

ارائه یک مدل جامع استوار دوهدفه و الگوریتم ممتیک برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت شرایط عدم قطعیت

علی اکبر حسینی*، سید محمدحسن حسینی**

چکیده

مدیریت جریان محصولات برگشتی از سوی مشتریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت فضای تصمیم‌گیری و توجه کردن به معیارهای غیرمالی در کنار معیارهای مالی متداول، یکی از موضوعات مهم در مدیریت زنجیره تأمین است. در این مقاله، یک شبکه جامع جدید برای زنجیره تأمین هفت‌لایه‌ای شامل مشتریان اولیه، مراکز جمع‌آوری و بازتوزیع، احیا، بازیافت، اسقاط و مشتریان محصولات شبکه، با جریان برگشتی تحت شرایط میزان و کیفیت غیرقطعی ارائه می‌شود. هدف این مقاله، طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی برای مدیریت جریان محصولات به نحوی است که دو تابع سود کل زنجیره و سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان در طی دوره برنامه‌ریزی حداکثر شود. با توجه به اینکه مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مورد بررسی از نوع مسائل طراحی شبکه و دارای پیچیدگی‌های حل بسیار زیاد است، یک الگوریتم ممتیک مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر برای یافتن جواب‌های بهینه پارتو ارائه شده است. مقدار تمامی پارامترهای الگوریتم پیشنهادی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی تنظیم شده است. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با نتایج دو الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر مقایسه شده است. نتایج محاسباتی حاکی از کارایی الگوریتم جدید ممتیک برای حل مدل دوهدفه پیشنهادی شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت عدم قطعیت است.

کلیدواژه‌ها: شبکه زنجیره تأمین برگشتی؛ عدم قطعیت؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ بهینه‌سازی استوار.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱۰/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۲۱.

* استادیار، دانشگاه شاهرود (نویسنده مسئول).

E-mail: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

** استادیار دانشگاه شاهرود.

۱. مقدمه

طی دهه‌های گذشته، توجه به الزامات زیست‌محیطی به افزایش معنادار فعالیت‌های احیای مجدد محصولات و توجه به مقوله پایداری زنجیره تأمین منجر شده است [۴]. مصرف‌کنندگان به سمت زنجیره تأمین سبز گرایش یافته‌اند و از سوی دیگر، عواملی نظیر قوانین سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، صرفه‌جویی ایجادشده در پی بازیافت محصولات مصرف‌شده، تمایل شرکت‌ها برای آگاهی از وضعیت محصولات فروخته‌شده و سایر مزیت‌های اقتصادی ممکن تولیدکنندگان را به تجدیدنظر در ساختار زنجیره‌های تأمین خود واداشته است [۶]. بسیاری از تولیدکنندگان به فعالیت‌های جمع‌آوری مجدد محصولات و تلاش برای تعمیر، احیا، بازیافت و اسقاط آن‌ها به صورت ایمن و اقتصادی در شبکه‌های زنجیره تأمین خود توجه کرده‌اند [۹]. در نتیجه، یکی از تصمیم‌های استراتژیک بسیار مهم در مدیریت کارای زنجیره تأمین، طراحی شبکه زنجیره است که بر رقابت‌پذیری آن تأثیر مستقیم خواهد داشت. شبکه زنجیره تأمین مجموعه‌ای از موجودیت‌ها با فعالیت‌های مشخص است که با یکدیگر در راستای اهداف زنجیره ارتباط دارند. جریان محصولات در شبکه سنتی از تأمین‌کنندگان آغاز و با گذر از مجموعه‌ای از تسهیلات میانی، به مشتریان نهایی ختم می‌شود. با این حال، در فضای کسب‌وکار امروز که بسیار تحت تأثیر تعاملات ما بین بازیگران آن قرار دارد و این تعاملات خود نیز نقش بسیار مهمی در موفقیت زنجیره خواهند داشت، جریان ساده و تک‌سویه توصیف‌شده در زنجیره‌های سنتی، دیگر نخواهد توانست بسیاری از الزامات و نیازمندی‌های محیط واقعی کسب‌وکار را برآورده کند. در نتیجه، جریان دومی از محصولات با شروع از مشتریان نهایی و ادامه یافتن به سوی تأمین‌کنندگان با گذر از تسهیلاتی نظیر مراکز جمع‌آوری/ بازتوزیع، احیا یا بازیافت تحت عنوان جریان برگشتی باید در نظر گرفته شود. این در حالی است که مدیریت این جریان برگشتی همواره با چالش‌هایی نظیر عدم قطعیت در میزان محصولات برگشتی و سطح کیفیت آن‌ها همراه بوده است [۷]. از سوی دیگر، علاوه بر معیارهای مالی متداول همچون حداکثر کردن سود کل شبکه زنجیره تأمین برگشتی، معیارهای دیگری تحت تأثیر ارتقای سطح انتظارات مشتریان نیز مطرح شده است که باید در طراحی شبکه‌ها در نظر گرفته شود [۶].

در این مقاله، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با در نظر گرفتن چندین لایه متشکل از انواع تسهیلات 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. همچنین، عدم قطعیت میزان و کیفیت محصولات برگشتی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای برای نمایش سطوح مختلف محافظه‌کاری تصمیم‌گیرندگان در دنیای واقعی در نظر گرفته شده است. در پایان، با توجه به ماهیت مسئله

دوهدفه مورد بررسی که از نوع مسائل با پیچیدگی‌های بسیار زیاد حل است [۸]، یک الگوریتم فراابتکاری ممتیک با یک ترکیب جدید مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر ارائه شده است. کارایی الگوریتم ممتیک پیشنهادشده با دو الگوریتم فراابتکاری مشابه دیگر مقایسه شده است.

ساختار ادامه این مقاله به شرح زیر خواهد بود: در بخش ۲، مبانی نظری و پیشینه پژوهش تشریح شده و در بخش ۳، مسئله به‌طور دقیق تشریح، مدل ریاضی مسئله ارائه و الگوریتم حل پیشنهادی معرفی شده است. در بخش ۴، داده‌ها و 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 و توصیه‌های مدیریتی مرتبط ارائه شده است. در بخش ۵، ضمن نتیجه‌گیری از تحقیق انجام‌شده، زمینه‌های تحقیقاتی آتی معرفی شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین برگشتی در بسیاری از صنایع، نظیر الکترونیک، هواپیماسازی، کامپیوتر و تجهیزات پزشکی، به کار رفته و منافع اقتصادی فراوانی را برای شرکت‌ها و مشتریان به‌همراه داشته است [۱۷]؛ برای نمونه، زنجیره تأمین برگشتی به‌صورت گسترده در صنایع تجهیزات کامپیوتری نظیر دل و ای.بی.ام پیاده‌سازی شده و تعمیر تجهیزات و خرید قطعات جدید را برای مشتریان بسیار آسان کرده است. این در حالی است که با افزایش تعداد مصرف‌کنندگان تجهیزات الکترونیکی، شاهد ایجاد هزاران تن زباله الکترونیکی هستیم که نزدیک به ۲۵ درصد زباله‌های جهان را تشکیل می‌دهند و این مسئله اهمیت مقوله مدیریت جریان محصولات برگشتی را دوچندان می‌کند [۱۳]. محصولات می‌توانند به دلایل مختلف، نظیر دریافت خدمات پس‌ازفروش و بازیافت محصولات مستهلک‌شده، به تولیدکنندگان بازگردانده شوند [۱۲]. به‌منظور مدیریت مؤثر این جریان، یک سیستم احیا برای کنترل محصولات برگشتی و هدایت آن‌ها به‌سوی تسهیلات مناسب لازم است. گروهی از محققان اروپایی در حوزه زنجیره تأمین برگشتی، این نوع از زنجیره را تحت عنوان فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان مواد اولیه در جریان ساخت و محصولات نهایی معرفی کرده‌اند که از تولیدکنندگان به‌سوی تسهیلات مناسب احیا و اسقاط جریان دارد [۲۴]. به برخی از فعالیت‌های اصلی در سیستم احیا در ذیل اشاره شده است که البته با توجه به ماهیت فرآیندها و الزامات هر صنعت می‌توانند متفاوت باشند [۶].

- جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده از مشتریان؛

- تفکیک و تعیین وضعیت محصولات برگشتی پس از بازرسی و سپس تصمیم‌گیری پیرامون وضعیت تعمیرپذیری آن‌ها از جنبه‌های اقتصادی و فناوری؛

- دور ریختن محصولات احیانشدنی؛

- احیای محصولات برگشتی به منظور بازگرداندن ارزش بالقوه آن‌ها؛

- توزیع مجدد محصولات احیاشده.

یک ساختار شبکه‌ای جامع با امکان در نظر گرفتن طیف متنوعی از لایه‌ها شامل تسهیلات با عملکردهای مختلف و سازگار با فرآیندهای مختلف مدیریت جریان محصولات برگشتی، برای تولیدکنندگان بسیار مطلوب و کارا خواهد بود. مطالعات بسیاری در دهه گذشته انجام شده است که با توجه به آن‌ها می‌توان فرآیندهای مدیریت زنجیره تأمین برگشتی را در حوزه‌های متنوعی دسته‌بندی کرد. این حوزه‌ها عبارت‌اند از: مدیریت موجودی [۱۴]، مسیریابی وسایل حمل‌ونقل و جمع‌آوری محصولات [۲۱]، مکان‌یابی تسهیلات [۱۱]، برون‌سپاری فرآیندها [۲۰] و قیمت‌گذاری محصولات برگشتی [۲۳]. تعدادی از محققان مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی را براساس فرآیندهای مدیریت محصولات برگشتی توسعه داده‌اند؛ برای نمونه، مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی یک یا چندهدفه برای خدمات پس‌ازفروش و به صورت خاص برای محصولاتی نظیر لوازم الکترونیک، فرش، لاستیک و کپسول‌های ال.پی.جی ارائه شده است. در برخی دیگر از مطالعات، محققان بیش از یک فرآیند مدیریت جریان برگشتی را در مدل‌های خود در نظر گرفته‌اند [۱۳، ۱۲، ۱۱]؛ برای نمونه، یک شبکه لجستیک برگشتی معکوس یکپارچه با سه فرآیند احیا شامل تعمیر، بازتولید و بازیافت با در نظر گرفتن قطعیت میزان جریان محصولات برگشتی و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا ارائه شده است [۸]. در مطالعه‌ای دیگر، یک شبکه برگشتی با دو فرآیند احیا شامل دمونتاز و تعمیر با تقاضای غیرقطعی برای محصولات هریک از این فرآیندها و همچنین عدم قطعیت در کیفیت محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است [۱۶].

