Pricing in reverse logistics considering product quality and stochastic demand

Nazemeh Akramzadeh
M.Sc Student, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
n_akramzade@yahoo.com
Mahboobeh Honarvar *
Assistant professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
mhonarvar@yazd.ac.ir
Mohammad Hossein Abooei
Assistant professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
mhabooei@yazd.ac.ir
Hassan Khademi zare
Professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
hkhademiz@yazd.ac.ir

Archive of SID

Abstract:

Presently, due to bio-ecological concerns, reverse logistics, recycling, reproducing and reusing the product returns is gaining interest in business and research worldwide.One of the important issues in reverse logistics is determination the price of the final product as well as the cost of recollecting used (recycled) products.This study proposes a profit maximization-modeling framework for an integrated, forward and reverse logistics network design problems.

A mixed integer non-linear programming (MINLP) formulation is presented for designing an integrated direct, reverse multi-level, single period and multi product logistic network. Product demands and returns are considered stochastic with a continuous function of price. Based on the stochastic demand and product returns, a two-stage stochastic programming is developed by using scenario-based stochastic approach. Moreover, the price of the returned products is considered as the decision variable dependent on its quality level.

In order to solve the model, GAMS software is used. The proposed model is justified by a numerical example and implemented for real case YAZD TIRE Company.

Keywords: Reproduction, Network Design, Uncertainty, Pricing, Reverse Logistics, Facility Location

* Corresponding author

www.SID.ir

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶
دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۹ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷
صص: ۲۷-۱

قیمت‌گذاری در لجستیک معکوس با درنظرگرفتن کیفیت محصولات و تقاضای احتمالی

ناظمه اکرم‌زاده[۱]، محبوبه هنرور[۲*]، محمدحسین ابوئی[۳]، حسن خادمی زارع[٤]

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، n_akramzade@yahoo.com
۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، mhonarvar@yazd.ac.ir
۳- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، mhabooei@yazd.ac.ir
٤- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، hkhademiz@yazd.ac.ir

چکیده: امروزه به‌علت افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، فعالیت‌هایی چون لجستیک معکوس، بازیافت محصول، تولید مجدد و استفادهٔ مجدد مورد توجه روزافزونی قرار گرفته‌اند. یکی از موضوعات مهم در مبحث لجستک معکوس، تعیین قیمت محصولات نهایی و همچنین قیمت خرید محصولات استفاده‌شده (بازگشتی) است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) برای طراحی یکپارچهٔ شبکهٔ لجستیک مستقیم و معکوس چندسطحی، تک‌دوره‌ای، چندمحصولی ارائه می‌شود. تقاضای محصول نهایی و همچنین برگشت محصولات به‌صورت احتمالی و تابعی پیوسته از قیمت در نظر گرفته می‌شود. براساس تقاضا و برگشت احتمالی محصولات، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای با رویکرد مبتنی بر سناریو ارائه می‌شود. همچنین قیمت خرید محصولات برگشتی به‌عنوان متغیر تصمیم براساس سطح کیفیت آنها تعیین می‌شود. در ادامه به‌منظور حل مدل از نرم‌افزار GAMS استفاده می‌شود؛ سپس مدل حاضر با ارائهٔ یک مثال عددی ارزیابی می‌شود و همچنین مدل برای مثال واقعی شرکت یزد تایر پیاده‌سازی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تولید مجدد، طراحی شبکه، عدم‌قطعیت، قیمت‌گذاری، لجستیک معکوس، مکان‌یابی تسهیلات

*نویسنده مسؤول

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

در گذشته، تولیدکنندگان در قبال کالاهای خود، پس از توزیع و سپس مصرف توسط مصرف‌کنندگان، هیچ‌گونه احساس مسئولیتی نداشتند و تعهدی را در قبال تولیدات توزیع‌شده و مصرف‌شدهٔ خود نمی‌پذیرفتند؛ اما امروزه حجم محصولات تولیدی مصرف‌شده، خسارات زیادی را در جهت تخریب محیط زیست به بار آورده است و همه نگران وضعیت محیط زیست هستند و با دغدغهٔ فراوان، روند روبه‌بهبودی را برای بهبود این وضعیت دنبال می‌کنند.

این توجه روزافزون به مسائل زیست‌محیطی، مدیریت ضایعات و وضع قوانین و مقررات جدید و نیز منافع ناشی از استفادهٔ مجدد محصول و بازیافت آن، باعث شده تا بسیاری از تولیدکنندگان کالاها بر اجرای فعالیت‌هایی چون جمع‌آوری، احیا، ساخت دوباره و بازیافت محصولاتی که در پایان عمر مفید خود قرار دارند، تمرکز کنند و در این زمینه موفقیت‌های زیادی به دست آوردند (میدل[۱]، ۲۰۰۷). فعالیت‌های لجستیک معکوس[۲] می‌تواند رقابت‌پذیری بنگاه‌های اقتصادی و سطح سرویس‌دهی به مشتری را بهبود دهد و هزینه‌های تولید را کم کند و به عبارت دیگر لجستیک معکوس یک تصویر سبز برای شرکت‌ها به‌وسیلهٔ افزایش تقاضای مشتری‌های آگاه برای محصولاتشان ارائه می‌دهد (دالگوی و همکاران[۳]، ۲۰۰۵)؛ همچنین در شبکه‌های بازیافت، محصولات استفاده‌شده می‌توانند با روش‌های متنوعی بازیافت شوند. این گزینه‌های بازیافت محصولات می‌توانند تحت عناوین تعمیر، نوسازی، تولید مجدد و بازیافت طبقه‌بندی شوند (تیبن و راگرز[۴]، ۲۰۰۲). تولید مجدد نیز یکی از هسته‌های فعالیت در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته[۵] است که در بسیاری از صنایع از جمله صنایع مربوط به موبایل، کامپیوتر، دوربین‌ها و دستگاه‌های کپی و پرینترها به‌طور موفقیت‌آمیزی اجرایی و عملی شده است. نتایج در صنایع مربوط به موبایل نشان می‌دهد که ۷۰درصد گوشی‌های موبایل استفاده‌شده می‌تواند مجدداً استفاده شود (فرنک و همکاران[۶]، ۲۰۰۶). از سوی دیگر، یکی از موضوعات کلیدی برای شرکت‌هایی که با احیای محصول سروکار دارند، نحوهٔ اکتساب یا جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده است. درحقیقت، این فعالیت اولین گام در جهت احیای محصول و آغازگر سایر فعالیت‌های سیستم احیای است. همچنین، یکی از ویژگی‌های بارز این سیستم‌ها میزان بالای عدم‌قطعیت در مقدار، کیفیت و زمان بازگشت محصولات استفاده شده است. برخی از تولیدکنندگان با پیشنهاد مشوق‌های مالی به دارندگان محصول، توانسته‌اند میزان محصولات بازگشتی را تحت تأثیر قرار دهند. همچنین واضح است که میزان مشوق پیشنهادشده توسط شرکت (قیمت خرید محصولات بازگشتی) بر سطح کیفیت محصولات بازگشتی تأثیرگذار است. بنابراین برای شرکت‌هایی که با فرایند احیای محصول سروکار دارند، اتخاذ رویکردی مناسب برای اکتساب محصولات بازگشتی از طریق پیشنهاد مشوق مناسب، نقشی تعیین‌کننده دارد (ارس و همکاران[۷]، ۲۰۰۸).

توجه به مطالب گفته‌شده مبنی بر ضرورت به‌کارگیری لجستیک معکوس، در این مقاله قصد داریم تا با درنظرگرفتن نقش قیمت‌گذاری[۸] در کاهش عدم‌قطعیت[۹] محصولات بازگشتی و نیز تأثیر میزان بازگشت محصولات بر تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات لازم، یک مدل قیمت‌گذاری برای

Archive of SID

www.SID.ir

محصولات برگشتی ارائه دهیم که ضمن لحاظ‌کردن کیفیت محصولات برگشتی با تقاضای احتمالی نیز روبه‌رو است؛ کاری که جای آن در مدل‌های قبلی خالی است. در اینجا یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP)[10] شامل تأمین‌کنندگان مواد اولیه، مراکز تولید، توزیع در حالت پیشرو و مراکز جمع‌آوری/بازرسی، بازیافت و انهدام در حالت معکوس ارائه می‌شود. هدف مدل بیشینه‌سازی سود موردانتظار و تصمیمات آن شامل مکان‌یابی تسهیلات تولید، توزیع، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و بازیافت، تعیین میزان جریان بین تسهیلات، تعیین قیمت فروش محصول نهایی و همچنین قیمت خرید محصولات بازگشتی است. نتایج محاسباتی مربوط به حل مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS نیز در پایان ارائه شده است.

در ادامهٔ مقاله، در بخش ۲ ادبیات موضوع مرور می‌شود و در بخش ۳ به تعریف مسئله پرداخته می‌شود. سپس در بخش ٤ ساختار مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. همچنین با ارائهٔ یک مثال عددی در بخش ۵ کاربردی‌بودن مدل و نتایج محاسباتی و همچنین آنالیز حساسیت مربوط به آن بررسی می‌شود و در پایان در بخش ٦ نتیجه‌گیری و ارائهٔ پیشنهادها جهت تحقیقات بیان خواهد شد.

۲- مرور ادبیات

به‌طور کلی مقالاتی که به مقولهٔ طراحی شبکهٔ لجستیک همراه با احیای محصول می‌پردازند، به دو دسته تقسیم می‌شوند. در دستهٔ اول پژوهش‌ها، تنها جریان معکوس در شبکه در نظر گرفته شده است در حالی که پژوهش‌های دستهٔ دوم نه تنها جریان معکوس محصولات بازگشتی بلکه جریان مستقیم محصولات نو و محصولات بازسازی‌شده را نیز برای برآورده‌کردن تقاضای مشتری در نظر می‌گیرند (ارس و اکسن[11]، ۲۰۰۸).

