

طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط زیست

سیما غایب‌لو^۱ و محمدجعفر تاریخ^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۹۳/۲/۲۸ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۳/۸/۵ - تاریخ تصویب ۹۳/۱۰/۲۸)

چکیده

هدف از طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته ترکیب کردن ملاحظات محیطی با طراحی شبکه زنجیره تأمین سنتی از طریق در نظر گرفتن بازیافت، دمونتاژ، و فعالیت‌های استفاده مجدد است. در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته استفاده از مواد اولیه دوستدار محیط زیست و افزایش استفاده دوباره از محصولات به کمک طراحی یک شبکه بازیافت، دمونتاژ، و نوسازی محصولات مناسب می‌تواند سبب افزایش ملاحظات محیطی در طراحی شبکه شود. در این فرایند طراحی باید معاوضه‌ای بین توابع هدف حداکثرسازی منافع و سبز بودن در نظر گرفته شود. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ۰ و ۱ دوهدفه برای یک شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس، شامل سه سطح در جریان مستقیم (به نام‌های تأمین‌کنندگان، مراکز مونتاژ، مناطق مشتری) و دو سطح در جریان معکوس (به نام‌های مراکز دمونتاژ و دفع)، توسعه داده و حل شد. مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو برای نشان دادن معاوضه بین توابع هدف سود و سبز بودن شبکه فراهم شد. همچنین، چندین بینش مدیریتی مفید از مثال‌های عددی متنوع توسعه داده شد.

کلیدواژه‌گان: انتخاب تأمین‌کنندگان سبز، برنامه‌ریزی دوهدفه، طراحی شبکه، لجستیک معکوس

مقدمه

کنترل لجستیک معکوس را می‌توان در چهار دسته اصلی خلاصه کرد: ۱. الزامات قانونی؛ ۲. حساسیت‌های زیست‌محیطی؛ ۳. سودآوری اقتصادی؛ و ۴. انحصار تکنولوژی. فلشمن [۴] تفاوت‌های زنجیره تأمین سنتی و معکوس را بیان کرد. مثلاً، لجستیک معکوس فرایندهای خاص و جدیدی را طلب می‌کند که در زنجیره روبه‌جلو در نظر گرفته نمی‌شوند. همچنین در لجستیک معکوس عدم قطعیت بالایی وجود دارد که به نوبه خود طراحی شبکه لجستیک معکوس را پیچیده‌تر می‌کند.

طراحی شبکه زنجیره تأمین سنتی در جریان مستقیم به مکان‌یابی و تعیین ظرفیت و تعداد تسهیلات تولید و ساخت و توزیع و تعریف انواع اتصالات و ارتباطات حمل‌ونقل می‌پردازد [۵]. در شبکه‌های معکوس و شبکه‌های یکپارچه مستقیم و معکوس تسهیلات دیگری، از جمله مراکز جمع‌آوری^{۱۲} و مرتب‌سازی^{۱۳} و پردازش مجدد^{۱۴}، به تسهیلات موجود در شبکه مستقیم اضافه می‌شود. از طرف دیگر، طراحی شبکه مستقیم و معکوس به طور مجزا موجبات زیربیهنگی شبکه را، با توجه به اهداف زنجیره تأمین،

مدیریت محصولات دست دوم،^۱ که لجستیک معکوس نیز نامیده می‌شود، با آن بخش تولیدی که در بردارنده مسائل زیست‌محیطی است، بسیار ارتباط دارد [۱]. اهمیت تولید مجدد و بازیافت محصولات دست دوم طی دهه گذشته به طرز چشمگیر افزایش یافته است. مدیریت لجستیک (زنجیره تأمین) معکوس فرایند برنامه‌ریزی، اجرا، و کنترل مؤثر و کارای جریان مواد اولیه و موجودی در جریان و محصولات نهایی و اطلاعات مرتبط با آن از سوی مصرف‌کنندگان تا منشأ اصلی آن است، که با هدف کسب مجدد ارزش اقلام یا انهدام مناسب آن‌ها انجام می‌شود [۲]. برای تعریف لجستیک معکوس عبارات گوناگونی به کار رفته است؛ از جمله لجستیک جریان معکوس^۲، توزیع معکوس^۳، زنجیره تأمین معکوس^۴، زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس^۵.

در دو دهه اخیر بسیاری از شرکت‌های بزرگ - مانند دل^۶، جنرال موتورز^۷، کداک^۸، زیراکس^۹ - به ساخت مجدد و تعمیرات و به طور کلی احیای^{۱۰} محصولات برگشتی (لجستیک معکوس)^{۱۱} توجهی ویژه داشته‌اند [۳]. عوامل محرک شرکت‌ها برای روآوردن به برنامه‌ریزی و اجرا و

تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس باید مدنظر قرار گیرند. با توجه به مباحث مطرح شده، در این پژوهش یک مدل ریاضی دوهدفه برای زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس ارائه می شود. حداکثرسازی سود و سبز بودن شبکه توابع هدف مدل در نظر گرفته شدند. تابع هدف سبز بودن شبکه با بهره گیری از مفهوم مدیریت زنجیره تأمین سبز^{۱۵}، که به یکپارچه کردن فاکتور اقتصاد (سود) و محیط زیست در سطح زنجیره تأمین می پردازد، تعیین شد [۱۱]. اسرئوستا مدیریت زنجیره تأمین سبز را به این صورت تعریف کرده است: «تلفیق تفکر محیط زیستی در مدیریت زنجیره تأمین که مراحل طراحی محصول، انتخاب و تأمین مواد، فرایندهای تولیدی و تحویل محصول به مشتری، و مدیریت پایان عمر محصول را در بر می گیرد.» تابع هدف سبز در این پژوهش به صورت تابعی از سبز بودن قطعات و محصولات در نظر گرفته شد.

جدول ۱ آثار مثبت و منفی شبکه های سبز و سنتی را بر تابع هدف سود نشان می دهد. با توجه به جدول ۱، شبکه سبز، به دلیل بازافت، هزینه خدمات بعد از فروش^{۱۶} پایین تری دارد. همچنین، امکان ایجاد بازاری برای محصولات نوسازی شده وجود دارد که ممکن است بر سودمندی چنین شبکه هایی بیفزاید. بازافت محصولات نیز به کاهش هزینه های زیست محیطی اعمال شده از سوی دولت ها برای شرکت ها می انجامد. به علاوه، سطوح قابلیت اطمینان قطعات بر کیفیت قطعات موجود در محصولات برگشتی تأثیر مستقیم می گذارد؛ به طوری که امکان استفاده مجدد از قطعات با سطوح قابلیت اطمینان بالای موجود در محصولات برگشتی وجود دارد. به علاوه، نوسازی و استفاده مجدد محصولات ساخته شده از قطعات با قابلیت اطمینان بالا راحت تر و ارزان تر است. جدول ۲ تأثیر مثبت و منفی قابلیت اطمینان قطعات روی تابع هدف سود را نشان می دهد.

فراهم می کند [۶ و ۷]. از این رو، طراحی جریان مستقیم و معکوس باید به صورت یکپارچه انجام شود که خود بر پیچیدگی این نوع طراحی نسبت به طراحی شبکه زنجیره تأمین سنتی می افزاید.

یکی از مسائل عمده در طراحی شبکه زنجیره تأمین ایجاد معیارهای اندازه گیری عملکرد برای تعیین میزان اثربخشی یا کارایی سیستم تحت مطالعه با سیستم های دیگر است. به طور سنتی، عمدتاً یک نوع تابع هدف (حداکثرسازی سود یا حداقل سازی هزینه) در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. در پاره ای از مطالعات انجام شده در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین به حداکثرسازی سطح خدمت مشتری و سطح کیفیت [۸] یا حداقل سازی ریسک مالی [۹] توجه شده است. یکپارچه سازی جریان معکوس با جریان مستقیم به تعریف معیارهای جدید ارزیابی، از جمله سطح بازافت پذیری محصولات و میزان تولید مجدد، می انجامد. از این رو، در نظر گرفتن چندین معیار اندازه گیری کارایی عملکرد در توسعه مدل های طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تأمین مستقیم و معکوس ضروری است.