به این ترتیب، محققان این حوزه به توسعه شبکه‌های زنجیره تأمین با هدف نزدیکی بیشتر آن به شرایط حاکم بر دنیای واقعی بسیار توجه کرده‌اند؛ برای نمونه، در یک مطالعه، به منظور حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل جریان و هزینه‌های ثابت راه‌اندازی تسهیلات در یک شبکه چندلایه جریان برگشتی برای چندین محصول، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح برای طراحی شبکه برگشتی خدمات پس‌ازفروش طی چندین دوره زمانی با در نظر گرفتن اهداف حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و مجموع تأخیر در چرخه احیا ارائه شده است [۱۰]. یکی از کامل‌ترین ساختارهای شبکه ارائه‌شده برای زنجیره تأمین برگشتی، ساختاری هفت‌لایه‌ای و دربردارنده لایه‌های مشتریان اولیه، مراکز جمع‌آوری و بازتوزیع، احیا، بازیافت، اسقاط و مشتریان ثانویه (مشتریان محصولات شبکه برگشتی) است [۱۳]. در این میان، یکی از مهم‌ترین

ویژگی‌های جریان برگشتی، عدم قطعیت در میزان و کیفیت آن است که باید در توسعه مدل‌های کمی برای مدیریت این جریان‌ها در نظر گرفته شود [۱۸]. کیفیت محصولات برگشتی می‌تواند روی موارد متفاوتی، نظیر هزینه‌های احیا و قیمت فروش محصولات احیاشده، تأثیر داشته باشد [۳۲]. از سوی دیگر، مکان‌بایی مناسب هریک از تسهیلات فعال در زنجیره تأمین برگشتی به‌منظور مدیریت جریان بین تسهیلات در راستای مجموعه اهداف زنجیره با توجه به ماهیت استراتژیک آن و تأثیرگذاری بر کارایی دیگر تصمیمات مدیریت زنجیره، همواره از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است.

با توجه به اینکه بیشتر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین از نوع مسائل با پیچیدگی حل بالا است [۱۵]، توسعه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری قدرتمند برای حل این نوع از مسائل لازم است؛ به همین دلیل، تاکنون روش‌های فراابتکاری متنوعی نظیر الگوریتم جستجوی ممنوعه [۳]، ژنتیک [۳۲، ۲۲، ۱۰، ۲۵، ۳۳] و جستجوی همسایگی متغیر [۱۱] برای حل این مسائل ارائه شده است.

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی به‌همراه یک الگوریتم ممتیک کارا برای حل آن ارائه شده است. مدل مذکور را می‌توان توسعه‌یافته مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی دانست که اخیراً توسط اسکندریور و همکارانش [۱۳] ارائه شده است. 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 اسکندریور و همکارانش [۱۳] 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 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 برای یافتن نقاط بهینه پارتو.

جدول ۱. مقایسه مدل پیشنهادشده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی درمقایسه با مدل‌های مشابه ارائه‌شده در ادبیات موضوع

منابع	تعداد سطوح	یک/چند محصولی	یک/چند دورهای	محدودیت‌ها				توابع هدف		عدم قطعیت	پارامتر غیرقطعی
				ظرفیت	لیست مواد	خاص محصول	زنجیره تأمین جهانی	تأخیر مالی	هزینه		
[۱۳]	۷	چند	یک	*	-			-	هزینه	-	-
[۱۷]	۴	چند	چند	*	*	فساد پذیری		-	سود	استوار	تقاضا
[۱۸]	۴	چند	چند	*	*	فساد پذیری	*	-	سود	استوار	تقاضا
[۱۱]	۵	چند	چند	*	-	-	-	تأخیر	هزینه	-	-
[۱۲]	۶	چند	چند	*	-	-	-	تأخیر	هزینه	-	-
[۳۱]	۶	تک	تک	*	*	-	-	پاسخ‌گویی	هزینه	-	-
[۲۹]	۶	تک	چند	*	*	-	-	تأخیر	هزینه	فازی	تقاضا، نرخ برگشت و هزینه
[۳۰]	۳	تک	تک	*	-	-	-	-	هزینه	-	-
**	۷	چند	چند	*	*	-	-	پاسخگویی	سود	استوار	نرخ برگشت و هزینه

** مدل ارائه‌شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت عدم قطعیت در این مقاله

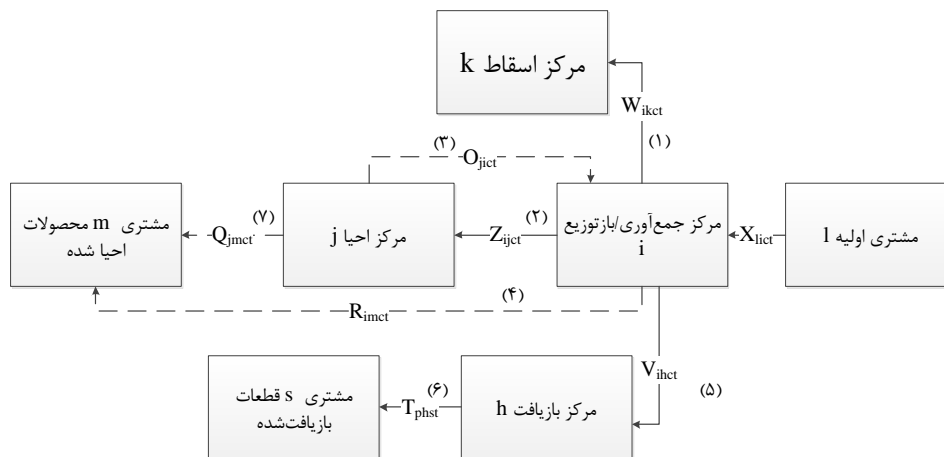
۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در این تحقیق، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برگشتی چندلایه برای چندین محصول طی چندین دوره زمانی بررسی می‌شود. نمای کلی این مسئله مطابق شکل ۱ است. در این مسئله، محصولات برگشت‌داده‌شده از مشتریان اولیه به دلایل مختلف نظیر ایرادات فنی (کیفیتی) و مستهلک شدن، به مراکز جمع‌آوری/ بازتوزیع انتقال داده می‌شوند. محصولات با توجه به سطح کیفیت آن‌ها به سه مرکز بازیافت، احیا و اسقاط هدایت می‌شوند. در مرکز بازیافت، محصولات دمونتازشده و قطعات مناسب آن‌ها تفکیک و پس از آماده‌سازی به بازار عرضه می‌شوند. در فرآیند احیا، با انجام برخی از فرآیندها نظیر تعمیر و تعویض قطعات، محصولات با

کیفیتی برابر با محصول نو وارد بازار و به مشتریان تحویل داده می‌شوند؛ در غیر این صورت، محصولات برگشت داده شده با توجه به سطح کیفیت پایین آن‌ها، به مرکز اسقاط ارسال می‌شوند. ظرفیت هریک از تسهیلات محدود است و امکان نگهداری موجودی در تسهیلات جمع‌آوری/بازتوزیع، احیا و بازیافت برای دوره‌های متوالی در نظر گرفته شده است. میزان و سطح کیفیت محصولات برگشتی به دلیل وابستگی آن‌ها به عوامل متعدد همواره با عدم قطعیت بسیاری همراه خواهد بود. اثر این عدم قطعیت بر هزینه‌های فرآیندهای احیا، اسقاط و بازیافت مشاهده می‌شود. در این مطالعه، عدم قطعیت پارامترهای کلیدی میزان جریان برگشتی و هزینه‌های مدیریت آن با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی استوار بازه‌ای بر پایه مفهوم بودجه عدم قطعیت در نظر گرفته شده است [۷]. به طور کلی، هنگام مواجهه با سطح بالای عدم قطعیت و عدم دسترسی به داده‌های کافی و معتبر برای برآورد تابع احتمال و رفتار پارامتر مورد بررسی با استفاده از رویکردهای معمول برنامه‌ریزی احتمالی و فازی، می‌توان از رویکرد برنامه‌ریزی استوار استفاده کرد [۲۷]. با توجه به پیچیده شدن فضای تصمیم‌گیری تحت تغییر پیوسته در شرایط کسب‌وکار و مواجهه با سطوح بالاتری از عدم قطعیت در پی گسترده‌تر شدن مرزهای تصمیم‌گیری در مسائل زنجیره تأمین، طی سال‌های اخیر، بسیاری از محققان به رویکرد برنامه‌ریزی استوار توجه کرده‌اند [۱-۳]. تکنیک بهینه‌سازی استوار بر پایه مفهوم بودجه عدم قطعیت نیز می‌تواند به شرایط دنیای واقعی هنگامی که احتمال انحراف مقادیر تمامی پارامترهای غیرقطعی از مقادیر اسمی خود کم باشد، به خوبی پاسخ دهد؛ بنابراین، 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. مقادیر این بودجه بیانگر درجه محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده خواهد بود. مقادیر کمتر و بیشتر بودجه عدم قطعیت به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر و حداقل ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده است.