در این بخش، به مرور برخی مقالات مرتبط در زمینهٔ طراحی شبکهٔ لجستیک معکوس و یکپارچه پرداخته خواهد شد. بیشتر ادبیات موجود در زمینهٔ طراحی شبکهٔ لجستیک شامل مدل‌های مختلف مکان‌یابی تسهیلات برپایهٔ برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است. این مدل‌ها انواع مختلفی از مدل‌های ساده نظیر مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود تا مدل‌های پیچیده‌تر مانند مدل‌های چندسطحی با ظرفیت محدود و یا مدل‌های چندمحصولی را شامل می‌شوند (پیشوایی،جولای و رزمی[12]، ۲۰۰۹؛ پیشوایی، فراهانی و دولارت[13]، ۲۰۱۰)

فلیشمان و همکاران[14] (۲۰۰۱) با استفاده از یک مدل MILP تأثیر بازیافت محصول بر طراحی شبکهٔ لجستیک را بررسی کردند و نشان دادند که رویکرد یکپارچه، یعنی درنظرگرفتن و بهینه‌سازی هم‌زمان شبکهٔ روبه‌جلو و معکوس، در مقایسه با طراحی جداگانه هر دو شبکه، صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه دارد. در تحقیق دیگری، ارس و اکسن[15](۲۰۰۸)، یک مدل MINLP برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده از مشتریان ارائه داده‌اند. در مدل آنها، تصمیم مشتریان دربارهٔ مراجعه به این مراکز به‌منظور تحویل محصولات استفاده‌شده به میزان مشوق مالی پیشنهادی و نیز فاصلهٔ آنها تا نزدیک‌ترین مرکز بستگی دارد و علاوه بر مکان این تسهیلات، مقدار بهینهٔ این مشوق مالی برای هر نوع محصول بازگشتی تعیین می‌شود. از کاستی‌های این مدل می‌توان به درنظرنگرفتن سایر تسهیلات موردنیاز در شبکهٔ لجستیک اشاره کرد. در

Archive of SID

www.SID.ir

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰٦ انجام گرفت، مین و همکاران[16](۲۰۰٦)، یک مدل MINLP برای شبکهٔ لجستیک قطعی به‌همراه بازیابی محصول پیشنهاد شد و از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل طراحی‌شده استفاده شد. لی و همکاران[17](۲۰۰۹)، یک مدل ریاضی سیستم تولید دوباره را به‌صورت مدل شبکهٔ لجستیک معکوس چندمرحله‌ای، چندمحصولی برای کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل لجستیک معکوس و هزینهٔ ثابت احداث مراکز دمونتاژ و مراکز پردازش، فرموله کردند. برای حل این مسئله، یک الگوریتم ژنتیک به‌همراه روش کدگذاری مبتنی بر اولویت ارائه شد. کارا و همکاران[18](۲۰۰۷)، یک مدل شبیه‌سازی شبکهٔ لجستیک معکوس برای جمع‌آوری محصولات به‌صورت کارا در انتهای دورهٔ عمرشان، مطرح کردند. در این مقاله برای ساخت مدل شبیه‌سازی از نرم‌افزار Arena استفاده شد. کو و اوانس[19](۲۰۰۷)، یک مدل MINLP پویا برای طراحی شبکهٔ لجستیک یکپارچهٔ چنددوره‌ای و چندمحصولی برای فرآهم‌آورندگان خدمات لجستیک طرف سوم ارائه کرده است. در انجام برخی تحقیقات، پارامترهایی چون تقاضا و برگشت، قطعی فرض شده است در حالی که طراحی و استقرار یک شبکهٔ لجستیک تصمیمی است که تأثیر آن برای چندین سال طول خواهد کشید و پارامترهایی مهم نظیر تقاضا و برگشت محصول از سوی مشتریان که خود نیز تأثیرپذیر از عوامل مختلفی هستند، در طی این مدت ممکن است تغییر کند. بنابراین یک شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین کارا باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند به عدم‌قطعیت‌ها نیز بپردازد. برای پرداختن به عدم‌قطعیت در طراحی شبکهٔ لجستیک یکپارچه، پیشوایی و همکاران[20](۲۰۰۹)، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برمبنای سناریو ارائه کرده‌اند که در آن شبکهٔ موردمطالعه، یک شبکهٔ لجستیک یکپارچه پیشرو/معکوس حلقه بسته با هدف کمینه‌سازی هزینهٔ کل با استفاده از یک مدل SMILP است. برای طراحی یکپارچهٔ شبکه‌های لجستیک پیشرو/معکوس، پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰)، مدل MINLP دوهدفه برای کمینه‌سازی هزینه‌های کل و بیشینه‌سازی پاسخگویی شبکهٔ لجستیک در نظر گرفته‌اند و برای حل مدل، یک الگوریتم ابتکاری برمبنای الگوریتم ممتیک پیشنهاد کرده‌اند. الساید و همکاران[21](۲۰۱۰)، با توسعهٔ زنجیره از طریق اضافه‌کردن سطوحی چون تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان مجدد و درنظرگرفتن فعالیت‌های تعمیر، بازسازی و بازیافت به‌صورت هم‌زمان، یک مدل احتمالی چندمرحله‌ای ارائه کرده‌اند. شی و همکاران[22] (۲۰۱۰)، جهت بیشینه‌سازی سود یک سیستم تولید مجدد و بازیابی محصول، یک مدل ریاضی با رویکرد حل مبتنی بر روش آزادسازی لاگرانژ ارائه کرده‌اند. شی و همکاران[23] (۲۰۱۱)، یک مسئلهٔ برنامه‌ریزی تولید برای یک سیستم حلقهٔ بسته چندمحصولی را با درنظرگرفتن تقاضا و برگشت تصادفی مطالعه کرده‌اند. همچنین پیشوایی، ربانی و ترابی[24] (۲۰۱۱)، برای درنظرگرفتن عدم‌قطعیت، یک مدل بهینه‌سازی استوار برای شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته ارائه کرده‌اند. امین و ژانگ[25] (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته و همچنین انتخاب تأمین‌کنندگان ارائه داده‌اند. در این مطالعه، تأمین‌کنندگان براساس شرایط کیفی، ارزیابی (رویکرد فازی) می‌شوند. اهداف این تحقیق شامل بیشینه‌کردن سود و معیار وزن‌دهی تأمین‌کنندگان و کمینه‌سازی نرخ تولیدات معیوب در

Archive of SID

www.SID.ir

نظر گرفته شده است. اسچولتمن و همکاران[۲۶] (۲۰۰۶)، اقدامات در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته و لجستیک معکوس را مدل‌سازی کردند و این مطالعه را نیز می‌توان از جمله مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ ادغام طراحی شبکه‌های روبه‌جلو و معکوس برشمرد. پیشوایی، کیانفر و کریمی[۲۷] (۲۰۱۰)، طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس را به‌کمک یک مدل، بهینه‌سازی و سپس با استفاده از یک الگوریتم متاهیوریستیک انجام دادند. از دیگر فعالیت‌هایی که در حوزهٔ زنجیرهٔ تأمین و لجستیک معکوس انجام شده است مبحث قیمت‌گذاری است. از جمله این مطالعات می‌توان به تحقیق (اکسو و ژو[۲۸]، ۲۰۱۱) با عنوان مدل قیمت‌گذاری پویا برای عملیات زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته اشاره کرد. در این مطالعه یک زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بستهٔ چندمرحله‌ای شامل یک تأمین‌کننده و یک تولیدکننده با مراکزی همچون توزیع، تولید مجدد و استفادهٔ مجدد است. فرر و همکارش[۲۹] (۲۰۱۱)، شرکتی را در نظر گرفته‌اند که محصولات جدید را در دورهٔ اول تولید و در دوره‌های آتی از محصولات برگشتی برای ساخت محصولات استفاده می‌کند. بنابراین شرکت باید قیمت‌های متمایزی را انتخاب کند. همچنین در این مطالعه تأثیر افق‌های برنامه‌ریزی بر سیاست بهینهٔ شرکت نشان داده شده است. تان و یوآن[۳۰] (۲۰۱۱)، زنجیرهٔ تأمینی متشکل از یک تولیدکننده، یک خرده‌فروش و یک توزیع‌کننده را در نظر گرفتند و به مبحث قیمت‌گذاری پرداختند. همچنین با ادغام مسائل زنجیرهٔ تأمین روبه‌جلو و معکوس مدلی برای قیمت‌گذاری محصولات برای تولیدکننده، خرده‌فروش و توزیع‌کننده با هدف بیشینه‌سازی سود کل زنجیرهٔ تأمین، ارائه داده‌اند. در این تحقیق تصمیمات قیمت‌گذاری در بازی بین اجزای متشکل در این زنجیره آنالیز می‌شود. وی و ژائو[۳۱] (۲۰۱۱)، با به‌کاربستن تئوری بازی‌ها، قیمت‌گذاری را در یک زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته فازی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق نیز زنجیرهٔ تأمین را متشکل از یک تولیدکننده، خرده‌فروش و توزیع‌کننده تحت سناریوهای متمرکز و غیرمتمرکز تصمیم‌گیری در نظر گرفته‌اند. وو[۳۲] (۲۰۱۲) زنجیرهٔ تأمینی را که شامل تجهیزات تولید برای تولید محصولات جدید و همچنین تولید مجدد محصولات استفاده‌شده است، در نظر گرفته و استراتژی‌های قیمت‌گذاری و طراحی محصول برای مسائل چنددوره‌ای را تعیین کرده است.

