مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال پانزدهم، شماره سوم (پیاپی ۵۸)، پاییز ۹۷، ص ص ۴۴-۲۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

ارایه و حل یک مدل بهینه‌سازی سبز در زنجیره تأمین حلقه بسته باهدف افزایش سود و کاهش مشکلات زیست‌محیطی با در نظر گرفتن دوره ضمانت-شده محصول

حمزه امین‌طهماسبی[1*]، مائده راهب[2]، سحر جعفریه[2]

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، موسسه آموزش عالی راهبرد شمال، رشت، ایران

رسید مقاله: ۱۷ تیر ۱۳۹۵

پذیرش مقاله: ۱۰ اسفند ۱۳۹۵

چکیده

امروزه با گسترش فضای رقابتی توجه به مدیریت زنجیره تأمین به یک موضوع اساسی در سازمان‌های تجاری تبدیل شده است، به‌گونه‌ای که تمامی فعالیت‌های سازمان‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. از طرف دیگر با افزایش حجم آلاینده‌ها و توجه روزافزون به مسایل زیست‌محیطی، تولیدکنندگان را مجبور به گسترش زنجیره تأمین خود به حالت زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC) می‌نماید. در این مقاله سعی شده است تا در کنار کسب مزیت رقابتی حاصل از مدیریت زنجیره تأمین در یک کارخانه تولیدی یخچال‌فریزر، مسایل زیست‌محیطی موجود در CLSC نیز در نظر گرفته شود. به این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح ارایه شده است. این مدل، جریان بهینه بخش‌ها و محصولات در CLSC و همچنین تعداد کامیون‌های به‌کار گرفته شده را برای جابه‌جایی تجهیزات در زنجیره تأمین روبه‌جلو بهینه می‌کند. به‌کارگیری مدل توسعه‌یافته می‌تواند تا ضمن کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و ایجاد یک تصور سبز از زنجیره تأمین، با کاهش هزینه-های حمل‌ونقل، افزایش سود شرکت را تضمین نماید.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین حلقه بسته، بهینه‌سازی دوهدفه، زنجیره تأمین سبز، سیستم بازیابی.

۱ مقدمه

در این پژوهش یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح برای یک کارخانه یخچال‌فریزرسازی در تهران پیشنهاد می‌شود [۱] که از دو تابع هدف با در نظر گرفتن اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی برای دستیابی به یک زنجیره تأمین پایدار تشکیل شده است. برای تحقق بخشیدن به این موضوع، اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی با دو تابع هدف سود و تعداد وسایل نقلیه در زنجیره تأمین روبه‌جلو موردبررسی و مدل‌سازی قرارگرفته‌است.

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: amintahmasbi@guilan.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

به‌طورکلی فرایند تولید این کارخانه را می‌توان به چهار بخش تولیدی محفظه بیرونی و در محفظه درونی، سیستم خنک‌کننده و مونتاژ نهایی تقسیم کرد. زنجیره تأمین روبه‌جلو از تأمین‌کنندگانی که در تهران واقع‌اند آغاز به کار می‌کند. پس‌ازآن به مراکز توزیع (تهران، اصفهان، تبریز، اهواز، شیراز و مشهد) فرستاده می‌شود تا نیاز مشتریان را در بازارهای نهایی (تهران، ساری، رشت، کرمانشاه، اصفهان، تبریز، اهواز، شیراز، مشهد، کرمان، قزوین، زنجان، سنندج، خرم‌آباد، ارومیه، بجنورد، بیرجند، بوشهر، بندرعباس، زاهدان) تأمین نماید. لازم به ذکر است که این کارخانه انواع وسایل خانگی (به‌عنوان‌مثال اجاق‌گاز، لباسشویی ماشین، کولر، بخاری و غیره) را تولید می‌کند؛ ولی در تولید یخچال‌فریزر شهرت بالایی دارد. این کارخانه به سه ویژگی زیر معروف است: هزینه عملیاتی پایین، کیفیت بالا و توجه به عوامل زیست‌محیطی. در این میان، عوامل زیست‌محیطی با توجه به قوانین و مقررات زیست‌محیطی ازجمله ماده ۱۴ به ممنوعیت هرگونه فعالیت کارخانه در صورت عدم رعایت قوانین زیست‌محیطی[۲] اشاره دارد و همچنین مشکلات موجود در میزان حمل‌ونقل کارخانه، بر طبق نظر تصمیم‌گیرنده اهمیت بیش‌تری دارد. عوامل زیست‌محیطی در تعیین مواد خام برای کارخانه، در زنجیره تأمین رو به عقب و در مرکز بازیافت موردتوجه قرارگرفته است. دفع یخچال‌فریزرها خطراتی برای تولیدکنندگان و مشتریان به همراه دارد؛ بنابراین شیوه دفع باید بسیار اصولی و مؤثر باشد. درنتیجه کارخانه در پی راه‌حلی برای به حداقل رساندن دفع محصولات خود است و برای این منظور در تلاش است که تا حد امکان محصولات را به مرکز دوباره‌کاری برگردانده و تعمیر نماید. به‌علاوه در پی یافتن راهی برای کاهش حمل‌ونقل در زنجیره تأمین خود است تا با این روش میزان آلودگی را تا حد امکان کاهش دهد. درنهایت برای حل مدل، از نرم‌افزار GAMS استفاده می‌شود. ازآنجاکه تحقیقات پیشین بر روی حداقل کردن تعداد وسایل نقلیه در زنجیره تأمین روبه‌جلو تمرکز نداشته‌است، نقطه قوت این مقاله مبتنی بر تابع هدف دوم می‌باشد.

در ادامه مقاله بخش دوم به ادبیات نظری و پیشینه پژوهش پرداخته است. در بخش سوم، مساله موردنظر توصیف خواهد شد. بخش چهارم، به ارایه مدل می‌پردازد. بخش پنجم به حل مساله و بالاخره بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادهای آتی اختصاص دارد.

۲ ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین، شبکه‌ای است مشتمل بر تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان که در آن مواد خام از تأمین‌کنندگان دریافت، تبدیل، تولید و درنهایت به مشتری نهایی تحویل داده می‌شود[۳]. مهم‌ترین موضوع در طراحی استراتژیک زنجیره تأمین یا همان طراحی شبکه، مکان‌یابی تسهیلات و سپس تخصیص جریان بین تسهیلات انتخاب شده است. هدف از طراحی زنجیره تأمین علاوه بر مکان‌یابی تسهیلات، حداقل کردن هزینه‌هایی مانند خرید، تولید، حمل‌ونقل و ... نیز می‌باشد[۴]. طراحی یک شبکه زنجیره تأمین را می‌توان به دو بخش؛ یعنی زنجیره تأمین مستقیم و زنجیره تأمین معکوس تقسیم کرد. به‌طورکلی در یک زنجیره تأمین مستقیم، به‌عنوان یک زنجیره تأمین معمولی، پس از خرید از تأمین‌کنندگان، مواد خام به محصولات تمام‌شده در کارخانه‌های تولیدی تبدیل شده و سپس این محصولات از طریق مراکز توزیع به مشتریان برای

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

برآورده کردن خواسته‌های آن‌ها انتقال داده می‌شود[۵]. زنجیره تأمین معکوس فرایند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل مؤثر جریان مواد اولیه، موجودی در جریان و محصولات نهایی و اطلاعات مرتبط با آن، از سوی مصرف‌کنندگان تا منشأ اصلی آن است که باهدف کسب مجدد ارزش اقلام یا انهدام مناسب آن‌ها انجام می‌شود. در زنجیره تأمین معکوس، سازنده تجهیزات اصلی (OEM[1]) مسئول جمع‌آوری محصولات از مشتریان است که آن محصولات را به اجزای سازنده‌اش تبدیل کند که بتواند به شیوه دوباره‌کاری، استفاده مجدد، بازیافت و یا دفع، انهدام نماید[۶]. اگر شبکه معکوس با شبکه مستقیم یکپارچه شود به‌عنوان شبکه حلقه بسته شناخته می‌شود. در زنجیره تأمین حلقه بسته[2](CLCS)، زنجیره تأمین روبه‌جلو برای پاسخ به تقاضای مشتریان کاربرد دارد؛ ولی زنجیره تأمین معکوس از سمت مشتریان برای کاهش بار زباله بر زمین، فعال است[۷]. مدیریت زنجیره تأمین روبه‌جلو و یا رو به عقب ممکن است منجر به دستیابی طرحی خوب و نه بهینه گردد؛ اما در CLCS به بهترین حالت تخصیص هزینه‌ها دست می‌یابیم. همچنین یک شرکت به‌واسطه زنجیره تأمین توسعه‌یافته، یک تصور سبز در مورد محصول خود ایجاد می‌کند که درنهایت موجب افزایش تقاضا می‌گردد[۸].