در این مدل، هدف انتخاب تسهیلات در هریک از لایه‌های شبکه و مدیریت جریان محصولات برگشتی به شکلی است که سود خالص زنجیره و میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان ثانویه حداکثر شود. راه‌اندازی هر تسهیل دارای هزینه ثابت است. افزایش سطح پاسخگویی به نیاز مشتریان نیازمند راه‌اندازی تعداد بیشتری از تسهیلات جمع‌آوری/بازتوزیع و احیا خواهد بود که خود با افزایش هزینه‌های ثابت و متغیر زنجیره برگشتی می‌تواند کاهش سودآوری را به همراه داشته باشد؛ بنابراین، یک تنافر بین اهداف حداکثر کردن سودآوری و سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان وجود خواهد داشت. هزینه‌های انجام فرآیندهای مدیریت جریان برگشتی شامل هزینه‌های احیا، بازیافت، اسقاط، بازتوزیع و حمل‌ونقل است. هریک از محصولات احیاشده، اسقاطی و قطعات بازیافتی دارای یک قیمت مشخص برای مشتریان خود خواهند بود.

مدل ارائه‌شده در این مقاله قابل استفاده برای تولیدکنندگان یا توزیع‌کنندگانی است که با مسئله مدیریت جریان محصولات برگشت‌داده‌شده از سوی مشتریان مواجه هستند. این مقوله امروزه با افزایش اهمیت ارائه خدمات پس‌ازفروش در بسیاری از صنایع فعال در حوزه محصولات الکترونیکی و کامپیوتری (محصولات مونتاژشده از مجموعه‌ای متنوع از قطعات قابل تعمیر، تعویض و یا اسقاط) کاربرد بیشتری خواهد داشت. از سوی دیگر، با توجه به استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان جریان برگشتی، مدل ارائه‌شده به خوبی خواهد توانست به تصمیم‌گیرندگان در مواجهه با عدم قطعیت کامل هنگام ارائه محصولات جدید به بازار و نبودن سوابق و اطلاعات کافی و مناسب برای برآورد رفتار پارامترهای کلیدی مورد انتظار، نظیر تقاضا و نرخ برگشت با استفاده از رویکردهای معمول همچون برنامه‌ریزی احتمالی و فازی، به خوبی یاری رساند [۱۷، ۱۸]. همچنین، با استفاده از مفهوم بودجه عدم قطعیت به‌طور مناسبی می‌توان سطوح متفاوت ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان را در فرآیند برنامه‌ریزی در نظر گرفت که این کار بر کاربردپذیری مدل ارائه‌شده در فضاهای تصمیم‌گیری مرتبط با زنجیره‌های تأمین یادشده در بالا خواهد افزود.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین برگشتی هفت‌لا به

مدل ریاضی پیشنهادی. در این قسمت، به منظور درک بیشتر مسئله مورد بررسی، مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط آن در حالت دوهدفه و تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده شده است. پیش از ارائه توضیحات بیشتر، ابتدا نمادگذاری مورد استفاده برای مدل

سازی مسئله معرفی شده است. اندیس‌های به‌کاررفته در معرفی مدل ریاضی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. اندیس‌های به‌کاررفته در مدل ریاضی پیشنهادی

اندیس	تعریف	اندیس	تعریف
L	مجموعه مشتریان اولیه	K	مجموعه نقاط تعریف‌شده برای مراکز اسقاط
M	مجموعه مشتریان محصولات احیاشده	H	مجموعه نقاط تعریف‌شده برای مراکز بازیافت
S	مجموعه مشتریان قطعات بازیافتی	C	مجموعه محصولات
I	مجموعه نقاط بالقوه مراکز جمع‌آوری / بازتوزیع	T	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی
J	مجموعه نقاط تعریف‌شده برای مراکز احیا	P	مجموعه قطعات محصولات

پارامترهای قطعی به‌کاررفته در مدل ریاضی عبارت‌اند از:

r_{lc} : تعداد محصول C برگشتی از مشتری اولیه l ؛

cf_{lic} : هزینه حمل واحد محصول برگشتی C از مشتری اولیه l به مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i ؛

cs_{ijc} : هزینه حمل واحد محصول قابل احیا C از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به مرکز احیا j ؛

ct_{ikc} : هزینه حمل واحد محصول قابل اسقاط C از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به مرکز اسقاط k ؛

cr_{ihc} : هزینه حمل واحد محصول قابل بازیافت C از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به مرکز بازیافت

h ؛

cq_{jmc} : هزینه حمل واحد محصول احیاشده C از مرکز احیا j به مشتری m ؛

cu_{imc} : هزینه حمل واحد محصول احیاشده C از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به مشتری m ؛

g_j, f_i, b_j و θ_k : به‌ترتیب هزینه ثابت راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری / بازتوزیع i ، بازیافت h ، احیا j و

اسقاط k ؛

cm_{phs} : هزینه حمل واحد قطعه بازیافت‌شده p از مرکز بازیافت h به مشتری s ؛

caf_i, cas_j, cat_k و car_h : به‌ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری / بازتوزیع i ، احیا j ، اسقاط k و

بازیافت h ؛

bom_{cp} : تعداد قطعه p به‌کاررفته در تولید واحد محصول C ؛

ps_{ps} : هزینه جریمه برای عدم‌ارضای تقاضای مشتری s برای یک قطعه بازیافتی p ؛

pm_{cm} : هزینه جریمه برای عدم‌ارضای تقاضای مشتری m برای یک واحد از محصولات

احیاشده C ؛

Γ_0, Γ_1 و Γ_2 : به‌ترتیب بودجه‌های عدم‌قطعیت 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؛

md_{spi} و sd_{mct} : به ترتیب تقاضاهای مشتری m برای محصول احیاشده C و تقاضای مشتری S برای قطعه بازیافتی p در دوره t ؛

spq_{mc} ، spt_{ps} و spw_{kc} : به ترتیب قیمت‌های فروش محصول احیاشده C برای مشتری m ، قطعه بازیافت شده p برای مشتری S و محصول C برای مرکز اسقاط k

پارامترهای غیرقطعی به کاررفته در مدل ریاضی عبارت‌اند از:

d_c و dI_c : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین مقدار محصول برگشتی C قابل اسقاط؛

e_c و eI_c : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین مقدار محصول برگشتی C قابل بازیافت؛

u_c و uI_c : به ترتیب میزان و انحراف از میانگین مقدار محصول برگشتی C قابل احیا؛

rcI_{cj} و rcI_{ci} : به ترتیب میزان میانگین و انحراف از میانگین هزینه احیای واحد محصول C در مرکز i .

متغیرهای به کاررفته در مدل ریاضی عبارت‌اند از:

Z_{ijct} : تعداد محصول C قابل احیا حمل شده از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به احیا j در دوره t ؛

W_{ikct} : تعداد محصول C قابل اسقاط حمل شده از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به اسقاط k در دوره t ؛

V_{ihct} : تعداد محصول C قابل بازیافت حمل شده از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به بازیافت h در دوره t ؛

O_{jict} : تعداد محصول C احیاشده حمل شده از مرکز احیای j به جمع‌آوری / بازتوزیع i در دوره t ؛

Q_{jmct} : تعداد محصول C احیاشده حمل شده از مرکز احیای j به مشتری m در دوره t ؛

R_{imct} : تعداد محصول C احیاشده حمل شده از مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i به مشتری m در دوره t ؛

T_{phst} : تعداد قطعه p بازیافت شده حمل شده از مرکز بازیافت h به مشتری S در دوره t ؛

HRC_{jct} : موجودی محصول C در مرکز احیا j در پایان دوره t ؛

$HCRC_{ict}$: موجودی محصول C در مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i در پایان دوره t ؛

TR_{pst} : تعداد تقاضای قطعه p بازیافتی پاسخ داده نشده برای مشتری S ؛

TF_{mct} : تعداد تقاضای محصول C پاسخ داده نشده برای مشتری m ؛

Rps_{01} ، Rps_{11} ، Rpf_{21} ، Rps_{01} ، Rpf_{11} و Rps_{21} : به ترتیب متغیرهای مکمل اول برای مدل

همتای استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط (نمایش

با اندیس ۰)، احیا (نمایش با اندیس ۱) و بازیافت (نمایش با اندیس ۲)؛

به ترتیب متغیرهای مکمل دوم برای مدل همتای استوار Zs_2 و Zf_2 ، Zs_1 ، Zf_1 ، Zs_0 ، Zf_0 به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط (نمایش با اندیس ۰)، احیا (نمایش با اندیس ۱) و بازیافت (نمایش با اندیس ۲)،
 Pro_{cj} ، Zro_{cj} و Xro_{cj} : به ترتیب متغیرهای مکمل اول، دوم و سوم برای مدل همتای استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت هزینه احیا محصول برگشتی c در مرکز احیا j تحت تأثیر عدم قطعیت کیفیت آن؛

همتای استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط (نمایش با اندیس ۰)، احیا (نمایش با اندیس ۱) و بازیافت (نمایش با اندیس ۲)؛
 $Ys2_{lit}$ و $Yf2_{lit}$ ، $Ys1_{lit}$ ، $Yf1_{lit}$ ، $Ys0_{lit}$ ، $Yf0_{lit}$: به ترتیب متغیرهای مکمل سوم برای مدل همتای استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط (نمایش با اندیس ۰)، احیا (نمایش با اندیس ۱) و بازیافت (نمایش با اندیس ۲)؛
 Y_{it} : ۱ اگر مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i در دوره t باز شود و ۰ در غیر این صورت؛
 U_{ht} : ۱ اگر مرکز بازیافت h در دوره t باز شود و ۰ در غیر این صورت؛
 D_{kt} : ۱ اگر مرکز اسقاط k در دوره t باز شود و ۰ در غیر این صورت؛
 PR_{jt} : ۱ اگر مرکز احیای j در دوره t باز شود و ۰ در غیر این صورت؛
 X_{lit} : ۱ اگر مشتری اولیه l به مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع i تخصیص داده شود و ۰ در غیر این صورت.