در یک نگاه کلی همان‌طور که از مرور ادبیات مشخص است، می‌توان عنوان کرد که در سال‌های گذشته بیشتر مدل‌های طراحی شبکه بر طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس به‌صورت جداگانه تمرکز داشته‌اند و تنها تعداد محدودی از مقالات در سال‌های اخیر به طراحی یکپارچهٔ شبکهٔ لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته‌اند؛ به‌طوری که هدف تمامی تحقیقات انجام‌شده ارائهٔ یک سیاست بهینهٔ تأمین، تولید و تحویل یکپارچه در جهت کاهش هزینه‌های کل و افزایش سودآوری در سرتاسر زنجیره است. همچنین می‌دانیم که تحقق این اهداف در رسیدن به زنجیره‌ای بی‌نقص و بی‌رقیب بسیار یاری‌بخش خواهد بود. با وجود ارزش این مدل‌ها در طراحی یکپارچه، برخی از موضوعات مهم در این مدل‌ها مورد غفلت قرار گرفته است. از جملهٔ آنها در مبحث قیمت‌گذاری محصولات بازگشتی است به‌گونه‌ای که قیمت پیشنهادی خرید، تأثیر غیرقابل‌انکاری بر میزان بازگشت محصولات دارد. از

Archive of SID

www.SID.ir

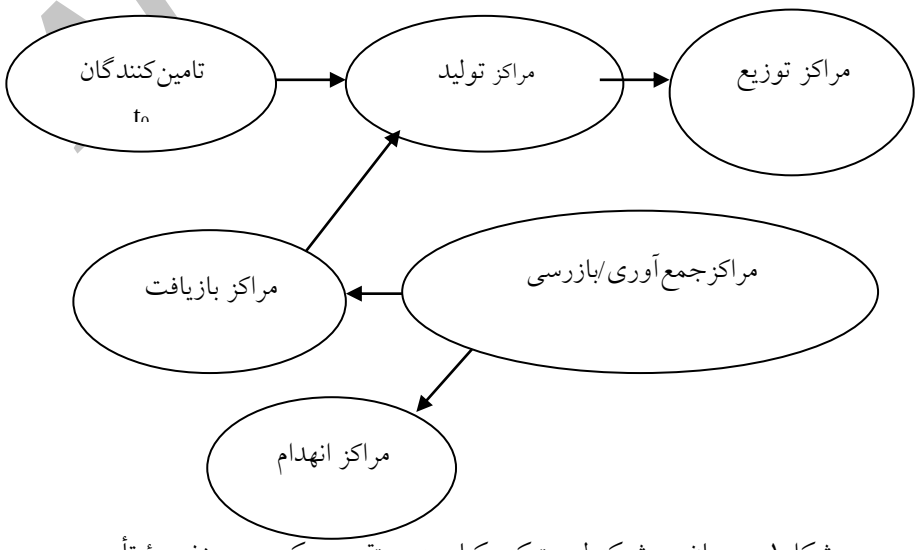
طرف دیگر سطح کیفیت محصول برگشتی یکی از عوامل بسیار مهمی است که باید در نظر گرفته شود؛ چرا که این سطح کیفیت بر قیمت پیشنهادی خرید آن از مشتری و همچنین بر هزینهٔ پردازش در مراکز بازیافت تأثیرگذار است. از دیگر کاستی‌های مدل‌های قبل می‌توان به درنظرنگرفتن سطوح شبکهٔ لجستیک به‌طور هم‌زمان، مانند تأمین‌کنندگان، مراکز بازیافت و مراکز انهدام اشاره کرد.

حال در این تحقیق با درنظرگرفتن شرایطی از قبیل احتمالی‌بودن تقاضا و کیفیت محصول برگشتی که در دنیای واقعی و در عمل بیشتر با آن مواجه هستیم، مدل ریاضی غیرخطی برای قیمت‌گذاری در لجستیک معکوس ارائه خواهیم کرد و در مدل پیشنهادی، سطح‌بندی کیفیت محصولات برگشتی انجام می‌شود، سپس قیمت خرید و همچنین هزینهٔ بازیافت این محصولات براساس کیفیت آن تعیین می‌شود.

۳- تعریف مسئله

شبکهٔ موردبررسی در این مقاله، یک شبکهٔ لجستیک یکپارچه مستقیم-معکوس چندسطحی، تک‌دوره‌ای، چندمحصولی و با ظرفیت تولید محدود است. تقاضای محصول نهایی و میزان محصولات برگشتی احتمالی و وابسته به قیمت است. همچنین قیمت پیشنهادی برای محصولات بازگشتی و هزینهٔ بازیافت وابسته به سطح کیفیت است. این مدل قابلیت به‌کارگیری در صنایعی را دارد که در آنها اجزا و یا کل محصول قابلیت بازیافت دارد و این بازیافت از نظر اقتصادی یا کاهش آثار تخریبی زیست‌محیطی بسیار ارزشمند است. از این جمله می‌توان به بازیافت کاغذ، بازیافت لاستیک، بازیافت ظروف pet در صنایع تولید نوشیدنی‌ها، بازیافت فلزات با ارزش به‌کاررفته در تولید گوشی‌های همراه و... اشاره کرد.

در شبکهٔ طراحی‌شده همانند شکل ۱، در جریان مستقیم، محصولات نهایی با استفاده از مواد اولیهٔ تهیه‌شده از تأمین‌کنندگان و یا ازطریق بازیافت محصولات برگشتی، تولید می‌شوند و ازطریق مراکز توزیع به سمت مشتریان منتقل می‌شوند. تقاضای مراکز توزیع،احتمالی و وابسته به قیمت است. ضمناً برای هر واحد تقاضای برآورد نشده، هزینه‌ای برای کمبود نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- جریان در شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم-معکوس در زنجیرهٔ تأمین

Archive of SID

www.SID.ir

در جریان معکوس، محصولات استفاده‌شده توسط مشتریان به چند دلیل از جمله نبودِ مشخصات کیفی رضایت‌بخش، معیوب‌بودن محصولات و یا به‌پایان‌رسیدن دورهٔ عمر آنها بازگردانده می‌شوند که این بازگشت، خود نیز بستگی به قیمت پیشنهادی جهت خرید محصولات بازگشتی از متقاضیان دارد. تمامی کالاهای برگشتی از سوی مشتریان به مراکز جمع‌آوری آورده می‌شود و پس از بازرسی و سطح‌بندی کیفیت، آن دسته از محصولاتی که قابل بازیافت باشند به مراکز بازیافت منتقل و آن دسته که قابلیت بازیافت نداشته باشند به مراکز انهدام فرستاده می‌شود. سپس مواد بازیافت‌شده نیز که ازلحاظ کیفیت با مواد نو تفاوتی ندارد، جهت استفاده مجدد به مراکز تولید ارسال می‌شود.

جریان محصولات در جهت مستقیم و روبه‌جلو وابسته به تقاضای مراکز توزیع و در جهت معکوس براساس بازگشت محصولات از سوی مشتریان است. مکان مراکز توزیع، تولید، تأمین‌کنندگان، جمع‌آوری و انهدام مشخص و ثابت است و به جز مراکز انهدام، تمامی مراکز دارای محدودیت ظرفیت هستند. همچنین این مدل، هزینه‌های حمل ونقل، خرید اجزا، عایدی‌ها و هزینه‌های تأمین‌کنندگان را به تفصیل بیان کرده است. در این مدل هدف تعیین تعداد و مکان تسهیلات تولید، توزیع، جمع‌آوری/بازرسی و بازیافت، جریان‌های بین تسهیلات و نیز میزان قیمت فروش محصول نهایی و قیمت پیشنهادی به مشتریان جهت خرید محصولات بازگشتی است. در ضمن تقاضای محصول و همچنین میزان برگشت محصول استفاده‌شده احتمالی است. شایان ذکر است در این مدل قیمت پیشنهادی جهت خرید محصولات بازگشتی و همچنین هزینهٔ پردازش در مراکز بازیافت با توجه به سطح کیفی آنها سطوح متفاوتی دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یکی از مشکلات عمده‌ای که در مسائل زنجیرهٔ تأمین با آن روبه‌رو هستیم، عدم‌قطعیت تقاضا و میزان بازگشت محصولات است. حال به‌منظور مدل‌سازی تحت شرایط عدم‌قطعیت از تکنیک‌های برنامه‌ریزی احتمالی استفاده کرده‌ایم. به‌طور کلی، رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی(SP)[۳۳] از دانتزینگ[۳۴] (۱۹۵۵) سرچشمه می‌گیرد. وی این رویکرد را برای زمانی که برخی از پارامترها تصادفی هستند ارائه دادند. همچنین حل مسائل در ابعاد بزرگ، تکنیک‌های برنامه‌ریزی احتمالی را به‌دلیل نزدیک‌بودن با شرایط واقعی حاکم بر مسئله، کاربردی‌تر ساخته است. برنامه‌ریزی تصادفی به‌طور موفقیت‌آمیزی در مسائلی از جمله مدیریت دارایی و بدهی‌ها (کونسیگلی[۳۵]، ۱۹۹۸؛ سودهی[۳۶]، ۲۰۰۵)، برنامه‌ریزی زنجیرهٔ تأمین (آزارون[۳۷]، ۲۰۰۸؛ السایدو همکاران[۳۸]، ۲۰۱۰؛ سانتسو[۳۹]، ۲۰۰۵)، برنامه‌ریزی ظرفیت (فلتن و همکاران[۴۰]، ۲۰۰۸؛ گوپتا و همکاران[۴۱]، ۲۰۰۰) و غیره عمل کرده است. یک روش استاندارد برای حل مدل برنامه‌ریزی احتمالی استفاده از تعداد محدودی سناریو برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت در مدل است (بیرج و اوویکس[۴۲]، ۱۹۹۷).

