زنجیره تأمین بر محیط زیست و جامعه مطلع گردیده‌اند. همچنین پژوهشگران در پژوهش‌های خود جنبه‌های زیست محیطی و اجتماعی را در نظر می‌گیرند و از رویکردهای مدل‌سازی بهینه چندمنظوره استفاده می‌نمایند [۳]. بررسی‌های انجام شده به روی مطالعات انجام شده در زمینه طراحی زنجیره تأمین سبز بیانگر این موضوع است که استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی در سال‌های اخیر افزایش یافته‌است و اکثر پژوهشگران بر بهبود عملکرد محیطی و اقتصادی بر اساس مدل‌های

³ FMOPM

⁴ GP

¹ MILP

² MINLP

خرابی جنس برون سپاری شده، تولید، جریمه خرابی جنس تولیدی، خرید ماشین آلات، هزینه‌های حمل و نقل در کلیه مسیرها و احداث تسهیلات می‌باشد. تابع هدف دوم به دنبال حداقل کردن انتشار گازهای آلاینده حاصل از فعالیت‌های حمل و نقل بین تسهیلات می‌باشد. بشیری و شیری [۱۰] به طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته با مراکز جمع‌آوری چند بخشی پرداخته‌اند. اهداف اصلی در نظر گرفته شده در این مدل کاهش هزینه‌ها شامل هزینه‌های احداث و حمل و نقل، افزایش صرفه‌جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و همچنین افزایش سود حاصل از کیفیت محصول بازیافتی می‌باشد. به دلیل اینکه داده‌ها در دنیای واقعی به صورت قطعی در دسترس نمی‌باشد، در این مدل از رویکردهای غیر قطعی استفاده شده است. روش به‌کاربرده شده جهت حل این مسئله الگوریتم ابتکاری تقریب میانگین نمونه و الگوریتم ژنتیک ترکیب شده با تقریب میانگین نمونه بوده است. نتایج بیانگر این است که بازیافت محصول و چند بخشی در نظر گرفتن مراکز جمع‌آوری منجر به دستیابی به اهداف زیست‌محیطی، افزایش کیفیت محصول و کاهش هزینه می‌شود.

اعضای فعال در زنجیره ارزش می‌توانند سهم بسزایی در کاهش هزینه‌های زنجیره ارزش از جمله هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند. قراردادهای تولیدکنندگان و خرده‌فروشان با هدف کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به اقدامات اصلاحی در فرایندهای تولید و حمل و نقل گردد. در فرایند تولید می‌توان با تولید محصولات دوست‌دار محیط زیست انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد. جهت مدیریت زنجیره تأمین سبز و همچنین کنترل و مدیریت انتشار این گونه‌ها و با در نظر گرفتن دو نوع مختلف تقاضای فازی ثابت و مثلثی بر اساس اطلاعات تقاضای موجود در بازار یک مدل فازی توسعه داده شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و همچنین الگوریتم ژنتیک هیبریدی، بهینه‌سازی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن شبکه‌ای با تعداد انبارها و ظرفیت‌های محدود و چندین نوع محصول تولیدی و عدم قطعیت در تقاضا، الگوریتم ژنتیک هیبریدی به‌طور کارآمدتری قادر به بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز می‌باشد [۱۱].

حمل و نقل به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی جهت توزیع، نقش قابل توجهی در فعالیت‌های توزیع شبکه زنجیره تأمین

چند محصوله، چند دوره‌ای، غیر قطعی و حلقه بسته پرداخته‌اند و از یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط جهت مدل‌سازی آن و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته استفاده نموده‌اند. در طراحی این شبکه ابعاد اقتصادی و زیست محیطی به همراه تصمیم‌های مالی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اعتبار سنجی حاکی از آن است که ملاحظه همزمان تصمیمات مالی و عدم قطعیت مربوط به تقاضا و بازگشت سرمایه منجر به بهبود سودآوری زنجیره تأمین می‌گردد. در تحقیق دیگری یک مدل دو-سطحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت و رقابت بین زنجیره‌ای طراحی شد و مسئله همسئله طراحی شده با استفاده از رویکرد تجزیه بندرز حل گردید. نتایج نشان داد که افزایش رقابت منجر به کاهش سود و افزایش ضریب الاستیسیته رقیب منجر به افزایش سود برای زنجیره خواهد شد [۷]. غایبلو و تارخ [۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دو هدفه برای شبکه زنجیره تأمین مستقیم، در سه سطح تأمین‌کنندگان، مراکز مونتاژ و دفع توسعه داده‌اند. اهداف در نظر گرفته شده در این مدل شامل دو تابع هدف حداکثرسازی سود و حداکثرسازی میزان سبز بودن شبکه می‌باشد. در این مدل منافع شبکه از کسر هزینه‌های کل از سود کلی حاصل از فروش محصولات به دست می‌آید. هزینه‌های در نظر گرفته شده در این مدل شامل هزینه‌های ثابت تأمین قطعات از تأمین‌کنندگان، راه‌اندازی خط مونتاژ بر مبنای طراحی برای دمونتاز و احداث مراکز دمونتاز، هزینه پردازش کالا در تسهیلات و هزینه حمل و نقل می‌باشد. حداکثرسازی میزان سبز بودن شبکه به صورت تابعی از میزان سبز بودن محصولات و قطعات در نظر گرفته شده است. خروجی این مدل انتخاب تأمین‌کنندگان و مراکز دمونتاز و مونتاژ و تعیین مقدار بهینه قطعات و محصولات در شبکه می‌باشد. صفار و همکاران [۹] یک شبکه زنجیره تأمین چندلایه‌ای، چند دوره‌ای و چند محصولی با بازگشت محصولات را مورد بررسی قرار داده‌اند و یک مدل ریاضی دو هدفه فازی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کرده‌اند. این مدل، تأمین‌کنندگان مناسب را بر اساس معیارهای متوسط خرابی، قیمت فروش و هزینه حمل و نقل انتخاب می‌کند. جهت تبدیل مدل، به مدل قطعی از روش خیمنز استفاده نموده‌اند و سپس از روش TH برای حل این مدل کمک گرفته‌اند. هدف اول این مدل کاهش هزینه‌ها اعم از خرید از تأمین‌کننده، جریمه

مشترک مزایای مالی و زیست محیطی برای تولیدکننده، توزیع کننده و مصرف کنندگان را به همراه دارد. برای طراحی چنین شبکه‌ای از مدل برنامه‌ریزی غیر خطی استفاده شده است و هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای آلاینده توسط وسایل حمل و نقل در شبکه توزیع در هر دو مسیر توزیع محصولات دست اول و جمع‌آوری محصولات بازگشتی کاهش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که بهره‌گیری از یک سیستم مشترک در مقایسه با مدل‌های قدیمی که دارای سیستم جمع‌آوری و توزیع جداگانه بوده‌اند، دارای ۱۰/۵ درصد هزینه پایین‌تر و ۱۲/۵ درصد مزایای زیست محیطی بیشتری هستند [۱۴].

رفت و آمد مشتریان به مراکز خرید جهت دستیابی به محصول نیز خود باعث انتشار گازهای آلاینده هوا خواهد شد. از این رو میزان تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از رفت و آمد مشتریان را نیز علاوه بر مسائل اقتصادی در طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط در نظر گرفته‌اند. مکان‌یابی صحیح خرده فروشان نیز ضمن ایجاد دسترسی راحت‌تر و سریع‌تر برای مشتریان و افزایش رضایتمندی آنان منجر به حداقل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های حمل و نقل در شبکه خواهد شد [۱۵]. بررسی سوابق پژوهشی حاکی از آن است که حمل و نقل با سهمی حدود یک سوم، رتبه اول را در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در زنجیره تأمین دارد و پس از آن فرایندهایی نظیر تولید، ذخیره‌سازی و انبارداری و در آخر فرایندهای استخراج مواد اولیه، احداث تسهیلات و فرایند دفع مواد زائد قرار دارند [۱۶].

نورجانی علاوه بر محصول جدید تازه تولید شده که از کارخانه به انبار و مراکز توزیع و سپس به مشتریان نهایی می‌رسد، دو جریان دیگر محصول یعنی محصول دفع شده، که از مشتری نهایی جمع‌آوری شده و برای فرآیند دفع به مراکز توزیع بازگردانده می‌شوند، و محصولات جدا شده که از مراکز توزیع به کارخانه، جهت بازیافت نهایی و استفاده مجدد ارسال می‌شوند را نیز در طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته و نرخ انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از دفع و سوزاندن زباله‌ها را کاهش داده‌است. البته این امر مستلزم افزایش حمل و نقل و در نتیجه افزایش هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل و فرایند بازیافت می‌شود. لذا برای بهینه‌سازی طراحی زنجیره تأمین

ایفا می‌کند [۱۲]. در سال‌های اخیر افزایش استفاده از ماشین‌های الکترونیکی راه جدیدی را جهت کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد کرده‌است. نکته قابل توجه در حمل و نقل محصولات، بازگشت بدون بار وسایل نقلیه از مقصد به مبدأ می‌باشد که این امر علاوه بر افزایش هزینه سوخت، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز به همراه دارد. می‌توان با مسیریابی کارا و در نظر گرفتن فاکتورهایی همچون سرعت وسیله نقلیه، نوع و اندازه وسیله نقلیه و میزان بارگذاری در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به حل این مسئله پرداخت. یافته‌ها نشان داد که سرعت بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد. استفاده از الگوریتم کولونی مورچه‌ها برای مسیریابی بهینه می‌تواند یک ابزار کارآمد با سرعت و اثر بخشی بالا، جهت مسیریابی بهینه و تحقق هر دو هدف کاهش هزینه‌های سوخت و انتشار، در طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز باشد [۱۳]. در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته توجه به بهینه‌سازی در زنجیره تأمین رو به جلو یا مستقیم، شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، مراکز توزیع و انبار و هم در زنجیره تأمین معکوس یا بازگشتی الزامی می‌باشد.

در زنجیره تأمین رو به جلو، مواد خام از تأمین‌کنندگان به مراکز تولید ارسال می‌گردند سپس بخشی از محصول ساخته شده به مراکز توزیع و بخشی از آن به انبارها منتقل می‌شود. زنجیره معکوس از نقطه پایان زنجیره تأمین مستقیم یا همان مشتریان آغاز می‌شود و محصولات مصرف شده و برگشتی به مراکز توزیع و جمع‌آوری ارجاع داده می‌شوند و در نهایت به مراکز باز تولید، بازیافت و دفع ارسال می‌گردند. جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده شده‌است و به وسیله‌ی آن اهداف مختلفی در زمینه بهینه‌سازی شبکه از جمله کاهش هزینه‌های زنجیره (اعم از هزینه‌های عملیاتی، حمل و نقل و هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات)، کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن و تعیین تعداد بهینه ماشین‌آلات خط تولید در هر دو زنجیره مستقیم و معکوس تحقق یافته است [۱۵]. مسائل مسیریابی و مدیریت مؤثر مسیر در طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز از دیگر مسائل مهم و حائز اهمیت می‌باشد. در شبکه‌های حلقه بسته که متشکل از دو نوع زنجیره‌ی مستقیم و معکوس هستند، توزیع محصولات دست اول و جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده و بازگشتی از طریق یک سیستم

سبز و حداقل کردن هزینه‌ها علاوه در نظر گرفتن هزینه‌های ثابت و هزینه‌های تولید، هزینه جمع‌آوری محصولات دفع شده از مشتریان و هزینه‌های بازتولید و حمل و نقل مسیر بازگشت را نیز در نظر گرفته‌است و به منظور کاهش میزان انتشار، نرخ انتشار ناشی از فرآیند بازیافت، باز تولید و حمل و نقل را علاوه بر عوامل منتشرکننده گازهای گلخانه‌ای که در مدل‌هایی با شبکه حلقه باز در نظر گرفته می‌شوند، محاسبه نموده و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با در نظر داشتن دو هدف کاهش هزینه کل و کاهش هزینه انتشار ارائه نموده‌است [۲].