در اجرای موفقیت‌آمیز یک شبکه CLCS که سازگار با محیط‌زیست است به نکات زیر باید توجه کرد [۹]: الف) بهبود یا بازیافت قطعات استفاده شده در محصولات چندبخشی ب) اتخاذ سیستم‌های توزیع و جمع‌آوری کارآمد و سازگار با محیط‌زیست. از طرفی ۳۵٪ از گازهای گلخانه‌ای ناشی از شبکه توزیع در زنجیره تأمین هستند [۱۰]؛ بنابراین، برای توجه به شبکه‌های حمل‌ونقل در زنجیره تأمین نیاز جدی داریم. برای تثبیت سیاست‌های حفاظت از محیط زیستی، نیاز به طراحی شبکه CLCS مناسب و حداقل رساندن حمل‌ونقل‌های مربوط به فعالیت‌های این شبکه ضروری است؛ بنابراین در طراحی یک CLCS پایدار، تصمیم‌گیرنده باید مطمئن باشد که در مسیر روبه‌جلو از دسته‌های بزرگ برای حمل بار استفاده کند. ازاین‌رو، توصیه می‌کنند که میزان بار حمل شده در هر دفعه کامل باشد؛ زیرا هم شامل تخفیفات می‌شود و هم وسایل نقلیه موردنیاز حداقل می‌گردد و به‌عنوان یک حامی برای محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود.

در طی سه دهه گذشته محققین به‌طور فزاینده به موضوع زنجیره تأمین حلقه‌بسته علاقه‌مند شدند. روند افزایش بحران‌های زیست‌محیطی منجر به جلب‌توجه هرچه بیش‌تر محققین گشته است. در این بخش به مروری جامع بر ادبیات مدل‌های طراحی زنجیره تأمین در دسته‌های مختلف، شامل طراحی زنجیره تأمین معکوس، حلقه - بسته و سبز پرداخته شده است.

۲-۱ طراحی زنجیره تأمین معکوس

در چند سال گذشته با توجه به کاهش استفاده از منابع اولیه، جلوگیری از آلودگی، مدیریت زباله، مصوبه دولت، نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسئولیت اجتماعی و فشار مشتری، توجه رو به رشدی به زنجیره تأمین معکوس شده است. جایارامن و همکاران [۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در مساله طراحی

[1] Original equipment manufacturer
[2] closed loop supply chain

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

شبکه زنجیره تأمین معکوس، تحت یک سیستم سفارش کششی بر اساس تقاضای مشتریان برای محصولات بازاریابی شده، ارایه کرده‌اند. هدف از مدل ارایه‌شده، حداقل رساندن هزینه‌های کل است. در این مدل فرآیند تولید مجدد محصولات مرجوعی مورد استفاده قرارگرفته است.

دو و اوانس [۱۲] در مقاله خود شبکه زنجیره تأمین معکوس را برای ارایه خدمات پس از فروش ارایه دادند. آن‌ها در مدل خود برای بازگشتی‌هایی که به خدمات تعمیراتی نیاز داشتند، از فراهم آورندگان زنجیره تأمینی استفاده کردند. اهداف مدل ارایه‌شده توسط آن‌ها کمینه نمودن هزینه‌های کل زنجیره تأمین و حداقل سازی تأخیر در چرخه می‌باشد. آن‌ها برای حل مدل پیشنهادی خود از سه روش جستجوی پراکنده، سیمپلکس دوگان و روش محدودیت بهره بردند. موتا و پوخارل [۱۳] به طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس برای محصولات بازگشتی که ابتدا در انبارها دسته‌بندی شده و سپس برای دمونتاژ به مراکز دوباره‌کاری فرستاده می‌شوند، پرداختند. قطعات دمونتاژ شده برای استفاده مجدد به کارخانه تولیدی بازگردانده شده و یا به‌عنوان قطعات یدکی به فروشگاه‌ها فرستاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد زمانی که تقاضای محصولات افزایش می‌یابد، به ساخت محصول مختلط از ماژول‌های جدید و قدیم نیاز وجود دارد. در پایان نیز اشاره شده که هزینه‌های زنجیره تأمین ممکن است عامل مهمی در طراحی یک شبکه نباشد، درحالی‌که هزینه تولید مجدد و هزینه‌های ماژول جدید می‌تواند عاملی اثرگذار برای انتخاب یک شبکه زنجیره تأمین معکوس باشد. کین و جی [۱۴] به طراحی سیستم زنجیره تأمین معکوس برای بازیافت محصول پرداختند. آن‌ها برای در نظر گرفتن عدم قطعیت از ابزار برنامه‌ریزی فازی استفاده کردند. در این مقاله سه نوع مدل بهینه‌سازی بر اساس معیارهای مختلف پیشنهاد شده است. همچنین آن‌ها برای حل مدل پیشنهادی خود از الگوریتم هوشمند ترکیبی که الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی فازی را ادغام می‌کند، استفاده کردند. لی و جن[۱۵]، یک مدل ریاضی سیستم تولید دوباره را به‌صورت مدل شبکه زنجیره تأمین معکوس چندمرحله‌ای، چندمحصولی برای کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل زنجیره تأمین معکوس و هزینه ثابت احداث مراکز دمونتاژ و مراکز پردازش، فرموله می‌کنند. برای حل این مساله، یک الگوریتم ژنتیک به همراه روش کدگذاری مبتنی بر اولویت پیشنهاد می‌شود. کارا و همکاران [۱۶] برای جمع‌آوری محصولات به‌صورت کارا در انتهای دوره عمرشان، یک مدل شبیه‌سازی شبکه زنجیره تأمین معکوس را طرح می‌کنند. در این مقاله برای ساخت مدل شبیه‌سازی از یک نرم‌افزار شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

۲-۲ طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته

در لجستیک معکوس، جریان مواد از سوی مشتریان به‌طرف تولیدکنندگان می‌باشد. اگر در مدلی جهت جریان مواد، هم روبه‌جلو و هم به‌صورت معکوس باشد، حلقه بسته نامیده می‌شود. در ادامه برخی از مقالات مرتبط به این زمینه ارایه می‌گردد. اوستر و همکاران [۱۷] یک شبکه حلقه بسته را طراحی کردند که در آن، فقط مراکز بازگشت و احیا در زنجیره تأمین معکوس مکان‌یابی می‌شوند؛ اما جریان مستقیم و معکوس هم‌زمان بهینه می-گردد. در این مقاله، یک روش حل دقیق بر مبنای روش تجزیه بندرز ارایه شده است. وانک و همکاران[۱۸] یک مدل غیرخطی برای مساله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ارایه نموده‌اند. در این مدل از رویکرد درخت

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

فراگیر جهت مدل‌سازی مساله استفاده شده است. در این مدل مکان‌های بالقوه تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مراکز دفع با توجه به حداقل کردن تابع هدف هزینه مشخص گردیده است.