در زمینه انتخاب تأمین کنندگان، از آنجا که برون سپاری مواد اولیه و قطعات در اغلب مواقع به صرفه است، بسیاری از سازمان ها اقدام به برون سپاری می کنند. انتخاب تأمین کنندگان در زنجیره تأمین مستقیم و معکوس متفاوت است و این تفاوت در مقایسه زنجیره تأمین مستقیم با زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس بیشتر است. مثلاً، اهمیت معیارهای سبز بودن محصولات و میزان سطح قابلیت اطمینان قطعات در زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس نسبت به زنجیره تأمین مستقیم به مراتب بیشتر است [۱۰]. از این رو، معیارهایی چون قابلیت اطمینان، بازافت پذیری، و سهولت دموونتاژ در انتخاب تأمین کنندگان در یک زنجیره

جدول ۱. تأثیرات مثبت و منفی سبز بودن شبکه بر تابع هدف سود

شبکه های سنتی	شبکه های سبز
<ul style="list-style-type: none"> تأمین قطعات با قیمت پایین هزینه های احداث پایین 	<ul style="list-style-type: none"> امکان ایجاد بازاری برای محصولات نوسازی شده کاهش هزینه های فروش و خدمات ارائه تصویری بهتر از شرکت^{۱۷} در دید مشتریان
<ul style="list-style-type: none"> عدم امکان ایجاد بازار برای محصولات نوسازی شده با هزینه قابل قبول هزینه بر بودن شبکه های فروش و خدمات 	<ul style="list-style-type: none"> تأمین قطعات با قیمت بالا هزینه های احداث بالا

جدول ۲. تأثیر سطوح گوناگون قابلیت اطمینان قطعات روی سود یا منافع حاصل از شبکه

استفاده از قطعات با سطوح قابلیت اطمینان بالا	استفاده از قطعات با سطوح قابلیت اطمینان نرمال
<ul style="list-style-type: none"> • کیفیت بالای محصولات برگشتی که مزایای زیر را در پی دارد: ✓ تعداد قطعات با کیفیت به دست آمده از دمونتاژ بالاست. ✓ هزینه نوسازی محصولات پایین است. 	<ul style="list-style-type: none"> • تأمین قطعات با قیمت پایین
<ul style="list-style-type: none"> • تأمین قطعات با قیمت بالا 	<ul style="list-style-type: none"> • تعداد قطعات با کیفیت به دست آمده از دمونتاژ پایین است. • شبکه تعمیر و نگهداری یا خدمات پرهزینه است. • قیمت تمام شده محصولات نوسازی شده بالاست.

مکان‌یابی تسهیلات بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته^{۲۰} است. این مدل‌ها انواع مختلفی از مدل‌های ساده، نظیر مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود و مدل‌های تک‌قطعه‌ای^{۲۱} و تک‌محصولی^{۲۲} (مثلاً [۱۲])، تا مدل‌های پیچیده‌تر، نظیر مدل‌های چندرده‌ای با ظرفیت محدود یا مدل‌های چندمحصولی و چندپربودی^{۲۳} (مثلاً [۱۳])، را شامل می‌شوند. کو و ایوانز [۱۴] مروری جامع از پیشینه موضوع در زمینه طراحی شبکه لجستیک ارائه داده‌اند.

در این مقاله، مرور پیشینه طراحی شبکه در سه دسته طراحی شبکه لجستیک معکوس، یکپارچه مستقیم و معکوس، و شبکه لجستیک سازگار با محیط زیست انجام شد. قسمت عمده‌ای از پیشینه به طراحی شبکه لجستیک معکوس مربوط می‌شود، که هدف آن‌ها تعیین تعداد و محل مراکز جمع‌آوری و بازیافت و دفع و همچنین ظرفیت آن‌ها و جریان بهینه از مراکز مصرف به مراکز بازیافت و دفع است. تعداد مطالعات انجام شده در زمینه طراحی یکپارچه شبکه‌های مستقیم و معکوس نسبت به دسته اول کمتر است. هدف آن‌ها یکپارچه‌سازی به منظور اجتناب از زیربهینگی ناشی از طراحی مجزای شبکه‌های مستقیم و معکوس است. در پایان، تعداد بسیار معدودی از مقالاتی که به طراحی شبکه یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط زیست پرداخته‌اند بررسی می‌شوند.

در زمینه طراحی شبکه معکوس مدل‌های بسیار زیادی در چند دهه اخیر توسعه داده شده‌اند. جایارامن و همکارانش [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با هدف حداقل سازی هزینه ارائه دادند. در این مقاله فقط به فعالیت‌های احیای محصولات برگشتی پرداخته شد. کریکی و همکارانش [۱۶] به طراحی شبکه لجستیک معکوس دوره‌ای برای یک تولیدکننده دستگاه‌های کپی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته پرداختند. در این مدل به هزینه‌های پردازش محصولات برگشتی و موجودی نیز در تابع هدف توجه شده است.

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه برای یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس ارائه می‌شود. با توجه به تمایل شرکت‌ها به ارائه تصویر سبز^{۱۸} از فعالیت‌های تولیدی و توزیع، در نظر گرفتن سود و سبزبودن به منزله توابع هدف به تصمیم‌گیرندگان در ایجاد موازنه بین دو تابع هدف متناقض فوق کمک می‌کند. همچنین، سطوح قابلیت اطمینان قطعات، که تأثیری مستقیم بر کیفیت قطعات موجود در محصولات برگشتی دارد، در مرحله انتخاب تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به پیشینه موضوع (بخش ۲)، مدل فوق اولین مدلی است که سبزبودن قطعات و محصولات و همچنین قابلیت اطمینان قطعات را، به منزله مصادیقی از زنجیره تأمین سبز، در طراحی زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس لحاظ کرده است. در مسئله تحت مطالعه سه رده^{۱۹}، شامل تأمین‌کنندگان و مراکز دمونتاژ و مراکز مصرف، در جریان مستقیم و دو رده، شامل مراکز دمونتاژ و دفع، در جریان معکوس در نظر گرفته شد. مدل توسعه داده شده تک‌دوره‌ای، چندقطعه‌ای، چندمحصولی، و چندمرحله‌ای است.

در بخش دوم این مقاله پیشینه موضوع مرور و بر مبنای یک سیستم کدینگ توسعه داده شده طبقه‌بندی می‌شود. در بخش سوم مسئله تعریف و فرض‌های مسئله تبیین می‌شود. تأثیر قابلیت اطمینان و سبزبودن قطعات و محصولات بر طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس در بخش چهارم ارائه می‌شود. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ۰ و ۱ دوهدفه برای مسئله در بخش پنجم توسعه داده می‌شود. بخش‌های ششم و هفتم به ارائه روش حل پیشنهادی و حل مثال‌های عددی و ارائه بینش‌های مدیریتی اختصاص می‌یابد. در پایان، بخش هشتم، درباره خلاصه‌ای از نتایج تحقیق و برخی زمینه‌های تحقیقات آتی بحث می‌شود.