زمان توزیع محصولات از دیگر عوامل مؤثر در طراحی بهینه زنجیره تأمین سبز می‌باشد. محققان با در نظر گرفتن کاهش زمان توزیع محصولات به‌عنوان یک هدف جدید و وارد کردن آن در مدل برنامه‌ریزی چند هدفه فازی، علاوه بر افزایش کیفیت عملکرد ارسال محصول به مشتریان، به تعیین بهینه تعداد و مکان‌های تسهیلات جدید پرداخته‌اند [۱۷]. استفاده از یک رویکرد ترکیبی شامل الگوریتم ژنتیک و روش دقیق برنامه‌ریزی پویا به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد جهت مسیریابی و حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با اهداف زمان‌بندی برنامه‌های تحویل و بهینه‌سازی میزان انتشار کربن دی‌اکسید در نظر گرفته می‌شود. صحت عملکرد این رویکرد در ۳۰ نمونه کوچک و ۱۴ نمونه بزرگ بررسی گردیده‌است [۱۸]. محصولات پس از استفاده توسط مصرف‌کنندگان نهایی می‌توانند وارد چرخه بازیافت شوند و مجدداً مورد استفاده قرار بگیرند اما تمامی محصولات مصرف شده قابلیت بازیافت را ندارند و تبدیل به ضایعات می‌گردند که دفع و یا سوزانده می‌شوند و این امر موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. با توجه به تحقیقات میدانی صورت گرفته، خطر انفجار برای تأمین‌کننده در مرحله عرضه مواد خام و همچنین متعاضد شدن گازهای خطرناک در مرحله دفع زباله، خطرات عمده تهدیدکننده زنجیره تأمین هستند. به همین منظور برای طراحی همه جانبه زنجیره تأمین باید خطرات تهدیدکننده شبکه را در نظر گرفت. باید در نظر داشت که این خطرات تنها به خطر آلودگی محیط زیست محدود نمی‌شود و به طور کلی‌تر شامل خطرات تلفات و از دست دادن اموال نیز می‌شود. در همین راستا ژائو با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد

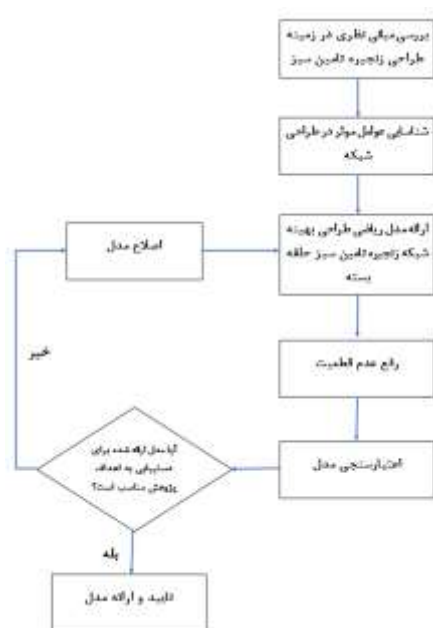
صحيح مختلط جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز، به حداقل کردن خطرات همه بخش‌های زنجیره مانند تأمین‌کنندگان، کارخانجات، مراکز توزیع و انبارها با محاسبه احتمال وقوع خطر در هر یک از آن‌ها و همچنین خطرات حمل و نقل، با در نظر گرفتن نرخ تصادف خودروهای شبکه در مدل ریاضی مذکور پرداخته‌است و در کنار سایر اهداف از جمله حداقل کردن هزینه‌ها و انتشار کربن دی‌اکسید به یک طراحی بهینه برای شبکه رسیده است [۱۹]. کل زنجیره تأمین نوعی سیستم کشتی^۱ است که توسط تقاضای مشتری راه‌اندازی شده‌است. موفقیت زنجیره اساساً با تأمین انتظارات مشتری تعیین می‌شود. به‌منظور بهره برداری مؤثر از منابع طبیعی و حداقل کردن آلودگی، رفتار مشتری یکی از عوامل اصلی می‌باشد و ضروری است که در محاسبات توسط تصمیم‌گیرندگان شرکت‌های درگیر زنجیره تأمین در نظر گرفته شود. به‌عبارت دیگر نگرش خرید مشتریان نسبت به محصولات سبز در هنگام مدیریت زنجیره تأمین سبز اطلاعات مهمی است. در یک پژوهش بر اساس رفتار خرید مصرف‌کنندگان، مشتریان را به سه گروه مشتریان سبز، قرمز و ناسازگار تقسیم نموده‌اند. مشتریان سبز متقاضی محصولات سبز هستند و بالعکس مشتریان قرمز معیارهای خرید خود را بر اساس معیارهای معمول دیگری قرار می‌دهند. مشتریان ناسازگار در صورتی که محصولات سبز دارای قیمتی پایین تر یا برابر محصولات جایگزین غیر سبز داشته‌باشند حاضر به خرید این محصولات هستند. با در نظر گرفتن عوامل جدیدی تحت عنوان جریمه بازار و پاداش بازار یک مدل آرمانی برای حداکثر کردن سود زنجیره تأمین که شامل مجموع درآمد کل و پاداش بازار منهای مجموع هزینه کل، جریمه بازار و فروش از دست رفته، ارائه گردیده‌است [۲۰].

مسئله مسیریابی سبز یکی از مسائل مربوط به مسیریابی استاندارد وسایل نقلیه در شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. اهداف اصلی این مسئله یعنی، یافتن حداقل فاصله و حداقل میزان انتشار دی‌اکسید کربن با استفاده از مدل ریاضی بهینه‌سازی غیر خطی، مدل‌سازی شده‌است. راه‌حل‌های این مسئله مجموعه‌ای از مسیرهای تحویل را تعیین می‌کند که ضمن رفع نیاز شبکه منجر به حداقل ساختن هزینه حمل و نقل در شبکه شده‌است.

^۱ Pull

یا رو به جلو مواد اولیه پس از دریافت از تأمین کنندگان به مراکز تولید منتقل می‌شوند. محصولات تولید شده در مراکز تولید جهت تأمین تقاضای مشتریان به مراکز توزیع ارسال و سپس توسط این مراکز به محل مشتریان ارسال می‌گردند. در زنجیره معکوس محصولاتی که فاقد کیفیت مورد انتظار مشتری می‌باشند تحت عنوان محصولات بازگشتی از مشتریان، در مرحله اول به مراکز جمع‌آوری مرجوع می‌گردند. در مراکز جمع‌آوری بخشی از محصولات بازگشتی پس از بازرسی و در صورت امکان بازیافت به مراکز بازیافت و بخشی دیگر که قابلیت بازیافت و بازگشت به چرخه تولید را ندارند، به مراکز انهدام منتقل می‌گردند. در مراکز بازیافت نیز بخشی از محصولات بازگشتی پس از بازیافت جهت تولید مجدد به مراکز تولید ارسال می‌گردند و بخش دیگر که شامل ضایعات و محصولات غیرقابل بازیافت می‌باشند، به مراکز انهدام منتقل می‌گردند.

نمای کلی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته پیشنهادی در شکل (۲) ارائه شده است. در ادامه اطلاعات مربوط به ساختار شبکه جهت تشریح کامل و شفافیت بیشتر در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۱- فرایند اجرای پژوهش

در این مدل با استفاده از روش باز ترکیب بلوک^۱ به محاسبه حداقل فاصله و انتشار دی اکسید کربن پرداخته شده است [۲۱].

در مطالعه‌ای یک مدل جدید برای طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شد که در آن یک رویکرد جدید پایایی معرفی گردیده است. مدل پیشنهادی علاوه بر اینکه مجموع هزینه‌ها را کمینه می‌نماید، بلکه به صورت اثربخش، شبکه‌ای مقاوم تحت اختلالات مختلف را ایجاد می‌نماید. برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها از یک روش کارای برنامه‌ریزی امکانی بهره گرفته شده است [۲۲].

۳- روش

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌دو دسته الگوریتم‌های دقیق^۲ الگوریتم‌های تقریبی^۳ طبقه‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های تقریبی نیز خود به‌دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری^۴ و فراابتکاری^۵ و فوق ابتکاری^۶ تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی می‌باشند که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند.

در این پژوهش ابتدا بر اساس مرور و بررسی مبانی نظری پژوهش، فرایند مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین را مشخص کرده سپس با توجه به مدل‌های مطالعه شده و شرایط حاکم بر مسئله مورد بررسی، مدلی جهت دستیابی به هدف پژوهش ارائه می‌گردد. در نهایت با توجه به اینکه مدل ارائه شده از نوع $Np\text{-hard}$ می‌باشد از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک چند هدفه جهت حل مسئله استفاده می‌گردد. مراحل کلی انجام پژوهش حاضر در شکل (۱) نشان داده شده است.