با توجه به پیچیدگی ابعاد مساله از رویکرد الگوریتم ژنتیک جهت حل سریع‌تر مساله به‌عنوان یک روش فراابتکاری استفاده شده است. السید و همکاران [۱۹] مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین مستقیم و معکوس را برای چند دوره و چند رده ارایه داده‌اند، درحالی‌که هدف آن‌ها به حداکثر رساندن سود از زنجیره تأمین است، مدل آن‌ها طراحی زنجیره تأمین مستقیم/معکوس یکپارچه دوهدفه بوده که در ناحیه SCDN انجام شده است. یانگ[۲۰] شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تأمین‌کنندگان مواد خام، تولیدکنندگان، خرده‌فروشان، مصرف-کنندگان و مراکز بازیافت را طراحی کردند. آن‌ها با استفاده از نظریه تغییر نامعادلات حالت پایدار، شبکه زنجیره تأمین خود را فرموله و بهینه‌سازی کردند. تعدادی مثال و نمودار جهت نشان دادن اثر پارامترهایی مانند نسبت بازگشت، نرخ تبدیل مواد خام و نرخ تبدیل محصولات قابل بازیافت روی حالت پایدار به‌کاررفته است. زرندی و همکاران[۲۱] مساله‌ای شامل چهار هدف فازی حداقل‌سازی هزینه‌های ارسال و حمل‌ونقل، حداقل‌سازی هزینه‌های احداث کارخانه‌ها و انبار، حداکثرسازی سطح خدمت و سرانجام حداکثرسازی سطح خدمت معکوس در جریان‌های بازگشتی را مدل نمودند که به‌صورت غیرمستقیم معیارهای محیط زیستی را لحاظ کردند. پیشوایی و ترابی [۲۲] یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی دوهدفه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته معرفی کردند. در مدل مذکور جریان معکوس در کنار جریان مستقیم و همچنین تصمیمات استراتژیک همراه تصمیمات تاکتیکی در نظر گرفته شدند. در آن مطالعه یک روش حل فازی تعاملی نیز با ترکیب کردن چند روش برای حل مدل بهینه‌سازی احتمالی پیشنهاد شده است. پیشوایی و همکاران[۲۳] مدل بهینه‌سازی استوار را برای درنظرگرفتن عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد دادند. در این مقاله، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط قطعی برای طراحی شبکه لجستیک حلقه‌بسته توسعه داده شده، سپس معادل استوار مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهادی با استفاده از گسترش تئوری بهینه‌سازی استوار ارایه می‌شود. شبکه لجستیک حلقه‌بسته در این مقاله، یک شبکه چند سطحی شامل مشتریان در بازار اولیه و ثانویه، مراکز جمع‌آوری، بازیافت، توزیع و انهدام با ظرفیت محدود می‌باشد. در مقدار محصولات بازگشتی، تقاضا برای محصولات بازیافتی و هزینه‌های حمل‌ونقل عدم قطعیت وجود دارد. در پایان، برای ارزیابی روش بهینه‌سازی استوار جدید، جواب به‌دست‌آمده با جواب حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط قطعی در مثال‌های واقعی مختلف مقایسه می‌شود.

صانعی و همکاران [۲۴] بر روی عدم قطعیت در تقاضا در زنجیره تأمین حلقه بسته تمرکز نمودند و از استراتژی ریسک اشتراکی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در این زنجیره‌ها استفاده کردند. مدل ارایه‌شده آنان در زنجیره روبه‌جلو شامل تأمین‌کنندگان، منابع توزیع و مصرف‌کنندگان و در زنجیره معکوس شامل مراکز جمع-آوری، بازیافت و احیا و مشتریان مواد می‌باشد. در آخر مدل پیشنهادی خود را با نرم‌افزار GAMS حل نمودند. بشیری و همکاران [۲۵] در مطالعات خود به بررسی هم‌زمان دو مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین و انتخاب تأمین‌کننده برتر پرداختند. آنان با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی، ملاکی تحت عنوان امتیاز مؤلفه

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

اصلی بیان کردند که به‌نوعی تمام معیارهای موردنظر برای انتخاب اجزای زنجیره تأمین را در برمی‌گیرد. همچنین مساله دوهدفه فازی را مدل کردند و سپس مساله را به حالت قطعی تبدیل کرده و با استفاده از روش ال‌پی‌متریک، جواب مرجح را تعیین نمودند. در پایان مساله را با یک مثال فرضی ارزیابی کردند.

۲-۳ طراحی زنجیره تأمین سبز

در مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارایه‌شده توسط پاکسوی و همکاران [۱۰]، به حداقل رساندن هزینه و میزان انتشار دی‌اکسید کربن در زنجیره تأمین روبه‌جلو و همچنین حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تنها در زنجیره تأمین معکوس مورد ارزیابی قرار گرفته است. کانان و همکاران [۲۶] در مدل پیشنهادی خود میزان انتشار کربن را به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش شبکه زنجیره تأمین معکوس مربوط به صنعت پلاستیک به‌صورت یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده است. امین و ژانگ [۹] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را که شامل مراکز تولید، مراکز جمع‌آوری و بازار تقاضا به‌صورت چندمحصولی است تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند. برای این هدف، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده است که هزینه‌های کل را حداقل می‌نماید. علاوه بر این یک تابع زیست‌محیطی با در نظر گرفتن عوامل محیطی به‌صورت وزنی به مساله اضافه شده است. پیشوایی و رزمی [۲۷] از برنامه‌ریزی ریاضی فازی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز استفاده کردند. مدل پیشنهادی علاوه بر کاهش هزینه، توانایی حداقل نمودن اثرات زیست‌محیطی را دارد. آن‌ها از روش محدودیت جزیی و یک روش حل تعاملی برای یافتن نقاط مرجح مدل قطعی شده، استفاده کردند و کارایی مدل پیشنهادی و روش حل خود را در یک مثال واقعی ارزیابی نمودند. وینکلر[۲۸] به اثرات نامطلوب کارخانجات بر محیط‌زیست چون ضایعات، مصرف انرژی، عملیات حمل‌ونقل و بسته‌بندی اشاره کرده و بیان می‌کند که اگر سیستم‌های زنجیره تأمین به‌صورت حلقه بسته باشد می‌توان تا حدودی این اثرات را جبران کرد. در این مقاله به طرح کلی مفهوم شبکه‌های زنجیره تأمین پایدار SSCN[1] به‌عنوان ابزاری مناسب جهت طراحی سیستم‌های تولید حلقه بسته پرداخته شده است. پیاده‌سازی SSCN باعث می‌شود عملیات شرکت‌های مختلف زنجیره به هم متصل شده و زنجیره بسته شود. این امر سبب ماندن مواد در زنجیره شده و پایداری آن را موجب می‌شود و درنهایت منجر به بهبود در عملکرد اقتصادی و محیطی می‌شود.

پیشوایی و همکاران [۲۹] به طراحی یک زنجیره تأمین سبز سه سطحی پرداختند و هم‌زمان هزینه کل و اثرات محیط زیستی را حداقل کردند. مدل آن پژوهش تک دوره‌ای و تک‌محصولی بوده و شامل تولیدکنندگان، مراکز توزیع و مشتریان می‌باشد. پس از قطعی کردن مدل با استفاده از محدودیت شانس بر پایه اندازه اعتبار، جواب بهینه مساله با به‌کارگیری یک روش تعاملی به دست می‌آید. در این پژوهش تصمیمات تاکتیکی انتخاب سیستم حمل‌ونقل نیز در نظر گرفته می‌شود. تارخ و همکاران [۳۰] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه پیشرو/معکوس چندلایه، چندمحصولی، تک دوره‌ای به همراه ظرفیت‌های محدودشده و با شرایط نبود قطعیت ارایه دادند،که با هدف کمینه‌سازی هزینه کل شبکه، به‌طور هم‌زمان گزینه-

[1] Sustainable supply chain networks

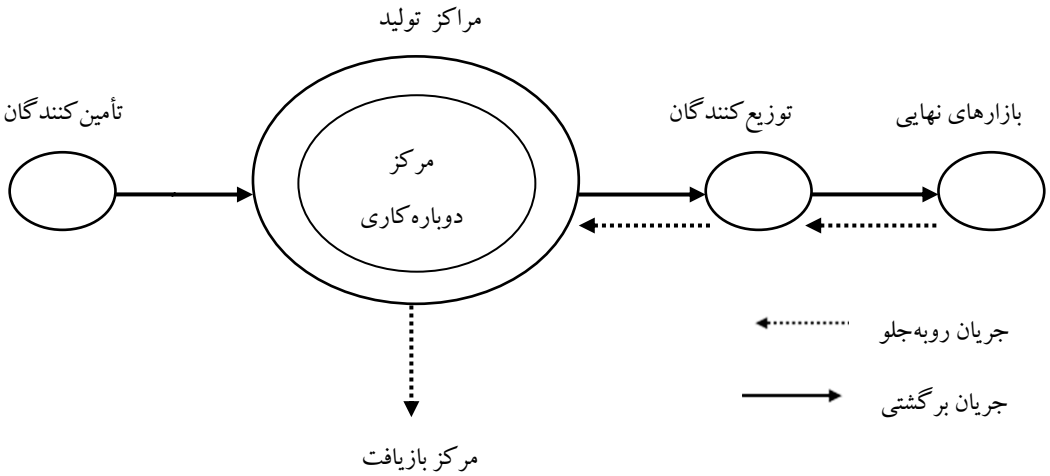
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

