

ارائه یک مدل استوار چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با قیمت‌گذاری پویا تحت عدم قطعیت و به‌کارگیری الگوریتم جستجوی ممتیک با پردازش موازی

علی‌اکبر حسینی^{۱*}، سید محمدحسن حسینی^۱

۱. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه شاهرود، شاهرود

خلاصه

طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با هدف مدیریت کارای جریان محصولات برگشتی یکی از موضوعات مهم در مدیریت زنجیره تأمین است. تعیین قیمت محصولات برگشتی که خود می‌تواند تحت تأثیر عوامل متفاوتی همچون کیفیت محصولات باشد، تأثیر بسزایی بر تصمیم‌گیری طراحی شبکه زنجیره تأمین خواهد داشت. در این مقاله، یک مدل ریاضی جامع برای طراحی شبکه زنجیره تأمین چندسطحی قیمت‌گذاری با قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی تابعی از کیفیت آن‌ها و در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان جریان برگشتی محصولات ارائه شده است. عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی با رویکرد بهینه‌سازی استوار بودجه‌ای نمایش داده شده است. هدف، انتخاب تسهیلات شبکه زنجیره تأمین برای مدیریت جریان محصولات برگشتی است به نحوی که به‌صورت همزمان سود کل زنجیره و سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان در طی دوره‌های برنامه‌ریزی حداکثر شود. با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی از نوع مسائل طراحی شبکه بوده که دارای پیچیدگی‌های حل بسیار زیاد است، یک الگوریتم ممتیک مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر موازی برای یافتن جواب‌های بهینه پارتو ارائه شده است. کارایی الگوریتم ممتیک پیشنهادی با عملکرد چندین الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر مقایسه شده است. نتایج محاسباتی حاکی از تأثیر معنادار قیمت‌گذاری پویا بر عملکرد زنجیره تأمین برگشتی داشته و به‌کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار بودجه‌ای به‌خوبی می‌تواند سطوح مختلفی از ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان در طراحی زنجیره را در برابر عدم قطعیت‌های محیطی نشان دهد. همچنین نتایج نشان از کارایی معنادار فراابتکاری ترکیبی ارائه‌شده برای حل مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی چند هدفه با قیمت‌گذاری پویای تحت شرایط عدم قطعیت دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۲۶

پذیرش ۱۳۹۴/۰۷/۰۷

کلمات کلیدی:

شبکه زنجیره تأمین برگشتی

قیمت‌گذاری پویا

عدم قطعیت

الگوریتم ممتیک

همسایگی متغیر با پردازش

موازی

۱- مقدمه

رقابت‌پذیری و موفقیت آن خواهد داشت [۴، ۵]. از این‌رو نیاز است تا در طراحی زنجیره تأمین، تأثیر و تعاملات دیگر سطوح تصمیم‌گیری تا حد امکان به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شود. شبکه زنجیره تأمین را مجموعه‌ای از موجودیت‌ها با وظایف مشخص شکل می‌دهند که به‌صورت هماهنگ در راستای اهداف زنجیره فعالیت می‌نمایند. با توجه به الزامات امروز فضای کسب‌وکار، دیگر جریان تک‌سویه و معمول شبکه‌های سنتی (جریان از سوی تأمین‌کنندگان به مشتریان) به‌خوبی پاسخگوی انتظارات نبوده و نیاز است تا جریان برگشتی محصولات با هدف تأمین منافع تمامی ذینفعان زنجیره شامل تسهیلات سطوح مختلف، مشتریان، جامعه و موارد دیگر در نظر گرفته شود. جریان برگشتی از مشتریان نهایی

طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی در پی افزایش توجه به الزامات زیست‌محیطی و توسعه پایدار و همچنین مزایای اقتصادی حاصل از مدیریت جریان برگشتی، در طی دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان و مدیران زنجیره‌های تأمین قرار گرفته است [۱-۳]. طراحی شبکه زنجیره تأمین در زمره تصمیمات راهبردی بوده و در نتیجه تغییر در آن تأثیر بسزایی بر تصمیمات دیگر سطوح تاکتیکی و عملیاتی زنجیره برای یک بازه زمانی بلندمدت و در نهایت

* نویسنده مسئول، علی‌اکبر حسینی

تلفن: ۰۲۳۲۲۳۹۲۲۰۴؛ پست الکترونیکی: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

یافته‌های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل برای بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با توجه به معیارهای ارزیابی مدنظر تحت شرایط عدم قطعیت تحلیل شده و توصیه‌های مدیریتی مرتبط ارائه می‌شود. سرانجام در بخش ۵، ضمن نتیجه‌گیری از تحقیق انجام شده، زمینه‌های تحقیقاتی آتی معرفی می‌شود.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در زنجیره تأمین برگشتی، تمرکز بر مدیریت جریان برگشتی محصولات از مشتریان به سوی تسهیلات زنجیره تأمین با هدف حداقل نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل و احیای محصولات و بهره بردن از حداکثر منفعت ایجاد شده به واسطه جریان برگشتی محصولات و قطعات است [۱۲]. بررسی مدل‌های طراحی زنجیره تأمین برگشتی در حوزه‌های مختلف نظیر تولید و بازیافت ماسه [۱۳]، فرش [۱۴]، ۱۵، کاغذ [۱۶]، باتری [۱۲]، آهن و استیل [۱۷]، محصولات یک‌بار مصرف پزشکی [۱۸، ۱۹]، محصولات الکترونیکی [۵، ۲۰]، حاکی از اهمیت و کاربردپذیری بالای این مفهوم و تأثیر مهم آن بر موفقیت کسب‌وکارهای مختلف است. به‌عنوان نمونه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای شبکه بازیافت ماسه و یک الگوریتم حل ابتکاری برای این مسئله ارائه شده است [۱۳]. در مطالعه‌ای دیگر یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای شبکه لجستیک برگشتی تحت یک سیستم کشتی بر پایه تقاضای مشتریان برای محصولات احیاء شده و با هدف حداقل نمونه هزینه‌های شبکه ارائه شده است [۲۱]. علاوه بر آن، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای یک شبکه سه سطحی متعلق به تولیدکننده دستگاه‌های کپی با در نظر گرفتن هزینه‌های احیا و نگهداری موجودی و هدف حداقل نمودن کل هزینه‌های شبکه ارائه شده است [۲۲]. همزمان با مطرح شدن معیارهای ارزیابی غیرمالی تحت تأثیر افزایش اهمیت مقولاتی همچون مسئولیت‌ها اجتماعی و الزامات قانونی دربرگیرنده مسائل زیست‌محیطی در کنار معیارهای مالی متداول، شاهد توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره جهت مدیریت زنجیره‌های تأمین برگشتی مبتنی بر الزامات واقعی محیط کسب‌وکار هستیم [۲۰، ۲۳]. علاقه‌مندان برای آگاهی بیشتر در این حوزه می‌توانند به مطالعه انجام شده توسط [۲۴] مراجعه نمایند.

از جمله دیگر تصمیم‌های مهم در مدیریت زنجیره‌های تأمین برگشتی، تنظیم سیاست‌های تشویقی به‌عنوان یک اهرم برای ایجاد رغبت در مشتریان به منظور ارائه محصولات برگشتی مدنظر بوده است. مقدار قیمت تعیین شده برای خرید محصولات برگشتی از مشتریان می‌تواند تأثیر مستقیم بر نرخ برگشت محصولات داشته باشد. از این رو تولیدکنندگان می‌توانند با استفاده از این راهبرد میزان بیشتری از محصولات را جمع‌آوری نمایند [۲۵]. مطالعات بسیاری در ادبیات موضوع به مسئله طراحی مشوق‌های مناسب برای مدیریت جریان برگشتی پرداخته‌اند [۲۶-۲۸]. عوامل متعددی نظیر کیفیت و مقدار محصول برگشتی می‌تواند بر قیمت‌گذاری آن‌ها تأثیرگذار باشد که خود منجر به پیچیده‌تر شدن این فرایند

آغاز شده و با گذر از تسهیلات میانی نظیر مراکز جمع‌آوری، احیا، امحا و بازیافت حتی می‌تواند به تأمین‌کنندگان نیز ختم شود. با توجه به دوره عمر محصولات برگشتی و دلایل برگشت آن‌ها از سوی مشتریان، این محصولات می‌توانند دارای کیفیت متفاوتی باشند که خود می‌تواند بر بسیاری از تصمیمات مرتبط با مدیریت جریان برگشتی تأثیرگذار باشد. از جمله مهم‌ترین این تصمیمات، قیمت‌گذاری محصولات برگشتی است که همواره با چالش‌های فراوانی همراه بوده و تبعات متفاوتی خواهد شد. در وهله نخست، قیمت مناسب برای دریافت محصولات برگشتی از مشتریان خود می‌تواند به‌عنوان یک عامل انگیزشی جهت تحویل محصولات توسط مشتریان تلقی شود. از سوی دیگر، این قیمت می‌بایست پوشش‌دهنده ارزش نهفته و قابل بهره‌برداری در محصول برگشتی باشد. از این رو قیمت‌گذاری مناسب محصولات تأثیر مهمی بر مزیت رقابتی زنجیره تأمین برگشتی خواهد داشت. نتایج برخی از تحقیقات حاکی از کاهش ۴۰ الی ۶۰ درصدی هزینه‌های تولید واحد محصولات در صورت مدیریت جریان برگشتی و استفاده از محصولات و قطعات بازیافتی است [۶]. در نتیجه، روش‌ها و راهبردهای متنوعی برای قیمت‌گذاری جریان برگشتی توسط محققان این حوزه ارائه شده است [۷-۹]. از سوی دیگر، علاوه بر معیارهای مالی همچون حداکثر نمودن سود کل شبکه زنجیره تأمین برگشتی، معیارهای دیگری نیز تحت تأثیر ارتقای سطح انتظارات مشتریان مطرح شده است که نیاز است تا در طراحی شبکه در نظر گرفته شود [۱۰].

در این مقاله، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با در نظر گرفتن چندین لایه متشکل از انواع تسهیلات مناسب برای مدیریت جریان برگشتی چندین محصول با لیست مواد متفاوت در طی چندین دوره زمانی بررسی شده است. این شبکه برای مدیریت جریان برگشتی طیف متنوعی از محصولات مناسب است. قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی نیز تحت تأثیر کیفیت آن‌ها به‌عنوان یک عامل انگیزشی برای جمع‌آوری محصولات در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، عدم قطعیت میزان برگشت محصولات با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای برای نمایش سطوح مختلف محافظه‌کاری تصمیم‌گیرندگان در دنیای واقعی نمایش داده شده است. در نهایت، با توجه به ماهیت مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین که از نوع مسائل با پیچیدگی‌های حل بسیار زیاد است [۱۱]، یک الگوریتم فراابتکاری ممتیک با یک ترکیب جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر موازی ارائه شده است که کارایی آن با دو الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر مقایسه شده است.

ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است: ابتدا در بخش ۲، مبانی نظری و پیشینه پژوهش تشریح می‌شود. در بخش ۳ به تشریح دقیق مسئله پرداخته و مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. سپس الگوریتم حل پیشنهادی توسعه داده می‌شود. در بخش ۴، داده‌ها و

باشند. از این‌رو نیاز است تا این معیارها همراه با دیگر معیارهای غیرمالی مناسب، در مدیریت زنجیره تأمین برگشتی مدنظر قرار گیرند. در نتیجه می‌بایست نقش قیمت‌گذاری محصولات برگشتی همزمان با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی و تحت شرایط عدم قطعیت فضای تصمیم‌گیری در تصمیم‌سازی پیرامون طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به‌خوبی در نظر گرفته شود در حالی است که علی‌رغم اهمیت این مقوله، تنها در تعداد محدودی از مقالات در ادبیات موضوع ابعاد مختلف این مسئله مورد بررسی قرار گرفته شده است [۷]. در جدول ۱ نیز می‌توان جایگاه مدل ارائه‌شده در این مقاله را با توجه به مدل‌های مشابه ارائه‌شده در ادبیات موضوع مشاهده کرد. در این مقاله، با هدف افزایش دامنه کاربردپذیری مدل ارائه‌شده توسط [۵] در دنیای واقعی، توسعه‌های ذیل تحت عنوان نوآوری‌های اساسی در نظر گرفته شده است:

- توسعه مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی عدم قطعیت فضای تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی برای چندین دوره زمانی، برنامه‌ریزی برای چندین محصول با لیست مواد مختلف و امکان نگهداری موجودی در تسهیلات جمع‌آوری/ بازتوزیع و احیا؛

- در نظر گرفتن دو تابع هدف حداکثرسازی سود کل زنجیره و پاسخگویی به تقاضای مشتریان به‌صورت توأمان در فرآیند طراحی شبکه؛

- در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های کیفیت و میزان محصولات برگشتی و به‌ترتیب تأثیرات آن‌ها بر هزینه‌های احیا و مدیریت جریان برگشتی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار بودجه‌ای و در نظر گرفتن طیف وسیعی از سطوح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده؛
- ارائه یک الگوریتم ممتیک کارا با یک ترکیب جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی برای یافتن نقاط بهینه پارتو.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- تعریف مسئله

در این مقاله، طراحی شبکه جامع برای زنجیره تأمین برگشتی چندسطحی با در نظر گرفتن چندین محصول و چندین دوره زمانی ارائه‌شده که ساختار آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. محصولات تحویل داده‌شده به مشتریان ممکن است به دلایل مختلف نظیر فرسوده‌شدن و ایرادات عملکردی برگشت داده شود و در نتیجه دارای سطوح کیفیت مختلف خواهند بود. میزان محصولات برگشتی به دلیل وابستگی آن به عوامل متعدد و نامعین، همواره با عدم قطعیت فراوان همراه که بر برنامه‌ریزی ظرفیت تسهیلات زنجیره به‌منظور مدیریت جریان برگشتی تأثیرگذار خواهد بود. در این مطالعه، عدم قطعیت میزان جریان برگشتی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی استوار بازه‌ای بر پایه مفهوم بودجه عدم قطعیت در نظر گرفته‌شده است [۳۵]. با استفاده از این تکنیک به‌خوبی می‌توان به