شبکه در نظر گرفته شده در مدل ریاضی ارائه شده، از نوع چندهدفه، حلقه بسته و چندسطحی می‌باشد که متشکل از ۶ سطح شامل تأمین‌کنندگان مواد اولیه، مراکز تولید، مراکز توزیع و جمع‌آوری، مشتریان، مراکز بازیافت و مراکز انهدام می‌باشند. برای این شبکه دو مرکز تولید، دو مرکز انهدام و دو مرکز بازیافت در نظر گرفته شده است. در زنجیره مستقیم

^۴ heuristic

^۵ meta-heuristic

^۶ hyper heuristic

1 block recombination

2 exact

3 approximate algorithms

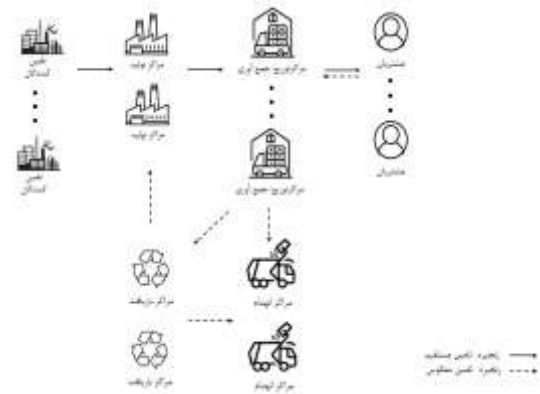
جدول ۱- مقایسه توابع هدف مدل‌های بررسی شده و مدل پیشنهادی

اهداف				تحقیق	ردیف
کاهش زمان ارسال	کاهش ریسک تولیدی-فنی	کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای	کاهش هزینه‌های شبکه		
		*	*	[۲]	۱
		*	*	[۵]	۲
		*	*	[۶]	۳
			*	[۸]	۴
		*	*	[۹]	۵
			*	[۱۰]	۶
		*	*	[۱۱]	۷
			*	[۱۳]	۸
		*	*	[۱۴]	۹
		*	*	[۱۵]	۱۰
*		*		[۱۸]	۱۱
		*	*	[۱۹]	۱۲
		*		[۲۰]	۱۳
		*		[۲۱]	۱۴
		*	*	[۲۳]	۱۵
		*	*	[۲۴]	۱۶
		*	*	[۲۵]	۱۷
			*	[۲۶]	۱۸
			*	[۲۷]	۱۹
			*	[۲۸]	۲۰
		*	*	[۲۹]	۲۱
			*	[۳۰]	۲۲
*		*	*	[۳۱]	۲۳
			*	[۳۲]	۲۴
			*	[۳۳]	۲۵
			*	[۳۴]	۲۶
		*		[۳۵]	۲۷
		*	*	[۳۶]	۲۸
		*	*	[۳۷]	۲۹
		*	*	[۳۸]	۳۰
			*	[۳۹]	۳۱
			*	[۴۰]	۳۲
*			*	[۴۱]	۳۳
*		*	*	[۴۲]	۳۴
			*	[۴۳]	۳۵
		*	*	[۴۴]	۳۶
			*	[۴۵]	۳۷
		*	*	[۴۶]	۳۸
			*	[۴۷]	۳۹
			*	[۴۸]	۴۰
*	*	*	*	پژوهش حاضر	۴۱

جدول ۲- مقایسه هزینه‌ها در مدل‌های بررسی شده و مدل پیشنهادی

ردیف	نویسندگان	هزینه‌ها																	
		خرید و اجاره وسایل نقلیه	مراکز جمع‌آوری	بازرسی در	تولید	خرید مواد اولیه	بازگشتی	خرید محصول	تسهیلات	حمل و نقل بین	سفارش	تأخیر در تأمین	واحد محصول	نگهداری هر	آموزش کارکنان	نگهداری	تعمیرات و	بازیافت	انهدام
۱	[۲]				*			*					*					*	
۲	[۵]			*								*							
۳	[۶]							*					*						
۴	[۸]							*					*						
۵	[۹]				*			*					*					*	
۶	[۱۰]				*			*				*						*	
۷	[۱۱]			*				*					*					*	
۸	[۱۳]				*			*					*					*	
۹	[۱۴]			*				*				*						*	
۱۰	[۱۵]			*				*				*						*	
۱۱	[۱۸]		*					*				*						*	
۱۲	[۱۹]		*					*				*						*	
۱۳	[۲۰]			*				*				*						*	
۱۴	[۲۱]			*				*				*						*	
۱۵	[۲۳]			*				*				*						*	
۱۶	[۲۴]		*					*	*			*	*					*	
۱۷	[۲۵]			*				*				*						*	
۱۸	[۲۶]		*					*		*		*	*					*	
۱۹	[۲۷]		*					*	*			*	*					*	
۲۰	[۲۸]		*					*	*			*	*					*	
۲۱	[۲۹]							*				*	*					*	
۲۲	[۳۰]		*					*	*			*	*					*	
۲۳	[۳۱]							*	*			*	*					*	
۲۴	[۳۲]							*	*			*	*					*	
۲۵	[۳۳]		*					*	*			*	*					*	
۲۶	[۳۴]							*	*			*	*		*			*	
۲۷	[۳۵]							*	*			*	*					*	
۲۸	[۳۶]		*					*	*			*	*					*	
۲۹	[۳۷]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۰	[۳۸]							*	*			*	*					*	
۳۱	[۳۹]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۲	[۴۰]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۳	[۴۱]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۴	[۴۲]							*	*	*		*	*					*	
۳۵	[۴۳]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۶	[۴۴]							*	*	*		*	*					*	
۳۷	[۴۵]							*	*	*		*	*					*	
۳۸	[۴۶]		*					*	*	*		*	*					*	
۳۹	[۴۷]		*					*	*	*		*	*		*			*	
۴۰	[۴۸]							*	*	*		*	*		*			*	
۴۱	پژوهش حاضر		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

۶. ظرفیت تسهیلات محدود است.
۷. جهت کاهش هزینه‌های شبکه برای توزیع محصولات دست اول به مشتریان و جمع‌آوری محصولات بازگشتی از آنان یک مکان دومنظوره در شبکه در نظر گرفته شده است.
۸. محل تأمین‌کنندگان، مرکز تولید، مراکز توزیع و جمع‌آوری، مراکز بازیافت، مراکز انهدام و مشتریان شناخته شده است.
۹. شبکه در نظر گرفته شده شامل دو مرکز تولید، دو مرکز انهدام و دو مرکز بازیافت و همچنین چندین تأمین‌کننده و مرکز توزیع و جمع‌آوری می‌باشد.
۱۰. بخشی از محصولات بازگشتی در زنجیره تأمین معکوس بازیافت گردیده و مجدداً به زنجیره باز می‌گردد و بخشی از آن دفع و از شبکه خارج می‌گردد.
۱۱. هزینه‌های کل شامل هزینه‌های متغیر از جمله: هزینه‌های تولید به‌ازای هر واحد محصول، هزینه خرید هر واحد مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، هزینه حمل و نقل که تابعی از مسافت از تأمین‌کنندگان به مرکز تولید، از مرکز تولید به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز مشتریان، از محل مشتریان به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز بازیافت و مراکز انهدام و از مراکز بازیافت به مرکز تولید اصلی و مراکز انهدام است، هزینه تأخیر در تامین سفارش مشتریان، هزینه نگهداری هر واحد محصول در مراکز توزیع، هزینه خرید هر واحد محصول نوع P از مشتری، هزینه آموزش کارکنان، هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات، هزینه بازرسی هر واحد محصول بازگشتی در مراکز توزیع و جمع‌آوری، هزینه خرید هر واحد محصول نوع P از مشتری، هزینه خرید و اجاره خودرو نوع m و هزینه‌های مربوط به فرآیند بازیافت و انهدام می‌باشد.
۱۲. انتشار کل ناشی از فرآیندهای تولید و حمل‌ونقل که تابعی از مسافت در فاصله بین تأمین‌کنندگان به مرکز تولید، از مرکز تولید به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به محل مشتریان، از محل مشتریان به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز بازیافت و مراکز انهدام و از مراکز



شکل ۲- نمای کلی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته پیشنهادی

نوع مدل	نوع شبکه	مشکلات	منابع	خروجی	کار هدف
مدل برنامه‌ریزی خطی حلقه بسته	حلقه بسته	تک دوره ای	تأمین‌کنندگان	محصولات سبز	حفاظت از محیط زیست
		تعدد دوره ای	مراکز تولید	انواع محصولات	حفاظت از محیط زیست
		تعدد دوره ای	مراکز توزیع	محصولات سبز	حفاظت از محیط زیست
		تعدد دوره ای	مراکز انهدام	محصولات سبز	حفاظت از محیط زیست
		تعدد دوره ای	مراکز بازیافت	محصولات سبز	حفاظت از محیط زیست
		تعدد دوره ای	مراکز انهدام	محصولات سبز	حفاظت از محیط زیست

شکل ۳- ساختار شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته پیشنهادی

۴-ارائه مدل

طراحی مدل‌های ریاضی، به در نظر گرفتن مفروضاتی برای محدود کردن دامنه مدل بررسی شده و امکان پذیر کردن حل آن نیاز دارد [۴۹]. مدل‌های بهینه‌سازی نیز عمدتاً بر اساس ساده‌سازی و قبول فرضیه‌ها شکل می‌گیرند؛ مفروضات مدل پیشنهادی نیز به شرح زیر هستند:

۱. مسئله یک مدل چند هدفه، تک دوره‌ای و چند محصولی است.
۲. تمامی تقاضای مشتریان باید تأمین گردد.
۳. شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده از نوع حلقه بسته می‌باشد.
۴. شبکه زنجیره تأمین با در نظر داشتن مسائل زیست محیطی طراحی می‌گردد.
۵. جریان مواد تنها بین دو سطح متفاوت از شبکه می‌تواند برقرار شود و جریان مواد بین تسهیلات در یک لایه وجود ندارد.

توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز بازیافت r با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mddi} : هزینه حمل‌ونقل محصول بازگشتی از مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز انهدام di با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mrf} : هزینه حمل‌ونقل محصول بازیافت شده از مرکز بازیافت r به مرکز تولید f با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mrdi} : هزینه حمل‌ونقل محصول بازگشتی از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام di با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

C_h : هزینه نگهداری محصول نوع p در مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

C_N : هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات

C_{tr} : هزینه آموزش کارکنان

C_{rp} : هزینه بازیافت محصول نوع p در مرکز بازیافت r

C_{di} : هزینه انهدام محصول نوع p در مرکز انهدام di

C_d : هزینه تأخیر به ازای زمان

F_{chp} : هزینه بازرسی هر واحد محصول بازگشتی در مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

f_h : هزینه خرید هر واحد محصول نوع P از مشتری

C_{rentm} : هزینه اجاره خودرو نوع m

C_{bt} : هزینه خرید خودرو نوع m

C_N : هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات

P_{LP} : میزان تولید محصول نوع P توسط تجهیز L

T_{pf1d} : نفر-ساعت مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نوع p در مرکز تولید اول

T_{pf2d} : نفر-ساعت مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نوع p در مرکز تولید دوم

T_{w1} : ساعت کار در دوره سفارش در مرکز تولید اول

T_{w2} : ساعت کار در دوره سفارش در مرکز تولید دوم

K_{a1} : تعداد نیروهای کار موجود در مرکز تولید اول

K_{a2} : تعداد نیروهای کار موجود در مرکز تولید دوم

d_{sf} : فاصله بین تأمین کننده s تا مرکز تولید f

d_{fd} : فاصله بین مرکز تولید f تا مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

d_{dc} : فاصله بین مرکز توزیع - جمع‌آوری dc تا مشتری c

d_{cd} : فاصله بین مشتری c تا مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

d_{dr} : فاصله بین مرکز توزیع - جمع‌آوری dc تا مرکز

بازیافت به مرکز تولیدی اصلی و مراکز انهدام است، و فرآیند تولید، بازرسی محصول بازگشتی در مراکز توزیع و جمع‌آوری، بازیافت و انهدام می‌باشد.

۱۳. ریسک تولیدی - فنی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی شبکه پیشنهادی شامل مواردی چون وقفه ایجاد شده ناشی از خرابی تجهیزات و دستگاه‌ها و کمبود نیروی کار ماهر می‌باشد.