سناریوها تخمینی از تابع توزیع احتمال داده‌های تصادفی را نشان می‌دهند و استفاده از توابع توزیع پیوسته را آسان‌تر می‌کند. در برنامه‌ریزی احتمالی، ماهیت تصمیم نشان می‌دهد که یک الگوی دو مرحله‌ای را در نظر بگیریم. در این الگو، متغیرهای تصمیم‌گیری را به دو زیرمجموعهٔ متفاوت تقسیم می‌کنیم: ۱. متغیرهای مرحلهٔ اول، آنهایی هستند که قبل از اینکه متغیرهای تصادفی مشاهده شوند، ساخته

Archive of SID

www.SID.ir

شده‌اند؛ ۲. متغیرهای مرحلهٔ دوم، متغیرهایی هستند که به تحقق متغیرهای مرحلهٔ اول و آزادشدن پارامترهای تصادفی بستگی دارند (بیرج و اوویکس[۴۳]، ۱۹۹۷).

در مطالعهٔ حاضر متغیرهای مرحلهٔ اول، تصمیم‌گیری‌های مربوط به قیمت‌ها (قیمت فروش محصول نهایی و قیمت خرید محصولات بازگشتی) و باز و بسته‌بودن مراکز هستند و متغیرهای مرحلهٔ دوم، سایر تصمیم‌گیری‌ها از جمله میزان تولید در مراکز تولید و جریان بین مراکز است؛ چرا که این متغیرها از تقاضا و برگشت احتمالی تأثیر می‌پذیرند.

یک رویکرد استاندارد برای حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی، استفاده از تعداد محدودی سناریو برای مدل‌کردن عدم‌قطعیت داده‌های مرتبط است. سناریوها و احتمالات آنها نشان‌دهندهٔ تقریبی از توزیع احتمال داده شده توسط داده‌های تصادفی هستند (بیرج و اوویکس، ۱۹۹۷).

٤- مدل‌سازی ریاضی

نمادهای به‌کارگرفته‌شده در مدل پیشنهادی برای شبکهٔ لجستیکی موردبررسی، عبارت‌اند از:

مجموعه‌ها

H: مجموعهٔ مراکز ثابت تأمین‌کنندگان $h \in H$

I: مجموعهٔ مراکز بالقوه برای مراکز تولید $i \in I$

J: مجموعهٔ مراکز بالقوه برای مراکز توزیع $j \in J$

L: مجموعهٔ مراکز بالقوه برای مراکز جمع‌آوری/ بازرسی $l \in L$

M: مجموعهٔ مراکز بالقوه برای مراکز بازیافت $m \in M$

N: مجموعهٔ مراکز بالقوه برای مراکز انهدام $n \in N$

R: مجموعهٔ مواداولیه برای تولید محصول نهایی $r \in R$

Q: مجموعهٔ سطوح کیفیت محصول برگشتی $q \in Q$ (q=1 معرف بالاترین سطح کیفیت است.)

K: مجموعهٔ محصولات خروجی از بازیافت محصول برگشتی $k \in K$

E: مجموعهٔ محصولات تولیدی (محصول نهایی) $e \in E$

S: مجموعهٔ سناریوهای ممکن $s \in S$

پارامترها

a_{ej}: پارامتر مقیاس تابع تقاضای محصول eام در مرکز توزیع j ام

b_{ej}: پارامتر حساسیت به قیمت تابع تقاضای محصول eام در مرکز توزیع j ام

ud_{ejs}: جزء تصادفی تابع تقاضا (دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف استاندارد σ_d) محصول eام در مرکز توزیع j تحت سناریوی s

α'_{ql}: مقیاس تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری lام

β_{ql}: پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکزجمع‌آوری lام

ur_{qls}: جزء تصادفی تابع برگشت (دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف استاندارد σ_r) با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری l تحت سناریوی s ام

P''_k: قیمت فروش هر واحد محصول بازیافتی kام

π_e:هزینه هر واحد فروش ازدست‌رفتهٔ محصول eام

α_q: متوسط کسر غیرقابل‌بازیافت محصول با سطح کیفیت q $(\alpha_1 < \alpha_2 < \cdots < \alpha_q)$

u_{re}: مقدار مادهٔ اولیهٔ rام که در یک واحد محصول نهایی eام استفاده می‌شود.

λmax_{er}: حداکثر نسبت جایگزینی مادهٔ اولیهٔ rام با محصول بازیافتی در محصول نهایی eام

g_k: مقدار محصول خروجی kام که از یک واحد محصول برگشتی تولید می‌شود

Cp_{rhi}: کلیهٔ هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد مادهٔ اولیهٔ r

Archive of SID

www.SID.ir

از تأمین‌کنندهٔ h به مرکز تولید i

CX_{eij}: کلیهٔ هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد محصول نهایی eام از مرکز تولید i به مرکز توزیع j

Cv_{ln}: کلیهٔ هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد محصول غیرقابل‌بازیافت از مرکز جمع‌آوری/بازرسی l به مرکز انهدام n

CT_{lm}: کلیهٔ هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد محصول قابل بازیافت از مرکز جمع‌آوری/بازرسی l به مرکز بازیافت m

CG_{kmi}: کلیهٔ هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد مادهٔ بازیافت‌شده (محصول بازیافتی kام) از مرکز بازیافت m به مرکز تولید i

CM_{rh}: کلیهٔ هزینه‌های تأمین مادهٔ اولیه نوع r برای هر واحد محصول نهایی از تأمین‌کنندهٔ h

PC_{ei}: کلیهٔ هزینه‌های تولید هر واحد محصول نهایی eام در مرکز تولید i

OC_{ej}: کلیهٔ هزینه‌های پردازش هر واحد محصول نهایی eام در مرکز توزیع j

CC_l: کلیهٔ هزینه‌های پردازش هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری/بازرسی l

DC_n:کلیهٔ هزینه‌های انهدام هر واحد محصول غیرقابل‌بازیافت در مرکز انهدام n

RC_{mq}: کلیهٔ هزینه‌های بازیافت هر واحد محصول قابل‌بازیافت در مرکز بازیافت m با سطح کیفیت q

$(RC_{m1}<RC_{m2}<RC_{m3}...<RC_{mq})$

b_i: هزینهٔ ثابت استقرار مرکز تولید i

c_j: هزینهٔ ثابت استقرار مرکز توزیع j

f_l: هزینهٔ ثابت استقرار مرکز جمع‌آوری/بازرسی l

g'_m: هزینهٔ ثابت استقرار مرکز بازیافت m

Sca_{rh}:حداکثر ظرفیت تأمین‌کنندهٔ h برای مادهٔ اولیهٔ r

Pca_i: حداکثر ظرفیت مرکز تولید i

Dca_j: حداکثر ظرفیت مرکز توزیع j

Cca_l: حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری/بازرسی l

Rca_m: حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت m

η_{rk} :ضریب جایگزینی محصول خروجی از بازیافت kام به جای مادهٔ اولیهٔ rام

متغیرهای مرحلهٔ اول

P_{ej}:قیمت فروش هر واحد محصول نهایی e ام در مرکز توزیع j ام

Pr_{ql}: قیمت پیشنهادی برای خرید هر واحد محصول استفاده‌شده با سطح کیفیت q در مرکز جمع‌آوری/ بازرسی l

P_{rhi}: میزان جریان مادهٔ اولیهٔ r از تأمین‌کنندهٔ h به مرکز تولید i

X_i: یک، اگر مرکز تولید در محل i استقرار یابد، در غیر این صورت، صفر

Y_j: یک، اگر مرکز توزیع در محل j استقرار یابد، در غیر این صورت، صفر

Z_l:یک، اگر مرکز جمع‌آوری/بازرسی در محل l استقرار یابد، در غیر این صورت، صفر

T_m: یک، اگر مرکز بازیافت در محل m استقرار یابد، در غیر این صورت، صفر

متغیرهای مرحلهٔ دوم

R_{qls}: میزان محصول برگشتی با سطح کیفیت q به مرکز جمع‌آوری l تحت سناریوی sام

QP_{eijs}: مقدار جریان محصول نهایی eام از مرکز تولید i به مرکز توزیع j تحت سناریوی sام

QD_{lnqs}: مقدار جریان محصولات غیرقابل‌بازیافت ازمرکز جمع‌آوری/بازرسی l به مرکز انهدام n با سطح کیفیq تحت سناریوی sام

Archive of SID

www.SID.ir

QR_{lmqs}: مقدار جریان محصولات قابل‌بازیافت از مرکز جمع‌آوری/بازرسی l به مرکز بازیافت m با سطح کیفی q تحت سناریوی sام

Xr_{kms}: مقدار تولید محصول بازیافتی kام از محصولات برگشتی در مرکز بازیافت m تحت سناریوی sام

Xr'_{kims}: مقدار جریان محصول بازیافتی k ام از مرکز بازیافت m به مرکز تولید i تحت سناریوی sام

Xr''_{kms}: مقدار محصول بازیافتی kام از مرکز بازیافت m تحت سناریوی sام که مستقیماً به فروش می‌رسد.

P'_{ris}: مقدار مادهٔ اولیهٔ r که ازطریق بازیافتی‌ها تأمین و به مرکز تولید i تحت سناریوی sام ارسال می‌شود

P''_{rise}: مقدار مادهٔ اولیهٔ r که از طریق بازیافتی‌ها تأمین و به مرکز تولید i به‌منظور استفاده در محصول نهایی e تحت سناریوی sام ارسال می‌شود

Ty_{eris}: میزان مادهٔ اولیهٔ موردنیاز r برای محصول نهایی e در مرکز تولید i تحت سناریوی sام

از قیمت فروش است (a_{ej} سایز بازار، b_{ej} حساسیت به قیمت فروش و P_{ej} قیمت فروش محصول نهایی در هر مرکز توزیع است) و ud_{ej} بیانگر جزء تصادفی تقاضاست که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σd_{ej}است.