های بازیابی، تعمیر، تولید دوباره و گزینه دفع ضایعات را در نظر گرفته است. الفت و همکاران [۳۱] به شناسایی مقتضیات لازم جهت دستیابی به مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت خودروسازی ایران پرداخته‌اند. سپس اقدامات لازم جهت دستیابی به مدیریت زنجیره تأمین سبز را استخراج کرده و این اقدامات برای نهایی شدن از طریق پرسشنامه به نظرسنجی خبرگان گذارده شده و درنهایت اقدامات اجرایی را به کمک روش TOPSIS فازی اولویت‌بندی نمودند. سلطانی تهرانی و همکاران [۳۲] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با دو هدف حداقل نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز و دی‌اکسید کربن منتشر شده در جریان حمل‌ونقل را در حالت چند محصولی و چند ارایه کردند.

۳ تعریف مدل

بر اساس شکل ۱، شبکه زنجیره تأمین کارخانه موردنظر در یک دوره زمانی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز تولید، توزیع‌کنندگان، بازارهای نهایی، مرکز دوباره‌کاری و درنهایت انتقال به مرکز بازیافت است. تأمین‌کنندگان مواد خام را در اختیار بخش‌های تولیدی قرار می‌دهند.



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین حلقه بسته

پس از اتمام مراحل تولید و مونتاژ قطعات، محصول نهایی برای توزیع‌کنندگان فرستاده می‌شود تا آن‌ها کالاها را در بازارهای نهایی توزیع کرده و به دست مشتریان برسانند. مشکل ازآنجا آغاز می‌گردد که تعدادی از محصولات در دوره ضمانت شده خود، غیرقابل استفاده می‌شوند و نیاز به تعمیرات دارند. این محصولات از بازارهای نهایی جمع‌آوری‌شده و به مرکز توزیع فرستاده می‌شوند. پس‌ازآن کامیون‌هایی برای انتقال آن‌ها به کارخانه فرستاده می‌شود. این محصولات در بخش دوباره‌کاری که زیرمجموعه بخش تولید است، بررسی می‌شود. تعدادی از آن‌ها نیاز به تعمیر دارند؛ بنابراین در بخش دوباره‌کاری تعمیر می‌گردند؛ ولی تعدادی از قطعات این محصولات قابلیت استفاده مجدد و یا تعمیر ندارند. این قطعات به مراکز بازیافت فرستاده می‌شود تا به‌طور دقیق مورد بررسی قرار بگیرند و تا حد امکان بازیافت گردند و باقی قطعات به شیوه اصولی و مطابق با معیارهای

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

زیست‌محیطی دفع گردند. در زنجیره تأمین روبه‌جلو کارخانه وظیفه حمل مواد خام و محصولات را به عهده یک شرکت حمل‌ونقل قرار داده است و این شرکت هر بار با توجه به وزن بار، کامیون متناسب با آن را در اختیار کارخانه قرار می‌دهد. با انتخاب متناسب کامیون‌ها با وزن بار، استهلاک ماشین‌آلات کاهش‌یافته و از آلودگی محیط‌زیست کاسته می‌شود.

این مقاله دو هدف را دنبال می‌نماید. هدف اول افزایش سود کارخانه و دومین هدف کاهش تعداد حمل‌ونقل در زنجیره تأمین روبه‌جلو است. در تابع هدف اول، برخلاف سایر مقالات، کاهش انواع هزینه در کنار افزایش انواع درآمدها ازجمله درآمد ناشی از زنجیره تأمین روبه عقب این شبکه معکوس در نظر گرفته شده است. درواقع تابع هدف اول به دنبال افزایش سود بوده که از کسر هزینه‌ها از درآمدها به دست می‌آید؛ که این درآمد ناشی از فروش محصولات تولیدشده در کارخانه، فروش قطعات قابل بازیافت به مرکز بازیافت و درآمد ناشی از دوباره‌کاری قطعاتی که در دوره ضمانت شده خود هستند نسبت به تعویض قطعات، می‌باشد. فرضیات مدل به شرح زیر است:

- ✓ تقاضا برای محصول نهایی تحت شرایط اطمینان کامل است.
- ✓ تسهیلات تولیدی مناسب‌است.
- ✓ جریان مواد و محصولات و قطعات تنها می‌تواند مابین دو مرحله متوالی از مدل حرکت کند.
- ✓ تمامی هزینه‌های مدل تحت شرایط اطمینان کامل برآورده شده است و تمامی بخش‌های زنجیره تأمین حلقه بسته باید تحت ظرفیت مشخص کار کند.
- ✓ به‌جز بخش دوباره‌کاری سایر بخش‌های مدل چندلایه‌ای است.
- ✓ هزینه راه‌اندازی بخش تولید با هزینه عملیات باهم محاسبه می‌گردد.
- ✓ هزینه‌های مربوط به بازرسی پارامتر مستقل ندارد و با هزینه دوباره‌کاری در نظر گرفته می‌شود.

نمادگذاری‌های ذیل برای فرموله نمودن مدل استفاده شده است:

- **اندیس‌ها**

I مجموعه تأمین‌کنندگان

J مجموعه مراکز تولیدی

l مجموعه بازارهای نهایی

K مجموعه مراکز توزیع

p مرکز دفع

q مرکز تعمیر

R مجموعه مواد اولیه

M مجموعه اجزا

VI مجموعه وسایل نقلیه تأمین‌کنندگان

VJ مجموعه وسایل نقلیه تولیدکنندگان

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

VK مجموعه وسایل نقلیه توزیع‌کنندگان

- **پارامترهای مستقل**

pur_i^r هزینه خرید r امین مواد اولیه از i امین تأمین‌کننده

$prod_{mj}$ هزینه تولید m امین جزء در j امین بخش تولیدی

Ass_j هزینه مونتاژ محصول در بخش j ام

op_k هزینه عملیاتی هر واحد در k امین بخش توزیع

Rep_m هزینه تعمیر m امین بخش

H^{vi} هزینه استخدام وسیله نقلیه vi برای تأمین‌کنندگان

H^{vj} هزینه استخدام وسیله نقلیه vj برای بخش‌های تولیدی

H^{vk} هزینه استخدام وسیله نقلیه vk برای توزیع‌کنندگان

D_l تقاضای مشتری در بازار نهایی l ام

$\propto$ نرخ بازگشت محصولات

W وزن هر واحد محصول به اتمام رسیده

B_m نرخ استفاده از جزء m ام در محصول

R_m نرخ تعمیر جزء m ام

$U^r{}_m$ نرخ استفاده از r امین ماده اولیه در هر واحد از m ام جزء محصول

W_r وزن هر واحد از r امین ماده خام

SP_l قیمت فروش هر واحد محصول در بازار l ام

P_R قیمت فروش R امین جزء به مرکز بازیافت

$Rcap_{ir}$ ظرفیت (تعداد) i امین تأمین‌کننده برای تأمین r امین ماده اولیه

$Pcap_j$ ظرفیت (تعداد) تولیدی j امین بخش تولیدی

cap_{vi} ظرفیت (kg) v امین وسیله نقلیه تأمین‌کنندگان

Max_{vi} بیش‌ترین تعداد از v امین نوع وسیله نقلیه در دسترس تأمین‌کنندگان

$Ncap_{vj}$ ظرفیت (تعداد) vj امین وسیله نقلیه در بخش تولیدی

$Wcap_{vj}$ ظرفیت (kg) vj امین وسیله نقلیه در بخش تولیدی

Max_{vj} بیش‌ترین تعداد از vj امین نوع وسیله نقلیه در دسترس بخش‌های تولیدی

$Ncap_{vk}$ ظرفیت (تعداد) vk امین وسیله نقلیه در دسترس توزیع‌کنندگان

$WBcap_{vk}$ ظرفیت (kg) vk امین وسیله نقلیه در دسترس توزیع‌کنندگان

Max_{vk} بیش‌ترین تعداد از v امین نوع وسیله نقلیه در دسترس توزیع‌کنندگان

A_{lk} $\begin{cases}1\\0\end{cases}$ اگر مرکز توزیع k محصولات برگشتی را از بازار نهایی l دریافت کند، یک و در غیراین صورت صفر