۱۴. میزان محصول بازگشتی از مشتریان و نرخ بازیافت و انهدام به صورت غیر قطعی ولی دارای تابع توزیع از پیش تعیین شده و شناخته شده در نظر گرفته می‌شود.

۱۵. نمادهای به کاررفته در مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

s : مجموعه تأمین کنندگان ($S=1, \dots, N$)

f : مراکز تولید ($F=1, 2$)

dc : مراکز توزیع - جمع‌آوری ($DC=1, \dots, N$)

di : مراکز انهدام ($DI=1, 2$)

r : مراکز بازیافت ($R=1, 2$)

c : مشتریان ($C=1, \dots, N$)

k : کارکنان ($K=1, \dots, N$)

p : مجموعه محصولات ($P=1, \dots, N$)

l : مجموعه تجهیزات ($L=1, \dots, N$)

m : انواع وسایل نقلیه ($M=1, \dots, N$)

t : زمان بر حسب ساعت ($T=1, \dots, N$)

پارامترهای به کاررفته در مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

C_p : هزینه تولید هر واحد محصول نوع p

f_s : هزینه خرید هر واحد مواد اولیه از تأمین کننده s

tr_{msf} : هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه از تأمین کننده s به مرکز تولید f با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mfdc} : هزینه حمل‌ونقل محصول از مرکز تولید f به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mdc} : هزینه حمل‌ونقل محصول از مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مشتری c با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mcd} : هزینه حمل‌ونقل محصول بازگشتی از مشتری c به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc با وسیله نقلیه نوع m بر حسب مسافت

Tr_{mrd} : هزینه حمل‌ونقل محصول بازگشتی از مرکز

Cadi: حداکثر ظرفیت مرکز انهدام d_i
 tk: حداکثر زمان تحویل قابل قبول برای مشتری c
 d: میزان تقاضای مشتریان
 df: میزان تقاضای مواد اولیه مرکز تولید f از تأمین کننده s
 RL: ریسک خرابی دستگاه L
 Tep: نرخ انتشار CO_2 کل تولید در مراکز تولید
 α : نرخ بازگشت محصولات بازگشتی
 β : نرخ ارسال محصولات بازگشتی از مرکز توزیع
 جمع‌آوری dc به مرکز انهدام d_i
 γ : نرخ ارسال محصولات بازگشتی از مرکز توزیع
 جمع‌آوری dc به مرکز بازیافت r
 λ : نرخ ارسال محصولات بازیافتی از مرکز بازیافت r به
 مرکز تولید f
 τ : نرخ ارسال محصولات بازیافتی از مرکز بازیافت r به
 مرکز انهدام d_i
 Q_s : سطوح مختلف کیفیت محصولات بازگشتی ($s = 1, 2, \dots, q_s$)
 q_{sc} : میزان کیفیت مورد انتظار مشتری
 q_{sddi} : میزان کیفیت محصولی که سبب انتقال از مرکز
 توزیع و جمع‌آوری dc به مرکز انهدام d_i می‌شود
 q_{sdr} : میزان کیفیت محصولی که سبب انتقال از مرکز
 توزیع و جمع‌آوری dc به مرکز بازیافت r می‌شود
 q_{srdi} : میزان کیفیت محصولی که سبب انتقال از مرکز
 بازیافت r به مرکز انهدام d_i می‌شود
 q_{srf} : میزان کیفیت محصولی که سبب انتقال از مرکز
 بازیافت r به مرکز تولید f می‌شود
 مدل ریاضی ارائه‌شده دارای دو نوع متغیر تصمیم می‌باشد.
 دسته اول متغیرهای تصمیم غیرصفر برای تعیین جریان
 مواد و محصولات بین تسهیلات مختلف و تعداد نیروی
 استخدامی در هریک از مراکز تولید و همچنین تعیین مدت
 زمان ارسال محصولات بین تسهیلات مختلف در زنجیره
 تأمین مستقیم می‌باشند. دسته دوم شامل متغیرهای صفر
 و یک می‌باشند که برای انتخاب تسهیلات، خودرو و
 تجهیزات مراکز تولید به کار برده می‌شوند.
 متغیرهای تصمیم غیر صفر:
 NP: تعداد محصولات تولید شده نوع p
 Ysf: مقدار مواد اولیه ارسالی از تأمین کننده s به مرکز
 تولید f

بازیافت r
 d_{rf} : فاصله بین مرکز بازیافت r تا مرکز تولید f
 d_{rdi} : فاصله بین مرکز بازیافت r تا مرکز انهدام d_i
 d_{ddi} : فاصله بین مرکز توزیع - جمع‌آوری dc تا مرکز انهدام
 d_i
 e_p : نرخ انتشار CO_2 ناشی از تولید هر واحد محصول نوع
 p
 e_{rp} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از فرایند بازیافت هر واحد
 محصول بازگشتی نوع p
 e_{dip} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از فرایند انهدام هر واحد
 محصول بازگشتی نوع p
 e_{sf} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 تأمین کننده s به مرکز تولید f به‌ازای یک واحد محصول
 e_{fd} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز تولید f به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به‌ازای یک
 واحد محصول
 e_{dc} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مشتری c به‌ازای یک واحد
 محصول
 e_{cd} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مشتری c به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به‌ازای یک واحد
 محصول
 e_{dr} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز بازیافت r به‌ازای یک
 واحد محصول
 e_{rf} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز بازیافت r به مرکز تولید f به‌ازای یک واحد محصول
 e_{rdi} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز بازیافت r به مرکز انهدام d_i به‌ازای یک واحد
 محصول
 e_{ddi} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل در فاصله بین
 مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز انهدام d_i به‌ازای یک
 واحد محصول
 e_{chp} : نرخ انتشار CO_2 ناشی از فرایند بازرسی محصولات
 بازگشتی در مرکز توزیع - جمع‌آوری dc
 Ca_s : حداکثر ظرفیت تأمین کننده s
 Ca_f : حداکثر ظرفیت مرکز تولید f
 Ca_{dc} : حداکثر ظرفیت مرکز توزیع - جمع‌آوری dc
 Ca_r : حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت r

X_{mfd} : اگر خودرو نوع m از مرکز تولید به مرکز توزیع و جمع آوری ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mdc} : اگر خودرو نوع m از مرکز توزیع و جمع آوری به محل مشتریان ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mcd} : اگر خودرو نوع m از محل مشتریان به مرکز توزیع و جمع آوری ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mnr} : اگر خودرو نوع m از مرکز توزیع و جمع آوری به مرکز بازیافت ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mrf} : اگر خودرو نوع m از مرکز بازیافت به مرکز تولید ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mrfd} : اگر خودرو نوع m از مرکز بازیافت به مرکز انهدام ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{mddi} : اگر خودرو نوع m از مرکز توزیع و جمع آوری به مرکز انهدام ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{rm} : اگر خودرو نوع m اجاره شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{bm} : اگر خودرو نوع m خریداری شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_1 : اگر تجهیز L استفاده شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

مدل پیشنهادی پژوهش حاضر دارای چهار تابع هدف متناقض کمینه‌سازی می‌باشد.

تابع هدف اول به‌عنوان یک هدف کمی کلیه هزینه‌های شبکه را محاسبه و حداقل می‌نماید.

تابع هدف دوم به‌عنوان هدف سازگاری هر چه بیشتر با محیط زیست، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرایندهای مختلف شبکه زنجیره تأمین را حداقل می‌سازد.

تابع هدف سوم و چهارم به‌عنوان اهداف کیفی به‌ترتیب کمینه‌سازی ریسک خرابی دستگاه‌ها و کمینه‌سازی زمان ارسال محصولات را دنبال می‌کنند. بنابراین با توجه به ساختار متفاوت اهداف بهتر است که در قالب چهار هدف جداگانه طرح شوند.

Y_{pfd} : مقدار محصول نوع p ارسالی از مرکز تولید f به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

Y_{pdc} : مقدار محصول نوع p ارسالی از مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مشتری c

Y_{pcd} : مقدار محصول نوع p ارسالی از مشتری c به مرکز توزیع - جمع‌آوری dc

Y_{pdr} : مقدار محصول نوع p ارسالی از مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز بازیافت r

Y_{prf} : مقدار محصول بازیافتی ارسالی از مرکز بازیافت r به مرکز تولید f

Y_{prdi} : مقدار محصول ارسالی از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام di

Y_{pddi} : مقدار محصول بازگشتی ارسالی از مرکز توزیع - جمع‌آوری dc به مرکز انهدام di

tt : زمان کل از تهیه مواد اولیه از تأمین کننده s تا ارسال محصول نهایی به مشتری c

t_{sf} : مدت زمان ارسال مواد اولیه تولید محصول از تأمین کننده s به مرکز تولید f

t_{fd} : مدت زمان ارسال محصول از مرکز تولید f به مرکز توزیع dc

t_{dc} : مدت زمان ارسال محصول از مرکز توزیع dc به مشتری c

K_{e2} : تعداد نیروی استخدامی مورد نیاز در مرکز تولید اول

K_{e2} : تعداد نیروی استخدامی مورد نیاز در مرکز تولید دوم

X_s : اگر تأمین کننده s انتخاب شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_f : اگر مرکز تولید f انتخاب شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{dc} : اگر مرکز توزیع - جمع‌آوری dc انتخاب شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_r : اگر مرکز بازیافت r انتخاب شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{di} : اگر مرکز انهدام di انتخاب شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

X_{msf} : اگر خودرو نوع m از تأمین کننده به مرکز تولید ارسال شود، برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با ۰.

تابع هدف ۱:

$$\begin{aligned}
MinZ_1 = & \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} f_s \cdot Y_{sf} \cdot X_s \cdot X_f + \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} C_p \cdot N_p \cdot X_f + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} f_H \cdot Y_{pdc} \cdot X_{dc} + \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} C_{rp} \cdot Y_{pdr} \cdot X_r + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{di \in DI} C_{di} \cdot (Y_{pddi} + Y_{prdi}) \cdot X_{di} + \sum_{l \in L} C_N \cdot X_L + \\
& \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} C_d \cdot \max(0, t_i - t_k) \cdot Y_{pdc} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{f \in F} tr_{mfd} \cdot d_{fd} \cdot Y_{pfd} \cdot X_{dc} \cdot X_f + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} tr_{mdc} \cdot d_{dc} \cdot Y_{pdc} \cdot X_{dc} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} tr_{mcd} \cdot d_{cd} \cdot Y_{pdc} \cdot X_{dc} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{dc \in DC} tr_{mrd} \cdot d_{dr} \cdot Y_{pdr} \cdot X_{dc} \cdot X_r + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} tr_{mrf} \cdot d_{rf} \cdot Y_{prf} \cdot X_r \cdot X_f + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{di \in DI} tr_{mrdi} \cdot d_{rdi} \cdot Y_{prdi} \cdot X_{di} \cdot X_r + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{dc \in DC} tr_{mddi} \cdot d_{ddi} \cdot Y_{pddi} \cdot X_{di} \cdot X_{dc} + \\
& \sum_{m \in M} C_{rentm} \cdot X_{rm} + \sum_{m \in M} C_{bm} \cdot X_{bm} + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{f \in F} C_h \cdot Y_{pfd} \cdot X_{dc} + \sum_{k_1 \in K} \sum_{k_2 \in K} C_{tr} \cdot (k_{e1} + k_{e2})
\end{aligned}$$