میزان برگشت محصول استفاده‌شده نیز به‌صورت تابع خطی، حساس به قیمت خرید و احتمالی در نظر گرفته می‌شود. ارتباط بین برگشت و قیمت خرید به‌صورت رابطهٔ ($R_{ql} = \alpha'_{ql} + \beta_{ql} pr_{ql} + ur_{ql}$) بیان می شود. در این عبارت $\alpha'_{ql} + \beta_{ql} pr_{ql}$ معرف برگشت موردانتظار به‌عنوان تابعی از قیمت خرید محصول برگشتی است (α'_{ql} مقیاس تابع برگشت، β_{ql} حساسیت به قیمت خرید و pr_{ql} قیمت خرید محصول برگشتی با سطح کیفیت q در مرکز جمع‌آوری l است) و ur_{ql} بیانگر جزء تصادفی تابع برگشت است که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس δr_{ql} است(شی،ژانگ و شا[۴۷]، ۲۰۱۱).

٤-١- تعیین تابع تقاضا و مقدار محصول بازگشتی

در اینجا فرض می‌شود که تابع تقاضا به‌صورت خطی، حساس به قیمت فروش و احتمالی باشد. ارتباط بین تقاضا و قیمت فروش به‌صورت رابطهٔ ($d_{ej}=a_{ej}-b_{ej}P_{ej}+ud_{ej}$) بیان می‌شود (چوی[۴۴]، ۱۹۹۶؛ راجو و روی[۴۵]، ۲۰۰۰؛ یو و لیو[۴۶]، ۲۰۰۶). در این عبارت $d_{ej}=a_{ej}-b_{ej}P_{ej}$ معرف تقاضای موردانتظار به‌عنوان تابعی

٤-٢-مدل ریاضی

٤-٢-١ مدل ریاضی تحت شرایط عدم‌قطعیت

با توجه به نمادهای ذکرشده، مسئلهٔ طراحی و قیمت‌گذاری جهت شبکهٔ لجستیک پیشرو/ معکوس یکپارچه با هدف بیشینه‌سازی سود تحت شرایط عدم‌قطعیت به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}\text{Max } Z=&\sum_s p_s * \Big[\sum_i\sum_j\sum_e(P_{ej} * QP_{eijs}) + \sum_m\sum_k(P''_k * xr''_{kms}) - \sum_e\sum_j((a_{ej} - b_{ej}P_{ej} + ud_{ejs}) - \sum_i QP_{eijs}) * \pi_e - \sum_q\sum_l(R_{qls} * Pr_{ql}) - \sum_i(b_i * X_i) - \sum_j(C_j * X_j) - \sum_l(f_l * z_l) - \sum_m(g'_m * T_m) - \sum_i\sum_j\sum_e(PC_{ei} + CX_{eij}) * QP_{eijs} - \sum_q\sum_l(CC_l * R_{qls}) - \sum_q\sum_l\sum_n(Cv_{ln} + DC_n) * QD_{lnqs} - \sum_q\sum_l\sum_m(RC_{mq} + CT_{lm}) * QR_{lmqs} - \sum_h\sum_i\sum_r(CM_{rh} + Cp_{rhi}) * p_{rhi} - \sum_m\sum_i\sum_k CG_{kmi} * xr'_{kims}\Big]\end{aligned} \quad (۱)$$

s.t

$$\sum_i QP_{eijs} \le a_{ej} - b_{ej}p_{ej} + ud_{ejs} \forall_{j,e,s} \quad (۲)$$

Archive of SID

$$\alpha_q * R_{qls} = \sum_n QD_{lnqs} \forall_{l,q,s} \quad (۳)$$

$$(1-\alpha_q) * R_{qls} = \sum_m QR_{lmqs} \forall_{l,q,s} \quad (٤)$$

$$R_{qls} = \alpha'_{ql} + \beta_{ql} Pr_{ql} + ur_{qls} \forall_{l,q,s} \quad (٥)$$

$$\sum_i P_{rhi} \leq Sca_{rh} \forall_{r,h} \quad (٦)$$

$$\sum_e \sum_j QP_{eijs} \leq X_i * Pca_i \forall_{i,s} \quad (٧)$$

$$\sum_e \sum_i QP_{eijs} \leq Y_j * Dca_j \forall_{j,s} \quad (٨)$$

$$\sum_l \sum_q QR_{lmqs} \leq T_m * Rca_m \forall_{m,s} \quad (٩)$$

$$Xr_{kms} = \sum_l \sum_q QR_{lmqs} * g_k \forall_{k,m,s} \quad (١٠)$$

$$Xr_{kms} = \sum_i Xr'_{kims} + X''_{kms} \forall_{k,m,s} \quad (١١)$$

$$Ty_{eris} = u_{re} * \sum_j QP_{eijs} \forall_{r,i,e,s} \quad (١٢)$$

$$\sum_e P''_{rise} \leq P'_{ris} \quad \forall_{r,i,s} \quad (١٣)$$

$$\sum_e Ty_{eris} \leq \sum_e P''_{rise} + \sum_h P_{rhi} \forall_{r,i,s} \quad (١٤)$$

$$\sum_r (\eta_{kr} * P'_{ris}) \leq \sum_m Xr'_{kims} \forall_{i,k,s} \quad (١٥)$$

$$\frac{P''_{rise}}{Ty_{eris}} \leq \lambda max_{er} \forall_{r,i,e,s} (\quad (١٦)$$

$$a_{ej} - b_{ej} p_{ej} + ud_{ejs} \geq 0 \qquad \forall_{j,e,s} \quad (١٧)$$

$$R_{qls}, P_{rhi}, QP_{eijs}, QD_{lnqs}, QR_{lmqs}, Xr_{kms}, Xr''_{kims}, Xr'_{kims}, P'_{ris}, Ty_{eris}, P''_{rise}, Pr_{ql}, P_{ej} \geq 0 \quad (١٨)$$

$$X_i, Y_j, Z_l, T_m \epsilon 0,1 \quad (١٩)$$

عبارت (۱) نشان‌دهندهٔ تابع هدف مدل است که سود کل را بیشینه می‌کند. درآمدها متشکل از سود حاصل از فروش محصول نهایی و فروش مستقیم محصولات حاصل از بازیافت محصول برگشتی و هزینه‌ها به‌ترتیب شامل هزینهٔ کمبود، هزینهٔ خرید محصولات برگشتی، هزینهٔ بازگشایی مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری/بازرسی و بازیافت، هزینهٔ پردازش و حمل‌ونقل در مراکز تولید، توزیع و دفع، هزینهٔ پردازش و حمل‌ونقل در مرکز بازیافت، هزینهٔ حمل‌ونقل و خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و هزینهٔ حمل از مرکز بازیافت به تولید است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که میزان محصولاتی که تولید و به مراکز توزیع ارسال می‌شود، حداکثر برابر با میزان تقاضای آن مراکز باشد. عبارت‌های (۳) و (٤) مربوط به محدودیت‌های تعادلی بین مراکز جمع‌آوری و انهدام و بین مراکز جمع‌آوری و بازیافت است. عبارت (٥) بیانگر رابطهٔ میزان برگشت محصولات برحسب قیمت خرید آنهاست.

Archive of SID

www.SID.ir

محدودیت‌های (٦) تا (۹) مربوط به ظرفیت تسهیلات هستند. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) مربوط به میزان محصولات بازیافت‌شدهٔ kام است که برخی از آنها به مرکز تولید برای به‌کارگیری در محصول اصلی ارسال می‌شود و برخی دیگر مستقیماً به فروش می‌رسد. محدودیت (۱۲) مقدار مواد اولیهٔ موردنیاز در مراکز تولید و محدودیت (۱۳) و (١٤) نحوهٔ تأمین این مواد را مشخص می‌کند. عبارت‌های (۱۵) و (١٦) بیانگر میزان استفادهٔ محصول بازیافت‌شده در محصول اصلی و نهایی است. عبارت (۱۷) مثبت‌بودن تقاضا را تضمین می‌کند و عبارات (۱۸) و (۱۹) نیز محدودیت‌های مربوط به نوع متغیرهای مسئله هستند.