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

B_{lk} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر بازار l از مرکز توزیع k کالا دریافت کند، یک و در غیراین‌صورت صفر

TC_{kl} هزینه حمل محصول از بازار نهایی l به مرکز توزیع k

TC_{jk} هزینه حمل محصول از مرکز توزیع k به بخش تولیدی j

REW_m درآمد ناشی از دوباره‌کاری m امین قطعه به‌جای تعویض

- **متغیرهای تصمیم**

X^{vi}_{ijr} تعداد مواد اولیه r حمل شده از تأمین‌کننده i به مرکز تولید j با کامیون vi

X^{vj}_{jk} تعداد محصول حمل شده از مرکز تولیدی j به مرکز توزیع k با کامیون vj

X^{vk}_{kl} تعداد محصول حمل شده از مرکز توزیع k به بازار نهایی l با کامیون vk

X_{lk} تعداد محصولات بازگشتی از بازار نهایی l به مرکز توزیع k

X_k تعداد محصولات بازگشتی از مرکز توزیع k به مرکز بررسی

X_r تعداد r امین جزیی که از مرکز بررسی به مرکز دفع فرستاده شد

X_{rew} تعداد محصولات بازگشتی در مرکز بررسی

XPQ_m تعداد m امین جزء فرستاده‌شده از مرکز بازرسی به بخش دوباره‌کاری

N_{vi} تعداد کامیون نوع vi که توسط تأمین‌کننده I ام استخدام می‌شود

N_{vj} تعداد کامیون نوع vj که توسط I بخش تولیدی j ام استخدام می‌شود

N_{vk} تعداد کامیون نوع vk که توسط توزیع‌کننده k ام استخدام می‌شود

L^{vi}_{ij} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر امکان حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده مواد خام و بخش تولیدی j به‌وسیله vi وجود داشته باشد، یک و در غیراین‌صورت صفر

L^{vj}_{jk} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر امکان حمل‌ونقل بین بخش تولیدی j و توزیع‌کننده k به‌وسیله vj وجود داشته باشد، یک و در غیراین‌صورت صفر

L^{vk} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر امکان حمل‌ونقل بین توزیع‌کننده k و بازار l به‌وسیله vk وجود داشته باشد، یک و در غیراین‌صورت صفر

Y_{lt} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر بازار l از کامیون t خدمات بگیرد، یک و در غیراین‌صورت صفر

Y_{kt} $\left\{ \begin{matrix} ۱ \\ ۰ \end{matrix} \right.$ اگر مرکز توزیع k از کامیون t خدمات بگیرد، یک و در غیراین‌صورت صفر

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

Y_{lt} $\left\{\begin{matrix}1\\0\end{matrix}\right.$ اگر بازار l از کامیون t خدمات بگیرد، یک و در غیراین‌صورت صفر

- **توابع هدف**

تابع هدف (۱) مربوط به حداکثر کردن سود کارخانه است. همان‌گونه که می‌دانیم سود حاصل اختلاف هزینه‌ها از درآمدهاست. درآمدها، شامل درآمد کل از فروش محصول نهایی به مشتریان (عبارت اول تابع هدف اول)، صرفه‌جویی ناشی از دوباره‌کاری قطعات به‌جای تعویض کامل آن‌ها (عبارت دوم تابع هدف اول) و درآمد حاصل از فروش قطعات قابل بازیافت به مراکز بازیافت (عبارت سوم تابع هدف اول) می‌باشد. همچنین هزینه‌ها، شامل هزینه تأمین قطعات از تأمین‌کننده (عبارت چهارم تابع هدف اول)، هزینه تولید قطعات (عبارت پنجم تابع هدف اول)، هزینه مونتاژ محصولات در بخش تولید (عبارت ششم تابع هدف اول)، هزینه دوباره‌کاری قطعات (عبارت هفتم تابع هدف اول)، هزینه وسیله نقلیه از تأمین‌کنندگان تا بخش تولید (عبارت هشتم تابع هدف اول)، هزینه وسیله نقلیه از بخش‌های تولیدی به مراکز توزیع (عبارت نهم تابع هدف اول)، هزینه وسایل نقلیه از مراکز توزیع به بازارهای نهایی (عبارت دهم تابع هدف اول)، هزینه حمل محصولات از بازارهای نهایی به مراکز توزیع در زنجیره برگشتی (عبارت یازدهم تابع هدف اول) و هزینه حمل از مراکز توزیع به مراکز تولید در زنجیره برگشتی (عبارت دوازدهم تابع هدف اول)، می‌باشد.

$$Max \quad f_1 = \sum_{l}\sum_{k}\sum_{vk} SP_l.X_{KL}^{VK} + \sum_{m} REW_m.XPQ_m + \sum_{r} P_r.X_r$$
$$-(\sum_{vi}\sum_{r}\sum_{j}\sum_{i} Pur_i^r.X_{ijr}^{vi} + \sum_{m}\sum_{j}\sum_{vj} prod_{mj}.X_{jk}^{vj}.B_m + \sum_{j}\sum_{vj} ASS_j.X_{jk}^{vj} + \sum_{m} Rep_m.XPQ_m$$
$$+\sum_{vi} H^{vi}.N_{vi}.L_{ij}^{vi} + \sum_{vj} H^{vj}.N_{vj}.L_{jk}^{vj} + \sum_{vk} H^{vk}.N_{vk}.L_{kl}^{vk} + \sum_{k}\sum_{l} TC_{kl}.X_{lk} + \sum_{j}\sum_{k} TC_{jk}.X_k)$$

تابع هدف (۲) مربوط به حداقل کردن تعداد کامیون‌های مورداستفاده در زنجیره تأمین روبه‌جلو است که تعداد کامیون‌های به‌کار گرفته‌شده از تأمین‌کنندگان تا مراکز تولید، تعداد کامیون‌های مورداستفاده از مراکز تولید به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به بازارهای نهایی را شامل می‌شود. این هدف در راستای حفاظت از محیط‌زیست است و به‌طور غیرمستقیم میزان کربن در هوا را حداقل می‌کند. تصمیم‌گیرنده با توجه به حجم انتقالی کالاها در مسیر روبه‌جلو و بازگشتی، تنها در رابطه با حمل محصولاتی که به بازار نهایی عرضه می‌دارد، از این سیستم کمک گرفته است. ازآنجاکه حجم برگشتی کالا نسبت به رفت بسیار کم‌تر است، ازلحاظ اقتصادی استخدام کامیون جدید برای انجام حمل برگشتی، به‌صرفه نیست. هزینه حمل قطعات برگشتی نیز در عبارات یازدهم و دوازدهم تابع هدف اول منظور شده است.

$$Min \quad f_2 = \sum_{vi} N_{vi} + \sum_{vj} N_{vj} + \sum_{vk} N_{vk}$$

- **محدودیت‌ها**

محدودیت (۱) میزان مواد اولیه‌ای را که باید وارد چرخه تولید گردد تعیین می‌کند. محدودیت (۲) بیان می‌کند که میزان مواد اولیه‌ای که وارد کارخانه می‌شود نمی‌تواند بیش‌تر از ظرفیت تأمین‌کنندگان باشد. رابطه (۳) بر این