در تابع هدف ۱ عبارت اول بیانگر هزینه خرید مواد اولیه از تأمین کننده S می‌باشد. عبارت دوم بیانگر هزینه تولید هر واحد محصول، عبارت سوم نشان دهنده هزینه خرید هر واحد محصول بازگشتی از مشتریان، عبارت چهارم بیانگر هزینه بازرسی هر واحد محصول بازگشتی در مرکز توزیع و جمع‌آوری، عبارت پنجم بیانگر هزینه بازیافت هر واحد محصول بازگشتی، عبارت ششم بیانگر هزینه انهدام هر واحد محصول بازگشتی و غیرقابل بازیافت، عبارت هفتم بیانگر هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات و عبارت هشتم بیانگر هزینه تأخیر در ارسال محصولات به‌ازای زمان می‌باشند. عبارت نهم تا شانزدهم به ترتیب بیانگر هزینه حمل و نقل مواد اولیه از تأمین کنندگان به مراکز تولید، حمل

محصولات از مراکز تولید به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به محل مشتریان، حمل محصول بازگشتی از محل مشتریان به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز بازیافت، از مراکز بازیافت به مراکز تولید، از مراکز بازیافت به مرکز انهدام و از مراکز توزیع و جمع‌آوری مراکز انهدام است. عبارت هفدهم نمایش دهنده هزینه نگهداری در مراکز توزیع و جمع‌آوری و عبارت هجدهم و نوزدهم به ترتیب بیانگر هزینه اجاره و خرید خودرو جهت حمل و نقل مواد اولیه و محصولات بین تسهیلات می‌باشد. در نهایت عبارت بیستم معادل هزینه آموزش کارکنان می‌باشد.

تابع هدف ۲:

$$\begin{aligned}
MinZ_2 = & \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} N_p \cdot e_p + \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} Y_{pdr} \cdot e_{rp} + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{di \in DI} \sum_{r \in R} (Y_{pddi} + Y_{prdi}) \cdot e_{dip} + \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} Y_{pdc} \cdot e_{chp} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} Y_{sf} \cdot e_{sf} \cdot X_{msf} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{f \in F} Y_{pfd} \cdot e_{fd} \cdot X_{mfd} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} Y_{pdc} \cdot e_{dc} \cdot X_{mcd} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} Y_{pcd} \cdot e_{cd} \cdot X_{mcd} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{r \in R} Y_{pdr} \cdot e_{dr} \cdot X_{mrd} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} Y_{prf} \cdot e_{rf} \cdot X_{mrf} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{di \in DI} Y_{prdi} \cdot e_{rdi} \cdot X_{mrdi} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{dc \in DC} tr_{mddi} \cdot d_{ddi} \cdot Y_{pddi} \cdot X_{di} \cdot X_{dc} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{di \in DI} Y_{pddi} \cdot e_{ddi} \cdot X_{mddi}
\end{aligned}$$

عبارت اول این تابع هدف بیانگر میزان انتشار ناشی از فرایند تولید محصولات در مراکز تولید، عبارت دوم این تابع هدف بیانگر میزان انتشار ناشی از فرایند بازیافت، عبارت سوم این

توسعه شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته در فضای غیرقطعی

محصولات از مراکز تولید به مراکز توزیع و جمع‌آوری و عبارت آخر بیانگر زمان ارسال محصولات از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مشتریان می‌باشد.

محدودیت‌های مدل

$$\begin{aligned} & \sum X_s, X_f, X_{dc}, X_r, X_{di}, X_{rm}, \\ & X_{bm}, X_l, X_{msf}, X_m \geq 1 \quad (1) \\ & \forall s \in S, \forall f \in F, \forall dc \in DC, \\ & \forall r \in R, \forall di \in DI, \forall m \in M, \forall l \in L \end{aligned}$$

میزان مواد اولیه ارسالی از تأمین‌کنندگان باید کوچک‌تر مساوی ظرفیت آنان باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} (Y_{pfd} + Y_{pcd}) X_{dc} \leq Ca_{dc} \quad (2)$$

میزان محصول ورودی به مراکز توزیع باید کوچک‌تر مساوی ظرفیت آنان باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{dc \in DC} Y_{pdr} \cdot X_r \leq Ca_f \quad (3)$$

مجموع محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت باید کوچک‌تر مساوی ظرفیت مراکز بازیافت باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} Y_{prf} \cdot X_r \leq Ca_f \quad (4)$$

مجموع محصولات ارسالی از مراکز بازیافت به مرکز تولید باید کوچک‌تر مساوی ظرفیت مرکز تولید باشد.

$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{r \in R} \sum_{di \in DI} Y_{pddi} \cdot X_{dc} \cdot X_{di} + \quad (5)$$

$$Y_{prdi} \cdot X_{di} \cdot X_r \leq Ca_{di}$$

مجموع محصولات ارسال شده به مراکز انهدام باید کوچک‌تر مساوی ظرفیت مراکز انهدام باشد.

$$\sum_{s \in S} X_s \cdot Y_{sf} \geq d_f \quad (6)$$

میزان مواد اولیه ارسالی از تأمین‌کنندگان به مرکز تولید بزرگ‌تر مساوی تقاضای مرکز تولید است.

$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} Y_{pdc} \cdot X_{dc} \geq \sum_{c \in C} d \quad (7)$$

کلیه تقاضای مشتریان باید آورده شود.

$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} Y_{pcd} = \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} E(\tilde{\alpha}) \cdot Y_{pdc} \quad (8)$$

مجموع محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع‌آوری

تابع هدف بیانگر میزان انتشار ناشی از فرایند انهدام و عبارت چهارم این تابع هدف بیانگر میزان انتشار ناشی از فرایند بازرسی محصولات بازگشتی در مراکز توزیع و جمع‌آوری می‌باشد. عبارت‌های پنجم تا دوازدهم نیز به ترتیب بیانگر میزان انتشار ناشی از فرایند حمل و نقل از تأمین‌کنندگان به مراکز تولید، حمل محصولات از مراکز تولید به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به محل مشتریان، حمل محصول بازگشتی از محل مشتریان به مراکز توزیع و جمع‌آوری، از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز بازیافت، از مراکز بازیافت به مراکز تولید، از مراکز بازیافت به مرکز انهدام و از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز انهدام است.

تابع هدف ۳:

$$MinZ_3 = \sum_{l \in L} R_l \cdot X_l$$

این تابع هدف در جهت حداقل سازی ریسک تولیدی-فنی که مهم‌ترین ریسک در زنجیره تأمین سبز است [۵۰]، می‌باشد. همانطور که در مفروضات مدل در بخش ۳-۳ اشاره شد، جهت مدل‌سازی ریسک تولیدی-فنی دو عامل وقفه ایجاد شده ناشی از خرابی تجهیزات و کمبود نیروی کار ماهر به‌عنوان علل اصلی ایجاد ریسک تولیدی-فنی در نظر گرفته شده‌است. جهت حداقل‌سازی وقفه ناشی از خرابی تجهیزات، تعمیرات و نگهداری از تجهیزات شبکه امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از این رو هزینه‌هایی جهت تعمیرات و نگهداری از تجهیزات در شبکه به منظور جلوگیری از خرابی تجهیزات و یا کاهش زمان از کارافتادگی آنها در نظر گرفته شده‌است که در تابع هدف اول مدل‌سازی شده‌است. همچنین جهت رفع معضل کمبود نیروی کار ماهر، آموزش کارکنان به‌عنوان راه حلی مؤثر در نظر گرفته شده‌است به‌همین سبب هزینه‌هایی جهت آموزش کارکنان به‌منظور جبران این کمبود و افزایش مهارت کارکنان در تابع هدف اول مدل‌سازی شده‌است.

تابع هدف ۴:

$$MinZ_4 = \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} t_{sf} \cdot X_f +$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{dc \in DC} t_{fd} \cdot X_{dc} + \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} t_{dc} \cdot X_c$$

عبارت اول بیان‌کننده زمان ارسال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به مراکز توزیع، عبارت دوم بیانگر زمان ارسال

(۱۵)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{r \in R} Y_{pdr} = \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{di \in DI} \sum_{f \in F} Y_{prf} + Y_{prdi}$$
 مجموع محصولات ورودی به مراکز بازیافت برابر با مجموع محصولات خروجی از مراکز بازیافت می‌باشد.

(۱۶)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} Y_{pdc} = \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{f \in F} Y_{pfd}$$
 مجموع محصولات نوع p ارسال شده از مراکز توزیع به مشتریان برابر با مجموع محصولات نوع p ارسال شده از مرکز تولید به مراکز توزیع است.

(۱۷)
$$\sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} \sum_{di \in DI} \sum_{r \in R} X_{msf} + X_{mfd} + X_{mdc} + X_{mcd} + X_{mdr} + X_{mrf} + X_{mrdi} + X_{mddi} \leq X_{rm} + X_{bm}$$

مجموع تعداد خودروهای در سفر باید کوچک‌تر یا مساوی تعداد کل خودروهای اجاره‌ای و خریداری شده در سازمان باشد.

(۱۸)
$$t_i = t_{sf} + t_{fd} + t_{dc}$$

زمان کل ارسال محصول به دست مشتری برابر با مجموع زمان انتقال محصول از تأمین کننده تا مشتری، زمان انتقال محصول از مرکز تولید به مرکز توزیع و زمان انتقال محصول از مرکز توزیع به دست مشتری است.

(۱۹)
$$t_{sf.min} \leq t_{sf} \leq t_{sf.max}$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مدت زمان ارسال مواد اولیه از تأمین کننده s به مرکز تولید f باید در بازه زمانی تعیین شده توسط مرکز تولید f باشد.

(۲۰)
$$t_{fd.min} \leq t_{fd} \leq t_{fd.max}$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مدت زمان ارسال محصولات نهایی از مراکز تولید f به مرکز توزیع و جمع آوری dc باید در بازه زمانی تعیین شده توسط مرکز توزیع و جمع آوری dc باشد.

(۲۱)
$$t_{dc.min} \leq t_{dc} \leq t_{dc.max}$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مدت زمان ارسال محصولات نهایی از مرکز توزیع و جمع آوری dc به مشتری c باید در بازه زمانی تعیین شده توسط مشتری c باشد.

(۲۲)
$$q_{sddi} + q_{sdr} + q_{srdi} = q_s$$

عبارت فوق تضمین می‌کند که کیفیت تمام محصولات در

α درصد کل محصولات ارسال شده به مشتریان است. این متغیر غیرقطعی بر اساس روش ارزش مورد انتظار به صورت $E(\tilde{\alpha})$ بیان شده است.

(۹)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{f \in F} Y_{pfd} = \sum_{p \in P} N_p$$

مجموع محصول نوع p ارسالی از مرکز تولید به مراکز توزیع برابر با کل میزان تولید محصول نوع p است.