پیشینه موضوع

بیشتر پیشینه موضوع در زمینه طراحی شبکه‌های لجستیک (اعم از مستقیم و معکوس) شامل مدل‌های مختلف

[۲۰] یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای تعیین محل تسهیلات و مسیر و جریان مواد و محصولات بین تسهیلات در یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس ارائه دادند. حداقل‌سازی هزینه‌های لجستیک معکوس، حداکثرسازی بهبود کیفیت محصولات، و ملاحظات زیست‌محیطی توابع هدف در نظر گرفته شدند. امین و زانگ [۹] نیز ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته با تابع هدف حداقل‌سازی هزینه کل توسعه دادند. سپس، تولیدکنندگان و تکنولوژی پاک در مراکز جمع‌آوری مدل فوق را به منظور در نظر گرفتن فاکتورهای زیست‌محیطی، شامل استفاده از مواد اولیه دوست‌دار محیط زیست، توسعه دادند.

در جدول ۴ پاره‌ای از مطالعات انجام‌شده مرتبط با مقاله فوق با جزئیات بیشتر ارائه می‌شود. در جدول ۳ علایم استفاده‌شده در جدول ۴ تشریح می‌شود. طبق جدول ۴، ویژگی‌های متمایز مدل ارائه‌شده در این مقاله با مدل‌های موجود در پیشینه پژوهش، شامل طراحی یکپارچه شبکه‌های مستقیم و معکوس و چندمحصولی و چندقطعه‌ای و از همه مهم‌تر در نظر گرفتن سبز بودن محصولات و قطعات در تابع هدف، مصادیقی از زنجیره تأمین سبز است.

تعریف مسئله

مسئله مورد بررسی در این پژوهش طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس است؛ شامل تأمین‌کنندگان، تسهیلات مونتاژ، مراکز مصرف (مشتریان)، تسهیلات دمونتاژ، و مرکز دفع. تأمین‌کنندگان و مراکز مونتاژ و دمونتاژ دارای ظرفیت‌اند. شبکه تحت مطالعه در شکل ۱ نشان داده می‌شود. قیمت قطعات خریداری‌شده از تأمین‌کنندگان و به‌کاررفته در مراکز مونتاژ به سطوح قابلیت اطمینان و سبز بودن آن‌ها بستگی دارد. مواد اولیه با قابلیت بازیافت‌پذیری بالا در ساخت قطعات سبز استفاده شده است.

همچنین، پیشوایی و همکارانش [۱۷] یک مدل خطی برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و بازرسی در یک شبکه لجستیک معکوس ارائه دادند. برای حل مدل در ابعاد بزرگ یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^{۲۴} توسعه داده شده است.

تعداد مطالعات انجام‌شده در زمینه طراحی یکپارچه شبکه‌های مستقیم و معکوس نسبت به مطالعات دسته اول کمتر است. در این زمینه، لو و بوستل [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی برای طراحی یکپارچه شبکه‌های مستقیم و معکوس، با در نظر گرفتن تسهیلات مشترک، با هدف حداقل‌سازی هزینه ارائه کردند. برای حل مدل پیشنهادی، یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای لاگرانژ ارائه شده است. همچنین، پیشوایی و همکارانش [۸] مدل برنامه‌ریزی دوهدفه، شامل حداقل‌کردن هزینه و حداکثرسازی مسئولیت‌پذیری^{۲۵}، برای یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس ارائه دادند. مدل ارائه‌شده قادر به در نظر گرفتن ترکیب تسهیلات توزیع و جمع‌آوری و محاسبه صرفه‌جویی حاصل و همچنین ایجاد تعادل بین حداقل‌کردن هزینه کل و حداکثر کردن پاسخگویی شبکه است. برای حل مدل در ابعاد بزرگ یک الگوریتم ممتیک توسعه داده شده است.

مقالات ارائه‌شده در زمینه طراحی شبکه یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط زیست بسیار کم است. هوگو و پیستیگوپولاس [۱۹] یک مدل دوهدفه پیشرفته برای طراحی زنجیره تأمین سازگار با محیط زیست برای مواد شیمیایی ارائه دادند. مدل توسعه‌داده‌شده یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته است که در یک شبکه چنددوره‌ای و چندمحصولی به کار رفته است. این مدل از افزایش و ایجاد ظرفیت مکان‌یابی تسهیلات را مدل کرده است. اهداف مدل شامل حداکثر کردن سود اقتصادی و حداقل کردن تأثیرات زیست‌محیطی است. پتی و همکارانش

جدول ۳. علایم استفاده‌شده در جدول ۴

مخفف (Acronym)	مشخصات (Description)	دسته (Category)
RN	شبکه معکوس (Reverse Network)	نوع شبکه
CLN	شبکه حلقه‌بسته (Closed-Loop Network)	
MPr or SPPr	چندمحصولی یا تک‌محصولی (Multi-product or single-product)	مشخصه‌های مدل
MPa or SPa	چندقطعه‌ای یا تک‌قطعه‌ای (Multi-part or single part)	
C or P	سود یا هزینه (Cost or Profit)	
R	مسئولیت‌پذیری (Responsiveness)	تابع هدف مدل
E	مزایای زیست‌محیطی (Environmental benefits)	
G	سبز بودن قطعه و محصول (Part and product Greenness)	

- درصد ثابتی از محصولات ارسال شده به هر مشتری مقدار محصولات برگشتی از همان مشتری در نظر گرفته می‌شود.
 - مکان و تعداد مراکز مصرف و دفع ثابت و از پیش معلوم است.
 - هزینه نوسازی- تعمیر قطعات مشابه نو حاصله از دمونتاز ناچیز است و از آن صرف نظر شده است.
 - هزینه دفع قطعات ضایعاتی در هزینه ارسال آن‌ها از مراکز دمونتاز به مراکز دفع حساب شده است.
- آنچه تحت فرض‌های فوق در مسئله باید به آن‌ها پاسخ داد شامل تعیین ساختار بهینه شبکه زنجیره تأمین مستقیم و معکوس، یعنی تعداد تأمین‌کنندگان قطعات، مکان، و تعداد مراکز دمونتاز و همچنین راه‌اندازی یا عدم راه‌اندازی خط مونتاژ ثانویه در مراکز مونتاژ و جریان جمعی بین تسهیلات به منظور ایجاد تعادل بین منافع حاصل از شبکه و سبز بودن آن است.

تأثیر قابلیت اطمینان و سبز بودن قطعات و محصولات روی طراحی شبکه زنجیره تأمین

معکوس

در این پژوهش، طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان قطعات و سبز بودن قطعات و محصولات به مثابه مصادیقی از زنجیره تأمین سبز مطالعه شد.

در هر مرکز مونتاژ یک خط مونتاژ اولیه وجود دارد (هزینه ثابت احداث خط مونتاژ اولیه برابر ۰ است). همچنین در هر مرکز مونتاژ قابلیت بالقوه نصب خط مونتاژ ثانویه بر مبنای طراحی برای دمونتاز وجود دارد. جهت نصب خط مونتاژ ثانویه، هزینه ثابت راه‌اندازی خط مونتاژ ثانویه بر مبنای طراحی برای دمونتاز (برای آشنایی با مفهوم طراحی برای دمونتاز به مرجع ۲۱ رجوع کنید) در نظر گرفته شده است. انواع محصولات مونتاژ شده با توجه به سطوح سبز بودن آن‌ها به مراکز مصرف منتقل می‌شوند. سطح سبز بودن محصولات بر مبنای سطح تکنولوژی طراحی برای دمونتاز (درجه سهولت دمونتاز محصول) تعریف می‌شود. از این رو، تعداد قطعات باکیفیت حاصله از دمونتاز محصولات با سطح بالای سبز بیشتر و از طرف دیگر زمان و هزینه دمونتاز برای چنین محصولاتی به مراتب پایین‌تر است. بخشی از محصولاتی که مشتریان مصرف می‌کنند به مراکز دمونتاز یا دفع منتقل می‌شود. این محصولات دمونتاز می‌شوند و قطعات حاصله از دمونتاز در دو دسته قطعات مشابه نو و قطعات ضایعاتی، به ترتیب، به مراکز مونتاژ و مرکز دفع منتقل می‌شوند.