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

موضوع تأکید دارد که میزان محصولات ورودی و خروجی از مراکز توزیع باهم برابر است. رابطه (۴) بیان می-کند که هر بخش تولیدی به میزان ظرفیتش می‌تواند تولید نماید. محدودیت (۵) بیان می‌کند که کمبودی در برآورده کردن تقاضا نداریم.

$$\sum_{vi}\sum_{i} X_{ijr}^{vi} = \sum_{vj}\sum_{m}\sum_{k} U_{m}^{r}.B_{m}.X_{jk}^{vj} \qquad \forall r,i \qquad (۱)$$

$$\sum_{vi}\sum_{i} X_{ijr}^{vi} \le Rcap_{ir} \qquad \forall r,i \qquad (۲)$$

$$\sum_{vj}\sum_{j} X_{jk}^{vj} = \sum_{vk}\sum_{l} X_{kl}^{vk} \qquad \forall k \qquad (۳)$$

$$\sum_{vj}\sum_{k} X_{jk}^{vj} \le Pcap_{j} \qquad \forall j \qquad (۴)$$

$$\sum_{vk}\sum_{k} X_{kl}^{vk} \ge D_{l} \qquad \forall l \qquad (۵)$$

$$\sum_{k} X_{lk} = \propto .D_{l} \qquad \forall l \qquad (۶)$$

$$X_{K} = \sum_{L} X_{lk} \qquad \forall k \qquad (۷)$$

$$X_{rew} = \sum_{k} X_{k} \qquad \forall k \qquad (۸)$$

$$XPQ_{M} = R_{m}.B_{m}.X_{rew} \qquad \forall m \qquad (۹)$$

$$X_{r} = \sum_{m}\left(1-R_{m}\right).X_{rew}.U_{m}^{r} \qquad \forall r \qquad (۱۰)$$

محدودیت (۶) رابطه بین محصولات تولیدی و محصولات بازگشتی را نمایش می‌دهد. رابطه (۷) مجموع محصولات برگشت‌خورده را در هر مرکز جمع‌آوری و رابطه (۸) مجموع محصولات برگشت‌خورده را در هر بخش بررسی نشان می‌دهد. محدودیت (۹) تعداد قطعاتی را که برای تعمیر به بخش دوباره‌کاری فرستاده می‌شوند نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) تعداد مواد اولیه را که برای دفع فرستاده می‌شوند نمایش می‌دهد.

$$\sum_{vk} X_{kl}^{vk} \le M.B_{kl} \qquad \forall k,l \qquad (۱۱)$$

$$X_{lk} \le M.A_{lk} \qquad \forall l,k \qquad (۱۲)$$

محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مراکز توزیع تنها به بازارهای مختص به خود خدمات ارایه می‌دهند و محدودیت (۱۲) تأکید می‌کند که بازارها نیز محصولات برگشتی خود را تنها به مراکز توزیع مختص به خود تحویل می-دهند.

$$\sum_{r}\sum_{j}\sum_{i} X_{ijr}^{vi}.W_{r} \le N_{vi}.Cap_{vi} \qquad \forall vi \qquad (۱۳)$$

$$N_{vi} \le Max_{vi} \qquad \forall vi \qquad (۱۴)$$

محدودیت (۱۳) حداکثر ظرفیت هر کامیون را که توسط هر تأمین‌کننده استفاده می‌شود مشخص می‌کند. رابطه (۱۴) بر این نکته تأکید دارد که تأمین‌کننده با توجه به میزان کامیون‌های در دسترس می‌تواند برای حمل بار استفاده نماید.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

$$\sum_k \sum_j X_{jk}^{vj} \le Ncap_{vj} . N_{vj} \qquad \forall vj \qquad (۱۵)$$

$$\sum_k \sum_j X_{jk}^{vj} \le Wcap_{vj} . N_{vj} \qquad \forall vj \qquad (۱۶)$$

$$N_{vj} \le Max_{vj} \qquad \forall vj \qquad (۱۷)$$

محدودیت (۱۵) و (۱۶) به ترتیب حداکثر ظرفیت، از لحاظ تعداد و وزن (kg)، هر کامیون را که توسط بخش-های تولیدی استفاده می‌شود نشان می‌دهد. رابطه (۱۷) حداکثر تعداد در دسترس از هر نوع کامیون را در بخش-های تولیدی بیان می‌کند.

$$\sum_l \sum_k X_{kl}^{vk} \le Ncap_{vk} . N_{vk} \qquad \forall vk \qquad (۱۸)$$

$$\sum_l \sum_k X_{kl}^{vk} \le Wcap_{vk} . N_{vk} \qquad \forall vk \qquad (۱۹)$$

$$N_{vk} \le Max_{vk} \qquad \forall vk \qquad (۲۰)$$

محدودیت (۱۸) و (۱۹) به ترتیب حداکثر ظرفیت، ازلحاظ تعداد و وزن (kg)، هر کامیون را که توسط مراکز توزیع استفاده می‌شود نشان می‌دهد. رابطه (۲۰) حداکثر تعداد در دسترس از هر نوع کامیون را در مراکز توزیع بیان می‌کند.

$$WR_l = \sum_k X_{lk} . w \qquad \forall l \qquad (۲۱)$$

$$\sum_l WR_l Y_{lt} \le M . W_t \qquad \forall t \qquad (۲۲)$$

محدودیت (۲۱) وزن محصولات برگشت‌خورده را در مراکز توزیع k، نشان می‌دهد. رابطه (۲۲) حداکثر وزنی که می‌تواند توسط هر کامیون از بازار نهایی تا مراکز توزیع حمل گردد، نمایش می‌دهد.

$$WR_k = X_k . W \qquad \forall k \qquad (۲۳)$$

$$\sum_k WR_k . Y_{kt} \le M . W_t \qquad \forall t \qquad (۲۴)$$

محدودیت (۲۳) وزن محصولات برگشت‌خورده را در بازار نهایی l نشان می‌دهد و رابطه (۲۴) حداکثر وزنی که می‌تواند توسط هر کامیون از مراکز توزیع تا بررسی حمل گردد، نمایش می‌دهد.

$$L_{ij}^{vi} \le \sum_r X_{ijr}^{vi} \qquad \forall i, j, vi \qquad (۲۵)$$

$$L_{jk}^{vj} \le X_{jk}^{vj} \qquad \forall j, k, vj \qquad (۲۶)$$

$$L_{kl}^{vk} \le X_k^{vk} \qquad \forall k, l, vk \qquad (۲۷)$$

محدودیت‌های (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) بر این نکته تأکید دارد که در زنجیره تأمین روبه‌جلو ارتباطات تنها از طریق وسایل نقلیه مشخص‌شده امکان‌پذیراست.

$$\sum_r X_{ijr}^{vi} \le M . L_{ij}^{vi} \qquad \forall i, j, vi \qquad (۲۸)$$

$$X_{jk}^{vj} \le M . L_{jk}^{vj} \qquad \forall j, k, v \qquad (۲۹)$$

$$X_{kl}^{vk} \le M . L_{kl}^{vk} \qquad \forall j, k, vj \qquad (۳۰)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

محدودیت‌های (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) اطمینان حاصل می‌کند که در زنجیره تأمین روبه‌جلو هیچ ارتباطی در مسیرهای برنامه‌ریزی نشده وجود نداشته است.