(۱۰)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{di \in DI} Y_{pddi} = \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} E(\tilde{\beta}).Y_{pdc}$$

مجموع محصول ارسالی از مراکز توزیع به مراکز انهدام β درصد کل محصولات بازگشتی ارسال شده از مشتریان به- مراکز توزیع است. این متغیر غیرقطعی بر اساس روش ارزش مورد انتظار به صورت $E(\tilde{\beta})$ بیان شده است.

(۱۱)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{di \in DI} Y_{pdr} = \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{dc \in DC} E(\tilde{\gamma}).Y_{pdc}$$

مجموع محصولات ارسالی از مراکز توزیع به مراکز بازیافت γ درصد کل محصولات بازگشتی ارسال شده از مشتریان به- مراکز توزیع است. این متغیر غیرقطعی بر اساس روش ارزش مورد انتظار به صورت $E(\tilde{\gamma})$ بیان شده است.

(۱۲)
$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} Y_{prdi} = \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{r \in R} E(\tilde{\tau}).Y_{pdr}$$

مجموع کل محصولات ارسالی از مراکز بازیافت به مراکز انهدام τ درصد کل محصولات ارسالی از مراکز توزیع به مراکز بازیافت است. این متغیر غیرقطعی بر اساس روش ارزش مورد انتظار به صورت $E(\tilde{\tau})$ بیان شده است.

(۱۳)
$$\sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} \sum_{f \in F} Y_{pfd} + Y_{pdc} \geq \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \sum_{di \in DI} Y_{pdc} + Y_{pdr} + Y_{pddi}$$

مجموع محصولات ورودی به مراکز توزیع بزرگ‌تر مساوی مجموع محصولات خروجی از مراکز توزیع می‌باشند.

(۱۴)
$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} Y_{prf} = \sum_{p \in P} \sum_{dc \in DC} \sum_{r \in R} E(\tilde{\lambda}).Y_{pdr}$$

مجموع محصول ارسالی از مراکز بازیافت به مرکز تولید λ درصد میزان کل محصولات ارسالی از مراکز توزیع به مراکز بازیافت است. این متغیر غیرقطعی بر اساس روش ارزش مورد انتظار به صورت $E(\tilde{\lambda})$ بیان شده است.

$$\sum X_s, X_f, X_{dc}, X_r, X_{di}, X_{rm}, X_{bm}, X_l, X_{msf}, X_m \geq 1 \quad (26)$$

$$\forall s \in S, \forall f \in F, \forall dc \in DC, \forall r \in R, \forall di \in DI, \forall m \in M, \forall l \in L$$

این محدودیت تضمین می‌کند که حداقل یک تسهیلات در طول انتقال محصول بدست مشتری مورد استفاده قرار گیرد.

$$X_s, X_f, X_{dc}, X_r, X_{di}, X_{msf}, X_{mfd}, X_{mcd}, X_{mcd}, X_{mdr}, X_{mf}, X_{mrdi}, X_{mddi}, X_m, X_{bm}, X_l \in \{0,1\} \quad (27)$$

۵- اعتبارسنجی مدل

به دلیل ماهیت NP-Hard مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین [۳۷] و تعدد متغیرها و محدودیت‌های مسئله که پیچیدگی مسئله و فضای جواب را بسیار زیاد می‌کند، این مسئله نیز از نوع NP-Hard است [۱۴، ۱۸، ۳۶] و همچنین به دلیل ناکارآمدی CPLEX solver برای حل مسایل بزرگ مقیاس [۳۷]، از الگوریتم فراابتکاری چند هدفه ژنتیک (NSGAI) استفاده کرده‌ایم که در زمان معقولی نسبت به روش‌های دقیق جواب بهینه یا نزدیک به بهینه تولید می‌کند [۳۰].

کل زنجیره (بجز مرحله انتقال محصول از مرکز بازیافت به مرکز تولید) برابر با کیفیت اولیه محصول است.

$$\sum_{f \in F} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} X_{LP} = \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} Y_{pfd} \quad (23)$$

مجموع تولید محصول نوع p تجهیزات در هر مرکز تولید برابر با تعداد محصول ارسالی از آن مرکز تولید به مراکز توزیع می‌باشد.

$$\sum_{f \in F} \sum_{p \in P} T_{pfd} \cdot Y_{pfd} \leq \sum_{ka_1 \in K} \sum_{ke_1 \in K} (ka_1 + ke_1) T_{w1} \quad (24)$$

نفر-ساعت مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نوع p در مرکز تولید اول باید توسط نیروی کار موجود و در صورت کمبود با استخدام نیروی کار جدید تأمین گردد.

$$\sum_{f \in F} \sum_{p \in P} T_{pfd} \cdot Y_{pfd} \leq \sum_{ka_2 \in K} \sum_{ke_2 \in K} (ka_2 + ke_2) T_{w2} \quad (25)$$

نفر-ساعت مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نوع p در مرکز تولید دوم باید توسط نیروی کار موجود، و در صورت کمبود با استخدام نیروی کار جدید تأمین گردد.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای اولیه

مقدار	نماد	پارامتر
۴	s	تأمین کنندگان
۲	f	مراکز تولید
۵	Dc	مراکز توزیع- جمع‌آوری
۲	Di	مراکز انهدام
۲	r	مراکز بازیافت
۱۰	C	مشتریان
۵	k	کارکنان
۳	p	مجموعه محصولات
۴	l	مجموعه تجهیزات
۳	m	انواع وسایل نقلیه
۱۰۰۰	N _p	تعداد محصولات تولید شده
۵۰۰۰۰	C _p	هزینه تولید هر واحد محصول
۱۰۰۰۰	f _s	هزینه خرید هر واحد مواد اولیه از تأمین کننده
۱۲۰۰۰۰۰	C _{tr}	هزینه آموزش کارکنان
۲۰۰۰۰	C _{rp}	هزینه بازیافت محصول
۱۳۰۰۰	C _{di}	هزینه انهدام محصول
۳۰۰۰۰	F _{chp}	هزینه بازرسی هر واحد محصول بازگشتی

جدول ۴- میزان تقاضای مشتریان

مشتری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تقاضا	۱۷۶	۳۲۹	۴۲۷	۷۲۹	۱۰۲	۳۵۶	۴۴۹	۲۲۴	۲۳۴	۳۳۲

مشتریان تعیین می‌گردد. از این‌رو در جدول ۴ میزان تقاضای هر ۱۰ مشتری مورد نظر ارائه شده است. بر اساس جدول فوق، مشخص است که مشتری اول دارای تقاضای ۱۷۶ عدد، مشتری دوم دارای تقاضای ۳۲۹ عدد و به همین شکل تا انتها می‌باشد. لازم به توضیح است که بیشترین زمان لازم برای انتقال محصول به هر مشتری که سبب نارضایتی آن نشود، ۱۲۰ ساعت می‌باشد. نکته دیگری که می‌بایست به آن توجه شود این است که از آنجا که تعیین مقادیر اولیه مدل در حل مسئله بصورت کاملاً تصادفی توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود، ممکن است دارای جواب غیر معقول یا Infeasible شود که الگوریتم بلافاصله در راستای غلبه بر آن عمل می‌نماید تا به جواب Feasible برسد. این پروسه در طول ۳۰۰ بار تکرار برای الگوریتم در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی حل مدل برای مثال‌های مختلف در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ می‌پردازیم. نتایج هر چهار تابع هدف برای هر سه بُعد مسئله، در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است.

بدیهی است که پارامترها و نوع تابع توزیع آنها در هر مسئله و با توجه به نوع مسئله می‌تواند متفاوت باشد. در اینجا برای پرهیز از پیچیدگی بیشتر مسئله برای پارامترهای غیرقطعی از توزیع نرمال و روش ارزش مورد انتظار استفاده کرده‌ایم. ادغام توابع در درون روش فرا ابتکاری در مرحله ارزیابی انجام شده است. به منظور نشان دادن ویژگی‌های مدل و اجرایی کردن آن، مدل پیشنهاد شده برای حل یک مثال عددی بکار گرفته شده است. ابتدا بر اساس مقادیر داده شده در جدول ۳ که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، مقادیر بهینه بدست آمده از هر کدام از توابع هدف را تعیین شد. سپس چند مسئله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ را در نظر گرفته و مقادیر هدف برای تمام نمونه‌ها تعیین گردید. حال بر اساس تنظیم تعداد جمعیت ۱۰، احتمال عملگر برابر با ۰/۸ و احتمال عملگر جهش برابر با ۰/۳ نتایج حاصل برای هر چهار تابع هدف را ارائه می‌دهیم. از طرف دیگر، از آنجا که مدل پیشنهادی دارای چند سطح مختلف بر اساس ۱۰ مشتری، ۵ توزیع کننده و ۲ تولید کننده می‌باشد (جدول ۳)، جریان محصولات بر اساس میزان تقاضای

جدول ۵- نتایج توابع هدف برای مسئله در ابعاد کوچک

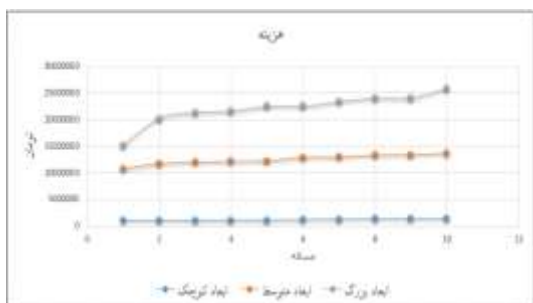
نمونه	تعداد توزیع کننده	تعداد مشتری	هزینه (تومان)	انتشار آلاینده (ppm)	تابع هدف ریسک (%)	زمان (ساعت)
۱	۲	۱	۱۰۳۸۱۱۳۷	۳۵۰	۰۵۸/۰	۷
۲	۲	۲	۱۰۴۱۹۰۲	۳۸۴	۱۱۹/۰	۸
۳	۲	۴	۱۰۴۹۳۸۱	۳۹۹	۱۳۰/۰	۱۰
۴	۳	۴	۱۰۹۸۸۹۹	۴۵۰	۲۹۸/۰	۱۳
۵	۳	۷	۱۱۰۴۴۰۶	۴۵۹	۱۵۱/۰	۱۹
۶	۴	۷	۱۲۰۴۴۴۵	۶۳۲	۲۲۴/۰	۲۵
۷	۴	۸	۱۳۳۹۱۲۶	۸۸۵	۳۲۴/۰	۳۹
۸	۴	۹	۱۴۵۵۳۰۲	۹۳۵	۱۳۳/۰	۴۴
۹	۵	۹	۱۴۵۸۳۸۹	۱۰۰۲	۲۳۷/۰	۶۸
۱۰	۵	۱۰	۱۴۷۷۸۱۵	۱۰۲۷	۲۷۶/۰	۷۵