با جمع‌بندی مطالب بیان شده در این بخش، می‌توان فرض‌های مسئله را در قالب موارد ذیل خلاصه کرد:

- همه تقاضاهای مشتریان در جریان مستقیم باید برآورده شود. در جریان معکوس هم باید همه کالاهای برگشتی از مشتریان جمع‌آوری شود.

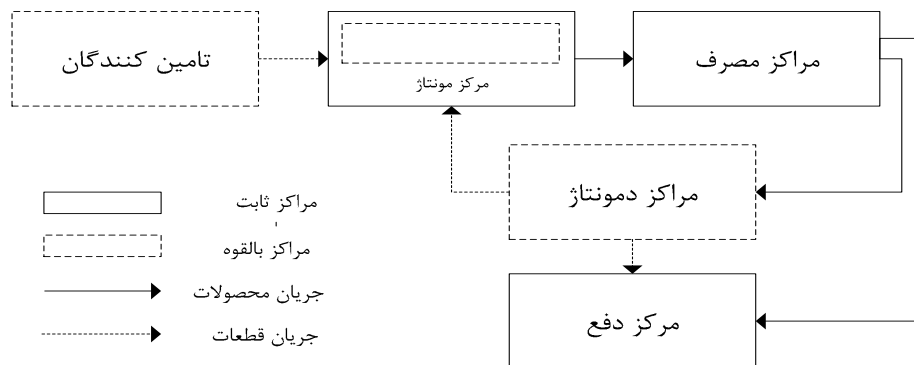
جدول ۴. پاره‌ای از مطالعات انجام شده مرتبط با موضوع مقاله

منابع	نوع شبکه		مشخصه‌های مدل				توابع هدف			
	CLN	RN	SPa	MPa	SPr	MPr	G	E	R	C/P
[۲۲]		✓	✓		✓					✓
[۲۳]		✓	✓		✓					✓
[۲۰]		✓	✓			✓		✓		
[۱۴]		✓	✓			✓				
[۲۴]		✓	✓		✓					
[۲۵]		✓	✓		✓					
[۲۶]		✓	✓		✓					
[۸]		✓	✓			✓		✓	✓	
[۹]		✓	✓			✓		✓	✓	
[۱۰]		✓	✓		✓			✓	✓	
(Our study, 2014)		✓	✓		✓			✓	✓	

که ممکن است به سودمندی بیشتر زنجیره تأمین معکوس نسبت به زنجیره تأمین مستقیم بینجامد. در مسئله تحت مطالعه، سطوح قابلیت اطمینان و سبز بودن برای قطعات به منزله پارامتر در نظر گرفته شدند. سپس، بر اساس ترکیب سطوح قابلیت اطمینان و سبز انتخابی برای قطعات سناریوهایی تعریف شد. در مدل تحت بررسی، با در نظر گرفتن دو سطح قابلیت اطمینان، دو سطح سبز بودن برای قطعات، و دو نوع قطعه به کاررفته در ساخت محصولات شانزده سناریو تعریف شد. دو سطح سبز بودن هم برای محصولات در نظر گرفته شد که به صورت متغیر تصادفی‌اند و مدل آن را تعیین می‌کند.

مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی

نمادهایی که در ذیل تعریف آن‌ها به اختصار ذکر می‌شود در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی برای طراحی شبکه یکپارچه مستقیم و معکوس استفاده شدند.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم- معکوس تحت مطالعه

پارامترها

- F_s : هزینه ثابت انتخاب تأمین‌کننده s
- F_{mda} : هزینه ثابت راه‌اندازی خط مونتاژ ثانویه بر مبنای طراحی برای دمونتاز برای محصول m با سطح سبز d در مرکز مونتاژ a
- F_l : هزینه ثابت احداث مرکز دمونتاز در محل l
- π_{prgsa} : هزینه خرید و حمل یک واحد قطعه p با سطح قابلیت اطمینان r و سطح سبز g از تأمین‌کننده s به مرکز مونتاژ a
- C_{mak} : هزینه حمل یک واحد محصول m از مرکز مونتاژ a به مرکز مشتری k

اندیس‌ها

- اندیس تأمین‌کنندگان بالقوه $s=1, \dots, S$
- اندیس انواع قطعات $p=1, \dots, P$
- اندیس انواع محصولات $m=1, \dots, M$
- اندیس نقاط ثابت استقرار مراکز مونتاژ با قابلیت راه‌اندازی خط مونتاژ ثانویه $a=1, \dots, A$
- اندیس نقاط ثابت استقرار مشتریان $k=1, \dots, K$
- اندیس اماکن نامزد برای احداث مراکز دمونتاز $l=1, \dots, L$
- اندیس سطح سبز بودن مواد استفاده‌شده در ساخت قطعات $g=1, \dots, G$
- اندیس سطوح قابلیت اطمینان قطعات $r=1, \dots, R$
- اندیس سطوح سبز بودن محصولات $d=1, \dots, D$

C_{mkl}	هزینه حمل یک واحد محصول m از مرکز مشتری k به مرکز دمونتاز l	f_{mkl}	مقدار محصولات m با سطح سبز d که از مرکز مشتری k برگشت داده و به مرکز دمونتاز l حمل می شود.
C_{pla}	هزینه حمل یک واحد قطعه بازیافت شده (قطعه مشابه نو) p از مرکز دمونتاز l به مرکز مونتاژ a	f_{prgl}	مقدار قطعات ضایعاتی p با سطح قابلیت اطمینان r و سطح سبز g که از مرکز دمونتاز l به مرکز دفع حمل می شود.
C_{pgl}	هزینه حمل یک واحد قطعه ضایعاتی p با سطح سبز g از مرکز دمونتاز l به مرکز دفع	f_{prgla}	مقدار قطعات با کیفیت مناسب p با سطح قابلیت اطمینان r و سطح سبز g که از مرکز دمونتاز l به مرکز مونتاژ a حمل می شود.
C_{mk}^e	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی m از مرکز مشتری k به مرکز دفع	O_{mdk}^e	مقدار محصولات m با سطح سبز d که از مرکز مشتری k برگشت داده و به مرکز دفع حمل می شود.
B_{mda}	هزینه مونتاژ یک واحد محصول m با سطح سبز d در مرکز مونتاژ a	f_{mdl}^D	مقدار محصولات m با سطح سبز d که در مرکز دمونتاز l برگشت داده و به مرکز دفع حمل می شود.
E_{mdl}	هزینه دمونتاز یک واحد محصول m با سطح سبز d در مرکز دمونتاز l		
C_{prgs}	ظرفیت تأمین کننده s برای تأمین قطعه p با قابلیت اطمینان r و سطح سبز g		
C_{mda}	ظرفیت مرکز مونتاژ a برای مونتاژ محصول m با سطح سبز d		
C_{mdl}^D	ظرفیت مرکز دمونتاز l برای دمونتاز محصول m با سطح سبز d		
θ_{md}	نسبتی از محصول m با سطح سبز d دارای قطعات قابل بازیافت		
θ_{pr}	نسبتی از قطعات p با سطح قابلیت اطمینان r حاصل شده از دمونتاز		
σ_{prgm}	تعداد قطعات استفاده شده p با سطح قابلیت اطمینان r و سطح سبز g در یک واحد محصول m		
d_{mk}	تقاضای مرکز مشتری k برای محصول m		
r_{md}	نرخ بازگشت محصول m با سطح سبز d		
ρ_{mk}	قیمت فروش یک واحد محصول m در مرکز مشتری k		
w	وزن تابع هدف منافع		

$$X_g = \begin{cases} 1 & \text{اگر تأمین کننده } S \text{ انتخاب شود،} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Y_{mda} = \begin{cases} 1 & \text{اگر خط مونتاژ برای محصول } m \text{ با سطح سبز } d \text{ در محل } a \text{ احداث شود،} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Z_l = \begin{cases} 1 & \text{اگر مرکز دمونتاز در محل } l \text{ احداث شود،} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

با استفاده از نمادهای فوق، مدل برنامه ریزی ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه به شرح زیر قابل ارائه است.