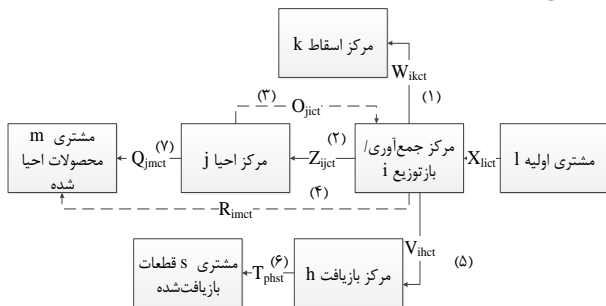
خواهد شد. برای نمونه، کیفیت و نرخ برگشت محصولات می‌تواند همراه با عدم قطعیت فراوان باشد و این عدم قطعیت نیز به قیمت‌گذاری تسری خواهد یافت. نخستین بار قیمت‌گذاری محصولات برگشتی با توجه به کیفیت متفاوت این محصولات در نظر گرفته شده است [۲۷]. در مطالعه‌ای دیگر تأثیر سیاست تشویقی قیمت‌گذاری محصولات برگشتی (قیمت‌دارای توزیع یکنواخت و تحویل بر عهده مشتری) در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با هدف حداکثرسازی سود کل شبکه در نظر گرفته شده است [۲۶]. عدم قطعیت در میزان تمایل مشتریان برای ارائه محصولات برگشتی به تولیدکننده در یک مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با استفاده از رویکرد فازی نیز لحاظ شده است. مسئله قیمت‌گذاری از آن حیث که می‌تواند بر تعیین راهبردهای رقابتی یک شرکت تأثیرگذار باشد، نقش مهمی را در طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تصمیماتی همچون مکان‌یابی و انتخاب تسهیلات در سطوح مختلف ایفا خواهد نمود. برای نمونه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای تعیین مکان مناسب برای تسهیلات و قیمت‌گذاری محصولات برگشتی با هدف دستیابی به حداکثر سود ممکن در یک زنجیره تأمین دوسطحی ارائه شده است [۶، ۲۶]. در مطالعه‌ای دیگر یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای اتخاذ توأم تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات در یک زنجیره تأمین سه سطحی و قیمت‌گذاری چندین محصول در طی چندین دوره زمانی ارائه شده است [۷].

با توجه به اینکه بیشتر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین از نوع مسائل با پیچیدگی حل بالا است [۲]، توسعه روش‌های ابتکاری و فرآیند قدرتمند برای حل این نوع از مسائل لازم است؛ به همین دلیل، تاکنون روش‌های فرآیندکاری متنوعی نظیر الگوریتم جستجوی ممنوعه [۵]، ژنتیک [۱۱، ۲۹-۳۲]، ممتیک [۱۹، ۳۳] و جستجوی همسایگی متغیر [۲۰] برای حل این مسائل ارائه شده است. بهبود کیفیت جواب در کنار کاهش زمان حل ازجمله دغدغه‌های محققان برای حل مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین در ابعاد بزرگ بوده است. از این‌رو شاهد توسعه کاربرد الگوریتم‌های حل با پردازش موازی برای حل مسائل پیچیده طراحی شبکه زنجیره تأمین در ابعاد بزرگ هستیم [۲۳].

با توجه به بررسی ادبیات موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی می‌توان اهمیت یکپارچه نمودن تصمیم طراحی شبکه زنجیره تأمین را با تصمیمات دیگر سطوح مرتبط همچون قیمت‌گذاری محصولات دریافت نمود. این در حالی است که قیمت‌گذاری محصولات برگشتی خود فرایندی پیچیده بوده و به دلیل ماهیت فرایند آن، همراه با عدم قطعیت‌های بسیاری خواهد بود. از سوی دیگر، معیارهای مالی که خود بسیار تحت تأثیر فرایند قیمت‌گذاری محصولات برگشتی هستند، دیگر به‌تنهایی نمی‌توانند شاخص مناسبی جهت ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین برگشتی

ثانویه نامیده می‌شوند. محصولات برگشتی ارسال شده به مراکز اسقاط نیز با توجه به سطح کیفیت پایین آن‌ها، امحا می‌شوند. ظرفیت فعالیت هر یک از تسهیلات تولیدی، احیا، اسقاط و بازیافت زنجیره محدود است. همچنین ظرفیت نگهداری موجودی در تسهیلات جمع‌آوری/باز توزیع، احیا و بازیافت در هر دوره زمانی محدود است.

در این مدل، هدف پیکربندی شبکه زنجیره (انتخاب تسهیلات) و مدیریت جریان محصولات برگشتی با توجه به قیمت گذاری پویا و عدم قطعیت میزان برگشت محصولات به نحوی است که سود خالص زنجیره و میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان ثانویه به صورت توأمان حداکثر شود. راه‌اندازی هر یک از تسهیلات دارای هزینه ثابت است. از سوی دیگر، ارتقای میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان نیازمند راه‌اندازی تعداد بیشتری از تسهیلات جمع‌آوری/باز توزیع و احیا است. این اقدام می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های ثابت و متغیر زنجیره برگشتی شود که کاهش سود زنجیره را به همراه خواهد داشت. در نتیجه مابین اهداف حداکثر نمودن سودآوری و سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان یک تعارض وجود دارد. هزینه‌های مدیریت جریان محصولات شامل هزینه‌های تولید، تأمین، نگهداری، احیا، بازیافت، اسقاط، باز توزیع و حمل‌ونقل نیز در نظر گرفته شده است. هر یک از محصولات احیاشده، اسقاطی و قطعات بازیافتی نیز با یک قیمت مشخص به فروش خواهند رسید.



شکل (۱): ساختار شبکه زنجیره تأمین برگشتی هفت لایه

شرایط دنیای واقعی هنگامی که احتمال انحراف مقادیر تمامی پارامترها به صورت همزمان از مقادیر اسمی خود کم باشد، به خوبی پاسخ داد. برای این منظور، تعداد پارامترهایی که مقدار آن‌ها دارای انحراف نسبت به مقدار اسمی خود است، با یک حد از پیش تعیین شده مشخص خواهد شد که در اصطلاح بودجه عدم قطعیت نامیده می‌شود که مقادیر آن نشان‌دهنده درجه محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده است. حداقل و حداکثر بودجه عدم قطعیت به ترتیب بیان‌گر حداقل و حداکثر ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده است. تعداد k سطح کیفیت متمایز فرض می‌شود که در آن سطح یک و k به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان کیفیت را به خود اختصاص خواهند داد. هر مشتری در صورتی محصول برگشتی خود با سطح کیفیت k را به یک مرکز جمع‌آوری ارائه می‌دهد که قیمت پیشنهادشده توسط آن مرکز حداقل برابر یا بیشتر از قیمت مورد انتظار مشتری (EP_k) باشد. به عبارت دیگر، جریان بالقوه محصولات برگشتی که همراه با عدم قطعیت است، در صورتی تبدیل به جریان بالفعل می‌شود که قیمت پیشنهادشده برای آن در محدوده مجاز مدنظر مشتری باشد. تابع توزیع قیمت مورد انتظار مشتری با یک تابع توزیع یکنواخت در یک بازه مشخص $[P_k^{\min}, P_k^{\max}]$ قابل تقریب است. استفاده از تابع توزیع یکنواخت برای قیمت علاوه بر تسهیل نمودن انجام محاسبات، این امکان را فراهم می‌سازد تا طیف متنوعی از انواع رفتارهای مشتریان به خوبی در نظر گرفته شود [۷]. محصولات برگشتی پس از انتقال به مراکز جمع‌آوری با توجه به سطح کیفیت به مراکز احیا، بازیافت و اسقاط ارسال می‌شوند. محصولات برگشتی در مراکز بازیافت، ابتدا دمونتاژ شده و سپس قطعات مناسب آن‌ها تفکیک و پس از آماده‌سازی به بازار قطعات یدکی عرضه می‌شود. در مراکز احیا نیز با انجام برخی از فرایندهای مشخص (نظیر تعمیر و تعویض قطعات) تحت تأثیر کیفیت محصول برگشتی، محصول احیاشده با کیفیتی برابر با کالای نو وارد بازار شده و به مشتریان تحویل داده می‌شود. مشتریان محصولات احیاشده و قطعات یدکی بازیافتی، مشتریان

جدول (۱): مقایسه مدل پیشنهادشده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی در مقایسه با مدل‌های مشابه ارائه‌شده در ادبیات موضوع

منبع	تعداد سطوح	تک/چند محصولی	تک/چند دورهای	محدودیت‌ها			توابع هدف			عدم قطعیت	قیمت‌گذاری محصولات	پارامتر غیرقطعی
				ظرفیت	بست مواد	محصول خاص	هزینه	بازگشت	زمان			
[۵]	۷	چند	یک	*	-	-	هزینه	-	-	-	-	
[۱۸]	۴	چند	چند	*	*	فسادپذیری	سود	استوار	-	-	تقاضا	
[۱۹]	۴	چند	چند	*	*	فسادپذیری	سود	استوار	-	-	تقاضا	
[۲۰]	۵	چند	چند	*	-	-	هزینه	-	-	-	-	
[۲۳]	۶	چند	چند	*	-	-	هزینه	-	-	-	-	
[۴]	۶	تک	تک	*	-	-	هزینه	-	-	-	-	
[۳۴]	۶	تک	چند	*	-	-	هزینه	فازی	-	-	تقاضا، نرخ برگشت و هزینه	
[۹]	۳	تک	تک	*	-	-	هزینه	-	-	-	-	
[۷]	۵	چند	چند	*	-	-	هزینه	-	*	*	-	
**	۷	چند	چند	*	*	-	سود	استوار	*	*	نرخ برگشت و هزینه	

** مدل ارائه‌شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی چندهدفه با قیمت‌گذاری پویا تحت عدم قطعیت در این مقاله

۳-۲- مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با قیمت‌گذاری پویا و تحت عدم قطعیت میزان جریان برگشتی ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا نمادگذاری مسئله و سپس مدل‌سازی ریاضی آن ارائه خواهد شد. مجموعه اندیس‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی ریاضی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول (۲): اندیس‌های به کار گرفته‌شده در مدل ریاضی پیشنهادی

اندیس	تعریف مجموعه	اندیس	تعریف مجموعه
L	مشتریان اولیه	K	مراکز بالقوه اسقاط
M	مشتریان ثانویه	H	مراکز بالقوه بازیافت
S	مشتریان قطعات بازیافتی	C	محصولات
I	مراکز بالقوه جمع‌آوری/باز توزیع	T	دوره‌های برنامه‌ریزی
J	مراکز بالقوه احیا	P	قطعات محصولات

۳-۲-۱- پارامترها و متغیرها

پارامترهای به کار گرفته‌شده در مدل ریاضی عبارت است از:

x_{ic} : تعداد محصول c برگشتی از مشتری اولیه i ،
 d_c و dI_c : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین محصول برگشتی c قابل اسقاط،
 e_c و eI_c : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین محصول برگشتی c قابل احیا،
 cf_{lic} : هزینه حمل واحد محصول برگشتی c از مشتری اولیه i به مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i ،
 cS_{ijc} : هزینه حمل واحد محصول قابل احیا c از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به مرکز احیا j ،
 cI_{ikc} : هزینه حمل واحد محصول قابل اسقاط c از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به مرکز اسقاط k ،
 cI_{ihc} : هزینه حمل واحد محصول قابل بازیافت c از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به مرکز بازیافت h ،
 rcI_{cij} و rcI_{ci} : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین هزینه احیای واحد محصول c در مرکز i ،
 cq_{jmc} و cu_{imc} : به ترتیب هزینه‌های حمل محصول احیاشده c از مرکز احیا j به مشتری m و از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به مشتری m ،
 b_j, g_{hj}, θ_k : به ترتیب هزینه ثابت راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری/باز توزیع i ، بازیافت h ، احیا j ، اسقاط k ،
 cm_{phs} : هزینه حمل قطعه بازیافتی p از مرکز بازیافت h به مشتری s ،
 car_h و cat_k, cas_j, caf_i : به ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری/باز توزیع i ، احیا j ، اسقاط k و بازیافت h ،
 bo_{mcp} : تعداد قطعه p به کاررفته در تولید واحد محصول c ،

ps_{ps} و pm_{cm} : به ترتیب هزینه جریمه برای عدم ارضای تقاضای مشتری s برای یک قطعه بازیافتی p و عدم ارضای تقاضای مشتری m برای یک واحد از محصولات احیاشده c ،

F_0, F_1 و F_2 : به ترتیب بودجه‌های عدم قطعیت میزان برگشت محصولات قابل اسقاط، احیا و بازیافت،

bud_{cj} : بودجه عدم قطعیت هزینه احیا محصول برگشتی c در مرکز احیا j به دلیل عدم قطعیت در میزان کیفیت آن،

sd_{mct} و md_{spt} : به ترتیب تقاضاهای مشتری m برای محصول احیاشده c و تقاضای مشتری s برای قطعه بازیافتی p در دوره t ،

P_{ckt}^{\max} و P_{ckt}^{\min} : به ترتیب حداکثر و حداقل قیمت مورد انتظار مشتری برای ارائه یک واحد محصول c با کیفیت k در دوره t ،

EP_{ckt} : قیمت مورد انتظار مشتری برای تحویل یک واحد محصول برگشتی c با سطح کیفیت k در دوره t ،