جدول ۶- نتایج توابع هدف برای مسئله در ابعاد متوسط

نمونه	تعداد توزیع کننده	تعداد مشتری	تابع هدف هزینه (تومان)	انتشار آلاینده (ppm)	تابع هدف ریسک (%)	تابع هدف زمان (ساعت)
۱	۶	۱۲	۱۰۸۶۸۳۳۳	۱۱۷۸	۰.۵۹/۰	۵۰
۲	۶	۱۴	۱۱۸۰۵۲۲۳	۱۲۰۸	۳۴۱/۰	۵۱
۳	۷	۱۴	۱۲۰۹۷۴۵۱	۱۳۲۱	۳۶۷/۰	۵۲
۴	۷	۱۵	۱۲۲۲۱۶۵۳	۱۳۴۲	۲۲۸/۰	۶۲
۵	۸	۱۵	۱۲۳۲۸۳۶۳	۱۵۷۴	۳۰۹/۰	۶۴
۶	۸	۱۶	۱۲۹۵۸۹۱۷	۱۶۲۲	۲۳۰/۰	۶۹
۷	۹	۱۶	۱۳۰۲۷۸۵۳	۱۷۰۰	۳۹۹/۰	۷۳
۸	۱۲	۱۸	۱۳۳۹۵۲۹۳	۱۷۶۵	۲۰۲/۰	۷۷
۹	۱۳	۱۸	۱۳۴۴۹۹۹۰	۱۹۳۲	۲۱۷/۰	۸۰
۱۰	۱۴	۱۸	۱۳۷۷۴۰۱۶	۲۱۲۰	۳۸۹/۰	۸۴

جدول ۷- نتایج توابع هدف برای مسئله در ابعاد بزرگ

نمونه	تعداد توزیع کننده	تعداد مشتری	تابع هدف هزینه (تومان)	انتشار آلاینده (ppm)	تابع هدف ریسک (%)	تابع هدف زمان (ساعت)
۱	۲۰	۳۰	۱۵۲۰۳۹۸۰	۱۳۵۲۶	۱۷۷/۰	۱۱۲
۲	۲۰	۴۵	۲۰۲۶۵۲۷۰	۱۳۶۵۸	۳۴۶/۰	۱۱۴
۳	۲۵	۵۰	۲۱۴۲۳۷۰۱	۱۴۰۰۲	۴۴۳/۰	۱۲۳
۴	۳۰	۵۰	۲۱۶۵۴۵۱۴	۱۴۲۳۰	۳۰۳/۰	۱۲۹
۵	۳۲	۶۰	۲۲۵۵۸۴۸۷	۱۵۲۰۰	۳۹۱/۰	۱۳۵
۶	۳۸	۶۵	۲۲۵۷۹۴۶۰	۱۶۲۱۰	۴۰۸/۰	۱۳۹
۷	۴۱	۶۵	۲۳۴۲۹۳۰۱	۱۶۸۹۰	۴۷۹/۰	۱۴۵
۸	۴۵	۷۰	۲۴۱۱۲۶۰۷	۱۷۵۳۲	۵۸۷/۰	۱۶۰
۹	۵۰	۷۰	۲۴۱۲۸۱۷۲	۱۸۰۵۰	۵۹۹/۰	۱۷۵
۱۰	۶۰	۷۰	۲۵۹۵۳۷۸۸	۱۹۸۵۰	۶۳۱/۰	۱۹۱

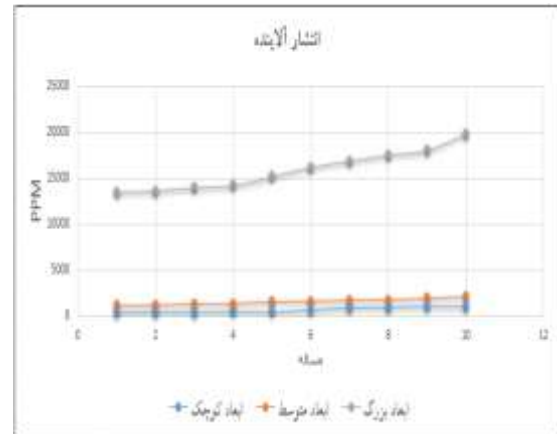


شکل ۴- مقایسه هزینه های بهینه در ابعاد مختلف

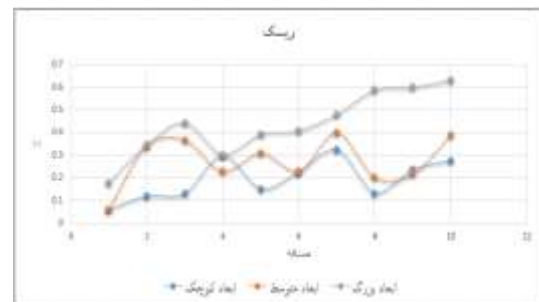
در ادامه به مقایسه نتایج بدست آمده از جداول فوق بصورت همزمان در شکل های زیر می پردازیم. این موضوع برای هر ۴ تابع هدف در شکل های (۴) تا (۷) ارائه شده است.

در هیچ یک از پژوهش‌های بررسی شده در پژوهش حاضر کلیه این هزینه‌ها به صورت یکجا در نظر گرفته نشده است. به علاوه در هیچ یک از چهار مدل بررسی شده هزینه (جریمه) تأخیر در تأمین سفارشات، هزینه آموزش کارکنان و هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات در تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها لحاظ نگردیده است اما در مدل پیشنهادی این پژوهش همه این هزینه‌ها مدل‌سازی گردیده است. همچنین به نظر می‌رسد در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین ریسک تولیدی-فنی ناشی از کمبود نیروی کار ماهر و وقفه ناشی از خرابی تجهیزات و ماشین آلات در نظر گرفته نشده است اما در مدل پیشنهادی این پژوهش، این ریسک مدل‌سازی گردیده است.

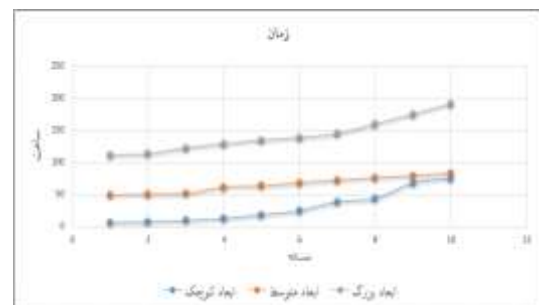
به علت وضع قوانین دولتی و افزایش مخاطرات زیست محیطی امروزه زنجیره تأمین سبز کانون توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. مدیران صنایع نقش اساسی در انتخاب و طراحی شبکه زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. استفاده از زنجیره تأمین سبز علاوه بر منافع زیست محیطی منجر به کسب مزیت رقابتی و جلب نظر مشتریان هر صنعتی می‌گردد. از آنجایی که مدل ارائه شده علاوه بر دارا بودن مزیت سبز بودن، از نوع حلقه بسته نیز می‌باشد. لذا این امر موجب افزایش بازده از طریق بازتولید محصولات می‌گردد. همچنین از آنجایی که در این شبکه مراکز تولید به صورت دومنظوره در نظر گرفته شده است و فرایند بازتولید نیز در این مراکز صورت می‌پذیرد و مراکز انبار، توزیع و جمع‌آوری نیز به صورت یک مرکز چندمنظوره در نظر گرفته شده است لذا هزینه‌های ثابت طراحی شبکه از جمله هزینه احداث تسهیلات کاهش می‌یابد. از دیگر مزایای مدل مذکور برای مدیران حداقل‌سازی میزان وقفه ناشی از خرابی تجهیزات، رفع معضل کمبود نیروی کار ماهر و افزایش سطح نگهداری از تجهیزات می‌باشد که این به معنای حداقل‌سازی ریسک تولیدی-فنی می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده مدیران و صاحبان کلیه صنایع به ویژه صنایع مواد غذایی و محصولات فاسد شدنی می‌توانند با کمک گرفتن از الگوی طرح شده در این پژوهش به کاهش هزینه‌های شبکه، آسیب‌های زیست محیطی، ریسک تولیدی-فنی، زمان ارسال محصولات و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتریان خود شوند. به علاوه این مدل با هدف کاهش ریسک خرابی تجهیزات برای صنایعی با تجهیزات گران قیمت که دارای



شکل ۵- مقایسه انتشار آلاینده بهینه در ابعاد مختلف



شکل ۶- مقایسه ریسک بهینه در ابعاد مختلف



شکل ۷- مقایسه زمان بهینه انتقال محصول به دست مشتری در ابعاد مختلف

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن چهار تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین، حداقل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، حداقل‌سازی ریسک تولیدی-فنی و حداقل‌سازی زمان ارسال محصولات به مشتریان ارائه گردیده است که به نظر می‌رسد تاکنون در هیچ یک از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه و مدل‌های ارائه شده، این توابع هدف به طور همزمان در نظر گرفته نشده‌اند و این مدل نخستین بار در پژوهش حاضر ارائه گردیده است. همچنین در تابع هدف کاهش هزینه این مدل، کلیه هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است که

- هزینه بالای خواب تجهیزات می‌باشند، کاربردی است. همچنین این مدل با حداقل سازی زمان ارسال محصولات و زمان بندی دقیق می‌تواند در صنایعی با محصولات حساس و ضروری که برنامه‌ریزی زمانی جهت پخش محصولات در آن‌ها دارای اهمیت و اولویت بالایی می‌باشد، نظیر صنایع دارویی مفید واقع شود.
- با توجه به نتایج پژوهش و با در نظر گرفتن این نکته که خلاء های زیادی در حوزه طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سبز وجود دارد و جهت ایجاد بهبودهای احتمالی برخی از پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی به شرح زیر ارائه می‌گردد:
- در نظر گرفتن سایر عوامل سبز بودن مانند آلودگی صوتی.
- چنددوره‌ای در نظر گرفتن مدل با توجه به عدم قطعیت مدل.
- استفاده از سایر روش‌های ابتکاری جهت مدل‌سازی و حل مسئله.
- در نظر گرفتن دیگر پارامترهای غیرقطعی نظیر هزینه.
- در نظر گرفتن تصمیمات مکان‌یابی در شبکه.
- در نظر گرفتن مباحث کنترل موجودی در مراکز توزیع شبکه و تعیین نقطه سفارش بهینه.
- استفاده از چند الگوریتم فراابتکاری جهت حل مسئله و ارزیابی و مقایسه آنها جهت تعیین کارآمدترین الگوریتم.
- در نظر گرفتن سایر ریسک‌های تهدید کننده زنجیره تأمین سبز.
- در نظر گرفتن هزینه حمل و نقل متفاوت برای هر نوع کالا.