توابع هدف

همان طور که پیش تر بیان شد، دو تابع هدف متعارض شامل حداکثرسازی سود و حداکثرسازی میزان سبز بودن شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شدند.

- تابع هدف اول، حداکثرسازی منافع کل شبکه: منافع کل شبکه از کسر هزینه های کل از سود کلی حاصل از فروش محصولات به دست می آید. هزینه های طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی شامل هزینه ثابت تأمین قطعات از تأمین کنندگان، راه اندازی خط مونتاژ بر مبنای طراحی برای دمونتاز و احداث مراکز دمونتاز، هزینه های پردازش کالا در تسهیلات شبکه و حمل و نقل بین آن هاست. رابطه ۱ فرمول ریاضی این تابع هدف را نشان می دهد.

متغیرهای تصمیم

- f_{prgsa} مقدار قطعات p با سطح قابلیت اطمینان r و سطح سبز g خریداری شده از تأمین کننده s که به مرکز مونتاژ a حمل می شود.
- f_{mda} مقدار محصولات m با سطح سبز d که در مرکز مونتاژ a مونتاژ می شود.
- f_{mdak} مقدار محصولات m با سطح سبز d که از مرکز مونتاژ a به مرکز مشتری k حمل می شود.

سبزی بودن محصول) در قیمت فروش محصول (وزن شاخص سبزی بودن محصول) در مقدار جریان محصول به دست می‌آید بیان‌کننده وزن کلی سبزی بودن شبکه با توجه به محصولات است.

• تابع هدف دوم، حداکثرسازی فاکتور سبز شبکه: این تابع هدف به صورت تابعی از میزان سبزی بودن محصولات و قطعات در نظر گرفته شد. رابطه ۲ فرمول ریاضی تابع هدف فوق را نشان می‌دهد. بخش اول، که از حاصل ضرب شاخص سبزی بودن محصول (سطح

$$\begin{aligned} \text{Maximize } Z_1 = & \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} \sum_{k \in K} \rho_{mk} f_{mdak} - \sum_{s \in S} F_s X_s - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} F_{mda} Y_{mda} - \\ & \sum_{l \in L} F_l Z_l - \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} \pi_{prgsa} f_{prgsa} - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} \sum_{k \in K} c_{mak} f_{mdak} - \\ & \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c_{mkl} f_{mdkl} - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} c_{mk}^e O_{mk}^e - \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{l \in L} c_{prgl} f_{prgl} - \\ & \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} c_{prgla} f_{prgla} - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} E_{mdl} f_{mdl}^D - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} B_{mda} f_{mda} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Maximum } Z_2 = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} d \rho_{mk} f_{mdak} + \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} g \pi_{prgsa} f_{prgsa} \quad (2)$$

۵ تضمین می‌کند که حاصل جمع قطعات خریداری شده از تأمین‌کنندگان و بازیافت شده در مراکز دمونتاز، که به مراکز مونتاژ حمل شده‌اند، برابر تعداد کل قطعات به کاررفته در مرکز مونتاژ است. رابطه ۶ بیانگر آن است که همه محصولات مونتاژ شده به مراکز مصرف توزیع شده‌اند.

$$\sum_{s \in S} f_{prgsa} + \sum_{l \in L} f_{prgla} = \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sigma_{prgm} f_{mda} \quad (5)$$

$$\forall p \in P, \forall r \in R, \forall g \in G, \forall a \in A \quad (6)$$

$$f_{mda} = \sum_{k \in K} f_{mdak} \quad \forall m \in M, \forall d \in D, \forall a \in A$$

- محدودیت‌های تعادل جریان محصولات و قطعات در مراکز دمونتاز: محدودیت‌های ۷ تا ۱۰ مربوط به تعادل جریان محصولات و قطعات در مراکز دمونتازند. رابطه ۷ تعادل جریان محصولات و رابطه‌های ۸ تا ۱۰ تعادل جریان قطعات در مراکز دمونتاز را نشان می‌دهند. رابطه ۷ تضمین می‌کند که همه محصولات برگشتی حمل شده از مراکز مصرف به مراکز دمونتاز دمونتاز شده‌اند. رابطه ۸ نشان می‌دهد که همه قطعات حاصل از دمونتاز در دو دسته قطعات بازیافتی و ضایعاتی تفکیک شده‌اند و به ترتیب به مراکز مونتاژ و مراکز دفع حمل شده‌اند. مقدار قطعات حمل شده به مراکز مونتاژ و مرکز دفع به ترتیب در رابطه‌های ۹ و ۱۰ مشخص شده‌اند.

$$\sum_{k \in K} f_{mdkl} = f_{mdl}^D \quad \forall m \in M, \forall d \in D, \forall l \in L \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sigma_{prgm} f_{mdl}^D = \sum_{a \in A} f_{prgla} + f_{prgl} \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall g \in G, \forall l \in L \quad (8)$$

بخش دوم هم، که از حاصل ضرب شاخص سبزی بودن قطعه (سطح سبزی بودن قطعه) در قیمت خرید قطعه (وزن شاخص سبزی بودن قطعه) در مقدار جریان قطعه به دست می‌آید، بیان‌کننده وزن کلی سبزی بودن شبکه با توجه به قطعات است.

محدودیت‌ها

در این بخش محدودیت‌های مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. این محدودیت‌ها در چهار دسته ۱. محدودیت‌های ارضای تقاضا و بازگشتی مشتریان؛ ۲. محدودیت‌های تعادل جریان؛ ۳. محدودیت‌های ظرفیت تسهیلات؛ و ۴. محدودیت‌های ضروری و منطقی روی متغیرهای تصمیم قابل طبقه‌بندی است.

- محدودیت‌های ارضای تقاضا و بازگشتی مشتریان: رابطه‌های ۳ و ۴ به ترتیب تضمین می‌کنند همه تقاضای مشتریان در جریان مستقیم ارضا و همه کالاهای بازگشتی از مشتریان در جریان معکوس جمع‌آوری و به مراکز دفع یا دمونتاز حمل می‌شوند.

$$\sum_{d \in D} \sum_{a \in A} f_{mdak} = d_{mk} \quad \forall m \in M, \forall k \in K \quad (3)$$

$$O_{mdk}^e + \sum_{l \in L} f_{mdkl} = f_{md} \sum_{a \in A} f_{mdak} \quad \forall m \in M, \forall d \in D, \forall k \in K \quad (4)$$

- محدودیت‌های تعادل جریان قطعات و محصولات در مراکز مونتاژ: محدودیت‌های ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به تعادل جریان قطعات و محصولات در مراکز مونتاژند. رابطه

حل مثال‌های عددی و ارائه بینش‌های

مدیریتی

در این بخش مدل تدوین شده، با استفاده از حل چندین مثال، به کمک روش‌های مجموع وزن‌دهی شده و قیود محدود، اجرا می‌شود. به منظور اجرای مثال‌های عددی در حجم بالا و ارائه بینش‌های مفید مدیریتی، بدون از دست دادن کلیت مسئله، یک شبکه زنجیره تأمین اندازه کوچک با سه مرکز مصرف، یک مرکز مونتاژ، یک مرکز دمونتاز، دو تأمین‌کننده، دو نوع قطعه هر یک با دو سطح قابلیت اطمینان و سبز بودن در نظر گرفته شد. سطوح سبز بودن ۱ و ۲ با توجه به نوع تکنولوژی استفاده‌شده در مونتاژ محصولات به آن‌ها اختصاص می‌یابد. سطح سبز ۱ به محصولاتی اختصاص می‌یابد که در خط مونتاژ اولیه (سنتی) مونتاژ شوند. اگر محصولی در خط مونتاژ بر مبنای طراحی برای دمونتاز مونتاژ شود، سطح سبز ۲ به آن تعلق می‌گیرد. قیمت‌های خرید قطعات از تأمین‌کنندگان گوناگون مشخص و تابعی از سطوح قابلیت اطمینان و سبز بودن آن‌هاست. بر اساس سطوح قابلیت اطمینان و سبز بودن قطعات و همچنین نوع قطعات، شانزده سناریو تعریف شد که در جدول ۵ می‌آید.