L : سطوح قیمت ارائه‌شده برای تحویل محصولات برگشتی،

spq_{mc} ، spt_{ps} و spw_{kc} : به ترتیب قیمت‌های فروش محصول احیاشده c برای مشتری m ، قطعه بازیافتی p برای مشتری s و محصول c برای مرکز اسقاط k ،

متغیرهای به کاررفته در مدل ریاضی عبارت است از:

Z_{ijct} : تعداد محصول c قابل احیا حمل شده از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به احیا j در دوره t ،

W_{ikct} : تعداد محصول c قابل اسقاط حمل شده از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به اسقاط k در دوره t ،

V_{ihct} : تعداد محصول c قابل بازیافت حمل شده از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به بازیافت h در دوره t ،

T_{phst} : تعداد قطعه p بازیافتی حمل شده از مرکز بازیافت h به مشتری s در دوره t ،

O_{jict} و Q_{jmet} : به ترتیب تعداد محصول c احیاشده حمل شده از مرکز احیای j به مشتری m در دوره t و از مرکز احیای j به مشتری m در دوره t ،

R_{imct} : تعداد محصول c احیاشده حمل شده از مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i به مشتری m در دوره t ،

HRC_{jct} : موجودی محصول c در مرکز احیا j در پایان دوره t ،

$HCRC_{ict}$: موجودی محصول c در مرکز جمع‌آوری/باز توزیع i در پایان دوره t ،

TR_{pst} : تقاضای قطعه p بازیافتی پاسخ داده نشده برای مشتری s ،

TF_{mct} : تقاضای محصول c پاسخ داده نشده برای مشتری m ،

Rp_{0t} ، Rpf_{1t} و Rps_{2t} (و Rps_{1t}) و Rpf_{2t} : به ترتیب متغیرهای مکمل اول برای مدل قرین استوار به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، احیا و بازیافت،

Z_0 ، Zf_1 و Zs_2 (و Zs_1): به ترتیب متغیرهای مکمل دوم برای مدل قرین استوار به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، احیا و بازیافت،

$$\begin{aligned} \text{Max } Obj_1 = & \sum_{j,t,c,t} S p o_{mc} \times (Q_{jmct} + R_{imct}) - \sum_{i,t} f_i \times Y_{it} \\ & + \sum_{h,s,c,t} S p t_{sc} \times T_{hst} + \sum_{i,k,c,t} S p w_{kc} \times W_{ikct} - \sum_{h,t} g_h \times U_{ht} \\ & - \sum_{j,t} b_j \times P R_{jt} - \sum_{k,t} \theta_k \times D_{kt} - \sum_{l,i,t} c f_{li} \times r_l \times X_{lit} \\ & - \sum_{i,j,c,t} c s_{ijc} \times Z_{ijct} - \sum_{i,k,c,t} c t_{ikc} \times W_{ikct} - \sum_{i,h,c,t} c r_{ihc} \times V_{ihct} \\ & - \sum_{i,j,c,t} c s_{ijc} \times O_{jict} - \sum_{j,m,c,t} c q_{jmc} \times Q_{jmct} \\ & - \sum_{i,m,c,t} c u_{imc} \times R_{imct} - \sum_{hst} c m_{hst} \times T_{hst} \\ & - \sum_{s,t} p s_s \times T R_{st} - \sum_{c,j} P r o_{cj} - \sum_{m,c,t} p m_{cm} \times T F_{mct} \\ & - \sum_{c,j} Z r o_{cj} \times b u d_{cj} + \sum_{j,i,m,c,t} r c_{cj} \times (Q_{jmct} + O_{jict}) \\ & - \sum_{k,c,l,t} p_{kct}^{\min} \times \left[\sum_{i=1}^{|L|} \left(\frac{i-1}{|L|-1} \right) \times \delta_{kci} \right] \times r_{lc} \\ & + \sum_{k,c,l,t} (p_{kct}^{\max} - p_{kct}^{\min}) \times \left[\sum_{i=1}^{|L|} \left(\frac{i-1}{|L|-1} \right)^2 \times \delta_{kci} \right] \times r_{lc} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Max } Obj_2 = \sum_{h,s,t} \frac{T_{hst}}{m d_s} + \sum_{m,c,t} \frac{\sum_j Q_{jmct} + \sum_i R_{imct}}{s d_{mc}} \quad (2)$$

$$\sum_i X_{lit} = 1 \quad \forall l, t \quad (3)$$

$$-Z r o_{cj} - P r o_{cj} \geq r c_{1cj} \times (Q_{jmct} + O_{jict}) \quad (4)$$

$$\forall c, j, m, i, t$$

$$-(Q_{jmct} + O_{jict}) \leq X r o_{cj} \leq (Q_{jmct} + O_{jict}) \quad (5)$$

$$\forall j, m, c, i, t$$

$$-\sum_k W_{ikct} + d \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Z_0 \times \Gamma_0 + \sum_l R p_{0l} = 0 \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$Z_0 + R p_{0l} \geq d 1 \times Y 0_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (7)$$

$$-Y 0_{lit} \leq X_{lit} \leq Y 0_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (8)$$

$$-\sum_h V_{ihct} + e \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Z f_1 \Gamma_1 + \sum_l R p f_{1l} \leq 0 \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$Z f_1 + R p f_{1l} \geq e 1 \times Y f 1_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (10)$$

$$-Y f 1_{lit} \leq X_{lit} \leq Y f 1_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (11)$$

$$+\sum_h V_{ihct} - e \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Z s_1 \Gamma_1 + \sum_l R p s_{1l} \leq 0 \quad \forall i, t \quad (12)$$

$$Z s_1 + R p s_{1l} \geq e 1 \times Y s 1_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (13)$$

$$-Y s 1_{lit} \leq X_{lit} \leq Y s 1_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (14)$$

$$-\sum_j Z_{ijct} + (1-e-d) \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} \quad (15)$$

$$+ Z f_2 \times \Gamma_2 + \sum_l R p f_{2l} \leq 0 \quad \forall i, t$$

$$Z f_2 + R p f_{2l} \geq (1-d1-e1) \times Y f 2_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (16)$$

$$-Y f 2_{lit} \leq X_{lit} \leq Y f 2_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (17)$$

$$\sum_j Z_{ijct} - (1-e-d) \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} \quad (18)$$

$$+ Z s_2 \times \Gamma_2 + \sum_l R p s_{2l} \leq 0 \quad \forall i, t$$

$$Z s_2 + R p s_{2l} \geq (1-d1-e1) \times Y s 2_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (19)$$

$$-Y s 2_{lit} \leq X_{lit} \leq Y s 2_{lit} \quad \forall l, i, t \quad (20)$$

$$\sum_j Q_{jmct} + \sum_i R_{imct} + T F_{mct} \geq s d_{mct} \quad \forall m, c, t \quad (21)$$

$$\sum_h T_{phst} + T R_{pst} \geq m d_{spt} \quad \forall s, p, t \quad (22)$$

$$\sum_{j,c} Z_{ijct} + \sum_{m,c} R_{imct} \leq c a f_i \times Y_{it} \quad \forall i, t \quad (23)$$

$Z r o_{cj}$ و $P r o_{cj}$: به ترتیب متغیرهای مکمل اول، دوم و سوم برای مدل قرین استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت هزینه احیا محصول برگشتی c در مرکز احیا j تحت تأثیر عدم قطعیت کیفیت

$Y s 1_{lit}$ و $Y f 1_{lit}$: به ترتیب متغیرهای مکمل سوم برای مدل قرین استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، احیا و بازیافت،

P_{kct} : قیمت پیشنهاد شده به مشتریان برای تحویل یک واحد از محصول برگشتی c با سطح کیفیت k در دوره t ،

δ_{kcl} : اگر سطح قیمت k به محصول برگشتی c با سطح کیفیت l تخصیص داده شود؛ ۰ در غیر این صورت،

$C R_{kct}$: درصدی از محصول برگشتی c که از سوی مشتریان با سطح کیفیت k در دوره t جمع آوری می شود،

Y_{it} : اگر مرکز جمع آوری/باز توزیع i در دوره t باز شود؛ ۰ در غیر این صورت ۰،

U_{ht} : اگر مرکز بازیافت h در دوره t باز شود؛ ۰ در غیر این صورت،

D_{kt} : اگر مرکز اسقاط k در دوره t باز شود؛ ۰ در غیر این صورت،

$P R_{jt}$: اگر مرکز احیای j در دوره t باز شود؛ ۰ در غیر این صورت،

X_{lit} : اگر مشتری اولیه l به مرکز جمع آوری/باز توزیع i تخصیص داده شود؛ ۰ در غیر این صورت.

۳-۲-۲- تابع هدف و محدودیت ها

مدل پیشنهادی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی شامل دو تابع هدف (روابط ۱ و ۲) و محدودیت های ۳ الی ۲۵ به صورت ذیل است. تابع هدف ۱ نیز به دنبال حداکثر نمودن سود کل شبکه زنجیره تأمین برگشتی با توجه به درآمد حاصل از فروش محصولات احیاشده، قطعات بازیافتی و محصولات اسقاطی و هزینه های صرف شده برای حمل و نقل، نگهداری و مدیریت فرایندهای جریان محصولات برگشتی و راه اندازی تسهیلات است. هزینه خرید محصولات برگشتی تحت تأثیر قیمت گذاری پویای آن نیز در نظر گرفته شده است. تابع هدف ۲ به دنبال حداکثر نمودن پاسخ گویی به تقاضای مشتریان ثانویه است.

محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲، ارضای حداکثر تقاضای ممکن برای مشتریان محصولات احیاشده و قطعات اسقاط‌شده قابل‌ارائه توسط شبکه زنجیره تأمین برگشتی را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۳ الی ۲۶، به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت محدود هر یک از تسهیلات جمع‌آوری/بازتوزیع، احیا، اسقاط و بازیافت شبکه زنجیره تأمین برگشتی برای انجام فرایندهای تخصیص داده‌شده به آن است. محدودیت‌های ۲۷ الی ۲۹، تعادلات جریان‌های ورودی و خروجی (نمایش داده‌شده در شکل ۱) را به ترتیب در تسهیلات جمع‌آوری/بازتوزیع، احیا و اسقاط نشان می‌دهد. امکان نگهداری موجودی برای دوره‌های متوالی در تسهیلات احیا و جمع‌آوری/بازتوزیع جهت پاسخگویی به تقاضا در هر دوره نیز در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های ۳۰ و ۳۱ نیز به‌منظور خطی سازی روابط غیرخطی قیمت‌گذاری انتظاری محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است. محدودیت ۳۰، در نظر گرفتن تنها یک سطح قیمت برای هر محصول برگشتی با سطح کیفیت مشخص را تضمین می‌نماید. در محدودیت ۳۱ نیز میزان برگشت محصولات با توجه به سطح قیمت انتخاب‌شده تعیین می‌شود. محدودیت ۳۲ نیز نوسان قیمت‌های مورد انتظار مشتریان را در طی دوره‌های زمانی متوالی تحت کنترل قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که با تعیین حداقل مقدار نوسان (یعنی مقدار صفر)، شاهد اتخاذ استراتژی قیمت‌گذاری ایستا نسبت به پویا خواهیم بود. توابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی قیمت مورد انتظار مشتریان با توجه به ماهیت تابع توزیع یکنواخت در روابط ۳۳ و ۳۴ نشان داده شده است.

$$f(EP_{kct}) = \frac{1}{p_{ckt}^{\max} - p_{ckt}^{\min}} \quad (33)$$

$$F(EP_{kct}) = \frac{EP_k - p_k^{\min}}{p_{ckt}^{\max} - p_{ckt}^{\min}} \quad (34)$$

با توجه به آن که در صورتی مشتری کالای خود را با سطح کیفیت مشخص به مراکز جمع‌آوری ارائه خواهد نمود که قیمت پیشنهادی از سوی آن‌ها (P_k) بزرگ‌تر یا مساوی قیمت انتظاری (EP_k) باشد، احتمال (نرخ) جمع‌آوری محصولات برگشتی با سطح کیفیت k (CR_k) در رابطه ۳۵ نمایش داده شده است. رابطه غیرخطی ۳۳ را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود. استفاده از این رابطه به شکل اولیه در مدل ریاضی می‌تواند منجر به ایجاد عبارات غیرخطی شود. از این‌رو با تبدیل قیمت انتظاری به تعداد $|L|$ نقطه منفصل، از مواجهه با مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی اجتناب می‌شود (شکل ۳ مشاهده شود).

$$CR_{kct} = p(P_{kct} - EP_{kct} \geq 0) = \min \left\{ 1, \frac{\max \{0, P_{kct} - p_{ckt}^{\min}\}}{p_{ckt}^{\max} - p_{ckt}^{\min}} \right\} \\ = \begin{cases} 0 & P_{kct} < p_k^{\min} \\ \frac{P_{kct} - p_{ckt}^{\min}}{p_{ckt}^{\max} - p_{ckt}^{\min}} & p_k^{\min} < P_{kct} < p_{ckt}^{\max} \\ 1 & p_{ckt}^{\max} < P_{kct} \end{cases} \quad (35)$$

$$\sum_{m,c} Q_{jmct} + \sum_{i,c} O_{jict} \leq cas_j \times PR_{jt} \quad \forall j,t \quad (24)$$

$$\sum_{i,c} W_{ikct} \leq cat_k \times D_{kt} \quad \forall k,t \quad (25)$$

$$\sum_{p,s} T_{phst} \leq car_h \times U_{ht} \quad \forall h,t \quad (26)$$

$$\sum_m Q_{jmct} + \sum_i O_{jict} + HRC_{jct} = \sum_j Z_{ijc,t-1} \quad \forall j,c,t \quad (27)$$

$$\sum_m R_{jmct} + \sum_k W_{ikct} + \sum_j Z_{ijct} + HCRC_{ict} \\ = \sum_j O_{jict} + \sum_l X_{lit} = \sum_j O_{jict} + \sum_l X_{lit} \quad \forall i,c,t \quad (28)$$

$$T_{phst} = \sum_i bom_{cp} \times V_{ihct} \quad \forall c,t,h \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^{|L|} \delta_{kci} = 1 \quad (30)$$