مدل پیشنهادی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی شامل دو تابع هدف است؛ تابع هدف ۱ به دنبال حداکثر کردن پاسخگویی به تقاضای مشتریان ثانویه است و تابع هدف ۲ به دنبال حداکثر کردن سود کل شبکه زنجیره تأمین برگشتی با توجه به درآمد حاصل از فروش محصولات احیاشده، قطعات بازیافتی و محصولات اسقاطی و هزینه‌های صرف شده برای حمل‌ونقل، نگهداری و مدیریت فرآیندهای جریان محصولات برگشتی و راه‌اندازی تسهیلات است. گفتنی است که عدم قطعیت پارامتر هزینه احیای محصولات برگشتی در تابع هدف ۲ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Max} \quad \sum_{p,h,s,t} \frac{T_{phst}}{md_{spt}} + \sum_{m,c,t} \frac{\sum_j Q_{jmct} + \sum_i R_{imct}}{sd_{mct}} \quad \text{محدودیت ۱}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Max} \quad \sum_{j,i,c,t} spq_{mc} \times (Q_{jmct} + R_{imct}) + \sum_{h,p,s,c} spt_{ps} \times T_{phst} - \sum_{i,t} f_i \times Y_{it} \\
& + \sum_{i,k,c,t} spw_{kc} \times W_{ikct} - \sum_{h,t} g_h \times U_{ht} - \sum_{j,t} b_j \times PR_{jt} - \sum_{k,t} \theta_k \times D_{kt} \\
& - \sum_{l,i,t} cf_{li} \times r_l \times X_{lit} - \sum_{i,j,c,t} cs_{ijc} \times Z_{ijct} - \sum_{i,k,c,t} ct_{ikc} \times W_{ikct} \\
& - \sum_{i,h,c,t} cr_{ihc} \times V_{ihct} - \sum_{i,j,c,t} cs_{ijc} \times O_{jict} - \sum_{j,m,c,t} cq_{jmc} \times Q_{jmct} \quad \text{محدودیت ۲} \\
& - \sum_{i,m,c,t} cu_{imc} \times R_{imct} - \sum_{phst} cm_{phs} \times T_{phst} - \sum_{s,t} ps_s \times TR_{st} - \sum_{c,j} Pro_{cj} \\
& - \sum_{m,c,t} pm_{cm} \times TF_{mct} + \sum_{j,i,m,c,t} rc_{cj} \times (Q_{jmct} + O_{jict}) - \sum_{c,j} Zro_{cj} \times bud_{cj}
\end{aligned}$$

$$\sum_i X_{lit} = 1 \quad \forall l, t \quad \text{محدودیت ۳}$$

$$-Zro_{cj} - Pro_{cj} \geq rc_{cj} \times (Q_{jmct} + O_{jict}) \quad \forall c, j, m, c, i, t \quad \text{محدودیت ۴}$$

$$-(Q_{jmct} + O_{jict}) \leq Xro_{cj} \leq (Q_{jmct} + O_{jict}) \quad \text{محدودیت ۵}$$

$$-\sum_k W_{ikct} + d_c \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zf_0 \times \Gamma_0 + \sum_l Rpf_{0l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۶}$$

$$Z1_0 + Rpf_{0l} \geq d1_c \times Yf_{0lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۷}$$

$$-Yf_{0lit} \leq X_{lit} \leq Yf_{0lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۸}$$

$$\sum_k W_{ikct} - d_c \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zs_0 \times \Gamma_0 + \sum_l Rps_{0l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۹}$$

$$Zs_0 + Rps_{0l} \geq d1_c \times Ys_{0lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۰}$$

$$-Ys_{0lit} \leq X_{lit} \leq Ys_{0lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۱۱}$$

$$-\sum_h V_{ihct} + e_c \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zf_1 \Gamma_1 + \sum_l Rpf_{1l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۲}$$

$$Zf_1 + Rpf_{1l} \geq e1_c \times Yf_{1lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۳}$$

$$-Yf_{1lit} \leq X_{lit} \leq Yf_{1lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۱۴}$$

$$\sum_h V_{ihct} - e_c \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zs_1 \Gamma_1 + \sum_l Rps_{1l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۵}$$

$$Z4_1 + Rps_{1l} \geq e1_c \times Ys_{1lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۶}$$

$$-Ys_{1lit} \leq X_{lit} \leq Ys_{1lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۱۷}$$

$$-\sum_j Z_{ijct} + u_u \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zf_2 \times \Gamma_2 + \sum_l Rpf_{2l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۸}$$

$$Zf_2 + Rpf_{2l} \geq u1_c \times Yf_{2lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۱۹}$$

$$-Yf_{2lit} \leq X_{lit} \leq Yf_{2lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۲۰}$$

$$\sum_j Z_{ijct} - u_u \times \sum_l r_{lc} \times X_{lit} + Zs_2 \times \Gamma_2 + \sum_l Rps_{2l} \leq 0 \quad \forall i, t, c \quad \text{محدودیت ۲۱}$$

$$Zs_2 + Rps_{2l} \geq u_{1c} \times Ys_{2lit} \quad \forall l, i, t, c \quad \text{محدودیت ۲۲}$$

$$-Ys_{2lit} \leq X_{lit} \leq Ys_{2lit} \quad \forall l, i, t \quad \text{محدودیت ۲۳}$$

$$\sum_j Q_{jmct} + \sum_i R_{imct} + TF_{mct} \geq sd_{mct} \quad \forall m, c, t \quad \text{محدودیت ۲۴}$$

$$\sum_h T_{phst} + TR_{pst} \geq md_{spt} \quad \forall s, p, t \quad \text{محدودیت ۲۵}$$

$$\sum_{j,c} Z_{ijct} + \sum_{m,c} R_{imct} \leq caf_i \times Y_{it} \quad \forall i, t \quad \text{محدودیت ۲۶}$$

$$\sum_{m,c} Q_{jmct} + \sum_{i,c} O_{jict} \leq cas_j \times PR_{jt} \quad \forall j, t \quad \text{محدودیت ۲۷}$$

$$\sum_{i,c} W_{ikct} \leq cat_k \times D_{kt} \quad \forall k, t \quad \text{محدودیت ۲۸}$$

$$\sum_{p,s} T_{phst} \leq car_h \times U_{ht} \quad \forall h, t \quad \text{محدودیت ۲۹}$$

$$\sum_m Q_{jmct} + \sum_i O_{jict} + HRC_{jct} = \sum_j Z_{ijc,t-1} \quad \forall j, c, t \quad \text{محدودیت ۳۰}$$

$$\sum_m R_{jmct} + \sum_k W_{ikct} + \sum_j Z_{ijct} + HCRC_{ict} = \sum_j O_{jict} + \sum_l X_{lit} \quad \forall i, c, t \quad \text{محدودیت ۳۱}$$

$$T_{phst} = \sum_i bom_{cp} \times V_{ihct} \quad \forall c, t, h \quad \text{محدودیت ۳۲}$$

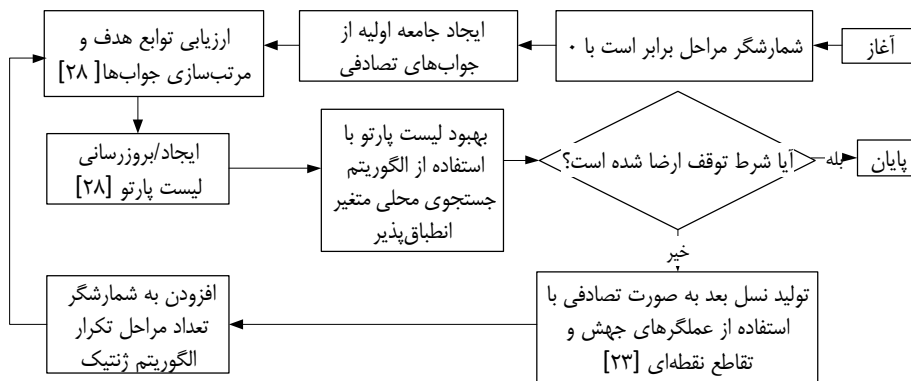
در مدل ریاضی بالا، محدودیت ۳ الزام تخصیص تنها یک مرکز جمع‌آوری / بازتوزیع به هر مشتری اولیه را برای دریافت محصولات برگشتی نشان می‌دهد. محدودیت‌های خطی ۴ و ۵، با توجه به مدل همتای استوار مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای (ارائه‌شده توسط [۷]) برای لحاظ کردن عدم قطعیت هزینه احیا تحت تأثیر عدم قطعیت کیفیت محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های ۶، ۹ و ۱۲، میزان محصول برگشتی اختصاص یافته به مراکز اسقاط، بازیافت و احیا را به ترتیب نشان می‌دهند. گفتنی است که عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، بازیافت و احیا به ترتیب در محدودیت‌های ۶ و ۹، ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ با توجه به پارامترهای نامعین d ، e و u در نظر گرفته شده است. مجموعه محدودیت‌های خطی ۸-۷ و ۱۱-۱۰، ۱۳-۱۴ و ۱۶-۱۷ و ۲۰-۱۹ و ۲۳-۲۲ نیز با توجه به مدل همتای استوار مبتنی بر برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای (ارائه‌شده توسط برتسیماس و سیم [۷]) برای لحاظ کردن عدم قطعیت بودجه‌ای میزان محصولات برگشتی قابل اسقاط، بازیافت و احیا در نظر گرفته شده‌اند.

محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵)، ارضای حداکثر تقاضای ممکن برای مشتریان محصولات احیاشده و قطعات اسقاط‌شده که توسط شبکه زنجیره تأمین برگشتی قابل ارائه هستند را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۲۶ تا ۲۹ نشان‌دهنده ظرفیت محدود هریک از تسهیلات شبکه زنجیره تأمین برگشتی برای انجام فرآیندهای تخصیص داده‌شده به آن هستند. محدودیت‌های ۳۰ تا ۳۲ تعادلات جریان در تسهیلات جمع‌آوری / بازتوزیع، احیا و اسقاط را نشان می‌دهند. امکان نگهداری موجودی برای دوره‌های متوالی در تسهیلات احیا و جمع‌آوری / بازتوزیع نیز در نظر گرفته شده است.

روش حل پیشنهادی. در این بخش، با توجه به ماهیت حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی که از نوع مسائل با پیچیدگی بسیار زیاد است، یک روش حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ممیتیک معرفی شده است. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک طی سال‌های اخیر روی مجموعه وسیعی از مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین یک و چندهدفه در ابعاد بزرگ، حاکی از برتری نسبی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تحولی است [۹]. با وجود قدرت الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، این الگوریتم دارای یک نقطه ضعف از نظر کارایی محدود در قدرت بخشیدن به فرآیند جستجوی محلی است [۱۸]. این نقطه ضعف با معرفی الگوریتم ممیتیک در ادبیات موضوع برطرف شده است که از یک فرآیند جستجوی محلی در هر تکرار الگوریتم ژنتیک بهره می‌برد [۹].

در این مطالعه، یک الگوریتم ممیتیک با ترکیب جدید برپایه الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی چندهدفه ارائه شده است. جستجوی فضای جواب توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II انجام می‌شود [۳۲]. بهبود جواب‌های پارتو در هر مرحله از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II توسط الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر انجام می‌شود. از الگوریتم ابتکاری تپه‌نورد نیز برای بیشتر عمق بخشیدن به فرآیند جستجوی محلی در الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر استفاده شده است. ساختار الگوریتم ممیتیک پیشنهادشده در شکل ۲ نشان داده شده است. هر کروموزوم جواب توسط یک ارائه باینری دوبعدی نمایش داده شده است. اندازه این ارائه عبارت است از «مجموع تعداد مراکز جمع‌آوری / بازتوزیع، احیا، اسقاط، بازیافت و حاصل ضرب تعداد مراکز جمع‌آوری / بازتوزیع در مشتریان اولیه» در «تعداد دوره‌های زمانی». هر ژن در این کروموزوم حاوی مقدار یک / صفر است که وضعیت متغیر باینری مربوطه نظیر باز (مقدار ۱) یا بسته بودن (مقدار ۰) یک تسهیل را نشان می‌دهد.

برازش مقدار معیار ارزیابی هر کروموزوم با استفاده از تکنیک مجموع وزنی انجام می‌شود. مجموع وزن‌ها برابر با یک است و مقادیر آن‌ها به صورت تصادفی در هر مرحله از تکرار الگوریتم تعیین می‌شود (فرمول ۲۴ مشاهده شود) [۳۳]. این تکنیک امکان جستجوی مناسب فضای جواب را با فراهم کردن شانس یکسان برای تمامی جواب‌های پارتو فراهم می‌کند.



شکل ۲. ساختار الگوریتم مبتنی بر پایه الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر

$$w_i = \frac{\text{random}_i}{(\text{random}_1 + \text{random}_2)} \quad \text{random}_i \in U(0,1), i = 1, 2 \quad \text{محدودیت} \quad ۲۴$$

مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده با جایگذاری مقادیر متغیرهای باینری حاصل از کدگذاری کروموزوم، به یک زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه (با در نظر گرفتن تابع وزنی جدید) تبدیل و با نرم‌افزار لیندوگلوبال گمز حل می‌شود. جواب‌های پارتو به دست آمده در هر مرحله با استفاده از الگوریتم جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر بهبود داده می‌شود. این الگوریتم با استفاده از یک رویکرد سیستماتیک، از میان نه ساختار همسایگی ارائه شده برای جستجوی همسایگی، برترین را بر اساس سابقه عملکرد هر یک انتخاب و در هر تکرار روی جواب‌ها پیاده‌سازی می‌کند. تعداد جواب‌های ناچیره ایجاد شده بر اثر اعمال یک ساختار همسایگی مشخص در تکرارهای قبلی، مبنای سنجش عملکرد هر ساختار همسایگی و انتخاب آن در تکرار بعدی خواهد بود. این انتخاب توسط چرخه رولت انجام خواهد شد [۴، ۵]. علاقه‌مندان برای آشنایی بیشتر با نه ساختار همسایگی مذکور می‌توانند به تحقیق انجام شده توسط حسنی و همکارانش [۱۸] مراجعه کنند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل ریاضی (توابع هدف و محدودیت‌های ۱ تا ۳۲) با هدف بررسی اثر عدم قطعیت بر عملکرد و طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی ارائه شده است. برای این منظور، پنج مسئله نمونه اصلی و الگوی تولید داده‌ها از مطالعه انجام شده توسط اسکندرپور و همکارانش [۱۳] به عنوان نزدیک‌ترین مسئله مشابه بررسی شده در ادبیات موضوع که در این مطالعه نیز توسعه یافته، برداشت شده است (جدول ۳ و ۴). به منظور نمایش سطوح متفاوت محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده، پنج سطح مختلف شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد کل بودجه‌های عدم قطعیت برای هر یک از مسائل نمونه اصلی (نمایش داده شده در جدول ۲) در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه، ۲۵ مسئله نمونه در مجموع بررسی شده است. سطوح ۰ و ۱۰۰ درصد بودجه به ترتیب نشان‌دهنده قطعیت و عدم قطعیت کامل است. سطوح میانی نیز یک حد متوسط از محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهند. تنظیم تمامی پارامترهای الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی انجام شده است [۱۸] و نتایج آن را می‌توان در جدول ۵ مشاهده کرد.

نخست، کیفیت جواب‌های به دست آمده از الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده در مقایسه با دو الگوریتم فراابتکاری مشابه، بر اساس دو معیار ارزیابی متداول ارائه شده در ادبیات موضوع و پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم حل، بررسی شده است [۱۱، ۵]. این دو معیار به ترتیب عبارت‌اند از: متوسط تعداد جواب‌های پارتو به دست آمده طی هر اجرای الگوریتم (معیار ۱) و متوسط نرخ جواب‌های پارتو به دست آمده (برحسب درصد) توسط یک الگوریتم به طوری که توسط جواب‌های پارتو دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی مغلوب نشود (معیار ۲). زمان برحسب ثانیه نیز به عنوان سومین معیار مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان از برتری الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده در مقایسه با دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر دارد. نتایج مقایسه با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II حاکی از اثربخشی فرآیند جستجوی محلی در عمق بخشیدن به و بهبود در کیفیت جواب‌های به دست آمده است. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II از نظر زمان جست‌وجو برتر از ممتیک پیشنهاد شده است؛ هرچند این برتری تحت تأثیر کیفیت پایین جواب آن قرار می‌گیرد. همچنین، برتری الگوریتم ارائه شده نسبت به ممتیک برپایه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر بیانگر اثر مثبت استفاده از یک فرآیند سیستماتیک در جستجوی همسایگی و انتخاب ساختارهای همسایگی مبتنی بر عملکرد هر یک از ساختارها طی فرآیند جست‌وجو نسبت به انتخاب ۹ ساختار همسایگی به صورت متوالی است. این در حالی است که این

برتری را می‌توان از نظر معیار زمان جست‌وجو نیز مشاهده کرد. نتایج اعمال آزمون ناپارامتری من-ویتنی برای تمامی مقایسه‌های ممکن بین عملکرد الگوریتم ممتیک پیشنهادی با سایر روش‌های حل مورد مقایسه از منظر ۳ معیار در نظر گرفته شده، حاکی از اختلاف آماری معنادار برای تمامی مقایسات در سطح اطمینان ۹۵ درصد (مقدار بحرانی آماره آزمون با توجه به اندازه نمونه ۲۵ برابر با ۲۰۱) است [۱۸].

در شکل ۳، مجموعه نقاط پارتو یافت‌شده برای بهینه‌سازی توأمان حداکثرسازی سود و میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان برای پنج بودجه (سطح) مختلف عدم‌قطعیت نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر ساختن سود لزوماً به افزایش سطح پاسخگویی منجر نخواهد شد. این در حالی است که با افزایش بودجه عدم‌قطعیت، سود کلی زنجیره نیز کاهش یافته که حاکی از طراحی محافظه‌کارانه شبکه در برابر شدت یافتن عدم‌قطعیت است. از سوی دیگر، افزایش بودجه عدم‌قطعیت کیفیت محصولات برگشتی تأثیر منفی بر سود کل شبکه خواهد داشت؛ به‌طوری‌که در پی آن شاهد کاهش در سود کل زنجیره هستیم (شکل ۳). از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که برای یک مقدار مشخص از بودجه عدم‌قطعیت، شاهد روند کاهشی سود کل شبکه در پی افزایش سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان هستیم. دلیل این امر را می‌توان در افزایش هزینه‌های راه‌اندازی تسهیلات پاسخگویی به تقاضای مشتریان و نگهداری به‌منظور پاسخگویی بیشتر به تقاضای مشتریان دانست که در نهایت به کاهش سود کل زنجیره منجر خواهد شد. در شکل ۴، می‌توان کاهش هزینه نگهداری موجودی را همزمان با افزایش بودجه عدم‌قطعیت مشاهده کرد که نشان از رفتار چابک زنجیره در برابر افزایش عدم‌قطعیت میزان برگشت محصولات دارد. با مقایسه ساختار شبکه ایجادشده برای مسائل نمونه مورد بررسی برای بودجه‌های عدم‌قطعیت مختلف، مشاهده می‌شود که پویایی ساختار شبکه در فضای عدم‌قطعیت کامل (سه‌م ۱۰۰ درصدی بودجه عدم‌قطعیت) بسیار افزایش خواهد یافت. این پویایی ساختار شبکه در حالی است که شبکه ایجادشده در فضای قطعیت کامل (سه‌م ۰ درصدی بودجه عدم‌قطعیت)، رفتاری با پویایی بسیار کمتر در پیش خواهد گرفت. در این مطالعه، معیارهای در نظر گرفته شده برای سنجش پویایی شبکه با توجه به ساختار آن عبارت است از سهمی از تسهیلات برحسب درصد که طی دوره برنامه‌ریزی مدنظر حداقل برای یک‌بار باز و بسته شده‌اند و سهمی از تسهیلات برحسب درصد فقط که برای یک‌بار باز شده و تا انتهای دوره برنامه‌ریزی نیز باز نگه داشته شده‌اند. دو معیار مذکور به ترتیب «الف» و «ب» نامیده شده‌اند و مقادیر آن‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. افزایش معیار «الف» به‌تنهایی بیانگر تنوع انتخاب تسهیلات طی دوره‌های برنامه‌ریزی است. این معیار زمانی می‌تواند به‌خوبی نشانگر پویایی ساختار یک شبکه زنجیره تأمین باشد که از وضعیت باز و بسته شدن تسهیلات انتخاب‌شده طی دوره برنامه‌ریزی