هزینه ثابت تأمین هر دو نوع قطعه از تأمین‌کنندگان برابر ۵۰۰۰۰ است. هزینه ثابت راه‌اندازی خط مونتاژ بر مبنای طراحی برای دمونتاز در مرکز مونتاژ برابر ۱۰۰۰۰۰ و هزینه ثابت احداث مرکز دمونتاز ۳۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. بقیه پارامترها در جدول ۶ می‌آید. همه قیمت‌ها بر حسب ۳۰۰۰۰ ریال است.

مدل ریاضی با نرم‌افزار GLPK (Gusek) و داده‌های عددی متنوع برای تولید جواب‌های بهینه پارتو با استفاده از روش‌های مجموع وزن‌دهی شده و قیود محدود حل شد. نتایج در زیربخش‌هایی که در ادامه می‌آید تشریح می‌شود.

ساختار مسئله مورد بررسی در این پژوهش از نوع مکان‌یابی تسهیلات باظرفیت است. پیش‌تر دیویس و ری^{۲۸} [۲۷] نشان داده‌اند که مسئله مکان‌یابی تسهیلات باظرفیت مسئله‌ای NP-hard است. همچنین بررسی‌های میرچندی و فرانسیس^{۲۹} [۲۸] نشان می‌دهد مسئله مکان‌یابی تسهیلات باظرفیت جزء مسائل قویاً NP-hard است. در این پژوهش با حل مثال‌های عددی متنوع سعی می‌شود بینش‌های مدیریتی ارائه شود. برای حل مدل در اندازه‌های بزرگ می‌توان از روش‌هایی بهره برد که برای حل مسائل طراحی لجستیک معکوس توسعه داده شده‌اند.

$$\sum_{a \in A} f_{prgla} = \theta_{pr} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \theta_{md} \sigma_{prgm} f_{mdl}^D \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall g \in G, \forall l \in L \quad (9)$$

$$f_{prgl} = \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} (1 - \theta_{md}) \sigma_{prgm} f_{mdl}^D + (1 - \theta_{pr}) \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \theta_{md} \sigma_{prgm} f_{mdl}^D \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall g \in G, \forall l \in L \quad (10)$$

- محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت تسهیلات: محدودیت‌های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت روی تأمین‌کنندگان از تأمین‌کنندگان و محدودیت‌های ظرفیت روی مراکز مونتاژ و دمونتازند. همچنین محدودیت‌های فوق به ترتیب از خرید قطعات از تأمین‌کنندگانی که انتخاب نشده‌اند و مونتاژ و دمونتاز در مراکز می‌کنند.

$$\sum_{a \in A} f_{prgsa} \leq C_{prgs} X_s \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall g \in G, \forall s \in S \quad (11)$$

$$f_{mda} \leq C_{mda} Y_{mda} \quad \forall m \in M, \forall d \in D, \forall a \in A \quad (12)$$

$$f_{mdl}^D \leq C_{mdl}^D Z_l \quad \forall m \in M, \forall d \in D, \forall l \in L \quad (13)$$

- محدودیت‌های ضروری و منطقی روی متغیرهای تصمیم: محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت‌های ضروری و منطقی روی متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته مسئله‌اند.

$$f_{mda} f_{mdak} f_{mdkl} f_{prgl} f_{prgla} \theta_{mdk}^e f_{mdl}^D \geq 0 \quad (14)$$

$$X_s, Y_{mda}, Z_l = \{0, 1\} \quad (15)$$

روش حل پیشنهادی

در این پژوهش، برای برخورد با توابع هدف مدل توسعه داده شده، از روش مجموع وزن‌دهی شده^{۲۶} و روش قیود محدود^{۲۷} استفاده شد. روش مجموع وزن‌دهی شده، به لحاظ فهم و اجرا، روشی ساده و برای مسائل بهینه‌سازی محدب مفید است. در این روش، مسئله با چند تابع هدف، با اختصاص وزن‌هایی، به یک مسئله تک‌هدفه تبدیل می‌شود. اهداف، در صورتی که دارای مقیاس‌های مختلف باشند، باید نرمالیزه و سپس وزن‌دهی شوند. روش قیود محدود مبتنی بر تبدیل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه است. در این روش یکی از اهداف مسئله، که نسبت به بقیه اهمیت بالاتری دارد، هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و بقیه اهداف به صورت قید در محدودیت‌ها قرار می‌گیرند.

جدول ۳.۶. هزینه‌های حمل و تقاضا و قیمت فروش محصول

k	۱	۲	۳
c_{mak}	۲	۳	۳
c_{mkl}	۲	۳	۴
c_{mk}^e	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
d_{mk}	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰
ρ_{1k}	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰

جدول ۴.۶. ظرفیت و هزینه‌های عملیاتی و نسبت‌ها

D	۱	۲
C_{mda}	۱۰	۲۰۰
C_{mdl}^D	۵۰	۱۰۰
B_{mda}	۲۰	۱۰۰
E_{mdl}	۵۰	۵
r_{md}	۰/۴	۰/۴
Θ_{md}	۰/۴	۰/۸

جدول ۵.۶. نسبت قطعات

p	R	θ
۱	۱	۳
۲	۱	۷
۱	۲	۴
۲	۲	۸

جدول ۶.۶. هزینه حمل قطعات ضایعاتی

P	g	C_{pg1}
۱	۱	۱۰
۱	۲	-۵
۲	۱	۱۰
۲	۲	-۵

جدول ۷.۶. هزینه حمل

P	C_{pla}
۱	۳
۲	۲

نتایج حل مدل با روش قیود محدود

در این بخش به جواب‌های بهینه پارتو، که از معاوضه^{۳۰} سود و سبزبودن شبکه با استفاده از روش قیود محدود محاسبه شدند، پرداخته می‌شود. مقادیر معاوضه^{۳۱} سود و سبزبودن برای سناریوی شماره ۱ در جدول ۷ می‌آید. مقادیر جدول ۷ از طریق محاسبه مقادیر بهینه هر دو تابع هدف به طور مجزا به دست آمد؛ بدین صورت که ابتدا سود به منزله تابع هدف اصلی در نظر گرفته شد و مقدار سبزبودن محاسبه شد و برعکس.