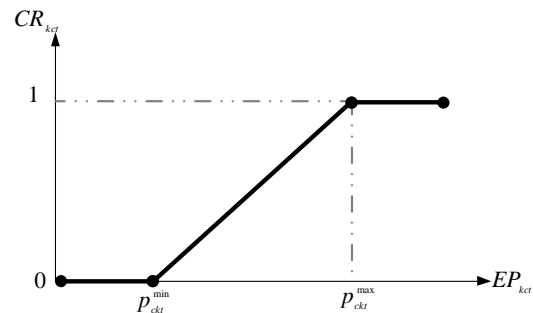
$$\sum_{i=1}^{|L|} \left(\frac{i-1}{|L|-1} \right) \times \delta_{kci} = CR_{kct} \quad (31)$$

$$|EP_{kct} - EP_{kc,t-1}| \leq \bar{P}_{kc} \quad \forall k,c \quad (32)$$

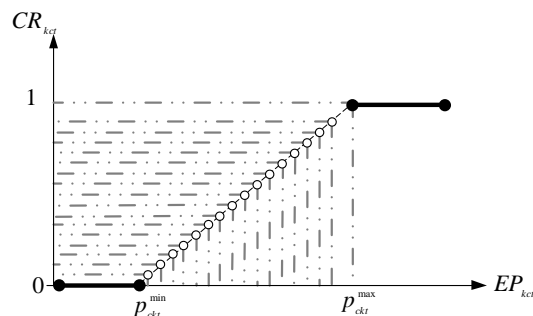
در مدل ریاضی فوق، محدودیت ۳، الزام تخصیص تنها یک مرکز جمع‌آوری/بازتوزیع به هر مشتری اولیه را برای دریافت محصولات برگشتی نشان می‌دهد. محدودیت‌های خطی ۴-۵، با توجه به مدل قرین استوار مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای (ارائه شده در [۳۵]) برای لحاظ نمودن عدم قطعیت هزینه احیا تحت تأثیر عدم قطعیت کیفیت محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است. در این حالت، پارامتر غیرقطعی نظیر \hat{a}_{ij} که دارای یک توزیع متقارن با میانگین مقدار اسمی a_{ij} است می‌تواند در بازه $[a_{ij} - \hat{\alpha}_{ij}, a_{ij} + \hat{\alpha}_{ij}]$ نوسان داشته باشد. برای هر i یک پارامتر Γ_i تعریف می‌شود. که لزوماً دارای عدد صحیح نبوده و مقدار آن در بازه $[0, |J_i|]$ تعیین می‌شود. نقش پارامتر Γ_i تنظیم میزان استواری جواب ارائه شده با در نظر گرفتن سطح محافظه کاری دلخواه است. به صورت ذاتی، تغییر تمامی پارامترها a_{ij} ($j \in J_i$) به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نیست. مدل مذکور در برابر حداکثر تغییر $[\Gamma_i]$ عدد از پارامترها و تنها یک پارامتر به میزان $[\Gamma_i - |\Gamma_i|] \hat{\alpha}_{ij}$ تغییر خواهد نمود. به عبارت دیگر نظیر شرایط حاکم بر دنیای واقعی، فرض شده است که تنها مجموعه‌ای از پارامترها تحت عدم قطعیت قرار گرفته و بر جواب تأثیر می‌گذارند. در صورت تحقق این شرایط، جواب به دست آمده قطعاً شدنی خواهد بود. این در حالی است که اگر در شرایط واقعی به تعداد بیش از $[\Gamma_i]$ پارامتر نیز تغییر نمایند، جواب حاصل با احتمال بسیار بالایی شدنی خواهد بود. علاقه‌مندان برای مطالعه بیشتر پیرامون مدل برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای و نحوه نمایش مدل قرین قطعی می‌توانند به مطالعه انجام شده توسط برتسیماس و سیم [۳۵] مراجعه نمایند. محدودیت‌های ۶، ۹ و ۱۲، میزان محصول برگشتی اختصاص یافته به مراکز اسقاط، بازیافت و احیا را به ترتیب نشان می‌دهد. محدودیت‌های خطی (۷-۸)، (۱۰-۱۱) و (۱۳-۲۰) نیز با توجه به مدل قرین استوار مبتنی بر برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای (ارائه شده توسط [۳۵]) برای لحاظ نمودن عدم قطعیت بودجه‌ای میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، بازیافت و احیا در نظر گرفته شده است.

جستجوی محلی است که از آن می‌توان به‌عنوان یک نقطه‌ضعف الگوریتم ژنتیک یاد نمود [۳۶]. در این راستا، الگوریتم ممیتیک با هدف تقویت قدرت جستجوی محلی در الگوریتم ژنتیک ارائه شده است که مورد استقبال محققان نیز قرار گرفته است [۳۷]. الگوریتم ممیتیک در هر مرحله از تکرارهای الگوریتم ژنتیک، از یک الگوریتم جستجوی همسایگی بهره می‌برد [۳۷].

در این الگوریتم حل فراابتکاری ارائه‌شده، جستجوی فضای اصلی جواب (تعیین پیکربندی شبکه زنجیره تأمین با تعیین متغیرهای باینری) توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II انجام می‌شود. بهبود جواب‌های موجه پارتو به‌دست‌آمده در هر مرحله از تکرار الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II نیز توسط الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی انجام می‌شود. در الگوریتم جستجوی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی، تعداد r هسته پردازش جهت جستجوی مستقل فضای جواب با استفاده از r الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر استفاده می‌شود. علاوه بر آن، یک هسته پردازش دیگر که به‌عنوان هسته پردازش مرکزی نیز می‌توان از آن یاد نمود، برای هماهنگی و کنترل فرایند جستجو به کار گرفته‌شده است. بهترین جواب هر هسته پردازش در پایان هر تکرار به هسته مرکزی ارسال شده و بهترین جواب از میان r جواب دریافت‌شده، انتخاب و به‌عنوان جواب آغازین در تکرار بعد به r هسته پردازش ارسال می‌شود. این روند تا دستیابی به شرایط توقف (تعداد تکرار مشخص) ادامه خواهد یافت. در گام نخست الگوریتم جستجوی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی ابتدا ساختارهای همسایگی و پارامترهای آغازین (نظیر تعداد تکرار الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر در هر هسته پردازش، تعداد هسته‌های پردازش، تعداد تکرار الگوریتم جستجوی همسایگی) تعیین می‌شوند. سپس یک جواب اولیه برای استفاده توسط هر هسته پردازش ایجاد و با توجه به در نظر گرفتن چند معیار ارزیابی به‌صورت توأم، تابع هدف وزین محاسبه می‌شود. سپس هر یک از هسته‌های پردازشگر با استفاده از جواب اولیه تعیین‌شده، برای ایجاد بهبود در جواب‌ها با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر تلاش می‌نمایند. در پایان عملیات هر هسته، بهترین جواب به هسته مرکزی ارسال می‌شود. سپس بهترین جواب با توجه به ارزیابی تابع هدف وزین، انتخاب و به‌عنوان جواب اولیه در جستجوی اولیه هسته‌های پردازشگر در تکرار بعدی استفاده می‌شود. گام‌های اجرای الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر در هر یک از هسته‌های پردازشگر در شکل ۴ نمایش داده شده است. ۹ ساختارهای همسایگی به کار گرفته‌شده در جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر عبارت‌اند از [۲۰]: ساختار ۱) یک بخش از کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده و سپس مکان دو ژن انتخاب‌شده به‌صورت تصادفی در آن با یکدیگر تعویض می‌شوند، ساختار ۲) برای یک تعداد تکرار مشخص، ساختار همسایگی شماره ۱ تکرار می‌شود، ساختار ۳) یک بخش از کروموزوم به‌صورت



شکل (۲): رفتار تابع پیوسته CR_{kct} بر حسب EP_{kct}



شکل (۳): رفتار تابع خطی سازی شده CR_k بر حسب EP_k

با توجه به شکل ۲ می‌توان قیمت انتظاری محصولات برگشتی را برحسب تعداد $|L|$ نقطه منفصل با استفاده از روابط ۳۶ و ۳۷ محاسبه نمود. همچنین می‌توان نرخ برگشت محصولات را نیز با استفاده از رابطه ۳۸ محاسبه نمود [۷].

$$EP_{kct} = p_{ckt}^{\min} + (p_{ckt}^{\max} - p_{ckt}^{\min}) \times \left[\sum_{i=1}^{|L|} \left(\frac{i-1}{|L|-1} \right) \times \delta_{kci} \right] \quad (36)$$

$$-p_{ckt}^{\min} \times \delta_{kc1} + \sum_{i=1}^{|L|} \delta_{kci} = 1 \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^{|L|} \left(\frac{i-1}{|L|-1} \right) \times \delta_{kci} = CR_{kct} \quad (38)$$

۳-۳- روش حل پیشنهادی

در این بخش، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید با توجه به ماهیت مسئله طراحی شبکه که از نوع مسائل با پیچیدگی حل بالا بوده، ارائه شده است. الگوریتم فراابتکاری ممیتیک ارائه‌شده مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی است. نتایج مطالعات انجام‌شده در ادبیات موضوع پیرامون استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل مسائل طراحی شبکه با پیچیدگی حل بسیار بالا نظیر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین یک و چندهدفه در ابعاد بزرگ حاکی از کارایی این الگوریتم و برتری نسبی آن نسبت به دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی به کار گرفته شده است [۱۰، ۱۹]. علی‌رغم توانمندی‌های معمول الگوریتم تکاملی ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، این الگوریتم دارای توان محدود در قدرت بخشیدن به فرایند

معطوف به پیکربندی (طراحی) شبکه است. از این رو، با تعیین پیکربندی شبکه تحت تأثیر مشخص شدن مقدار متغیرهای باینری، مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده پس از کدگشایی کروموزوم جواب، تبدیل به یک زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی خواهد شد که با استفاده از نرم‌افزار لیندوگلوبال گمز حل می‌شود. لازم به ذکر است که مسئله مذکور با لحاظ نمودن تابع وزنی حاصل از دو تابع هدف مورد بررسی، تک‌هدفه خواهد بود. مجموعه جواب‌های پارتو ایجاد شده در هر تکرار با استفاده از الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی بهبود داده می‌شود. در این الگوریتم با بهره‌گیری از یک رویکرد نظام‌مند، از بین مجموعه نه ساختار همسایگی در نظر گرفته شده برای جستجوی همسایگی در هر تکرار، برترین آن‌ها را بر اساس سابقه عملکرد آن انتخاب نموده و بر روی جواب‌های مورد بررسی، پیاده‌سازی می‌نماید. مبنای سنجش عملکرد هر ساختار همسایگی که بر شانس انتخاب آن در تکرار بعد با توجه به استفاده از ابزار چرخه رولت، تأثیرگذار خواهد بود عبارت است از تعداد جواب‌های ناچیزه ایجاد شده بر اثر اعمال یک ساختار همسایگی مشخص در تکرارهای قبلی. فرمول به‌روزرسانی وزن‌های هر ساختار همسایگی در رابطه ۳۹ نمایش داده شده است. علاقه‌مندان برای آشنایی بیشتر با ۹ ساختارهای همسایگی مذکور می‌توانند به تحقیق انجام شده توسط [۱۹] مراجعه نمایند.

$$w_i = \frac{random_i}{(random_1 + random_2)} \quad (39)$$

$$random_i \sim U(0,1), i=1,2$$

ورودی‌ها: مجموعه ساختارهای همسایگی $N_i (i=1, \dots, 9)$ برای فرایند جستجوی همسایگی، بهترین جواب شناسایی شده (مبتنی بر ارزیابی تابع هدف وزین) توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب Π ، احتمال آغازین برای انتخاب ساختارهای همسایگی $P=(1, \dots, 1)$ ، و معیار توقف. خروجی: بهترین جواب شناسایی شده / مجموعه جواب پارتو بهترین جواب تکرار حاضر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب $\Pi \leftarrow x$
 $m \leftarrow 1$ و $n \leftarrow 1$
 تکرار

انتخاب یک ساختار همسایگی با استفاده از چرخه رولت.
 ایجاد یک جواب جدید با اعمال ساختار همسایگی انتخاب شده.
 پیاده‌سازی جستجوی همسایگی با استفاده از الگوریتم تپه‌نورد و انتخاب ساختار همسایگی اول.
 ارزیابی توابع هدف جواب ایجاد شده و محاسبه تابع هدف وزین.
 در صورت ایجاد بهبود در جواب، بهترین جواب یافت شده جایگزین جواب اولیه شود.

$$m \leftarrow m+1$$

تا زمان حصول شرط توقف (m برابر با تعداد تکرار الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر).

به‌روزرسانی وزن‌های ساختارهای همسایگی

$$n \leftarrow n+1$$

تا زمان حصول شرط توقف (n برابر با اندازه بخش)

شکل (۴): شبه کد الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر به

کار گرفته شده در یک هسته پردازشگر

تصادفی انتخاب شده، مکان مجموعه‌ای از ژن‌ها به صورت تصادفی به مکان دیگری در همان بخش منتقل می‌شوند، ساختار (۴) انتخاب یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی و سپس انتقال یک ژن انتخاب شده به صورت تصادفی از آن بخش به مکان مابین دو ژن دیگر انتخاب شده به صورت تصادفی در همان بخش، ساختار (۵) یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده و سپس مجموعه‌ای از ژن‌ها انتخاب شده به صورت تصادفی با یک ترتیب کاملاً تصادفی در همان بخش چیده می‌شوند، ساختار (۶) یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی شده و سپس مجموعه‌ای از ژن‌ها انتخاب شده به صورت تصادفی با ترتیب معکوس در همان بخش چیده می‌شوند، ساختار (۷) یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده مجموعه‌ای از ژن‌های انتخاب شده به صورت تصادفی با ترتیب معکوس در مکان دیگری در همان بخش چیده می‌شوند، ساختار (۸) یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده و دو ژن از آن بخش نیز به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. سپس ژن‌های انتخاب شده به صورت تصادفی در همان بخش به اندازه یک واحد به سمت راست یا چپ منتقل می‌گردند، ساختار (۹) نخست یک بخش از کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس در آن بخش یک ژن به صورت تصادفی انتخاب شده و مکان آن به صورت تصادفی در همان بخش با مکان ژن سمت راست یا چپ خود تعویض می‌شود.