مراجع

- [1] A. Haddadsisakht, and S. M. Ryan, "Closed-loop supply chain network design with multiple transportation modes under stochastic demand and uncertain carbon tax", *International Journal of Production Economics*, No. 195, 2018, pp. 118-131.
- [2] K. P. Nurjanni, M. S. Carvalho, and L. Costa, "Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model", *International Journal of Production Economics*, No. 183, 2017, pp. 421-432.
- [3] M. K. Chalmardi, and J. F. Camacho-Vallejo, "A bi-level programming model for sustainable supply chain network design that considers incentives for using cleaner technologies", *Journal of cleaner production*, No. 213, 2019, pp. 1035-1050.
- [4] M. L. Tseng, M. S. Islam, N. Karia, F. A. Fauzi, and S. Afrin, "A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. Resources", *Conservation and Recycling*, No. 141, 2019, pp. 145-162.
- [5] N. Zarbakhshnia, H. Soleimani, M. Goh, and S. S. Razavi, "A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design", *Journal of cleaner production*, No. 208, 2019, pp. 1304-1316.
- [6] امیرسالار محمدی، اکبر عالم تبریز و میرسامان پیشوایی، "طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت"، *مدیریت صنعتی*، دوره ۱۰، شماره ۱، ۱۳۹۷، صفحه ۸۴-۶۱.
- [7] حامد فلاح، حمیدرضا اسکندری، سید حسام‌الدین ذگردی و سیدکمال چهارسوقی، "ارائه مدل دوسطحی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت و رقابت بین زنجیره‌ای: حل با رویکرد تجزیه بندرز"، *مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۴۹، ۱۳۹۶، صفحه ۲۰۱-۲۱۵.
- [8] سیما غایب لو و محمد جعفر تارخ، "طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط زیست"، *نشریه مهندسی صنایع*، دوره ۴۹، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحه ۱۰۶-۹۳.
- [9] محمدمهدی صفار، حامد شکوری گنجوی و جعفر رزمی، "طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم NSGA II"، *نشریه مهندسی صنایع*، دوره ۴۹، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحه ۶۸-۵۵.
- [10] مهدی بشیری و مهدیه شیری، "طراحی شبکه زنجیره تأمین با حلقه بسته با در نظر گرفتن مراکز جمع‌آوری چند بخشی تحت عدم قطعیت با دو الگوریتم ابتکاری و فرا ابتکاری"، *پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، دوره ۳، شماره ۵، ۱۳۹۴، صفحه ۲۷-۴۱.

[11] J. Noh, and J. S. Kim, "Cooperative green supply chain management with greenhouse gas emissions and fuzzy demand", *Journal of cleaner production*, No. 208, 2019, pp. 1421-1435.

[۱۲] محمد علی بهشتی نیا و میلاد نوذری، "ارائه مدلی جهت زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل قطعات در صنعت خودرو (مطالعه موردی: شرکت ایران خودرو)", *مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۲، ۱۳۹۷، صفحه ۲۹۹-۳۰۹.

[13] J. Wang, M. K. Lim, M. L. Tseng, and Y. Yang, "Promoting low carbon agenda in the urban logistics network distribution system", *Journal of cleaner production*, No. 211, 2019, pp. 146-160.

[14] H. Soleimani, Y. Chaharlang, and H. Ghaderi, "Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria", *Journal of cleaner production*, No. 172, 2018, pp. 960-970.

[15] J. Gao, Z. Xiao, B. Cao, and Q. Chai, "Green supply chain planning considering consumer's transportation process", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, No. 109, 2018, pp. 311-330.

[16] C. Waltho, S. Elhedhli, and F. Gzara, "Green supply chain network design: A review focused on policy adoption and emission quantification", *International Journal of Production Economics*, No. 208, 2019, pp. 305-318.

[17] A. Mohammed, and Q. Wang, "The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain", *International Journal of Production Economics*, No. 184, 2017, pp. 47-58.

[18] Y. Xiao, and A. Konak, "A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem", *Journal of cleaner production*, No. 167, 2017, pp. 1450-1463.

[19] R. Zhao, Y. Liu, N. Zhang, and T. Huang, "An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach", *Journal of Cleaner Production*, No. 142, 2017, pp. 1085-1097.

[20] S. Coskun, L. Ozgur, O. Polat, and A. Gungor, "A model proposal for green supply chain network design based on consumer segmentation", *Journal of cleaner production*, No. 110, 2016, pp. 149-157.

[21] A. Tiwari, and P.C. Chang, "A block recombination approach to solve green vehicle routing problem", *International Journal of Production Economics*, No. 164, 2015, pp. 379-387.

[۲۲] محمدرضا فضل‌ی خلف، سید کمال چهارسوقی و میر سامان پیشوایی، "طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت: مطالعه موردی یک تولیدکننده باتری اسیدی"، *مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۲، شماره ۳۹، ۱۳۹۳، صفحه ۴۵-۶۰.

[۲۳] داوود خدادادیان، رضا رادفر و عباس طلوعی، "طراحی مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین سبز چند محصولی صنعت خودرو در شرایط عدم اطمینان"، *آینده پژوهی مدیریت*، شماره ۲۹، ۱۳۹۷، صفحه ۸۳-۱۰۰.

[۲۴] طهمورث سهرابی، محسن اعتماد و محمدرضا فتحی، "مدل‌سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک تأمین: مطالعه موردی"، *مدل‌سازی پیشرفته ریاضی*، دوره ۷، شماره ۲، ۱۳۹۶، صفحه ۱۰۳-۱۲۲.

[۲۵] جاوید قهرمانی نهر، علی قدرت نما، حمیدرضا ایزد بخش و رضا توکلی مقدم، "طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چند هدفه چند محصولی و چند دوره ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت"، *پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، دوره ۶، شماره ۱۳، ۱۳۹۵، صفحه ۱۱۹-۱۳۷.

[26] M. Akbari Jokar, M. Abouchenari, and H. Akefi, "Complete Closed-loop Supply Chain Network Design under Uncertainty of Demand and Return Products", *Advances in Industrial Engineering*, Vol 50, No. 3, 2016, pp. 355-369.

[۲۷] مریم کولیایی، عادل آذر، محمدرضا امینی و علی رجب زاده قطری، "طراحی مدل ریاضی یکپارچه برای زنجیره تأمین با حلقه بسته"، *پژوهش‌های مدیریت در ایران*، دوره ۲۰، شماره ۱، ۱۳۹۵، صفحه ۱-۳۲.

[۲۸] مجتبی فرخ، عادل آذر و غلامرضا جندقی، "طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار جدید"، *پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری*، دوره ۱، شماره ۳، ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۱-۱۶۰.

[۲۹] مهدی سلطانی تهرانی، حسینعلی حسن پور و سعید رضائی، "مدل بهینه‌سازی دو هدفه هزینه و کربن دی‌اکسید در زنجیره تأمین حلقه بسته"، *پژوهش‌های مدیریت در ایران*، دوره ۱۹، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحه ۱۶۹-۱۸۹.

[۳۰] محسن نوتاش، مصطفی زندیه و بهروز دری نوکورانی، "طراحی چند هدفه شبکه زنجیره تأمین با رویکرد الگوریتم ژنتیک"، *پژوهش‌های مدیریت در ایران*، دوره ۱۸، شماره ۴، ۱۳۹۳، صفحه ۱۸۳-۲۰۳.

- [۳۱] رضا توکلی مقدم، بهناز جعفرمزده و صابر ملا علیزاده زواردهی، "طراحی شبکه خرید-تولید-توزیع چندهدفه در زنجیره تأمین سبز با الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه"، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۲۶، شماره ۲، ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۹-۱۵۵.
- [۳۲] احمد ماکویی، رضا توکلی مقدم و مرتضی قمی اوپلی، "طراحی شبکه زنجیره تأمین رو به جلو/ بازگشتی با در نظر گرفتن احتمال از کارافتادگی برای مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و بازرسی"، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۲۶، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحه ۶۹-۸۰.
- [۳۳] علیرضا رشیدی کمیجان، محمدرضا لطفی و سید مجتبی تقوی، "ارائه مدل یکپارچه زنجیره تأمین پیشرو-معکوس با توجه به مکان یابی تسهیلات و تعیین سیاست‌های حمل و نقل بطور همزمان"، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۲۶، شماره ۲، ۱۳۹۴، صفحه ۱۵۷-۱۶۹.
- [۳۴] ابوالقاسم یوسفی بابادی و داوود شیشه بری، "بهینه‌سازی استوار طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس در شرایط عدم قطعیت"، نشریه مهندسی صنایع، دوره ۴۹، شماره ۲، ۱۳۹۴، صفحه ۲۹۹-۳۱۳.
- [۳۵] حسین زارعیان جهرمی، محمد صابر فلاح نژاد، احمد صادقیه و احمد احمدی یزدی، "مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۲، شماره ۳، ۱۳۹۳، صفحه ۹۳-۱۱۱.
- [36] L. Zhen, L. Huang, and W. Wang, "Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, No. 227, 2019, pp. 1195-1209.
- [37] M. Yavari, and M. Geraeli, "Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods", *Journal of Cleaner Production*, No. 226, 2019, pp. 282-305.
- [38] R. S. Rad, and N. Nahavandi, "A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount", *Journal of cleaner production*, No. 196, 2018, pp. 1549-1565.
- [39] A. Cherrafi, J. A. Garza-Reyes, V. Kumar, N. Mishra, A. Ghobadian, and S. Elfezazi, "Lean, green practices and process innovation: A model for green supply chain performance", *International Journal of Production Economics*, No. 206, 2018, pp. 79-92.
- [40] M. Bortolini, F. G. Galizia, C. Mora, L. Botti, and M. Rosano, "Bi-objective design of fresh food supply chain networks with reusable and disposable packaging containers", *Journal of cleaner production*, No. 184, 2018, pp. 375-388.
- [41] M. Liu, R. Liu, Z. Zhu, C. Chu, and X. Man, "A Bi-objective green closed loop supply chain design problem with uncertain demand", *Sustainability*, Vol. 10, No. 4, 2018, pp. 967.
- [42] X. Wang, H. K. Chan, R.W. Yee, and I. Diaz-Rainey, "A two-stage fuzzy-AHP model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain", *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, No. 2, 2012, pp. 595-606.
- [43] A. S. Safaei, A. Roozbeh, and M. M. Paydar, "A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain", *Journal of cleaner production*, No. 166, 2017, pp. 1154-1168.
- [44] D. Zhang, F. Zou, S. Li, and L. Zhou, "Green supply chain network design with economies of scale and environmental concerns", *Journal of Advanced Transportation*, No. 14, 2017, pp. 1-14.
- [45] H. Golpîra, E. Najafi, M. Zandieh, and S. Sadi-Nezhad, "Robust bi-level optimization for green opportunistic supply chain network design problem against uncertainty and environmental risk", *Computers & Industrial Engineering*, No. 107, 2017, pp. 301-312.
- [46] M. Zohal, and H. Soleimani, "Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry", *Journal of Cleaner Production*, No. 133, 2016, pp. 314-337.
- [47] K. Garg, D. Kannan, A. Diabat, and P.C. Jha, "A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design", *Journal of Cleaner Production*, No. 100, 2015, pp. 297-314.
- [48] S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem, and Y. Rekik, "Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach", *International Journal of Production Economics*, No. 157, 2014, pp. 80-88.

[۴۹] مهدی نصراللهی، "مدل تعیین قیمت وارانتهی PRW با تولید کنندگان ریسک گریز"، مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۵، شماره ۴۵، ۱۳۹۶، صفحه ۷۵-۹۶.

[۵۰] حمید شاهبندرزاده و محمدحسین کبگانی، "تحلیل کمی ریسک‌های موجود در مدیریت زنجیره تأمین سبز با استفاده از مدل‌سازی ریاضی"، پژوهشنامه بازرگانی، دوره ۸۲، شماره ۲۱، ۱۳۹۶، صفحه ۱-۳۲.