نیز اطلاع داشته باشیم (معیار «ب»). برای نمونه، تنها اطلاع از انتخاب تمامی تسهیلات طی دوره برنامه‌ریزی نمی‌تواند بیانگر پویایی ساختار یک شبکه باشد؛ زیرا ممکن است این تسهیلات از ابتدا تا انتهای دوره برنامه‌ریزی باز بوده باشند و در نتیجه شبکه یک ساختار کاملاً ایستا داشته باشد؛ بنابراین، افزایش تعداد تسهیلات انتخاب‌شده (معیار «الف») و درعین‌حال کاهش تعداد تسهیلاتی که در تمام طول دوره برنامه‌ریزی باز نگه داشته شده‌اند (معیار «ب»)، می‌تواند تداعی‌کننده یک ساختار پویا برای شبکه زنجیره باشد. برای نمونه، در این مطالعه می‌توان پویایی مدنظر را در قالب افزایش تعداد تسهیلات با وضعیت باز و بسته شده طی دوره برنامه‌ریزی و کاهش تعداد تسهیلاتی که پس از گشایش تا انتهای دوره برنامه‌ریزی باز نگه داشته شده‌اند، در حالت عدم قطعیت کامل نسبت به قطعیت کامل مشاهده کرد.

جدول ۳. مسائل نمونه اصلی [۱۳]

تعداد							
مشتریان ثانویه قطعات	مشتریان ثانویه محصولات	مشتریان اولیه	مراکز اسقاط	مراکز بازیافت	مراکز احیا بازتوزیع	مراکز جمع‌آوری / نمونه اصلی	مسئله
۶	۱۵	۱۵	۴	۳	۳	۱۰	۱
۸	۴۰	۴۰	۵	۴	۴	۳۰	۲
۱۰	۷۰	۷۰	۶	۵	۵	۵۰	۳
۱۲	۱۰۰	۱۰۰	۷	۶	۶	۸۰	۴
۱۴	۱۲۰	۱۲۰	۸	۷	۷	۱۰۰	۵

جدول ۴. حدود پارامترهای مدل پیشنهادشده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی [۱۳]

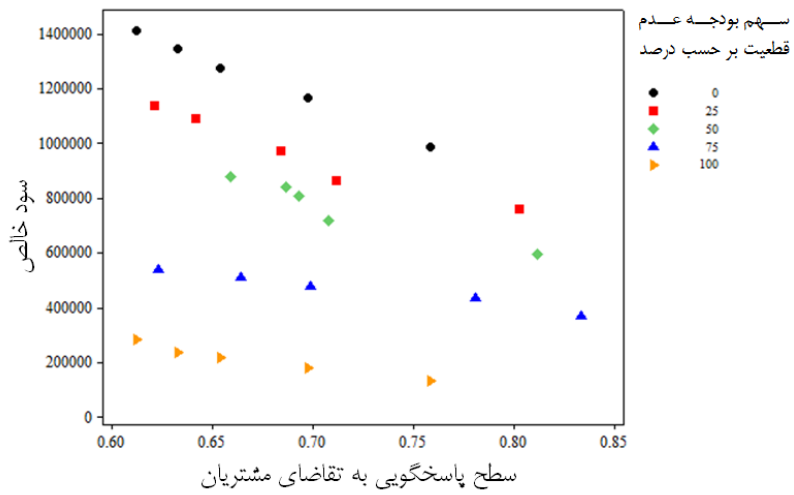
پارامتر	حدود	پارامتر	حدود	پارامتر	حدود
cf_{lic}	[۸-۱۶]	caf_i	[۷۰-۱۲۰]	b_j	[۴۰۰۰-۵۰۰۰]
cq_{jmc}	[۳-۸]	cas_j	(تعداد مرکز احیا)/(مجموع تقاضا) $\times [۱/۵-۲/۳]$	θ_k	[۲۰۰۰-۳۰۰۰]
cm_{phs}	[۳-۸]	cat_k	(تعداد مرکز اسقاط)/(مجموع تقاضا) $\times [۰/۴-۰/۷]$	pm_{cm}	[۱۲-۱۴]
cs_{ijc}	[۵-۱۲]	car_h	(تعداد مرکز بازیافت)/(مجموع تقاضا) $\times [۰/۴-۰/۷]$	ps_{ps}	[۹-۱۰]
ct_{ikc}	[۳-۸]	rc_{ci}	[۶-۸]	spw_{kc}	[۵-۶]
ct_{ihc}	[۳-۸]	Γ_0	۱	spq_{mc}	[۱۱-۱۳]
cu_{imc}	[۸-۱۶]	Γ_1	۱	spt_{ps}	[۸-۹]
r_{lc}	[۱۰-۵۰]	Γ_2	۱	md_{spt}	[۵۰-۱۰۰]
d_c	[۰/۲-۰/۳۵]	bud_{cj}	۱۰ \times تعداد مراکز احیا	sd_{mct}	[۱۰-۴۰]
e_c	[۰/۴-۰/۵]	f_i	[۵۰۰۰-۱۰۰۰۰]	g_h	[۱۰۰۰-۲۰۰۰]

جدول ۵. مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم ممتیک با استفاده از روش تاگوچی (مقادیر انتخاب شده از میان سه سطح مورد بررسی با خط زیرین مشخص شده است)

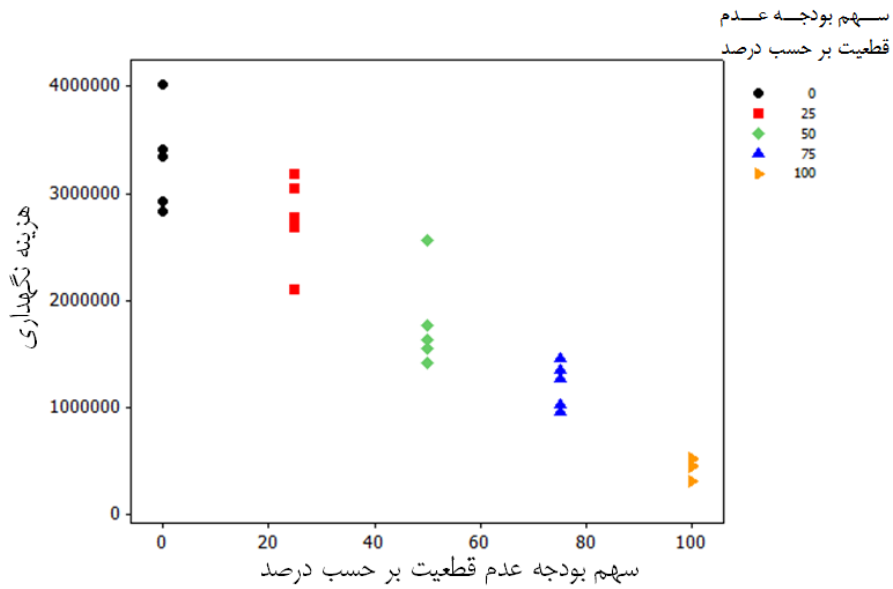
پارامتر	سطوح آزمایش	پارامتر	سطوح آزمایش
تکرار الگوریتم ژنتیک	(۴۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰)	اندازه جمعیت	(۵۰، ۷۵، ۱۰۰)
تکرار الگوریتم جستجوی متغیر همسایگی	(۸، ۱۰، ۱۲)	تکرار الگوریتم	(۳، ۵، ۴)
احتمال جهش (۱ منهای احتمال تقاطع)	(۰/۱، ۰/۲، ۰/۳)	تپهنورد	

جدول ۶. مقایسه کارایی الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر انطباقی پذیر