۵- نتایج محاسباتی

به‌منظور نشان‌دادن ویژگی‌های مدل و کاربردی‌بودن آن، مدل پیشنهادشده برای حل یک مثال عددی به کار گرفته شد. مسئلهٔ موردنظر شامل ۲ تأمین‌کننده، ۲ مرکز تولید، ۳ مرکز توزیع، ۲ مرکز جمع‌آوری/بازرسی، ۲ مرکز بازیافت و ۱ مرکز انهدام است. در تولید محصول موردنظر ۵ مادهٔ اولیهٔ مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین محصول بازگشتی دارای ۲ سطح کیفی و از بین ۳ محصول خروجی از بازیافت محصول برگشتی، هرسه محصول قابلیت به‌کارگیری در ۲ محصول نهایی را دارند و مابقی مستقیماً به فروش می‌رسند. سایر پارامترهای مدل مطابق با جدول ۱ به‌صورت اعداد تصادفی در فواصل ذکرشده در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل در مسئلهٔ موردبررسی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
α_q	(۰/۱,۰/۲)	b_i	(۲۵۰۰۰۰,۵۵۰۰۰۰)	CM_{rh}	(۷,۱۵)
a_{ej}	(۳٤۰۰۰۰,۳۵۰۰۰۰)	c_j	(۲۵۰۰۰۰,۵۰۰۰۰۰)	PC_{ei}	(۲۲,۳۵)
b_{ej}	(-۱۰,-۱۳)	f_l	(۲۵۰۰۰۰,۵۰۰۰۰۰)	OC_{ej}	(۸,۱۲)
α'_{ql}	(٤۵۰۰۰۰,٦۰۰۰۰۰)	g'_m	(۲۰۰۰۰۰,۵۰۰۰۰۰)	CC_l	(٤,۸)
β_{ql}	(۱۵,۲۰)	Sca_{rh}	(۷۲۰۰۰۰,۹۵۰۰۰۰)	DC_n	(۱,۳)
π_e	(۸,۱۰)	Pca_i	(۲۰۰۰۰۰,٤۰۰۰۰۰)	RC_{mq}	(٤,۱۰)
$\lambda max_{11},\lambda max_{12},\lambda max_{14},$ $\lambda max_{21},\lambda max_{22},\lambda max_{24}$	۰/۲	Dca_j	(۷۵۰۰۰۰,۹۰۰۰۰۰)	CX,Cv, CT,CG	(۱,۳)
		Rca_m	(۳۵۰۰۰۰,۵۰۰۰۰۰)	η_{11}	۰/۰۵
g_1,g_2,g_3	۰/۳,۰/٤۵,۰/۲۵	Cca_l	(۵۵۰۰۰۰,۷۰۰۰۰۰)	η_{22}	۰/۰۳
$u_{11},u_{22},u_{31},u_{51}$	۰/۱,۰/۲۵.۰/۱۵, ۰/۱۵	P''_k	(۱۰۰۰,۱۱۵۰)	η_{34}	۰/۰۳
$u_{12},u_{22},u_{32},u_{42}$	۰/۲,۰/۳,۰/۱,۰/٤	Cp_{rhi}	(۱,۳)	p_s	۰/۱
ud_{ejs}	۵۰۰۰۰	ur_{qls}	۸۰۰		

محاسبات مربوط به مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار GAMS22.2 و با استفاده از حل‌کنندهٔ BARON انجام گرفته است.

لم ۱: در صورتی که محدودیت دوم به‌صورت مساوی برقرار شود تابع هدف یک تابع هدف غیرخطی مقعر است. اثبات لم‌ها در پیوست آمده است.

تابع هدف تعریف‌شده تنها در صورتی که محدودیت دوم به‌صورت مساوی باشد، مقعر خواهد بود و با توجه به محدب‌بودن محدودیت‌ها و بیشینه‌سازی تابع هدف جواب‌های به‌دست‌آمده از حل، شرط لازم و کافی را خواهند داشت. در غیر این صورت به‌علت ظاهرشدن ترم **PQ** در ابتدای تابع هدف نمی‌توان

Archive of SID

www.SID.ir

درمورد محدب یا مقعربودن تابع هدف تصمیم‌گیری کرد.

BARON سیستم محاسباتی برای پیداکردن راه‌حل سراسری در مسائل غیرخطی و غیرخطی آمیخته است. در حالی که الگوریتم‌های سنتی NLP بهینگی جواب را تنها در شرایط تحدب مسئله تضمین می‌کنند، BARON یک الگوریتم بهینه‌سازی سراسری براساس شاخه و کران است که بهینگی را در صورت وجود تنها یک سری محدودیت منصفانه و آسان تضمین می‌کند. این محدودیت‌ها شامل وجود حدود بالا و پایین در ترم‌های غیرخطی است که این حدود در لم ۲ برای ترم‌های غیرخطی تابع هدف مشخص شده است.

لم ۲: مقدار حداقل برای ترم غیرخطی $P_{ej} * QP_{eijs}$ برابر با صفر و مقدار حداکثر برابر با $(a_{ej} + ud_{ejs})^2 / (4b_{ej})$و مقدار حداقل برای ترم غیرخطی $Pr_{ql} \times R_{qls}$برابر با صفر و حداکثر آن $\left(\frac{Max_{\forall m}(Rca_m) - \alpha'_{ql} - ur_{qls}}{\beta_{ql}}\right) \times Max_{\forall m}(Rca_m)$ است.

تصمیمات بهینهٔ مربوط به مکان‌یابی تسهیلات به‌صورت $X_i:X_1=X_2=1$، $Y_j:Y_1=Y_2=Y_3=1$، $Z_l:Z_1=Z_2=1$ و $T_m:T_1=T_2=1$ به دست آمده و مقدار برخی متغیرهای دیگر به‌شرح جدول ۲ است.

جدول ۲- مقادیر برخی متغیرهای مدل در مسئلهٔ موردبررسی

متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
Pr_{11}	۲۸۹۱۲/۲	P_{11}	۱۵۳۹۹/۵۲۲
Pr_{12}	۲۶۵۸۱/۰۶	P_{12}	۹۹۰۰/۶۸۷
Pr_{21}	۱۶۹۲۳/۰۲	P_{13}	۱۴۵۳۳/۲۹۲
Pr_{22}	۱۴۵۷۲/۰۳۱	P_{21}	۱۲۳۳۵/۸۶۵
z	۲/۳۹۴۸E+۹	P_{22}	۱۵۵۸۲/۷۲۶
		P_{23}	۲۷۲۲۵/۲۱۳

۵-۱- تجزیه و تحلیل پارامتری

به‌منظور سنجش اعتبار و عملکرد مدل پیشنهادی در شرایط عدم‌قطعیت، چندین آنالیز حساسیت بر پارامترهای مسئله انجام گرفته که تأثیرات آنها در قالب نمودارهایی نشان داده خواهد شد. تحلیل‌ها را در سه قسمت پارامترهای مربوط به محصول برگشتی (کسر دورریختنی، تغییر پارامترهای مقیاس و حساسیت به قیمت خرید در تابع برگشت محصول)، پارامترهای مربوط به محصول نهایی (تغییر پارامترهای مقیاس و حساسیت به قیمت فروش در تابع تقاضای محصول) و سرانجام پارامترهای مربوط به بازیافت محصول برگشتی (هزینهٔ بازیافت) پی می‌گیریم. تمامی اعداد درنظرگرفته‌شده برای پارامترهای مدل در این بخش، به‌صورت تصادفی و در دامنه‌ای که در جدول ۱ مشخص شده تولید شده است.

۵-۱-۱- آنالیزهای مربوط به میزان بازگشت محصول

با توجه به اهمیت میزان بازگشت محصول بر سود زنجیرهٔ تأمین و از سوی دیگر به‌دلیل وابستگی بازگشت محصول به قیمت خرید، آنالیز حساسیت‌هایی به‌منظور بررسی تأثیر برخی پارامترها بر میزان محصول برگشتی انجام گرفته است.

پارامتر متوسط کسر غیرقابل‌بازیافت محصول برگشتی با سطح کیفیت α_q(q): شکل ۲، تأثیر تغییر در سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات متوسط کسر دور ریختنی (کسر غیرقابل‌بازیافت محصول برگشتی) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش α_{ql}، سود زنجیرهٔ تأمین کاهش می‌یابد. افزایش α_{ql} بدین معنی است که مقدار بیشتری از محصولات برگشتی با سطح کیفیت q، قابل‌بازیافت نیستند و باید به مراکز

Archive of SID

www.SID.ir

انهدام (دفع) منتقل شوند. در حالی که برای خرید این محصولات هزینه‌ای پرداخت شده است و غیرقابل‌استفاده (غیرقابل‌بازیافت) هستند. بنابراین با افزایش این پارامتر که خود به‌نوعی افزایش هزینهٔ خرید محصولات بازگشتی را به دنبال دارد، سود موردانتظار روند کاهشی خواهد داشت (شکل ۲)

پارامتر مقیاس تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری lام (α'_{ql}): شکل‌های ۳، ٤ و ۵، به‌ترتیب تأثیر پارامتر مقیاس تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری lام (α'_{ql}) را بر متغیرهای مدل از جمله سود زنجیرهٔ تأمین، مجموع میزان محصولات بازگشتی از مراکز جمع‌آوری، مجموع میزان تولیدات در مراکز تولید، متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی با سطح کیفی q و همچنین متوسط قیمت فروش محصول نهایی eام نشان می‌دهد. تغییرات این پارامتر را بدین صورت در نظر گرفتیم که براساس مقدار تصادفی که در جدول ۱ آورده شده بود، به‌طور هم‌زمان برای دو مرکز جمع‌آوری و ۲ سطح کیفی موردنظر، ابتدا مقادیر را به نصف (۰/۵)کاهش دادیم و سپس آن را به ۱/۵، ۱/۷ و ۲ برابر مقدار فعلی افزایش دادیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش این پارامتر، مقدار محصولات بازگشتی در هر مرکز جمع‌آوری، افزایش و درنتیجه مجموع میزان برگشتی‌ها نیز افزایش می‌یابد. با افزایش میزان برگشتی‌ها، به‌دلیل اینکه این میزان از حد نیاز مراکز بازیافت فراتر نرود، متوسط قیمت خرید کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که این افزایش به‌معنی استفادهٔ بیشتر از محصولات برگشتی در تولید محصول نهایی و کاهش میزان خرید مواد اولیه با هزینهٔ بیشتر از تأمین‌کنندهٔ خارجی است، سود زنجیره افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، تغییرات پارامتر گفته‌شده تأثیری بر میزان تولیدات محصول و درنتیجه متوسط قیمت فروش محصول نهایی ندارد (تابع تقاضا و برگشت محصول مستقل از هم در نظر گرفته شده‌اند)(شکل۳، شکل ٤، شکل۵).

پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری lام (β_{ql}): شکل‌های ٦، ۷ و ۸، به‌ترتیب تأثیر پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول با سطح کیفی q از مرکز جمع‌آوری lام (β_{ql}) را بر متغیرهای مدل از جمله سود زنجیرهٔ تأمین، مجموع میزان محصولات بازگشتی از مراکز جمع‌آوری، مجموع میزان تولیدات در مراکز تولید، متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی با سطح کیفی q و همچنین متوسط قیمت فروش محصول نهایی eام نشان می‌دهد. تغییرات این پارامتر را نیز بدین صورت در نظر گرفتیم که براساس مقدار تصادفی که در جدول ۱ آورده شده بود، به‌طور هم‌زمان برای دو مرکز جمع‌آوری و دو سطح کیفی موردنظر، ابتدا مقادیر را به نصف (۰/۵) کاهش دادیم و سپس آن را به ۱/۵، ۱/۷ و ۲ برابر مقدار فعلی افزایش دادیم. با افزایش این پارامتر حساسیت نسبت به قیمت زیاد می‌شود و می‌توان با قیمت کمی مراکز جمع‌آوری را تشویق به بازگشت کالا کرد. درنتیجه مجموع میزان برگشتی‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش میزان برگشتی‌ها، به‌دلیل اینکه این میزان از حد نیاز مراکز بازیافت فراتر نرود، متوسط قیمت خرید کاهش پیدا می‌کند. همانند قبل، این افزایش منجر به استفادهٔ بیشتر از محصولات برگشتی در تولید محصول نهایی و کاهش میزان خرید مواد اولیه با هزینهٔ بیشتر از تأمین‌کنندهٔ خارجی می‌شود و به همین علت سود زنجیره افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، همان‌طور که

Archive of SID

www.SID.ir

نمودارها نشان می‌دهند تغییرات پارامتر گفته‌شده تأثیری بر میزان تولیدات محصول و درنتیجه متوسط قیمت فروش محصول نهایی ندارد. (تابع تقاضا و برگشت محصول مستقل از هم در نظر گرفته شده‌اند) شکل٦، شکل۷، شکل۸.

با توجه به اهمیت میزان تولید محصول بر سود زنجیرهٔ تأمین و از سوی دیگر به‌دلیل مرتبط‌بودن میزان تولید در مراکز تولید به تقاضای محصول نهایی بر آن شدیم تا آنالیز حساسیت‌هایی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای درنظرگرفته‌شده در تابع تقاضا را بر برخی متغیرهای مسئله انجام دهیم.

پارامتر مقیاس تابع تقاضای مرکز توزیع jام (a_{ej}): در شکل ۹ تأثیر پارامتر a_{ej} (مقیاس تابع تقاضای مرکز توزیع jام) بر میزان سود زنجیرهٔ تأمین نشان داده شده است. تغییرات این پارامتر را نیز بدین صورت در نظر گرفتیم که براساس مقدار تصادفی که در جدول ۱ آورده شده بود، به‌طور هم‌زمان برای هر دو مرکز جمع‌آوری، ابتدا مقادیر را به نصف (۰/۵) کاهش دادیم و سپس آن را به ۱/۵، ۱/۷ و ۲ برابر مقدار فعلی افزایش دادیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر a_{ej}ها، سود افزایش می‌یابد. درحقیقت افزایش a_{ej} به‌معنی افزایش تقاضا است و از آنجایی که میزان تولید محصول مرتبط و براساس میزان تقاضای آن تعیین می‌شود، میزان تولید محصول در مراکز تولید افزایش و به تبع آن مجموع میزان تولیدات نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش میزان تولیدات، محصولات بیشتری نیز به فروش می‌رسند که این خود منجر به افزایش درآمد و سود زنجیره می‌شود. از سوی دیگر با افزایش مقادیر a_{ej}، تقاضا نسبت به عرضه افزایش می‌یابد و این خود منجر به افزایش متوسط قیمت فروش محصول می‌شود. تأثیر این پارامتر بر مجموع تولیدات و متوسط قیمت فروش نیز در بخشی از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در رابطه با تأثیرگذاری این پارامتر بر مجموع برگشت محصولات از مراکز جمع‌آوری و نیز قیمت خرید آنها باید گفت که چون رابطهٔ تابع تقاضا و برگشت محصول مستقل از هم در نظر گرفته شده‌اند، تغییرات پارامتر گفته‌شده بر متغیرهای مجموع برگشت محصولات و همچنین متوسط قیمت خرید آنها بی‌تأثیر خواهد بود که این نیز توسط بخش دیگری از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده است. (شکل۹، شکل۱۰، شکل۱۱)

پارامتر حساسیت به قیمت تابع تقاضا در مرکز توزیع jام (b_{ej}): در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ١٤به تأثیر پارامتر b_{ej} (پارامتر حساسیت به قیمت تابع تقاضا در مرکز توزیع jام) بر متغیرهای مدل از جمله سود زنجیرهٔ تأمین، مجموع میزان تولیدات در مراکز تولید، قیمت فروش محصول نهایی، مجموع میزان محصولات بازگشتی از مراکز جمع‌آوری و همچنین متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی با سطح کیفی q می‌پردازیم. تغییرات این پارامتر را نیز بدین صورت در نظر گرفتیم که براساس مقدار تصادفی که در جدول ۱ آورده شده بود، به‌طور هم‌زمان برای هر سه مرکز توزیع، ابتدا مقادیر را به نصف (۰/۵) کاهش دادیم و سپس آن را به ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر مقدار فعلی افزایش دادیم.

از آنجایی که در رابطهٔ تابع تقاضای محصول، پارامتر b_j با علامت منفی وارد شده است، افزایش باعث کاهش تقاضا و کاهش متوسط قیمت فروش می‌شود و همان‌طور که قبلاً بیان شد، میزان تولیدات براساس

Archive of SID

www.SID.ir

تقاضای محصول شکل می‌گیرد. بنابراین میزان تولید در هر مرکز کاهش و مجموع تولیدات مراکز نیز روند کاهشی خواهند داشت. به تبع کاهش تولید و کاهش متوسط قیمت فروش، سود کلی زنجیره نیز کاهش خواهد یافت. این تغییرات به‌خوبی در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱٤ نشان داده شده است. در رابطه با میزان مجموع برگشتی‌ها و متوسط قیمت خرید آنها، بنا به علت گفته‌شده در بخش‌های قبلی میزان تغییرات پارامتر بی‌تأثیر خواهد بود. (شکل۱۲، شکل۱۳، شکل۱٤)

۵-۱-۳- آنالیزهای مربوط به بازیافت محصول برگشتی

ازجمله مزیت‌های لجستیک معکوس، توجه به جریان برگشتی و بازیافت محصولات است. از ویژگی‌های برجستهٔ این مطالعه درنظرگرفتن سطح کیفیت محصولات برگشتی و وابسته‌کردن برخی پارامترها و متغیرها از جمله هزینهٔ پردازش در مراکز بازیافت به آن است. در ادامه تأثیر تغییرات این پارامتر بر چهار متغیر مهم مدل بررسی می‌شود.

در رابطه با هزینهٔ پردازش این امر طبیعی به نظر می‌رسد که هرچه سطح کیفیت محصول بازگشتی که به مراکز جمع‌آوری و سپس بازیافت منتقل می‌شود پایین‌تر باشد، هزینهٔ بیشتری جهت پردازش در مراکز بازیافت خواهد داشت و همان‌طور که می‌دانیم به‌طور کلی هرچه هزینه‌ها افزایش یابد، سود کاهش پیدا می‌کند.

همچنین با پایین‌آمدن سطح کیفیت محصولات برگشتی و افزایش هزینه‌های پردازش در مراکز بازیافت، این محصولات به‌میزان کمتری قابلیت استفاده در محصول اصلی را دارند و به همین دلیل سعی می‌شود که میزان کمتری محصول برگشتی خریداری شود. درنتیجه متوسط قیمت خرید کمتری نیز پیشنهاد می‌شود. شکل‌های ۱۵، ۱۶،۱۷و ۱۸ به‌خوبی این تأثیرگذاری را نشان می‌دهند. (شکل۱۵، شکل۱۶، شکل۱۷، شکل۱۸)

۵-۲- محاسبهٔ شاخص‌های VSS[48] و EVPI[49]

یک سؤال معمول و رایج در برنامه‌ریزی تصادفی این است که آیا جواب ارائه‌شده، نزدیک به جواب بهینه است یا خیر. پاسخ به این سؤال با محاسبهٔ دو شاخص VSS و EVPI مشخص می‌شود. EVPI بیانگر ارزش و اهمیت اطلاع از آینده با قطعیت و VSS ارزش استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی است. EVPI از تفاوت بین مقدار حاصل از حل با رویکرد WS[50] و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی (SP) حاصل می‌شود. در رویکرد WS، هر سناریو به‌طور جداگانه‌ای حل می‌شد و میانگین توابع حاصل از آنها به‌عنوان مقدار WS در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبهٔ VSS، می‌بایست تفاضل بین مقادیر حاصل از رویکرد EV و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی را محاسبه کنیم. برای به‌دست‌آوردن مقدار EV، ابتدا مقادیر میانگین هر پارامتر تصادفی محاسبه می‌شود و سپس مدل با این مقادیر حل می‌شود. مقادیر این دو شاخص در مثال عددی ارائه‌شده عبارت‌اند از:

VSS=2.447E+8،EVPI=2.691E+8

مقادیر بالای شاخص VSS و EVPI نشان‌دهندهٔ ارزش بالای استفاده از مدل احتمالی است.