$$B_{kl}, A_{lk}, Y_{lt}, Y_{kt}, L_{ij}^{vi}, L_{jk}^{vj}, L_{kl}^{vk} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, k, vi, vj, vk, l, t, k \qquad (۳۱)$$

$$X_{ijr}^{vi}, X_{jk}^{vj}, X_{kl}^{vk}, X_{lk}, X_{k}, XPQ_{m}, X_{rew}, X_{r}, N_{vi}, N_{vj}, N_{vk} \geq 0 \; and \; integer$$

$$\forall i, j, k, vi, vj, vk, m, r, l \qquad (۳۲)$$

٤ حل مساله

مدل ارایه‌شده یک مدل چندهدفه با ماهیت متفاوت دو تابع هدف می‌باشد. برای حل این مدل در نرم‌افزار GAMS نیاز به بی‌مقیاس‌سازی و ترکیب توابع هدف به‌صورت یک تابع هدف است. در این حالت می‌توان از روش‌هایی همچون وزن‌دهی[1]، روش قیود محدود[2]، روش میل به مقصود[3] و روش تقاطع مرزی متعامد[4] استفاده نمود. در این مساله با توجه به قابل‌فهم بودن روش وزن‌دهی برای مدیران کارخانه و شرایط پیاده‌سازی ساده آن، روش ترکیب توابع هدف انتخاب گردید. در روش وزن‌دهی، توابع هدف در قالب یک تابع هدف کلی ترکیب می‌شوند. مساله زیر را در نظر بگیرید:

$$Max \;\; f_1(x), f_2(x), \ldots, f_p(x)$$

$$s.t. \; x \in S$$

که در آن x متغیر تصمیم و $f_1(x)$ ، $f_2(x)$ ،...، $f_p(x)$ توابع هدف و S فضای جواب است. در روش وزن‌دهی ابتدا توابع هدف را بی‌مقیاس کرده و سپس به هریک از اهداف یک وزن اختصاص داده می‌شود. فرم کلی روش وزن‌دهی برای حل مساله بالا به‌صورت زیر است:

$$Max \sum_{i=1}^{p} W_i \frac{f_i(x)}{f_i^*}$$

$$s.t. \; x \in S$$

$$0 \leq W_i \leq 1, \sum_{i=1}^{p} W_i = 1$$

که در آن w_i وزن هریک از توابع هدف در تابع هدف کلی و f_i^* مقدار بهینه هریک از توابع هدف است. در این روش درجه اهمیت هریک از اهداف در جواب نهایی با استفاده از وزن آن تابع هدف تعیین می‌شود. بدین ترتیب می‌توان درجه اهمیت هر تابع هدف را نسبت به سایرین با تغییر اوزان کنترل کرد و به جواب مؤثر[5] متفاوتی دست یافت.

بنابراین مدل ذکرشده را در این مقاله، با استفاده از روش وزن‌دهی به مدل تک‌هدفه تبدیل می‌نماییم. با نظر گروهی از خبرگان و تصمیم‌گیران و با توجه به سیاست‌هایی که کارخانه مدنظر دارد، به تابع هدف اول ضریب

[1] Weighting Approach
[2] ε - Constraint
[3] Goal Attainment
[4] Normal Boundary Intersection
[5] Efficient solutions

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

۰/۷ و به تابع هدف دوم ضریب ۰/۳ اختصاص داده می‌شود. گروه خبرگان شامل شخص مدیرعامل، سه نفر از اعضای هیأت‌مدیره، مدیر بازاریابی و فروش، مدیر بخش برنامه‌ریزی جمعاً به تعداد ۶ نفر به‌صورت هدفمند و با شرایط ویژه‌ای انتخاب شدند. همگی افراد مذکور، علاوه بر داشتن بیش از ۵ سال سابقه مدیریت مداوم، دارای حداقل سطح تحصیلات کارشناسی و جزو تصمیم‌گیرندگان و تعیین‌کننده اهداف استراتژیک صنعت می‌باشند.
داده‌های مذکور وارد نرم‌افزار شده و مدل حل گردید. اعداد جدول ۱، مقادیر تابع هدف اول ناشی از حل مدل با داده‌های یکسان را در یک بازه زمانی مشخص نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز تعداد وسایل حمل‌ونقل متناسب باهدف دوم مدل، نمایش داده شده است.

جدول ۱. تغییرات در مقادیر تابع هدف اول ناشی از حل مدل

شاخص	اجزای توابع هدف اول (به میلیون ریال)	مقدار تغییر
۱	درآمد کل از فروش محصول نهایی به مشتریان	۰
۲	صرفه‌جویی ناشی از دوباره‌کاری قطعات به‌جای تعویض کامل آن‌ها	۴۰۰
۳	درآمد حاصل از فروش قطعات قابل بازیافت به مراکز بازیافت	۵۰/۱
۴	هزینه تأمین قطعات از تأمین‌کننده	-۱۰۰/۲
۵	هزینه تولید قطعات	-۸۲/۷
۶	هزینه مونتاژ محصولات در بخش تولید	-۲۷/۶
۷	هزینه دوباره‌کاری قطعات	-۵۳/۸
۸	هزینه وسیله نقلیه از تأمین‌کنندگان تا بخش تولید	-۴۳۸/۸
۹	هزینه وسیله نقلیه از بخش‌های تولیدی به مراکز توزیع	-۶۵۵/۴
۱۰	هزینه وسایل نقلیه از مراکز توزیع به بازارهای نهایی	-۸۴۴/۲
۱۱	هزینه حمل محصولات از بازارهای نهایی به مراکز توزیع در زنجیره برگشتی	-۳۰/۳
۱۲	هزینه حمل از مراکز توزیع به مراکز تولید در زنجیره برگشتی	-۱۶/۹
	جمع کل صرفه‌جویی (سود)	۲۷۰۰

جدول ۲. مقادیر تابع هدف دوم حاصل از حل مدل

شاخص	اجزای توابع هدف دوم	تعداد
۱	تعداد کامیون‌های به‌کار گرفته‌شده از تأمین‌کنندگان تا مراکز تولید	۱۰
۲	تعداد کامیون‌های مورداستفاده از مراکز تولید به مراکز توزیع	۷
۳	تعداد کامیون‌های مورداستفاده از مراکز توزیع به بازارهای نهایی	۲

همان‌طور که از نتایج جدول ۱ مشخص است، شاخص اول هیچ‌گونه تغییری نداشته؛ زیرا تعداد فروش در دو دوره ثابت در نظر گرفته‌شده است؛ اما بقیه شاخص‌ها به دلیل تغییر در استراتژی دوباره‌کاری و سیستم حمل‌ونقل شرکت تغییراتی داشته است. سود کل حاصل از به‌کارگیری این سیاست کاری نسبت به گذشته برابر با ۲۷۰ میلیون تومان به دست آمد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

همچنین بر اساس نتایج جدول ۲، تعداد ۱۹ عدد وسیله نقلیه باید به ناوگان حمل‌ونقل شرکت برای استفاده در زنجیره تأمین روبه‌جلو اضافه شود. در کل کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی حاصله، نشان از توانایی و کارایی مدل توسعه داده‌شده دارد.

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله سعی شد تا با توجه به قوانین زیست‌محیطی و سیاست‌های مدیریت زباله، بهترین حالت سوددهی کارخانه به وجود آید. هدف اصلی تحقیق، کاهش مشکلات زیست‌محیطی مانند کاهش استفاده از وسایل حمل‌ونقل در زنجیره تأمین و درنتیجه ورود کربن به هوا و آلودگی هوا بود. پیش از این مقالاتی با این رویکرد ارایه گردیده؛ ولی در هیچ‌یک از آن‌ها درآمد ناشی از به کار بردن زنجیره تأمین معکوس در نظر گرفته نشده و تنها به هزینه‌های ناشی از اجرای آن اشاره شده بود. همچنین در هیچ‌یک از تحقیقات پیشین در مورد دوره ضمانت شده محصول و ارتباطش با زنجیره تأمین سبز بررسی انجام نگرفته و برنامه‌ریزی برای این دوره لحاظ نگردیده بود. این مدل، ضمن توجه به معیارهای زیست‌محیطی، زنجیره تأمین مستقیم و معکوس را در نظر گرفته، در پی کسب سود اقتصادی می‌باشد. برای آزمودن کارایی مدل توسعه‌یافته، اطلاعات یک کارخانه تولید یخچال‌فریزر، به‌عنوان یک نمونه واقعی به‌صورت مطالعه موردی و کاربردی به‌کار گرفته‌شده و برای حل مدل، از نرم‌افزار GAMS استفاده گردید. همان‌گونه که از نتایج حل مشخص است، به‌کارگیری مدل و استفاده از روش مدل‌سازی در مسایل واقعی تقریباً روی تمامی اهداف هزینه‌ای سازمان تأثیر گذاشته و توانسته صرفه‌جویی بالایی را در یک دوره زمانی کوتاه ایجاد کند. درواقع شرکت با حذف یک واسطه اصلی که کار حمل‌ونقل زنجیره تأمین روبه‌جلوی شرکت را نیز بر عهده داشته است، بسیاری از هزینه‌های این بخش را حذف می‌نماید و به سبب حجم بالای حمل‌ونقل، استخدام وسایل حمل‌ونقل به نفع شرکت می‌باشد؛ اما در زنجیره روبه عقب به دلیل حجم کوچک‌تر و تعداد دفعات کم‌تر، استخدام و به‌کارگیری وسایل حمل‌ونقل استخدام‌شده به‌صرفه نبوده و این بخش از کار را با استفاده از توان شرکت‌های حمل‌ونقل و توسط برون‌سپاری انجام می‌دهد. از دیگر بخش‌های درآمد ایجادشده، فعال‌سازی بخش دوباره‌کاری قطعات به‌جای تعویض آن‌ها در کالاهای بازگشتی است. این بخش نیز توانسته درآمد مناسبی را نسبت به گذشته نشان دهد. همچنین صرفه‌جویی کوچک‌تری در بخش زنجیره تأمین بازگشتی به سبب تغییر سیاست ایجادشده، مشاهده می‌شود. درواقع کالاهای بازگشتی به‌جای بازگشت مستقیم از بازار نهایی به کارخانه، توسط ماشین‌های کوچک‌تر و مناسب به مراکز توزیع ارسال‌شده و پس از تجمیع در آن‌ها، از مرکز توزیع با وسیله‌ای بزرگ‌تر به محل کارخانه انتقال می‌یابند. این موضوع سبب می‌شود تا به‌جای طی مسافت‌های طولانی با ماشین‌های کوچک‌تر، با انجام حمل‌ونقل دولایه‌ای در زنجیره تأمین روبه عقب، مسافت‌های طولانی در دفعات کم‌تر و با ماشین بزرگ‌تر انجام شود. در کل، حل مساله با این مدل، نشان از توانایی مدل در حل مسایل دارد که توانسته است با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی ضمن ایجاد تصوری سبز از شرکت، موجب افزایش سودآوری شرکت نیز باشد.