جدول ۵. سناریوهای تعریف‌شده بر مبنای سطوح قابلیت اطمینان و سبزبودن قطعات

شماره سناریو	قطعه ۱		قطعه ۲	
	سطح قابلیت اطمینان	سطح سبز بودن	سطح قابلیت اطمینان	سطح سبز بودن
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۲
۳	۱	۱	۲	۱
۴	۱	۱	۲	۲
۵	۱	۲	۱	۱
۶	۱	۲	۱	۲
۷	۱	۲	۲	۱
۸	۱	۲	۲	۲
۹	۲	۱	۱	۱
۱۰	۲	۱	۱	۲
۱۱	۲	۱	۲	۱
۱۲	۲	۱	۲	۲
۱۳	۲	۲	۱	۱
۱۴	۲	۲	۱	۲
۱۵	۲	۲	۲	۱
۱۶	۲	۲	۲	۲

جدول ۶. مقادیر پارامترهای مدل

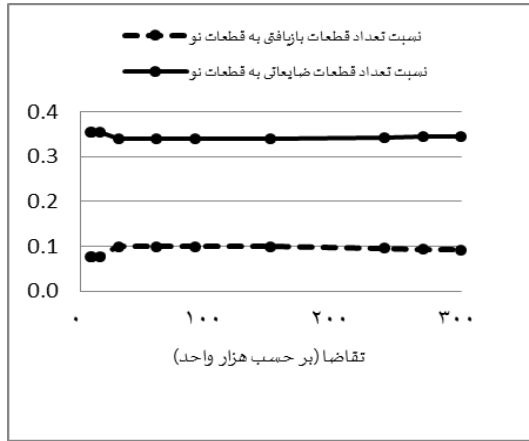
جدول ۱۰.۶. هزینه خرید قطعات و ظرفیت تأمین کنندگان در تأمین قطعات

p	r	g	s	π_{prgs1}	C_{prgs}
۱	۱	۱	۱	۵	۵۰۰
۱	۱	۱	۲	۵	۵۰۰
۱	۱	۲	۱	۷	۵۰۰
۱	۱	۲	۲	۷	۵۰۰
۱	۲	۱	۱	۷	۵۰۰
۱	۲	۱	۲	۷	۵۰۰
۱	۲	۲	۱	۱	۵۰۰
۱	۲	۲	۲	۱	۵۰۰
۲	۱	۱	۱	۶	۵۰۰
۲	۱	۱	۲	۶	۵۰۰
۲	۱	۲	۱	۸	۵۰۰
۲	۱	۲	۲	۸	۵۰۰
۲	۲	۱	۱	۸	۵۰۰
۲	۲	۱	۲	۸	۵۰۰
۲	۲	۲	۱	۱	۵۰۰
۲	۲	۲	۲	۱	۵۰۰

جدول ۲.۶. تعداد قطعات استفاده شده در هر محصول

p	r	g	σ_{prg1}
۱	۱	۱	۱
۱	۱	۲	.
۱	۲	۱	.
۱	۲	۲	.
۲	۱	۱	۱
۲	۱	۲	.
۲	۲	۱	.
۲	۲	۲	.

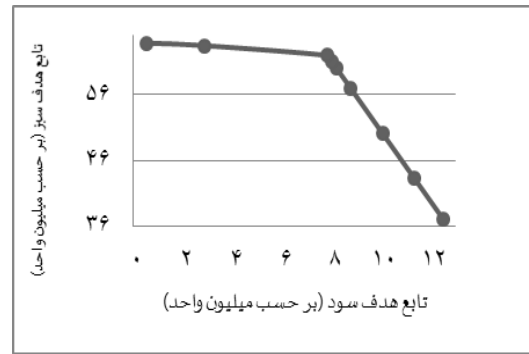
ضایعاتی به تعداد قطعات نو خریداری شده از تأمین کنندگان در مونتاژ با توجه به تغییرات سطوح تقاضا محاسبه و نمایش داده شده‌اند.



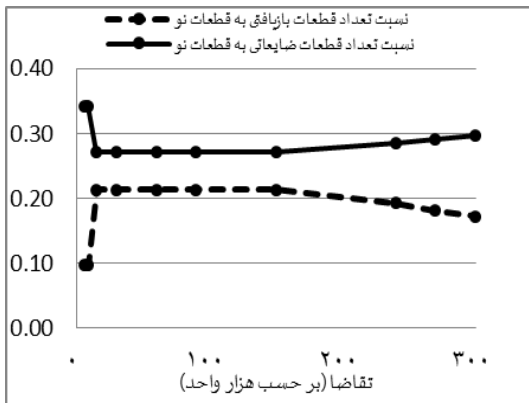
شکل ۳. جریان قطعات در سناریوی ۱

جدول ۷. مقادیر معاوضه برای سناریوی ۱

سبزی (Z_2)	سود (Z_1)	
۳۶۳۳۸۴۰۰	۱۳۲۷۹۹۲۰	حداکثر سود ($\text{Max } Z_1$)
۶۳۹۰۰۰۰۰	۶۶۱۰۰۰۰	حداکثر سبزی ($\text{Max } Z_2$)



شکل ۴. عملکرد متقابل دو تابع هدف منافع و سبزی در سناریوی ۱

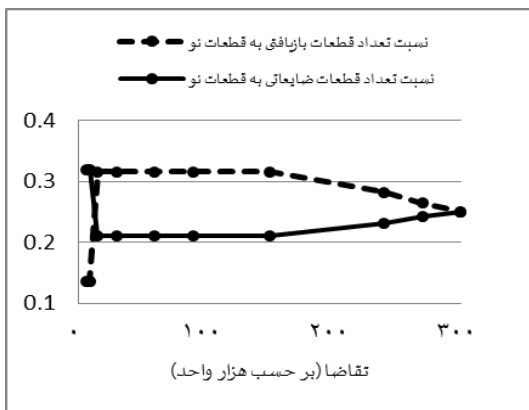


شکل ۵. جریان قطعات در سناریوی ۸

دامنه مقادیر به دست آمده برای تابع هدف سبزی بودن به هشت فاصله مساوی تقسیم شد. از این رو نه مقدار برای تابع هدف فوق به دست آمد که به منزله مقادیر ۴ در روش قیود محدود در نظر گرفته شدند. شکل ۲ منحنی پارتو برای دو تابع هدف سود و سبزی بودن در سناریوی ۱ را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دو تابع هدف مسئله با یکدیگر در تضادند؛ به این معنا که حرکت هر یک به سمت مطلوب (ارضای بیشتر تابع هدف) مستلزم حرکت تابع هدف دیگر به سمت نامطلوب (ارضای کمتر) خواهد بود. به بیان دیگر، مقدار سود با افزایش مقدار سبزی بودن کاهش می‌یابد و برعکس.

تأثیر قابلیت اطمینان و سبزی بودن روی درصد قطعات بازیافتی و ضایعاتی در روش مجموع وزن دهی شده

تأثیر قابلیت اطمینان و سبزی بودن بر درصد قطعات بازیافتی و ضایعاتی در سه سناریوی ۱ و ۸ و ۱۲ به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۵ می‌آید. سناریوهای ۱ و ۸ و ۱۲ به ترتیب بیشترین و متوسط و کمترین مقادیر قابلیت اطمینان و سبزی بودن را دارند. با توجه به اینکه درصد قطعات بازیافتی و ضایعاتی با تغییرات تقاضا برای محصولات تعمیر می‌کنند، در شکل‌های ۳ تا ۵ نسبت تعداد قطعات بازیافتی استفاده شده در مونتاژ و



شکل ۶. جریان قطعات در سناریوی ۱۶

در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه داده شد. یکپارچگی سبزبودن قطعات و محصولات در مدل مدنظر قرار گرفت. همچنین دو سطح برای میزان راحتی مونتاژ-دمونتاژ (طراحی برای دمونتاژ) در نظر گرفته شد. در انتخاب تأمین‌کنندگان قابلیت اطمینان و قابلیت بازیافت‌پذیری قطعات مدنظر قرار گرفتند. خروجی مدل فوق دو دسته از تصمیمات سطح استراتژیک (انتخاب تأمین‌کنندگان و مراکز دمونتاژ، مراکز مونتاژ، انتخاب مراکز از مراکز مونتاژ که طراحی آن‌ها بر پایه طراحی بر اساس دمونتاژ باشد) و سطح تاکتیکی (مقادیر بهینه قطعات و محصولات در شبکه) بود. با استفاده از روش قیود محدود، مقادیر بهینه پارتو محاسبه شدند. همچنین تأثیر قابلیت اطمینان و سبزبودن بر درصد قطعات بازیافتی و ضایعاتی در روش مجموع وزن‌دهی شده شناسایی شد. مطالعات در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته بسیار گسترده است. با این حال، توابع هدف مرتبط با محیط زیست در مطالعات پیشین به‌ندرت مشاهده می‌شود. در مطالعه انجام‌گرفته دو تابع هدف سود و سبزبودن در نظر گرفته شدند. در مدل‌های آینده، بسیاری از توابع هدف مرتبط با محیط زیست را می‌توان برای تولیدکنندگان در نظر گرفت؛ از جمله بسته‌بندی سبز، تکنولوژی پاک، گواهی‌نامه‌های محیط زیست. همچنین، با توجه به اینکه در واقعیت برخی پارامترها، مانند تقاضا و میزان برگشتی‌ها، غیر قطعی‌اند، استفاده از رویکردهای فازی و برنامه‌ریزی استوار مفیدتر است. سرانجام، مدل فوق با در نظر گرفتن چند دوره، که مسائل کنترل موجودی و جریان مواد را به همراه خواهد داشت، می‌تواند توسعه یابد.