به منظور بهبود در عمق بخشیدن به فرایند جستجوی محلی در الگوریتم جستجوی متغیر با پردازش موازی ارائه شده، از الگوریتم جستجوی ابتکاری تپه نورد استفاده شده است. ساختار الگوریتم ممیتیک پیشنهاد شده نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. هر کروموزوم جواب در این الگوریتم با استفاده از یک ارائه باینری دو بعدی تشکیل شده که اندازه آن با توجه به مجموعه متغیرهای باینری مسئله تحقیق عبارت است از (مجموع تعداد مراکز جمع‌آوری/باز توزیع (بخش ۱)، احیا (بخش ۲)، اسقاط (بخش ۳)، بازیافت (بخش ۴) و حاصل ضرب تعداد مراکز جمع‌آوری/باز توزیع در مشتریان اولیه (بخش ۵)) × (تعداد دوره‌های زمانی). ژن‌های تشکیل دهنده این کروموزوم جواب در بردارنده تنها مقدار صفر یا یک است که وضعیت متغیر باینری مربوطه همچون راه‌اندازی (مقدار ۱) یا عدم راه‌اندازی (مقدار ۰) یک تسهیل زنجیره تأمین را نشان می‌دهد (شکل ۶).

برازش مقدار معیار ارزیابی هر کروموزوم با استفاده از روش مجموع وزنی با لحاظ نمودن مجموع وزن‌ها برابر با یک و تعیین مقادیر وزن‌ها به صورت تصادفی در هر مرحله از تکرار الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود (فرمول ۳۳ مشاهده شود) [۱۰، ۲۰]. با استفاده از روش مجموع وزین، شانس جستجوی تمامی جواب‌های پارتو در فضای جواب با یکدیگر برابر خواهد بود [۱۰، ۲۰].

همان‌طور که پیش‌از این نیز بیان شد، جستجوی فضای اصلی جواب مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب Π

استفاده از روش آماری طراحی آزمایش‌های تاگوچی و به صورت آفلاین تعیین شده است [۱۹].

جدول (۳): مسائل نمونه اصلی [۵]

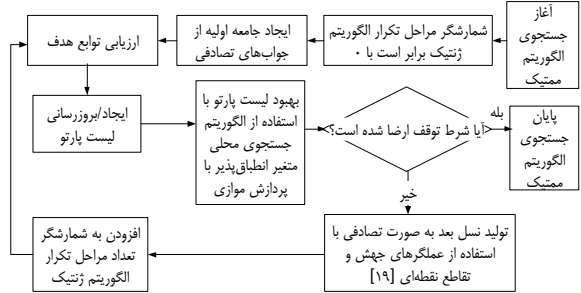
مسئله نمونه	مشتريان ثانويه	مشتريان ثانويه	مشتريان اوليه	مراکز اسقاط	مراکز بازیافت	مراکز احيا	جمع آوری/بازتوزیر مراکز
۱	۱۵	۱۵	۱۵	۴	۳	۳	۱۰
۲	۴۰	۴۰	۴۰	۵	۴	۴	۳۰
۳	۷۰	۷۰	۷۰	۶	۵	۵	۵۰
۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷	۶	۶	۸۰
۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۸	۷	۷	۱۰۰

۴-۱- ارزیابی کارایی روش حل پیشنهاد شده

در این بخش، کارایی الگوریتم حل فراابتکاری پیشنهاد شده در مقایسه با سه الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر برای حل مسئله مدنظر و با توجه به سه معیار ارزیابی متداول در ادبیات موضوع و پس از ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم حل، بررسی شده است. نخست، کیفیت جواب‌های به دست آمده از الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده در مقایسه با سه الگوریتم‌های فراابتکاری مشابه، بر اساس دو معیار ارزیابی متداول ارائه شده در ادبیات موضوع و پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم حل، بررسی شده است [۱۰، ۲۰، ۲۳، ۳۸]. معیارهای ارزیابی به کار گرفته شده عبارت‌اند از: زمان جستجو/پردازش (معیار ۱)، متوسط تعداد جواب‌های پارتو به دست آمده در هر مرحله از تکرار الگوریتم (معیار ۲) و متوسط نرخ تعداد جواب‌های پارتو به دست آمده توسط یک الگوریتم به نحوی که توسط جواب‌های پارتو دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی مغلوب نشوند (معیار ۳). معیارهای دوم و سوم مرتبط با ارزیابی کیفیت جواب‌های پارتو است. تمامی مقایسات انجام شده مابین عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی با توجه به سه معیار در نظر گرفته شده توسط آزمون ناپارامتری من-وینتنی در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شده است [۱۹]. مقدار بحرانی آماره این آزمون با توجه به اندازه نمونه ۲۵ (تعداد مسائل نمونه) برابر با ۲۰۱ خواهد بود [۳۹].

جدول (۴): حدود پارامترهای مدل پیشنهاد شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی [۵]

پارامتر	حدود	پارامتر	حدود	پارامتر	حدود
cf_{ic}	[۸-۱۶]	$cafi$	[۷۰-۱۲۰]	b_j	[۴۰۰-۵۰۰]
cq_{jmc}	[۳-۸]	cas_j	(تعداد مرکز احیا)/(مجموع تقاضا) $\times [1/5-2/2]$	θ_k	[۲۰۰-۳۰۰]
cm_{phs}	[۳-۸]	cat_k	(تعداد مرکز اسقاط)/(مجموع تقاضا) $\times [0/4-0/7]$	pm_{em}	[۱۲-۱۴]
cs_{jic}	[۵-۱۲]	car_h	(تعداد مرکز بازیافت)/(مجموع تقاضا) $\times [0/4-0/7]$	ps_{ps}	[۹-۱۰]
ct_{ikc}	[۳-۸]	rc_{ci}	[۶-۸]	spw_{ke}	[۵-۶]
cr_{inc}	[۳-۸]	I_0	۱	spq_{mc}	[۱۱-۱۳]
cu_{jmc}	[۸-۱۶]	I_1	۱	spl_{ps}	[۸-۹]
r_{ic}	[۱۰-۵۰]	I_2	۱	md_{spt}	[۵۰-۱۰۰]
d_c	[۰/۲-۰/۳۵]	bud_{ej}	$10 \times$ تعداد مراکز احیا	sd_{mct}	[۱۰-۴۰]
e_c	[۰/۴-۰/۵]	f_i	[۵۰۰۰-۱۰۰۰۰]	g_h	[۱۰۰۰-۲۰۰۰]



شکل (۵): ساختار الگوریتم ممتیک بر پایه الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق پذیر با پردازش موازی

بخش ۱	بخش ۲	بخش ۳	بخش ۴	بخش ۵
۱	۰	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۱	۰
۰	۰	۱	۰	۱
۰	۰	۰	۱	۰

شکل (۶): ساختار کروموزوم ۲ بعدی جواب

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش، مجموعه‌ای از نتایج داده‌ها و یافته‌های پژوهش انجام شده در قالب نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل ریاضی (مجموعه روابط) با استفاده از الگوریتم‌های حل پیشنهاد شده و تحلیل حساسیت نتایج ارائه شده است. هدف از تحلیل حساسیت، بررسی اثر نکات مهمی همچون قیمت‌گذاری پویا و عدم قطعیت جریان برگشتی بر عملکرد و طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی است. پنج مسئله نمونه اصلی و محدود تنظیم شده برای پارامترهای انتخاب شده برای تحلیل نتایج از ادبیات موضوع و نزدیک‌ترین مسئله ارائه شده توسط [۵] انتخاب شده است (جدول شماره ۳ و ۴ ملاحظه شود). با توجه به لحاظ نمودن بودجه عدم قطعیت در مدل ارائه شده در این مقاله، مسائل اصلی یاد شده با در نظر گرفتن پنج سطح متفاوت از کل بودجه عدم قطعیت، توسعه داده شده و در نهایت ۲۵ مسئله نمونه در نظر گرفته شده است. سطوح متفاوت بودجه عدم قطعیت عبارت است از ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ که حداقل و حداکثر مقدار این طیف به ترتیب نمایشگر حداقل و حداکثر مقدار ریسک‌گریزی است. مقدار تمامی پارامترهای الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده (نمایش داده شده در جدول ۵) نیز با

جدول (۵): مقادیر تنظیم‌شده برای پارامترهای الگوریتم ممتیک پیشنهادشده با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی (نمایش مقادیر انتخاب‌شده از میان سه سطح موردبررسی با خط زیرین)

پارامتر	سطوح آزمایش	پارامتر	سطوح آزمایش
تکرار الگوریتم ژنتیک	(۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰)	اندازه جمعیت	پارامتر
تعداد هسته‌های پردازشگر	(۶، ۵، ۴)	تکرار الگوریتم تپ‌نورد	سطوح آزمایش
تکرار الگوریتم جستجوی متغیر همسایگی انطباق‌پذیر	(۱۲، ۱۰، ۸)		(۱۰۰، ۷۵، ۵۰)
احتمال جهش (۱ منهای احتمال تقاطع)	(۰/۰۵، ۰/۰۳)		(۵، ۴، ۳)

زمان و کیفیت حل نسبت به دیگر الگوریتم‌های مشابه فراابتکاری موردبررسی، به‌خوبی برتری خود را نشان دهد.

مقایسه عملکرد الگوریتم ممتیک ارائه‌شده با حل حاصل از نرم‌افزار گمز، نسخه تک هدفه مدل پیشنهادشده تنها در نظر گرفتن تابع هدف اول (Obj_1) و تبدیل تابع هدف دوم (Obj_2) به یک محدودیت انجام شده است. مقدار بهینه تابع هدف دوم متعلق به هر جواب به دست آمده توسط الگوریتم فراابتکاری به‌عنوان مقدار سمت راست محدودیت جدید ایجاد شده در نظر گرفته می‌شود. مدل مذکور با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده و جواب حاصل برای تابع هدف اول با جواب نظیر به‌دست‌آمده از حل مدل دو هدفه توسط الگوریتم فراابتکاری مقایسه خواهد شد. زمان حل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار گمز برابر است با مجموع زمان‌های حل مدل‌های تک هدفه مرتبط با تمامی جواب‌های پارتو در اختیار (N عدد). کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده نیز با توجه به معیار ارزیابی (۴۰) بررسی شده است [۳۳]. نتایج مقایسه نیز در جدول ۷ نمایش داده شده است.

$$\%error = \sum_{i=1}^N \frac{Obj_1^i (Meta-heuristic) - Obj_1^i (GAMS)}{Obj_1^i (GAMS)} \times \frac{100}{N} \quad (40)$$

نتایج جدول ۵ حاکی معنادار بودن خطای محاسبه‌شده مابین تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم حل فراابتکاری و نرم‌افزار بهینه‌سازی برای مسائل با ساین متوسط و بزرگ است. از سوی دیگر، رشد زمان پردازش توسط نرم‌افزار بیشتر از الگوریتم فراابتکاری بوده و در مواجهه با مسائل با ساین بزرگ، نرم‌افزار حتی پس از سپری شدن یک زمان بسیار طولانی در مقایسه با زمان حل الگوریتم فراابتکاری، نمی‌تواند بهینه‌بودن جواب یافت‌شده را تضمین نماید.

۴-۲- نتایج محاسباتی و توصیه‌های مدیریتی

در این بخش، کارایی مدل چندهدفه ارائه‌شده در مواجهه با رویکرد قیمت‌گذاری متغیر کالاهای برگشتی تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و با لحاظ نمودن سطوح متفاوتی از ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده، بررسی شده است.