تحقیقات دیگری را می‌توان در موضوع زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی انجام داد. تحقیقاتی که با توجه به بحران زیست‌محیطی، حیاتی و ارزشمندند. پیشنهاد می‌شود که مدل ارایه‌شده را

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

در صنایعی خانگی مانند یخچال و یخزن، ... استفاده نمود و عدم قطعیت در موردتقاضا و میزان کالاهای برگشتی را در آن اعمال کرد. همچنین می‌توان مرحله بازیافت محصولات را به‌عنوان بخشی از مراحل تولید در نظر گرفت و تولید را به‌صورت چند دوره‌ای بررسی نمود. در پایان پیشنهاد می‌گردد که کیفیت و قیمت تمام‌شده محصولات حاصل از بازیافت را بررسی نموده و با توجه به آن صرفه‌جویی ناشی از این مدل را موردتوجه قرار داد.

منابع

[۲] دبیری، فرهاد، کیانی، مژده، بررسی قوانین و مقررات پیشگیرانه ازجمله ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در کشور ایران و چند کشور صنعتی، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره نهم، شماره چهارم، زمستان ۸۶.

[۲۴] صانعی، مریم، توکلی مقدم، رضا، مدل ریاضی دوهدفه برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با ریسک اشتراکی و تقاضاهای غیرقطعی، مدیریت زنجیره تأمین، سال شانزدهم، شماره ۴۳، بهار ۱۳۹۳.

[۲۵] بشیری، مهدی، شرافتی، مهتاب، طراحی دوهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای همبسته در محیط فازی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولیدی، سال اول، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲، از صفحه ۲۵-۳۶.

[۳۰] تارخ، محمدجعفر، اسمعیلی گوکه، مهسا، ترابی، شهره، مدل کلی بهینه‌سازی طراحی شبکه لجستیک معکوس تحت عدم قطعیت، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۶، شماره ۲، مهرماه ۱۳۹۱، از صفحه ۱۵۹ تا ۱۷۳.

[۳۱] الفت، لعیا، خاتمی فیروزآبادی، علی، خداوردی، روح‌الله، مقتضیات تحقق مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت خودروسازی ایران، فصلنامه علوم مدیریت ایران، سال ششم، شماره ۲۱، بهار ۱۳۹۰، از صفحه ۱۲۳-۱۴۰.

[۳۲] سلطانی تهرانی، مهدی، حسن‌پور، حسینعلی، رمضانی، سعید، مدل بهینه‌سازی دوهدفه هزینه و کربن دی‌اکسید در زنجیره تأمین حلقه‌بسته، پژوهش‌های مدیریت در ایران، دوره ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴.

[1] Asl-Najafi, J., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri, A., Taheri-Moghaddam, A. (2015). A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk. Computers & Industrial Engineering, 90, 414–428.

[3] Hyung, J. A., Sung, J. P. (2003). Modeling of a multi-agent system for coordination of supply chains with complexity and uncertainty. Intelligent Agents and Multi-Agent Systems, 2891, 13–24.

[4] Daskin, M. S. (1995). Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. New York: Wiley.

[5] Baumgarten, H. Christian, B. Annerous, F. Thomas, S.D. (2003). Supply chain management and reverse logistics-integration of reverse logistics processes into supply chain management approaches, in: Proceedings of the Electronics and the Environment on IEEE International Symposium, IEEE Computer Society, Washington, 79–83.

[6] Rogers, D., Lembke, T. (1999). Going Backwards: Reverse Logistic Trends and Practices. Center for Logistics Manage, Univ. Nevada, Reno, NV.

[7] Kumar, D.T., Soleimani, H., Kannan, G. (2014). Forecasting return products in an integrated forward/reverse supply chain utilizing an ANFIS. Applied Mathematics and Computer Science, 24 (3), 669-682.

[8] Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., Jha, P.C. (2015). A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. Journal of Cleaner Production.

[9] Amin, S.H., Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. Applied Mathematical Modeling, 37, 4165-4176.

[10] Paksoy, T., Ozceylan, E., Weberb, G.W. (2010). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. Global Journal of Technological Optimal, 2 (1).

[11] Jayaraman, V., Guide, Jr. V., Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. Journal of the operational research society, 50, 497-508.

[12] Du, F. Evans, G. W. (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. Computers & Operations Research, 35, 2617-2634.

[13] Mutha, A., Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. Computers & Industrial Engineering, 56, 334-346.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]

[14] Qin, Z., Ji, X. (2010). Logistics network design for product recovery in fuzzy environment. European journal of Operational Research, 202, 479-490.
[15] Lee, J.E., Gen, M., Rhee K.G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. Computers and Industrial Engineering, 56, 951-964.
[16] Kara, S., Rugrungruang, F., Kaebernick H. (2007). Simulation modelling of reverse logistics networks. International Journal of Production Economics, 106, 61–69.
[17] Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E., Çetinkaya, S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multiproduct closed loop supply chain network design model. Naval Research Logistics, 54, 890-907.
[18] Wang, F., Lai, X., Shi, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. Decision Support Systems, 51(26), 2-9.
[19] El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward– reverse logistics network design under risk. Computers & Industrial Engineering, 58, 423–431.
[20] Yang, G. f. (2009). The optimization of closed-loop supply chain network. Transportation research, 45, 16-28.
[21] Fazel-Zarandi, M. H., Haddad-Sisakht, A., Davari, S. (2011). Design of a closed-loop supply chain (CLCS) model using an interactive fuzzy goal programming. The international journal of advanced manufacturing of technology, 56, 809-821.
[22] Pishvaee, M., Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. Fuzzy sets and systems, 161(20), 2668-2683.
[23] Pishvaee, M. S., Rabbani, M., Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. Applied Mathematical Modelling, 35, 637-649.
[26] Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. Resources, conservation and recycling, 67(7), 5-9.
[27] Pishvaee, M. S., Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi objective fuzzy mathematical programming. Applied Mathematical Modelling, 36(8), 3433-3446.
[28] Winkler, H. (2011). Closed loop production systems. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4(3), 243–246.
[29] Pishvaee, M. S., Torabi, S. A., Razmi, J. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. Computers & Industrial Engineering, 62(2), 624-632.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2018.15.3.4.0]