مسئله نمونه اصلی	عدم قطعیت (در صد)	بهبود بودجه	الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر انطباقی پذیر			الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II			الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر		
			معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳
۱	۲۵	۰	۱۰/۵۹	۰/۶۱۹۰	۴۱/۰۳	۸/۷۴	۰/۵۵۶۳	۲۹/۲۸	۹/۰۱	۰/۵۷۴۱	۴۵/۱۲
			۹/۳۷	۰/۶۰۱۲	۴۳/۰۹	۷/۶۵	۰/۵۴۱۱	۳۳/۰۲	۸/۸۱	۰/۵۶۴۹	۴۷/۳۰
			۹/۰۲	۰/۶۴۷۳	۴۵/۰۷	۷/۳۲	۰/۵۸۶۴	۳۱/۴۳	۷/۵۲	۰/۶۰۲۲	۴۸/۱۱
۲	۷۵	۱۰۰	۸/۸۰	۰/۶۱۹۶	۴۵/۴۶	۷/۱۲	۰/۵۶۰۳	۳۲/۳۲	۷/۳۴	۰/۵۷۶۰	۴۸/۹۲
			۸/۴۶	۰/۶۰۲۱	۵۱/۷۶	۶/۲۷	۰/۵۲۰۳	۳۶/۱۹	۶/۹۲	۰/۵۴۳۶	۵۳/۷۱
			۱۱/۶۶	۰/۶۱۲۰	۲۸۵/۶۱	۹/۸۶	۰/۵۴۹۴	۱۹۱/۰۹	۱۰/۰۸	۰/۵۷۰۲	۳۰۰/۰۴
۳	۲۵	۰	۱۰/۲۸	۰/۶۰۶۸	۲۹۰/۳۲	۸/۵۰	۰/۵۴۵۹	۱۹۲/۳۹	۸/۷۹	۰/۵۶۸۶	۳۱۲/۶۴
			۱۰/۱۳	۰/۵۹۶۳	۲۹۰/۴۳	۸/۳۶	۰/۴۹۶۷	۱۹۵/۵۵	۸/۶۶	۰/۵۵۸۰	۳۳۱/۴۱
			۱۰/۰۴	۰/۵۶۸۸	۲۹۴/۴۷	۸/۳۳	۰/۴۷۱۲	۲۰۲/۷۱	۸/۴۷	۰/۵۲۹۱	۳۳۸/۰۹
۴	۱۰۰	۰	۹/۱۳	۰/۵۳۷۰	۳۱۰/۵۸	۷/۲۱	۰/۴۳۱۰	۲۰۷/۷۱	۷/۲۳	۰/۴۹۱۰	۳۶۲/۰۹
			۱۳/۲۸	۰/۶۱۰۲	۱۲۷۱/۶۲	۱۱/۱۶	۰/۵۵۴۱	۹۱۶/۰۷	۱۱/۴۹	۰/۵۷۱۴	۱۳۸۹/۴۶
			۱۲/۷	۰/۵۹۴۱	۱۲۷۳/۱۲	۱۰/۰۴	۰/۵۳۷۰	۹۲۸/۰۰	۱۰/۹۰	۰/۵۵۲۶	۱۳۹۸/۶۵
۵	۲۵	۵۰	۱۰/۶۵	۰/۵۸۱۹	۱۳۴۲/۰۵	۸/۲۳	۰/۵۲۳۹	۱۰۲۱/۲۳	۹/۰۰	۰/۵۴۲۹	۱۴۳۷/۲۱
			۹/۰۳	۰/۵۷۵۷	۱۴۲۸/۳۲	۷/۰۱	۰/۵۱۷۴	۱۰۶۸/۷۱	۷/۵۳	۰/۵۳۴۲	۱۵۷۰/۲۴
			۸/۴۲	۰/۵۱۹۰	۱۴۹۶/۴۸	۶/۲۳	۰/۴۷۸۰	۱۱۰۴/۰۵	۶/۵۱	۰/۴۹۲۱	۱۶۳۹/۹۰
۶	۰	۲۵	۱۴/۶۹	۰/۵۷۹۴	۱۶۵۱/۵۵	۱۲/۵۴	۰/۵۲۱۸	۱۲۰/۱/۷۲	۱۲/۹۳	۰/۵۴۱۹	۱۸۱۰/۶۳
			۱۴/۳۶	۰/۵۷۷۷	۱۸۳۹/۵۶	۱۲/۲۸	۰/۵۲۰۵	۱۳۴۷/۰۱	۱۲/۶۵	۰/۵۴۱۲	۲۰۱۲/۵۶
			۱۲/۷۸	۰/۵۶۱۵	۱۸۹۲/۸۶	۱۰/۸۱	۰/۵۰۶۸	۱۳۶۲/۳۳	۱۰/۹۹	۰/۵۲۱۲	۲۰۷۸/۳۱
۷	۷۵	۱۰۰	۱۱/۵۵	۰/۵۳۶۵	۱۹۸۱/۶۵	۹/۷۰	۰/۴۸۱۴	۱۴۳۶/۰۲	۹/۹۶	۰/۵۰۲۸	۲۱۶۸/۵۶
			۱۰/۷۱	۰/۵۰۳۳	۲۱۰۰/۱۷	۸/۱۱	۰/۴۳۲۸	۱۵۷۲/۱۰	۸/۹۳	۰/۴۸۱۱	۲۳۵۱/۷۰
			۱۶/۷۴	۰/۵۵۲۵	۱۸۰۴/۷۸	۱۴/۳۷	۰/۴۹۹۹	۱۳۰۴/۳۳	۱۴/۸۹	۰/۵۱۸۵	۱۹۷۲/۶۷
۸	۲۵	۵۰	۱۵/۷۱	۰/۵۴۲۷	۱۹۴۷/۴۲	۱۳/۵۸	۰/۴۹۲۴	۱۴۳۶/۴۷	۱۳/۷۷	۰/۵۰۵۸	۲۱۳۰/۶۳
			۱۴/۹۰	۰/۵۳۳۴	۱۹۹۸/۳۵	۱۲/۸۳	۰/۴۸۰۰	۱۴۴۱/۵۲	۱۳/۱۳	۰/۴۹۹۶	۲۱۸۹/۹۰
			۱۳/۹۵	۰/۵۱۳۶	۲۰۳۹/۱۰	۱۱/۹۳	۰/۴۶۱۸	۱۴۵۸/۰۰	۱۲/۱۷	۰/۴۷۶۴	۲۲۳۰/۳۸
۹	۱۰۰	۰	۱۲/۶۳	۰/۴۸۰۲	۲۱۹۴/۱۱	۱۰/۴۱	۰/۴۳۶۸	۱۵۴۶/۲۱	۱۱/۳۰	۰/۴۵۱۰	۲۳۴۰/۷۱



شکل ۳. مجموعه نقاط جبهه پارتو با توجه به معیارهای ارزیابی سود و سطح پاسخگویی برای سطوح مختلف عدم قطعیت میزان جریان محصولات برگشتی



شکل ۴. رفتار هزینه نگهداری متعلق به . مجموعه نقاط جبهه پارتو در برابر سطوح مختلف عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی

جدول ۷. پویایی ساختار شبکه زنجیره تأمین برگشتی در برابر سطوح مختلف عدم قطعیت میزان محصولات برگشتی برحسب مقادیر معیارهای «الف» و «ب» برحسب درصد (عناصر هر خانه جدول نشان دهنده «معیار ب»، «معیار الف» است)

مسئله نمونه	سهم بودجه عدم قطعیت (درصد)	مراکز جمع آوری / بازتوزیع	مراکز احیا	مراکز باز یافت	مراکز اسقاط
۱	۰	(۷۰.۶۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۵۰،۵۰)
	۲۵	(۶۰.۷۵)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۵۰،۵۰)
	۵۰	(۵۵.۷۵)	(۸۳،۱۰۰)	(۱۰۰،۱۰۰)	(۵۰،۶۰)
	۷۵	(۵۵.۷۵)	(۷۵،۱۰۰)	(۸۳،۱۰۰)	(۷۰،۵۰)
	۱۰۰	(۵۰.۸۰)	(۱۰۰،۶۶)	(۱۰۰،۶۶)	(۷۵،۵۰)
۲	۰	(۷۰.۶۰)	(۵۰،۵۰)	(۵۰،۵۰)	(۶۰،۴۰)
	۲۵	(۵۸.۷۰)	(۵۰،۶۰)	(۵۰،۵۰)	(۶۰،۶۵)
	۵۰	(۵۸.۷۱)	(۵۰،۶۰)	(۵۰،۵۰)	(۶۰،۶۵)
	۷۵	(۵۴.۷۳)	(۵۰،۷۰)	(۵۰،۷۵)	(۶۰،۷۳)
	۱۰۰	(۷۳.۵۳)	(۷۵،۵۰)	(۷۵،۵۰)	(۸۰،۶۰)
۳	۰	(۷۲.۶۲)	(۶۰،۴۰)	(۶۰،۴۰)	(۸۳،۶۶)
	۲۵	(۶۲.۷۵)	(۶۰،۶۰)	(۶۰،۷۵)	(۶۰،۸۳)
	۵۰	(۶۲.۷۸)	(۶۰،۷۵)	(۶۰،۷۵)	(۶۲،۸۳)
	۷۵	(۶۰.۷۸)	(۶۰،۷۵)	(۶۰،۷۵)	(۵۵،۸۳)
	۱۰۰	(۸۰.۶۰)	(۸۰،۶۰)	(۸۰،۶۰)	(۸۳،۵۰)
۴	۰	(۶۲.۵۰)	(۸۳،۶۶)	(۸۳،۶۶)	(۷۱،۵۷)
	۲۵	(۶۲.۵۴)	(۶۲،۸۳)	(۶۴،۸۳)	(۵۷،۷۶)
	۵۰	(۶۲.۶۸)	(۶۲،۸۳)	(۶۲،۸۳)	(۵۱،۸۰)
	۷۵	(۶۲.۷۳)	(۵۵،۸۳)	(۵۳،۸۳)	(۴۶،۸۰)
	۱۰۰	(۷۵.۶۲)	(۸۳،۵۰)	(۸۳،۵۰)	(۸۵،۴۲)
۵	۰	(۶۳.۵۲)	(۵۷،۴۲)	(۵۷،۵۷)	(۶۲،۵۰)
	۲۵	(۴۶.۶۳)	(۴۲،۶۰)	(۵۵،۶۳)	(۴۲،۶۲)
	۵۰	(۴۳.۶۸)	(۴۲،۶۵)	(۴۹،۷۰)	(۴۲،۶۵)
	۷۵	(۴۲.۷۵)	(۴۲،۷۱)	(۴۳،۷۸)	(۳۷،۷۰)
	۱۰۰	(۷۸.۴۱)	(۷۱،۴۲)	(۸۵،۴۲)	(۷۵،۳۷)

۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

یکی از مسائل مهم در مقوله مدیریت زنجیره‌های تأمین برگشتی، طراحی شبکه زنجیره است که در زمره تصمیمات استراتژیک بوده و تأثیر بسیار مهمی بر عملکرد مطلوب آن خواهد داشت؛ بنابراین، توسعه مدل‌های ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با هدف نزدیکی بیشتر به شرایط حاکم بر دنیای واقعی، همواره مورد توجه محققان بوده است. افزایش تعداد معیارهای ارزیابی و در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در فضای برنامه‌ریزی تنها نمونه‌هایی از

پیچیدگی‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی با هدف افزایش سازگاری با شرایط دنیای واقعی است.