در شکل ۷ ماهیت قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی محصول ۱ از مشتری ۱ در مسئله نمونه بزرگ ۲۵ در طی دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی نمایش داده شده است. در این شکل به‌وضوح می‌توان تغییر در قیمت محصولات برگشتی تحت تأثیر کیفیت آن‌ها را در طی هر دوره زمانی مشاهده نمود. در شکل ۷ می‌توان عملکرد زنجیره را از منظر دو معیار سودآوری و سطح پاسخ‌گویی تحت دو شرایط قیمت‌گذاری ای‌ستا و پویا برای مسائل نمونه بزرگ ۲۱

نتایج مقایسه عملکرد و کارایی الگوریتم ممتیک پیشنهادشده با الگوریتم فراابتکاری مشابه را می‌توان در جدول ۶ مشاهده نمود. هدف از انتخاب این سه الگوریتم، فراهم‌نمودن امکان بررسی سه جنبه از الگوریتم ممتیک پیشنهادشده شامل اعمال جستجوی محلی، انتخاب ساختار همسایگی مبتنی بر سوابق و انجام پردازش موازی بوده است. برتری الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر نسبت به الگوریتم عمومی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب ۲ حاکی از اثربخشی و تفاوت معنادار آماری اعمال الگوریتم جستجوی محلی در بهبود کیفیت جواب‌ها دارد. اگرچه این بهبود در کیفیت جواب ب عمق بخشیدن به فرایند جستجو همراه با افزایش زمان همراه خواهد بود، اما این برتری الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II تحت تأثیر کیفیت پایین جواب آن قرار خواهد گرفت. از سوی دیگر، شاهد برتری الگوریتم ممتیک با استفاده از رویکرد سیستماتیک در انتخاب ساختارهای همسایگی (جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر) نسبت به الگوریتم ممتیک با انتخاب ساختارهای همسایگی به‌صورت عمومی (بر اساس توالی ثابت تعیین‌شده برای نه ساختار همسایگی) از منظر دو معیار زمان پردازش و کیفیت جواب به‌صورت توأم هستیم. این برتری نیز بر اثربخشی معنادار آماری انتخاب هوشمندانه ساختارهای همسایگی و کاهش تعداد مراحل تکرار تحت تأثیر انتخاب ساختارهای همسایگی با احتمال متغیر (تابع عملکرد گذشته) تأکید دارد. علی‌رغم برتری معنادار آماری کیفیت جواب ارائه‌شده توسط الگوریتم ممتیک مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر، زمان حل ارائه‌شده توسط این الگوریتم به میزان معناداری بیشتر از زمان حل الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II است. به‌منظور بهبود در کیفیت و زمان حل الگوریتم ممتیک یادشده، از استراتژی پردازش موازی (توسط چند هسته پردازشگر) در اجرای الگوریتم جستجوی محلی استفاده شده است. این اقدام امکان جستجوی دامنه وسیع‌تری از فضای جواب را به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌سازد. نتایج ممتیک با پردازش موازی حکایت بر کاهش معنادار زمان حل (جستجو) نسبت به عدم اجرای دارد. این بهبود به حدی است که بر برتری الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب III از منظر معیار زمان حل نیز فائق خواهد آمد. از سوی دیگر، برتری نسبتی الگوریتم حل موازی پردازش موازی برای حل مسائل نمونه بزرگ را نیز می‌توان مشاهده نمود. در پایان می‌توان جمع‌بندی نمود که الگوریتم ممتیک پیشنهادشده با پردازش موازی توانسته است از نظر دو معیار

درصد که فقط برای یکبار باز شده و تا انتهای دوره برنامه ریزی نیز باز نگه داشته شده اند (معیار ب). این وضعیت پویای زنجیره را می توان به وضوح در برابر رفتاری کاملاً ایستا تحت تأثیر شرایط مواجهه با قطعیت کامل در جدول ۸ مشاهده نمود. به عبارت دیگر، تعبیر این پویایی معادل است با افزایش تعداد تسهیلات با وضعیت باز و بسته شده در طی دوره های برنامه ریزی و کاهش تعداد تسهیلات باز نگه داشته شده تا انتهای دوره ی برنامه ریزی پس از گشایش در حالت عدم قطعیت کامل نسبت به قطعیت کامل.

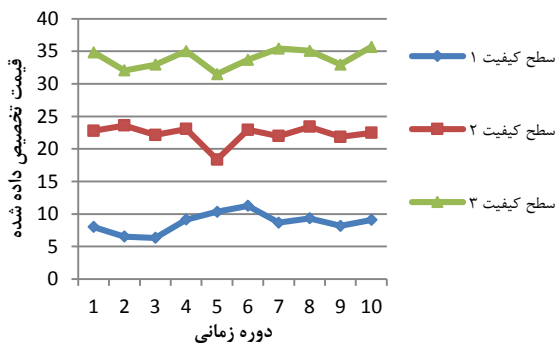
در پایان با توجه به تحلیل نتایج کسب شده از انجام آزمایش ها و تحلیل حساسیت جواب ها، می توان مجموعه ای از توصیه های مدیریتی ذیل را برای فعالان حوزه مدیریت زنجیره تأمین ارائه نمود:

- اتخاذ رویکرد قیمت گذاری پویا تحت تأثیر کیفیت محصولات برگشتی به نحو معناداری خواهد توانست به عنوان اهرم تشویقی جهت دریافت محصولات برگشتی عمل نماید.

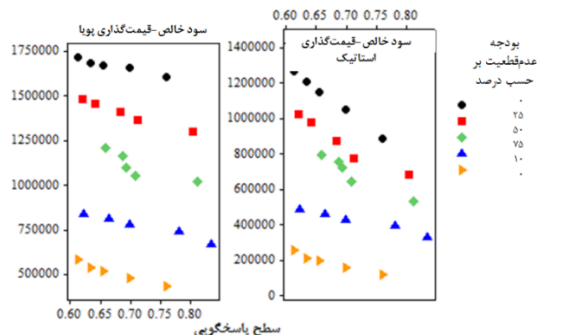
- سود کل زنجیره تأمین با اتخاذ رویکرد قیمت گذاری پویا نسبت به شرایط ایستا به نحو معناداری بهبود خواهد یافت.

- رویکرد بهینه سازی استوار بودجه ای با لحاظ نمودن سطوح مختلفی از عدم قطعیت به خوبی می تواند حالات متفاوتی از ریسک پذیری تصمیم گیرندگان در نظر بگیرد.

- با افزایش عدم قطعیت در فضای تصمیم گیری، ساختار زنجیره تأمین طراحی شده با رویکرد بهینه سازی استوار، رفتار محافظه کارانه در پیش می گیرد که نشانه های آن را می توان در کاهش سطح سود، کاهش هزینه های نگهداری و افزایش پویایی ساختار شبکه زنجیره تأمین مشاهده نمود.



شکل (۷): قیمت پویای تخصیص داده شده در طی دوره های زمانی



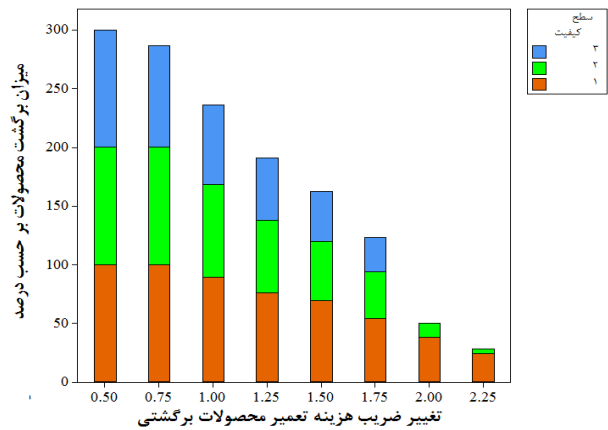
شکل (۸): سود کل زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط

قیمت گذاری پویا و استاتیک محصولات برگشتی متأثر از کیفیت

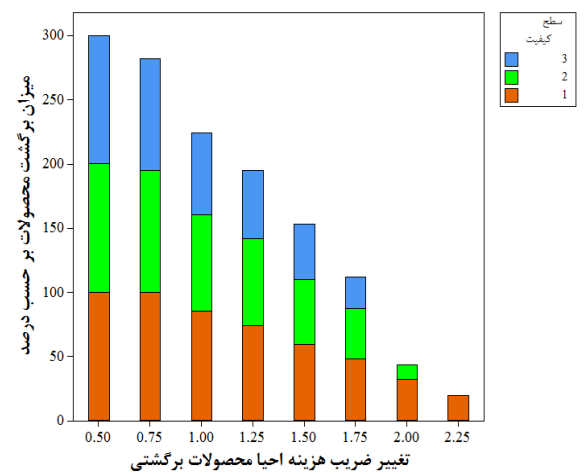
الی ۲۵ مشاهده نمود. همان طور که ملاحظه می شود، اتخاذ قیمت گذاری پویا به عنوان یک اهرم تشویقی برای تحویل کالاهای برگشتی توسط مشتریان سبب گشته تا زنجیره با سطوح بالاتری از سودآوری نسبت به حالت ایستا همراه باشد. این در حالی است که تأثیر قیمت گذاری پویا (تابعی از کیفیت محصولات برگشتی) بر میزان محصولات برگشتی را نیز می توان در اشکال ۹ و ۱۰ مشاهده نمود. این تحلیل حساسیت با توجه به اثرگذاری هزینه های تعمیر و احیا محصولات برگشتی بر روی قیمت گذاری آن ها توسط زنجیره تأمین انجام شده است. برای این منظور، یک طیف از ضرایب ثابت در هزینه های تعمیر و احیا اثر داده شده است. افزایش هزینه های مدیریت جریان برگشتی سبب می شود تا مزیت اقتصادی آن کاهش یافته و زنجیره نتواند با قیمت گذاری مناسب محصولات برگشتی، از یک اهرم تشویقی مناسب استفاده نماید. عدم برگشت محصولات در این اشکال ۹ و ۱۰ حاکی از عدم تمایل مشتریان برای تحویل محصولات تحت تأثیر قیمت های پیشنهادی است که یک زنجیره با جریان تک سویه روبه جلو را به همراه خواهد داشت. این در حالی است که در محدوده هایی از قیمت گذاری، مشتریان تمایل به ارائه محصولات برگشتی خود دارند. از سوی دیگر، دریافت محصولات برگشتی با سطح بالای کیفیت به دلیل نیاز به هزینه اندک جهت استفاده از پتانسیل بالقوه آن ها، برای زنجیره بسیار مطلوب خواهد بود. تأثیر مواجهه با سطوح مختلف عدم قطعیت میزان و کیفیت محصولات برگشتی (نمایش با مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت) بر عملکرد زنجیره را نیز می توان در شکل ۸ مشاهده نمود. نتایج حاکی از کاهش سود کل زنجیره همزمان با افزایش بودجه عدم قطعیت است. به عبارت دیگر، زنجیره تأمین مورد بررسی، در برابر افزایش عدم قطعیت یک ساختار محافظه کارانه را به دلیل افزایش در هزینه های مواجهه با عدم قطعیت در پیش خواهد گرفت. کاهش در بودجه عدم قطعیت نیز افزایش سود کل زنجیره را به همراه دارد که لزوماً نیز همراه با افزایش در سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان نخواهد بود. همزمان با افزایش بودجه عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی، شاهد کاهش در هزینه های نگهداری محصولات در مراکز نگهداری هستیم که بر رفتار چابک ساختار ارائه شده برای شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت اشاره دارد (شکل ۱۱). بدین معنا که با افزایش عدم قطعیت تقاضا، موجودی کمتری در مراکز نگهداری جهت پاسخگویی به تقاضا نگهداری شده و زنجیره عملکردی نزدیک به تولید به هنگام را نمایش می دهد. این در حالی است که پویایی ساختار (پیکربندی) زنجیره از نظر تغییر در وضعیت انتخاب تسهیلات زنجیره همزمان با افزایش عدم قطعیت نیز به نحو معناداری افزایش خواهد یافت. معیارهای در نظر گرفته شده برای سنجش پویایی ساختار زنجیره در این مطالعه عبارت است از سهمی از تسهیلات زنجیره (بر حسب درصد) که در طی دوره برنامه ریزی مدنظر (تعداد ۱۰ دوره زمانی) حداقل برای یکبار باز و بسته شده اند (معیار الف) و همچنین سهمی از تسهیلات بر حسب

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

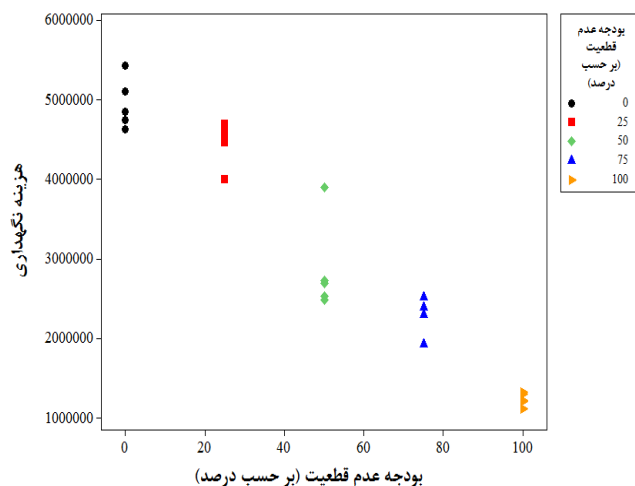
در طی سال‌های اخیر، مدیریت زنجیره‌های تأمین برگشتی تحت تأثیر الزامات قانونی و مزیت‌های اقتصادی بالقوه آن بسیار مورد توجه محققان واقع شده است. پیچیدگی ذاتی طراحی شبکه زنجیره‌های تأمین برگشتی همگام با افزایش پیچیدگی‌های فضای تصمیم‌گیری به شدت در حال افزایش است. در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تری از تصمیمات در سطوح دیگر مرتبط با طراحی استراتژیک زنجیره، مطرح‌شدن معیارهای ارزیابی غیرمالی در کنار دیگر معیارهای مرسوم مالی و لحاظ نمودن عدم قطعیت فضای برنامه‌ریزی با هدف افزایش کارایی و اثربخشی تصمیمات تنها نمونه‌هایی از پیچیدگی‌های طراحی زنجیره‌های تأمین برگشتی است. از این رو در این مقاله با هدف ارائه یک مدل جامع و درعین حال کاربردی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی، مدل ریاضی ارائه شده توسط [۵] در سال ۲۰۱۴ از چندین جنبه کلیدی توسعه یافته است که عبارت‌اند از: لحاظ نمودن قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی تحت تأثیر کیفیت محصولات به‌عنوان یک اهرم تشویقی، در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای غیرمالی سطح پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری در کنار معیار حداکثر نمودن سودآوری در طی چندین دوره برنامه‌ریزی، امکان نگهداری موجودی در برخی از تسهیلات زنجیره و در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان و کیفیت محصولات برگشتی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای. با توجه به پیچیدگی‌های زیاد حل مدل ارائه شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با قیمت‌گذاری پویای محصولات، یک روش حل فراابتکاری با استفاده از یک ترکیب کارا و جدید برای حل این مسئله چند هدفه مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه شده است. جستجوی فضای اصلی جواب در این الگوریتم ترکیبی توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II انجام شده و بهبود کیفیت جواب‌های پارتو یافت شده و عمق بخشیدن به فرایند جستجوی همسایگی در هر مرحله توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر با پردازش موازی انجام می‌شود. نتایج سنجش کارایی الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ارائه شده در مقایسه با چندین الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر حاکی از کارایی و برتری معنادار آن در بهبود کیفیت جواب و زمان جستجو با استفاده از یک ساختار انطباق‌پذیر برای انتخاب ساختارهای همسایگی و همچنین استفاده از پردازش موازی دارد. نتایج حل مدل استوار ارائه شده نیز نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری پویای محصولات برگشتی تأثیر معناداری بر سودآوری زنجیره از طریق تشویق مشتریان به ارائه محصولات برگشتی خود دارد. از سوی دیگر، با افزایش هزینه‌های تأثیرگذار بر این قیمت‌گذاری همچون تعمیر و احیای محصولات برگشتی، شاهد تغییر معنادار در میزان برگشت محصولات و تک‌سویه شدن جریان در زنجیره به دلیل غیراقتصادی شدن مدیریت جریان برگشتی خواهیم بود. از سوی دیگر، با مواجهه با سطوح بالاتری از عدم قطعیت، شاهد اتخاذ یک ساختار کاملاً محافظه‌کارانه توسط زنجیره