از شکل‌های ۳ تا ۵ دو نتیجه مهم می‌توان گرفت؛ نتیجه‌گیری اول زمانی که هر یک از اشکال به صورت مجزا در نظر گرفته شوند و دومین نتیجه زمانی که روند مشاهده‌شده در هر سه نمودار توأمأ در نظر گرفته شوند به دست می‌آیند.

همچنان که انتظار می‌رود، در هر یک از نمودارها نسبت قطعات بازیافتی و ضایعاتی با افزایش تقاضا روند عکس هم دارند. برای مقادیر تقاضای کمتر از ۷۰۰۰ واحد سطح سبزبودن ۱ در مرکز مونتاژ به کار رفت؛ چون این تعداد تقاضا نمی‌تواند هزینه ثابت راه‌اندازی خط مونتاژ را بر اساس طراحی برای دمونتاژ پوشش دهد. برای مقادیر بزرگ‌تر تقاضا، حداکثر تا ظرفیت خط مونتاژ طراحی، بر اساس طراحی برای دمونتاژ، سطح سبزبودن ۲ استفاده شد. زمانی که مقدار تقاضا بیشتر از ظرفیت مرکز مونتاژ بر اساس طراحی برای دمونتاژ می‌شود هر دو سطح سبزبودن به کار رفت.

در شکل ۳، که درباره سناریوی ۱ (پایین‌ترین سطح قابلیت اطمینان و سبزبودن در نظر گرفته‌شده برای قطعات) است، نسبت قطعات ضایعاتی بیشتر از قطعات بازیافتی است. با انتخاب سناریوهای بهتر برای قطعات، مقدار قطعات بازیافتی و ضایعاتی به ترتیب بیشتر و کمتر شدند (شکل ۴). سرانجام، با انتخاب بالاترین سطح قابلیت اطمینان و سبزبودن (سناریوی ۱۶)، برای هر مقدار تقاضا جریان قطعات بازیافتی بیشتر از قطعات ضایعاتی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای مطالعه نحوه ارتباط سبزبودن و سود

REFERENCES

1. Nukala, S. and Gupta, S. M. (2007). A fuzzy mathematical programming approach for supplier selection in a closed-loop supply chain network. In Proceedings of the 2007 POMS-Dallas meeting.
2. Rogers, D. S., Tibben-Lembke, R. S., and Council, R. L. E. (1999). Going backwards: reverse logistics trends and practices, Volume 2, (Reverse Logistics Executive Council Pittsburgh, PA).
3. Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E., and Cetinkaya, S. (2007). "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model." *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol. 54, No. 8, 890-907.
4. Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., and Flapper, S. D. P. (2000). "A characterisation of logistics networks for product recovery." *Omega*, Vol. 28, No. 6, 653-666.
5. Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A., and Van Wassenhove, L. N. (1997). "Quantitative models for reverse logistics: a review." *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, No. 1, 1-17.
6. Baumgarten, H., Butz, C., Fritsch, A., and Sommer-Dittrich, T. (2003). Supply chain management and reverse logistics-integration of reverse logistics processes into supply chain management approaches. In

- Electronics and the Environment, 2003. IEEE International Symposium on. (IEEE), 79-83.
7. Schultmann, F., Zumkeller, M., and Rentz, O. (2006). "Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry." *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, No. 3, 1033-1050.
 8. Pishvaei, M. S., Farahani, R. Z., and Dullaert, W. (2010). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design." *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 6, 1100-1112.
 9. Amin, S. H. and Zhang, G. (2013). "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 6, 4165-4176.
 10. Amin, S. H. and Zhang, G. (2012). "An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach." *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 8, 6782-6791.
 11. Srivastava, S. K. (2007). "Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review." *International Journal of Management Reviews*, Vol. 9, No. 1, 53-80.
 12. Yeh, W. -C. (2005). "A hybrid heuristic algorithm for the multistage supply chain network problem." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 5-6, 675-685.
 13. Du, F. and Evans, G. W. (2008). "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service." *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 8, 2617-2634.
 14. Ko, H. J. and Evans, G. W. (2007). "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs." *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 2, 346-366.
 15. Jayaraman, V., Guide Jr, V., and Srivastava, R. (1999). "A closed-loop logistics model for remanufacturing." *Journal of The Operational Research Society*, 497-508.
 16. Krikke, H., van Harten, A., and Schuur, P. (1999). "Business case Océ: reverse logistic network re-design for copiers." *OR-Spektrum*, Vol. 21, No. 3, 381-409.
 17. Pishvaei, M. S., Kianfar, K., and Karimi, B. (2010). "Reverse logistics network design using simulated annealing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, No. 1-4, 269-281.
 18. Lu, Z. and Bostel, N. (2007). "A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities." *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 2, 299-323.
 19. Hugo, A. and Pistikopoulos, E. (2005). "Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, No. 15, 1471-1491.
 20. Pati, R. K., Vrat, P., and Kumar, P. (2008). "A goal programming model for paper recycling system." *Omega*, Vol. 36, No. 3, 405-417.
 21. Güngör, A. (2006). "Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 50, No. 1, 35-54.
 22. Marin, A. and Pelegrín, B. (1998). "The return plant location problem: Modelling and resolution." *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 2, 375-392.
 23. Jayaraman, V., Patterson, R. A., and Rolland, E. (2003). "The design of reverse distribution networks: models and solution procedures." *European Journal of Operational Research*, Vol. 150, No. 1, 128-149.
 24. Lee, D. -H. and Dong, M. (2008). "A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 3, 455-474.
 25. Pishvaei, M. S., Jolai, F., and Razmi, J. (2009). "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 28, No. 4, 107-114.
 26. Wang, H. -F. and Hsu, H. -W. (2010). "A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm." *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 2, 376-389.
 27. Davis, P. and Ray, T. (1969). "A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem." *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 16, No. 3, 331-344.
 28. Mirchandani, P. B. and Francis, R. L. (1990). Discrete location theory.

واژگان لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. End-of-life Products
2. Reverse Flow Logistics
3. Reverse Distribution
4. Reverse Supply Chain
5. Closed Loop Supply Chain
6. Dell
7. General Moors (GM)
8. Kodak

9. Xerox
 10. Recovery
 11. Reverse Logistics
 12. Collection
 13. Sorting
 14. Reprocessing
 15. Green Supply Chain Management (GrSCM)
 16. After-sales Service
 17. Corporate Image
 18. Green Image
 19. Echelon
 20. Mixed Integer Programming (MIP)
 21. Single Part
 22. Multi Product
 23. Multi Period
 24. Simulated Annealing (SA)
 25. Responsiveness
 26. Weighted Sum Method
 27. ϵ -constraint
 28. Davis and Ray
 29. Merchandise and Francis
 30. Trade-off
 31. Payoff Values
-