در این مقاله، مدل ارائه‌شده توسط اسکندرپور و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۴، با هدف ارائه یک مدل جامع از چندین جنبه کاربردی توسعه یافته است که عبارت است از: در نظر گرفتن دو معیار ارزیابی حداکثر کردن سود و سطح پاسخ‌دهی به تقاضای مشتریان به صورت توأم، برنامه‌ریزی برای چندین دوره زمانی و چندین محصول با قطعات متفاوت، لحاظ کردن عدم قطعیت میزان و کیفیت محصولات برگشتی و امکان نگهداری موجودی برای چندین دوره زمانی در تسهیلات زنجیره تأمین.

با توجه به پیچیدگی‌های زیاد حل مدل ارائه‌شده، یک روش حل فراابتکاری با ترکیب جدید برای این مسئله دوهدفه مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه شده است. این الگوریتم ممتیک برای جستجوی فضای جواب از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II بهره برده و بهبود کیفیت جواب‌های پارتو در هر مرحله توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر انجام می‌شود. نتایج سنجش کارایی این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و ممتیک مبتنی بر ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II و جستجوی همسایگی متغیر، حاکی از برتری معنادار از حیث کیفیت جواب است. این برتری حاکی از اثربخشی مثبت استفاده از یک ساختار سیستماتیک برای انتخاب ساختارهای همسایگی حین فرآیند بهبود جواب است. نتایج حل مدل استوار ارائه‌شده نیز نشان می‌دهد که با افزایش بودجه عدم قطعیت، سودآوری زنجیره کاهش یافته و شاهد شکل‌گیری یک طراحی محافظه‌کارانه برای شبکه برگشتی خواهیم بود. استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای می‌تواند به‌خوبی طیف متنوعی از ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده را نشان دهد. از سوی دیگر، با افزایش بودجه عدم قطعیت، هزینه‌های نگهداری زنجیره با کاهش همراه خواهد بود که می‌تواند تداعی‌کننده رفتار چابک زنجیره باشد. این در حالی است که پویایی ساختار زنجیره به‌منظور افزایش انعطاف در برابر تغییرات محیطی، همزمان با افزایش عدم قطعیت افزایش خواهد یافت.

با توجه به اهمیت مقوله مدیریت موجودی قطعات و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در مدیریت زنجیره‌های تأمین برگشتی، یکپارچه کردن این تصمیمات با طراحی شبکه زنجیره تأمین می‌تواند به‌عنوان یکی از زمینه‌های تحقیقاتی آتی، جالب توجه باشد. یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقاتی کاربردی، در نظر گرفتن تصمیم‌گذاری محمولات برگشتی باهدف ایجاد انگیزه برای جمع‌آوری محصولات از مشتریان و خرید قطعات یا محصولات احیاشده توسط مشتریان ثانویه، در طراحی شبکه برگشتی است.

منابع

۱. آذر، عادل، ربیعه، مسعود، مدرس یزدی، محمد. و فطانت فرد حقیقی، محمد. (۱۳۹۰) مدل ریاضی منبع‌یابی چند هدفه استوار- فازی: رویکردی در مدیریت ریسک زنجیره تامین ایران خودرو. فصلنامه مدرس علوم انسانی (پژوهش‌های مدیریت در ایران). ۵۱.
۲. ربیعه، مسعود، آذر، عادل، مدرس یزدی، محمد. و فطانت فرد حقیقی، محمد. (۱۳۹۳) طراحی مدل ریاضی منبع‌یابی استوار چند هدفه: رویکردی در کاهش ریسک زنجیره تامین (مورد مطالعه: زنجیره تامین ایران خودرو). فصلنامه چشم‌انداز مدیریت صنعتی. ۱، ۵۷.
۳. مرادی، محمود، صلاحی، مازیار، بردسیری، مرضیه، جمالیان، علی. (۱۳۹۳) یک مدل جدید استوار در طراحی شبکه زنجیره تامین تحت عدم قطعیت. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن (ریاضی کاربردی). ۳، ۲۶-۲۹.
4. 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.
5. Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paksoy, T. (2006). A Genetic Algorithm Approach for Multi-Objective Optimization of Supply Chain Networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 196-215.
6. Aras, N. and D. Aksen, (2008). Locating Collection Centers for Distance and Incentive Dependent Returns. *Int J Prod Econ*, 111(2), 316-333.
7. Bertsimas, D. and M. Sim, (2004). The Price of Robustness. *Operations Research*, 52(1), 35-53.
8. Das, D. and P. Dutta, (2013). Simulation Study of an Integrated Reverse Logistics in Fuzzy Environment, in *In IAENG transactions on engineering technologies*, Springer: Netherlands, 151-165.
9. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182.
10. Du, F. and G.W. Evans, (2008). A Bi-Objective Reverse Logistics Network Analysis for Post-Sale Service. *Comput Oper Res*, 35, 2617-34.
11. Eskandarpour, M., E. Nikbakhsh, and S.H. Zegordi, (2014). Variable Neighborhood Search for the Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach. *Computers & Operations Research*, 13.
12. Eskandarpour, M., S.H. Zegordi, and E. Nikbakhsh, (2013). A parallel multi-objective variable neighborhood search for the sustainable post-sales network design. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 117-131.
13. Eskandarpour, M., Zegordi, S.H., and Nikbakhsh, E. (2014). A Reverse Logistics Network for Recovery Systems and a Robust Metaheuristic Solution Approach. *Int J Adv Manuf Technol*, 74, 1393-1406.
14. Gou, Q., Liang, L., Huang, Z., and Xu, C. (2008). A Joint Inventory Model for an Open-Loop Reverse Supply Chain. *Int J Prod Econ*, 116(1), 28-42.
15. Govindan, K., H. Soleimani, and D. Kannan, (2015). Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review to Explore the Future. *European Journal of Operational Research*, 240, 603-626.
16. Guo, S., G. Aydin, and G.C. Souza, (2014). Dismantle or Remanufacture? *European Journal of Operational Research*, 233(3), 580-583.
17. Hasani, A., S.H. Zegordi, and E. Nikbakhsh, (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.

18. Hasani, A., S.H. Zegordi, and E. Nikbakhsh, (2014). Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design under Uncertainty: The Case of the Medical Device Industry. *International Journal of Production Research*.
19. Ilgin, M. and S. Gupta, (2010). Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Review of the State of The Art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-591.
20. Kannana, G., S. Pokharel, and P. Kumarc, (2009). A Hybrid Approach Using Ism and Fuzzy Topsis for the Selection of Reverse Logistics Provider. *Resour Conserv Recycl*, 54(1), 28-36.
21. Kim, H., J. Yang, and K. Lee, (2009). Vehicle Routing In Reverse Logistics for Recycling End-Of-Life Consumer Electronic Goods In South Korea. *Transp Res D*, 14(5), 291-299.
22. Lee, J.E., M. Gen, and K.G. Rhee, (2009). Network Model and Optimization of Reverse Logistics By Hybrid Genetic Algorithm. *Comput Ind Eng*, 56, 951-64.
23. Liang, Y., S. Pokharel, and G. (2009). Lim, Pricing Used Products for Remanufacturing. *Eur J Oper Res*, 193(2), 390-395.
24. Meade, L., J. Sarkis, and A. Presley, (2007). The Theory and Practice of Reverse Logistics. *Int J Logist Syst Manag*, 3(1), 56-84.
25. Min, H., H.J. Ko, and C.S. Ko, A. (2006). Genetic Algorithm Approach to Developing the Multiechelon Reverse Logistics Network for Product Returns. *Omega*, 34, 56-69.
26. Moscato, P. and M.G. Norman, (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.
27. Nikbakhsh, E., M. Eskandarpour, and S.H. Zegordi. (2012). Designing A Robust Post-Sales Reverse Logistics Network. In *Electrical Engineering and Intelligent System*. Berlin: Springer.
28. Niknejad, A. and D. Petrovic, (2014) Optimization of Integrated Reverse Logistics Networks With Different Product Recovery Routes. *European Journal of Operational Research*, 238, 143-154.
29. Pishvae, M. and S. Torabi, (2010). A Possibilistic Programming Approach for Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty. *Fuzzy Sets Syst*, 161(20), 2668-2683.
30. Pishvae, M., K. Kianfar, and B. Karimi, (2009). Reverse Logistics Network Design Using Simulated Annealing. *Int J Adv Manuf Technol*, 47(1-4), 269-281.
31. Pishvae, M., R. Farahani, and W. Dullaert, (2010). A Memetic Algorithm for Bi-Objective Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design. *Comput Oper Res*, 37(6), 1100-1112.
32. Roghanian, E. and P. Pazhoheshfar, (2014). An Optimization Model For Reverse Logistics Network Under Stochastic Environment By Using Genetic Algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 348-356.
33. Wang, H.F. and W.H. Hsu, (2010). A Closed-Loop Logistic Model with a Spanning-Tree Based Genetic Algorithm. *Computers & Operations Research*, 37(2), 376-389.