شکل (۹): تأثیر تغییر ضریب هزینه تعمیر محصولات برگشتی بر میزان برگشتی محصولات



شکل (۱۰): تأثیر تغییر ضریب هزینه احیا محصولات برگشتی بر میزان برگشتی محصولات



شکل (۱۱): رفتار هزینه نگهداری در برابر سطوح مختلف عدم قطعیت

درعین حال مورد نیاز شرکت های فعال در این حوزه معرفی نمود. قیمت گذاری محصولات برگشتی نیز می تواند همراه با توزیع های آماری متفاوتی داشته باشد که بررسی تأثیر آن بر نرخ برگشت محصولات مطلوب خواهد بود. همچنین، مدیریت یکپارچه نمودن تصمیمات استراتژیک طراحی زنجیره با دیگر تصمیمات مرتبط همچون مدیریت موجودی قطعات و برنامه ریزی حمل و نقل محصولات می تواند افزایش اثربخشی تصمیمات طراحی شبکه را به همراه داشته باشد و به عنوان یک موضوع تحقیقاتی دیگر معرفی شود.

خواهیم بود. کاهش معنادار سود زنجیره و همچنین هزینه های نگهداری محصولات همزمان با افزایش بودجه عدم قطعیت خود گواهی بر این رویکرد محافظه کارانه است. در این راستا، پویایی ساختار زنجیره نیز همزمان با افزایش بودجه عدم قطعیت در راستای افزایش انعطاف پذیری به تغییرات محیطی افزایش خواهد یافت. به طور کلی، رویکرد برنامه ریزی استوار بودجه ای می تواند ابزار مناسبی جهت نمایش سطوح مختلفی از محافظه کاری/ریسک گریزی تصمیم گیرندگان باشد. در پایان می توان لحاظ نمودن تأثیر قیمت گذاری محصولات بر مزیت رقابتی زنجیره تأمین برگشتی را با توجه به شدت یافتن فضای رقابتی، به عنوان یکی از زمینه های تحقیقات آتی و

جدول (۶): مقایسه کارایی الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر انطباق پذیر با پردازش

موازی													مستلله نمونه اصلی	مستلله نمونه
ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب II			الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر			الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر انطباق پذیر			الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر انطباق پذیر با پردازش موازی			عده قطعات (درصد)		
معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱		سهم بوده	
۰/۵۴۶۷	۸/۵۹	۲۹/۴۶	۰/۵۶۴۸	۸/۸۶	۴۵/۵۹	۰/۶۳۰۹	۱۰/۴۶	۴۱/۷۶	۰/۶۳۹۰	۱۰/۵۹	۲۴/۰۹	۰	۱	
۰/۵۳۱۷	۷/۵۲	۳۳/۴۲	۰/۵۵۵۸	۸/۶۷	۴۸/۰۱	۰/۶۲۳۲	۹/۲۵	۴۴/۰۷	۰/۶۳۱۲	۹/۳۷	۲۶/۰۴	۲۵	۲	
۰/۵۷۶۲	۷/۱۹	۳۱/۷۸	۰/۵۹۲۵	۷/۴۰	۴۸/۶۴	۰/۶۴۸۹	۸/۹۱	۴۶/۲۴	۰/۶۵۷۳	۹/۰۲	۲۶/۲۳	۵۰	۳	
۰/۵۵۰۶	۷/۰۰	۳۲/۷۴	۰/۵۶۶۷	۷/۲۲	۴۹/۸۳	۰/۶۳۱۵	۸/۶۹	۴۵/۹۸	۰/۶۳۹۶	۸/۸	۲۷/۲۶	۷۵	۴	
۰/۵۱۱۳	۶/۱۶	۳۶/۶۹	۰/۵۳۴۸	۶/۸۱	۵۴/۱۶	۰/۶۲۴۱	۸/۳۵	۵۲/۶۵	۰/۶۳۳۱	۸/۴۶	۳۱/۴۵	۱۰۰	۵	
۰/۵۳۹۹	۹/۶۹	۱۹۴/۵۹	۰/۵۶۱۰	۹/۹۲	۳۰۵/۹۲	۰/۶۲۴۰	۱۱/۵۱	۲۸۸/۵۰	۰/۶۳۳۰	۱۱/۶۶	۱۴۱/۸۹	۰	۶	
۰/۵۳۶۴	۸/۳۵	۱۹۶/۰۴	۰/۵۵۹۴	۸/۶۵	۳۱۵/۶۳	۰/۶۱۸۸	۱۰/۱۵	۲۹۷/۰۲	۰/۶۲۶۸	۱۰/۲۸	۱۴۸/۶۴	۲۵	۷	
۰/۴۸۸۱	۸/۲۲	۱۹۹/۳۷	۰/۵۴۹۰	۸/۵۲	۳۲۸/۶۲	۰/۶۰۸۵	۱۰/۰۰	۲۹۷/۳۴	۰/۶۱۶۳	۱۰/۱۳	۱۴۸/۷۶	۵۰	۸	
۰/۴۶۳۰	۸/۱۹	۲۰۶/۳۶	۰/۵۲۰۵	۸/۳۳	۳۴۴/۷۲	۰/۵۸۱۳	۹/۹۱	۳۰۰/۵۸	۰/۵۸۸۸	۱۰/۰۴	۱۵۵/۸۰	۷۵	۹	
۰/۴۳۳۵	۷/۰۸	۲۱۲/۱۷	۰/۴۸۱۳	۷/۱۱	۳۶۷/۵۰	۰/۵۲۸۹	۹/۰۱	۳۱۵/۶۴	۰/۵۳۵۷	۹/۱۳	۱۵۵/۰۴	۱۰۰	۱۰	
۰/۵۴۴۵	۱۰/۹۷	۹۲۶/۶۰	۰/۵۶۲۲	۱۱/۳۰	۱۴۱۶/۸۵	۰/۶۱۹۰	۱۴/۴۸	۱۲۹۰/۰۱	۰/۶۲۷۰	۱۴/۶۷	۵۹۵/۴۷	۰	۱۱	
۰/۵۲۷۷	۹/۸۷	۹۳۲/۱۳	۰/۵۴۳۷	۱۰/۷۲	۱۴۰۹/۶۵	۰/۵۸۶۵	۱۲/۵۴	۱۲۸۷/۹۸	۰/۶۲۴۸	۱۳/۹۱	۶۰۱/۰۹	۲۵	۱۲	
۰/۵۱۴۸	۸/۰۹	۱۰۳۶/۳۲	۰/۵۳۴۱	۸/۸۵	۱۴۴۴/۳۳	۰/۵۷۴۵	۱۰/۵۱	۱۳۶۵/۳۵	۰/۶۱۳۰	۱۱/۴۸	۶۴۱/۹۱	۵۰	۱۳	
۰/۵۰۸۴	۶/۸۹	۱۰۷۶/۱۰	۰/۵۲۵۶	۷/۴۱	۱۵۹۰/۱۶	۰/۵۶۸۴	۸/۹۲	۱۴۴۷/۰۵	۰/۶۰۲۸	۱۰/۷۳	۶۸۶/۰۲	۷۵	۱۴	
۰/۴۶۹۷	۶/۱۲	۱۱۱۸/۴۹	۰/۴۸۴۱	۶/۴۰	۱۶۵۱/۹۶	۰/۵۱۲۴	۸/۳۱	۱۵۳۴/۹۶	۰/۵۹۴۰	۸/۸۶	۷۴۱/۹۵	۱۰۰	۱۵	
۰/۵۱۲۸	۱۲/۳۲	۱۱۲۱/۳۶	۰/۵۳۳۱	۱۲/۷۲	۱۸۳۳/۵۳	۰/۵۷۲۰	۱۴/۵۰	۱۶۹۱/۸۷	۰/۶۰۹۴	۱۶/۸۱	۶۵۷/۶۵	۰	۱۶	
۰/۵۱۱۵	۱۲/۰۷	۱۳۶۴/۱۶	۰/۵۳۲۴	۱۲/۴۵	۲۰۵۴/۱۷	۰/۵۷۰۳	۱۴/۱۸	۱۸۶۴/۷۸	۰/۵۹۶۸	۱۶/۲۳	۷۳۴/۰۵	۲۵	۱۷	
۰/۴۹۸۰	۱۰/۶۲	۱۳۸۷/۸۱	۰/۵۱۲۸	۱۰/۸۱	۲۱۱۸/۰۱	۰/۵۵۴۴	۱۲/۶۲	۱۹۱۸/۷۰	۰/۵۹۳۶	۱۵/۲۹	۷۳۱/۹۷	۵۰	۱۸	
۰/۴۷۳۱	۹/۵۲	۱۴۵۹/۲۱	۰/۴۹۴۷	۹/۸۰	۲۱۹۱/۰۸	۰/۵۲۹۷	۱۱/۴۰	۲۰۳۳/۷۴	۰/۵۸۱۲	۱۴/۸۵	۷۷۷/۸۰	۷۵	۱۹	
۰/۴۲۵۳	۷/۹۷	۱۵۸۱/۷۶	۰/۴۷۳۳	۸/۷۹	۲۳۷۸/۱۵	۰/۴۹۵۹	۱۰/۵۷	۲۱۴۵/۸۰	۰/۵۵۲۳	۱۳/۶۵	۸۳۵/۲۴	۱۰۰	۲۰	
۰/۴۹۱۲	۱۴/۱۲	۱۳۱۱/۹۴	۰/۵۱۰۱	۱۴/۶۵	۱۹۸۷/۳۳	۰/۵۴۵۵	۱۶/۵۳	۱۸۳۷/۰۸	۰/۶۰۱۳	۱۸/۹۲	۶۱۹/۷۶	۰	۲۱	
۰/۴۸۳۹	۱۳/۳۴	۱۴۵۰/۸۳	۰/۴۹۷۶	۱۳/۵۵	۲۱۵۹/۲۱	۰/۵۳۵۸	۱۵/۵۱	۱۹۹۶/۷۷	۰/۵۷۳۱	۱۷/۳۹	۶۲۷/۶۵	۲۵	۲۲	
۰/۴۷۱۷	۱۲/۶۱	۱۴۷۱/۶۸	۰/۴۹۱۵	۱۲/۹۲	۲۳۳۹/۹۱	۰/۵۲۶۶	۱۴/۷۱	۲۰۳۰/۰۹	۰/۵۶۳۸	۱۷/۱۲	۶۷۳/۸۴	۵۰	۲۳	
۰/۴۵۳۸	۱۱/۷۲	۱۴۶۵/۵۸	۰/۴۶۷۸	۱۱/۹۷	۲۲۵۲/۸۸	۰/۵۰۷۱	۱۳/۷۷	۲۰۶۰/۰۱	۰/۵۵۴۳	۱۶/۷۶	۷۳۰/۲۰	۷۵	۲۴	
۰/۴۱۹۴	۱۰/۲۳	۱۵۶۷/۱۷	۰/۴۴۳۷	۱۱/۱۲	۲۳۵۳/۳۲	۰/۴۷۴۱	۱۲/۴۷	۲۲۱۷/۰۰	۰/۵۳۲	۱۵/۳۹	۸۰۲/۸۲	۱۰۰	۲۵	

جدول (۷): مقایسه کارایی عملکرد الگوریتم فراابتکاری ارائه شده برای حل مسئله تک هدفه در مقایسه با نرم‌افزار حل دقیق

مستله نمونه اصلی	مستله نمونه (درصد)	عدم قطعیت سهم بودجه	الگوریتم فراابتکاری ارائه شده	متوسط زمان حل مدل تک‌هدفه		مستله نمونه اصلی
				الگوریتم فراابتکاری ارائه شده	گمز	
۱	۱۰/۵۹	۰	۱۳/۴۱	۶/۳۷	۳/۰۱	۱
۲	۹/۳۷	۲۵	۱۴/۳۷	۷/۳۴	۱/۷۸	۲
۳	۹/۰۲	۵۰	۱۴/۲۲	۸/۴۸	۲/۲۶	۳
۴	۸/۸	۷۵	۱۴/۸۵	۶/۳۲	۳/۱۴	۴
۵	۸/۴۶	۱۰۰	۱۷/۴۲	۹/۲۲	۲/۷۳	۵
۶	۱۱/۶۶	۰	۶۹/۴۴	۱۲۶/۷	۵/۲۳	۶
۷	۱۰/۲۸	۲۵	۷۷/۳۹	۱۵۱/۳۵	۷/۶۳	۷
۸	۱۰/۱۳	۵۰	۷۱/۹۸	۱۲۵/۶۳	۴/۵۶	۸
۹	۱۰/۰۴	۷۵	۷۶/۷۳	۱۲۰/۶۹	۸/۱۲	۹
۱۰	۹/۱۳	۱۰۰	۷۵/۰۸	۱۱۵/۵۶	۹/۳۱	۱۰
۱۱	۱۴/۶۷	۰	۲۶۵/۵۲	۹۸۳/۳۷	۱۳/۵۰	۱۱
۱۲	۱۳/۹۱	۲۵	۲۶۰/۵۷	۸۴۴/۲۲	۱۴/۱۱	۱۲
۱۳	۱۱/۴۸	۵۰	۳۱۹/۲۲	۸۸۵/۱۰	۱۳/۹۲	۱۳
۱۴	۱۰/۷۳	۷۵	۳۱۳/۰۹	۱۰۳۴/۲۹	۱۲/۶۴	۱۴
۱۵	۸/۸۶	۱۰۰	۳۲۸/۰۹	۱۳۱۷/۶۴	۱۲/۷۱	۱۵
۱۶	۱۶/۸۱	۰	۲۸۳/۸۶	۳۴۵۶۰۰*	۱۲/۴۲	۱۶
۱۷	۱۶/۲۳	۲۵	۲۸۳/۵۳	۳۴۵۶۰۰*	۱۲/۵۷	۱۷
۱۸	۱۵/۲۹	۵۰	۳۰۸/۷۴	۳۴۵۶۰۰*	۱۴/۲۷	۱۸
۱۹	۱۴/۸۵	۷۵	۳۴۹/۰۷	۳۴۵۶۰۰*	۱۷/۳۷	۱۹
۲۰	۱۳/۶۵	۱۰۰	۳۶۹/۵۹	۳۴۵۶۰۰*	۱۵/۸۳	۲۰
۲۱	۱۸/۹۲	۰	۲۲۶/۵۸	۳۴۵۶۰۰*	۱۶/۴۵	۲۱
۲۲	۱۷/۳۹	۲۵	۲۷۶/۴۷	۳۴۵۶۰۰*	۱۷/۳۸	۲۲
۲۳	۱۷/۱۲	۵۰	۲۷۷/۴۷	۳۴۵۶۰۰*	۱۷/۵۴	۲۳
۲۴	۱۶/۷۶	۷۵	۳۰۶/۴۵	۳۴۵۶۰۰*	۱۹/۲۳	۲۴
۲۵	۱۵/۳۹	۱۰۰	۳۴۸/۹۰	۳۴۵۶۰۰*	۲۰/۶۳	۲۵

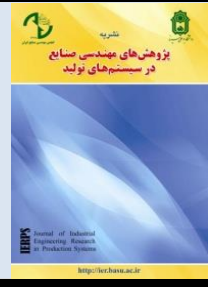
*عدم اثبات بهینه بودن جواب پس از سپری شدن زمان مشخص از جستجو توسط نرم‌افزار گمز

جدول (۸): پویایی ساختار شبکه زنجیره تأمین برگشتی در برابر سطوح مختلف عدم قطعیت (شامل بودجه صفر و کامل) برای میزان و کیفیت محصولات برگشتی برحسب مقادیر معیارهای الف و ب (از راست به چپ در هر خانه جدول)

مستله نمونه اصلی	سهم بودجه عدم قطعیت (درصد)	مراکز جمع‌آوری/بازتوزیع	مراکز احیا	مراکز باز یافت	مراکز اسقاط
۱	۰	(۷۰،۶۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۵۰،۵۰)
۱	۱۰۰	(۸۰،۵۰)	(۱۰۰،۶۶)	(۱۰۰،۶۶)	(۷۵،۵۰)
۲	۰	(۷۰،۶۰)	(۵۰،۵۰)	(۵۰،۵۰)	(۶۰،۴۰)
۲	۱۰۰	(۷۳،۵۳)	(۷۵،۵۰)	(۷۵،۵۰)	(۸۰،۶۰)
۳	۰	(۷۲،۶۲)	(۶۰،۴۰)	(۶۰،۴۰)	(۸۳،۶۶)
۳	۱۰۰	(۸۰،۶۰)	(۸۰،۶۰)	(۸۰،۶۰)	(۸۳،۵۰)
۴	۰	(۶۲،۵۰)	(۸۳،۶۶)	(۸۳،۶۶)	(۷۱،۵۷)
۴	۱۰۰	(۷۵،۶۲)	(۸۳،۵۰)	(۸۳،۵۰)	(۸۵،۴۲)
۵	۰	(۶۳،۵۲)	(۵۷،۴۲)	(۵۷،۵۷)	(۶۲،۵۰)
۵	۱۰۰	(۷۸،۴۱)	(۷۱،۴۲)	(۸۵،۴۲)	(۷۵،۳۷)

- Location Allocation Model For Reusing Carpet Materials", *Comput. Ind. Eng* 36(4): 855–869.
- [15] Realf, M.J., Ammons, J.C., Newton, D.J., (2004), "Robust Reverse Production System Design For Carpet Recycling", *IIE Trans* 36 (8): 767–776.
- [16] Kara, S.S., Onut, S., (2010), "A Two-Stage Stochastic And Robust Programming Approach To Strategic Planning of A Reverse Supply Network: The Case Of Paper Recycling", *Expert Syst. Appl* 37(9): 6129–6137.
- [17] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R. Jolai, F., (2013), "Reliable Design Of A Logistics Network Under Uncertainty: A Fuzzy Possibilistic-Queuing Model", *Appl. Math. Modell* 37 (5): 3254–3268.
- [18] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E., (2012), "Robust Closed-Loop Supply Chain Network Design For Perishable Goods in Agile Manufacturing Under Uncertainty", *International Journal of Production Economics* 50(16): 4649–4669.
- [19] Hasani, A., Zegordi, S. H., Nikbakhsh, E., (2015), "Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design Under Uncertainty: The Case of The Medical Device Industry", *International Journal of Production Research* 53(5): 1596–1624.
- [20] Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., Zegordi, S. H., (2014), "Variable Neighborhood Search For The Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach", *Computers & Operations Research* 52: 300–314.
- [21] Jayaraman, V., Guide, V.D.R., Srivastava, R., (1999), "A closed-loop logistics model for remanufacturing", *J. Oper. Res. Soc.* 50(5): 497–508.
- [22] Krikke, H.R., Harten, A. Schuur, P. C., (1999), Business case Océ: reverse logistic network redesign for copiers", *OR Spectr.* 21(3): 381–409.
- [23] Eskandarpour, M., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E., (2013), "A parallel multi-objective variable neighborhood search for the sustainable post-sales network design", *International Journal of Production Economics* 145(1): 117–131.
- [۲۴] زارعیان جهرمی، ح.، فلاح نژاد، م. ص. صادقیه، ا. احمدی یزدی. ه. (۱۳۹۳). مدل بهینه‌سازی چند هدفه استوار در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید ۳: ۹۳–۱۱۱.
- [25] Klausner, M. Hendrickson, C. T., (2000), "Reverse Logistics Strategy For Product Take-Back", *Interfaces* 3: 156–165.
- [26] Aras, N., D. Aksen, D., (2008), Locating Collection Centers For Distance And Incentive Dependent Returns", *Int J Prod Econ* 111(2): 316–333.
- [27] Guide, V.D.R., Teunter, R., Wassenhove, L. N., (2003), "Matching Demand And Supply To Maximize Profits From Remanufacturing", *Manufacturing and Service Operations Management* 5: 303–316.
- [28] Kulshreshtha, P., Sarangi, S., (2001), "No Return, No Refund: Analysis Of Deposit-Refund
- [1] Ilgin, M., Gupta, S., (2010), "Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Review of The State of The Art", *Journal of Environmental Management* 91(3): 563–591.
- [2] Govindan, K., Soleimani, H., D. Kannan. D., (2015), "Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review To Explore The Future", *European Journal of Operational Research* 240: 603–626.
- [3] Niknejad, A., Petrovic, D., (2014), "Optimization of Integrated Reverse Logistics Networks With Different Product Recovery Routes", *European Journal of Operational Research* 238:143–154.
- [4] Meepetchdee, Y., Shah. N., (2007), "Logistical Network Design With Robustness And Complexity Considerations", *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag* 37(3): 201–222.
- [5] Eskandarpour, M., Masehian, E., Soltani, R., Khosrojerdi, A., (2014), "A Reverse Logistics Network For Recovery Systems and A Robust Metaheuristic Solution Approach", *Int J Adv Manuf Technol* 74: 1393–1406.
- [6] Aras, N., Aksen, D., Tanugur. A.G., (2008), "Locating Collection Centers For Incentive-Dependent Returns Under A Pick-Up Policy With Capacitated Vehicles", *European Journal of Operational Research* 3: 223–1240.
- [7] Keyvanshokoh, E., Seyed-Hosseini, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2013), "Dynamic Pricing Approach For Returned Products In Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design", *Applied Mathematical Modelling* 37: 10182–10202.
- [8] Liang, Y., Pokharel, S, Lim., G., (2009), "Pricing Used Products For Remanufacturing", *Eur J Oper Res.* 193(2): 390–395.
- [9] Pokharel, S., Mutha., A., (2009), "Perspectives In Reverse Logistics: A Review". *Resour. Conserv. Recycl.* 53: 175–182.
- [10] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I., (2008), "A Steady-State Genetic Algorithm For Multi-Product Supply Chain Network Design", *Computers & Industrial Engineering* 56: 521–537.
- [11] Roghanian, E., Pazhoeshfar. P., (2014), "An Optimization Model For Reverse Logistics Network Under Stochastic Environment By Using Genetic Algorithm", *Journal of Manufacturing Systems* 33: 348–356.
- [12] Kannan, G., Sasikumar, P., Devika., K., (2010), "A Genetic Algorithm Approach For Solving A Closed Loop Supply Chain Model: A Case Of Battery Recycling", *Appl. Math. Modell* 34: 655–670.
- [13] Barros, A.I., Dekker, R., Scholten. V., (1998), "A Two-Level Network For Recycling Sand: A Case Study", *Eur. J. Oper. Res* 110 (2): 199–214.
- [14] Louwers, D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F., Flapper. S. D. P., (1999), "A Facility

- Systems", *Journal of Economic Behavior and Organization* 4: 379–394.
- [29] Wang, H.F., Hsu, W. H., (2010), "A Closed-Loop Logistic Model With A Spanning-Tree Based Genetic Algorithm", *Computers & Operations Research* 37(2): 376-389.
- [30] Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K. G., (2009), "Network Model and Optimization of Reverse Logistics By Hybrid Genetic Algorithm", *Comput Ind Eng* 56: 951–64.
- [31] Du, F., Evans, G. W., (2008), "A Bi-Objective Reverse Logistics Network Analysis For Post-Sale Service", *Comput Oper Res* 35: 2617–34.
- [32] Min, H., Ko, H.J., Ko, C.S., (2006), "A Genetic Algorithm Approach To Developing The Multiechelon Reverse Logistics Network For Product Returns", *Omega* 34: 56–69.
- [33] Pishvaea, M.S., Zanjirani Farahani, R. Dullaert, W., (2010), "A Memetic Algorithm for Bi-Objective Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design", *Computers & Operations Research* 37:1100–1112.
- [34] Pishvae, M. Torabi, S., (2010), "A Possibilistic Programming Approach For Closed-Loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty", *Fuzzy Sets Syst* 161(20): 2668-2683.
- [35] Bertsimas, D., M. Sim, M., (2004), "The price of robustness", *Operations Research* 52(1): 35-53.
- [36] Fahimnia, B., Farahani, R.Z., Sarkis, J., (2013), "Integrated Aggregate Supply Chain Planning Using Memetic Algorithm—A Performance Analysis Case Study", *International Journal of Production Research* 15(18): 5354-5373.
- [37] Moscato, P., Norman, M.G., (1992), "A Memetic Approach For The Traveling Salesman Problem Implementation of A Computational Ecology For Combinatorial Optimization On Message-Passing Systems", *Parallel Computing and Transputer Applications*: 177–186.
- [38] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paskoy, T., (2006), "A Genetic Algorithm Approach For Multi-Objective Optimization of Supply Chain Networks", *Computers & Industrial Engineering* 51: 196-215.
- [39] Freund, J.E., (2003), "Mathematical Statistics with Application"s. 7th ed. 2003, London, UK: Pearson.



A Robust Multi-objective Model for Designing Reverse Supply Chain Network via Considering Dynamic Pricing and a Parallel Memetic Solution Algorithm

A. A. Hasani^{1,*}, S.M.H. Hosseini¹

¹ Department of Industrial Engineering and Management, University of Shahrood, Shahrood, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 March 2015
Accepted 28 September 2015

Keywords:

Reverse supply chain
Dynamic Pricing
Uncertainty
Memetic algorithm
Parallel adaptive variable
neighborhood search

ABSTRACT

Design of reverse supply chain network (RSCN) to efficiently manage the flow of returned products is one of the most important issues in supply chain management. Determining an acquisition price of returned products which could be affected by different factors such as product quality levels has a significant effect on strategic design of RSCN. In this paper, a comprehensive mathematical model for designing a multi-level RSCN with a dynamic pricing approach for returned products which is affected by product quality levels. In order to manage the uncertainty of number of returned products, a robust optimization based on the uncertainty budget approach is considered. The aim of the proposed model is to design the RSCN to maximize the RSCN total profit and responding to customer demands simultaneously. Due to the NP-hard nature of the network design problems, a memetic algorithm based on the non-dominated sorting genetic algorithm II and parallel adaptive variable neighborhood search is proposed to find the optimal Pareto solutions. The performance of the proposed memetic algorithm is compared with multiple similar algorithms. The computational results indicate a significant impact of the dynamic pricing approach on the performance of the reverse logistic network. In addition, using the robust optimization based on the uncertainty budget approach can efficiently handle various conservatism levels of decision makers under uncertainty of the business environment. Finally, the obtained results show the significant superiority of the proposed hybrid meta-heuristic algorithm to solve a multi-objective RSCN design model via considering the dynamic pricing approach under uncertainty.

* Corresponding author. Aliakbar Hasani

Tel.: 02332392204; E-mail address: aa.hasani@shahroodut.ac.ir