۵-۳- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در شرکت صنایع لاستیک یزد

با توجه به اینکه شرکت صنایع لاستیک یزد طی چند سال اخیر برنامهٔ خرید و بازیافت لاستیک‌های کهنه و فرسوده را در برنامهٔ کاری خود قرار داده است، لازم

Archive of SID

www.SID.ir

دیدیم تا این مطالعه را به‌صورت عملی بر داده‌های این شرکت انجام دهیم. بنابراین با بررسی‌های به‌عمل‌آمده در این رابطه مشخص شد که مسئلهٔ موردنظر برای پیاده‌سازی در شرکت صنایع لاستیک شامل۱۳ تأمین‌کننده، ۱ مرکز تولید، ۲ مرکز توزیع، ۳ مرکز جمع‌آوری/بازرسی، ۱ مرکز بازیافت و ۱ مرکز انهدام است. در تولید محصول موردنظر ۱۰ نوع مادهٔ اولیه استفاده می‌شود. همچنین دربارهٔ محصولات بازگشتی این‌چنین فرض می‌شود که همگی دارای سطح کیفی یکسان باشند. از بین ۵ محصول خروجی از بازیافت محصول برگشتی، تنها یک محصول قابلیت به‌کارگیری در محصول اصلی را دارد و مابقی مستقیماً به فروش می‌رسند. سایر پارامترهای موردنیاز برای حل مدل پیشنهادی از جمله میزان محصول خروجی از بازیافت هر واحد محصول برگشتی و قیمت فروش آن، هزینه‌های حمل مواد بین مراکز، هزینهٔ خرید مواد اولیه و مقدار مصرف هر ماده در هر واحد محصول نهایی، هزینهٔ راه‌اندازی و پردازش در هر مرکز، ظرفیت مراکز مطابق با جدول‌های ۳-۶ در نظر گرفته شده‌اند.

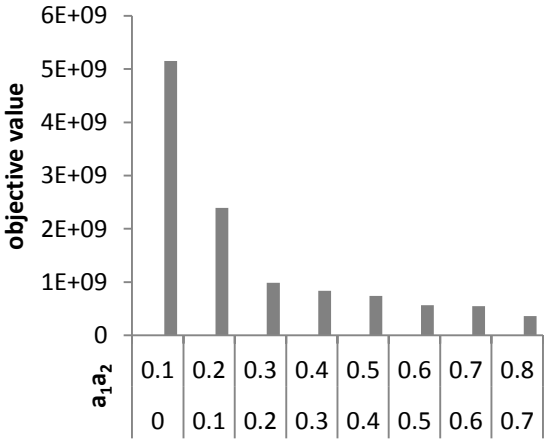
در این مسئله واحد پولی، ریال و واحد وزنی کیلوگرم در نظر گرفته شده است. پس از جای‌گذاری داده‌های شرکت در مدل پیشنهادی، محاسبات مربوطبه مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار GAMS22.2 و با استفاده از حل‌کنندهٔ BARON انجام گرفت. با حل مدل، تصمیمات بهینه مربوط به مکان‌یابی تسهیلات به صورت Zl:Z1=Z2=Z3=1،Yj:Y1=Y2=1،Xi:X1=1 و Tm:T1=1 به دست آمد و مقدار برخی متغیرهای دیگر به‌شرح جدول ۷ است که مقایسهٔ این مقادیر با وضعیت موجود شرکت صنایع لاستیک یزد براساس اظهارات مسئولان آن شرکت، نشان‌دهندهٔ صحت و درستی مدل پیشنهادی است.

۶- نتیجه‌گیری و ارائهٔ پیشنهادها

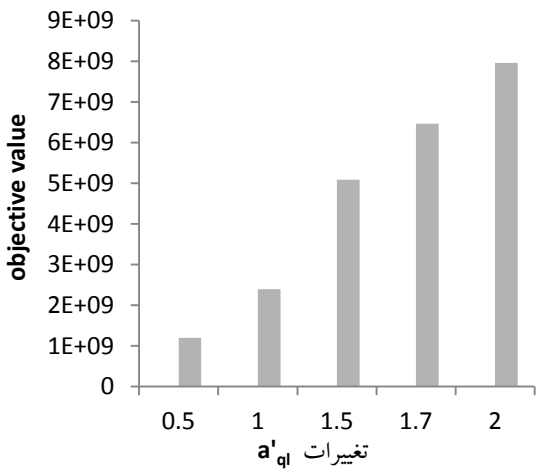
با توجه به اهمیتی که لجستیک معکوس در سال‌های اخیر از لحاظ علمی، منافع اقتصادی و هم از نظر مسائل زیست‌محیطی دریافت کرده است بر آن شدیم تا به طراحی یکپارچه شبکهٔ لجستیک مستقیم و معکوس بپردازیم. به‌منظور نزدیک‌کردن مدل پیشنهادی با شرایط حاکم بر دنیای واقعی، تقاضای محصول نهایی و میزان محصولات برگشتی احتمالی در نظر گرفته شد و به‌منظور بررسی نقش قیمت‌گذاری این کالاها بر تمایل مشتریان به بازگرداندن آنها، مقدار محصول برگشتی وابسته به قیمت در نظر گرفته شد. همچنین قیمت پیشنهادی برای محصولات بازگشتی و هزینهٔ بازیافت وابسته به سطح کیفیت هستند. درنتیجه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندسطحی ارائه شد. شبکهٔ موردبررسی در این تحقیق قابلیت به‌کارگیری در صنایعی را دارد که در آنها جزء و یا اجزایی از محصول قابلیت بازیافت دارد و این بازیافت از نظر اقتصادی یا زیست‌محیطی ارزشمند باشد. در ادامه به‌منظور نشان‌دادن کاربردی‌بودن مدل، با ارائهٔ مثال عددی و تحلیل حساسیت پارامترهای آن، نشان دادیم که برخی از تغییرات پارامترها تأثیر چشمگیری بر متغیرهای مسئله دارد. شایان ذکر است همچنان که ابعاد و اندازهٔ مسئله بزرگ می‌شود، حجم محاسباتی و زمان اجرا نیز بیشتر می‌شود. حل مسائل با ابعاد بزرگ‌تر در زمان کوتاه با استفاده از روش‌های فراابتکاری ممکن است و این می‌تواند به‌عنوان مطالعه و تحقیق بعدی در این زمینه باشد. همچنین مدل پیشنهادی دوره‌های مختلف زمانی را نیز در نظر نمی‌گیرد.

Archive of SID

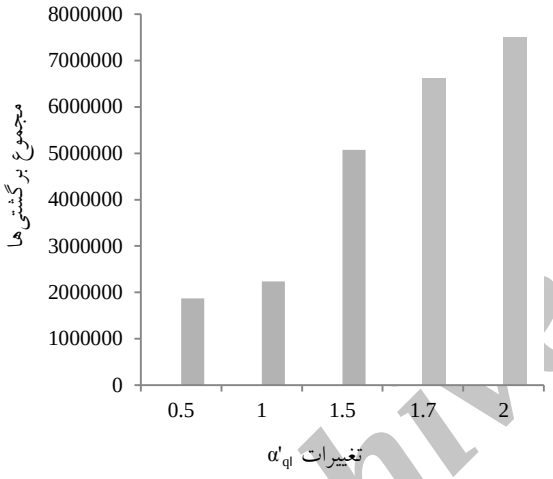
www.SID.ir

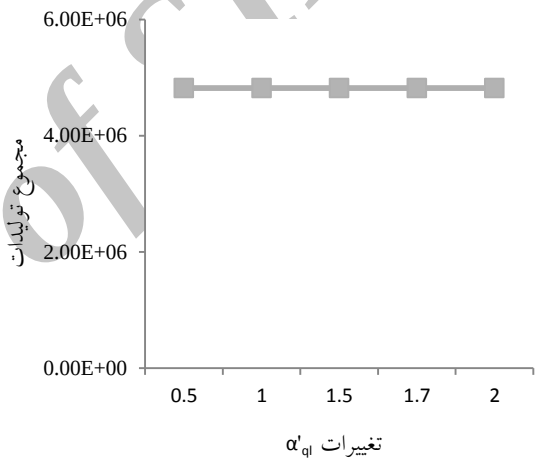


شکل۲- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات متوسط کسر غیرقابل‌بازیافت محصول برگشتی

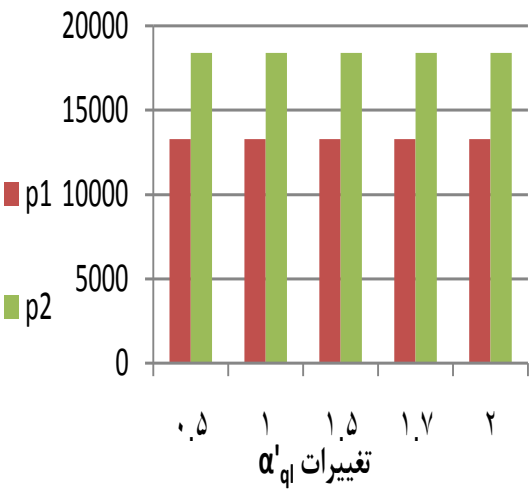


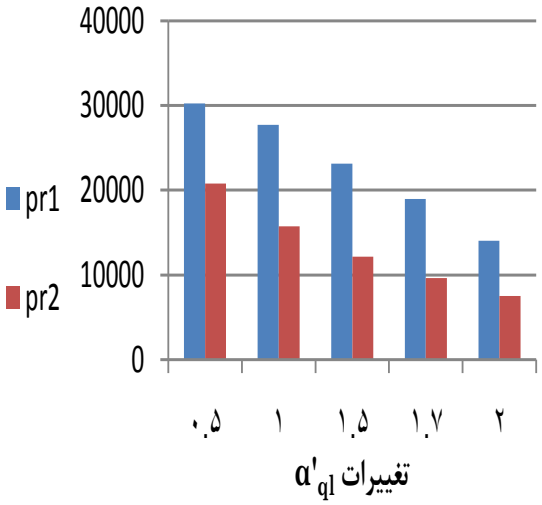
شکل۳- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات مقیاس تابع برگشت محصول





شکل٤- تغییرات مجموع میزان محصولات برگشتی و مجموع تولیدات از مراکز جمع‌آوری در برابر تغییرات مقیاس تابع برگشت محصول

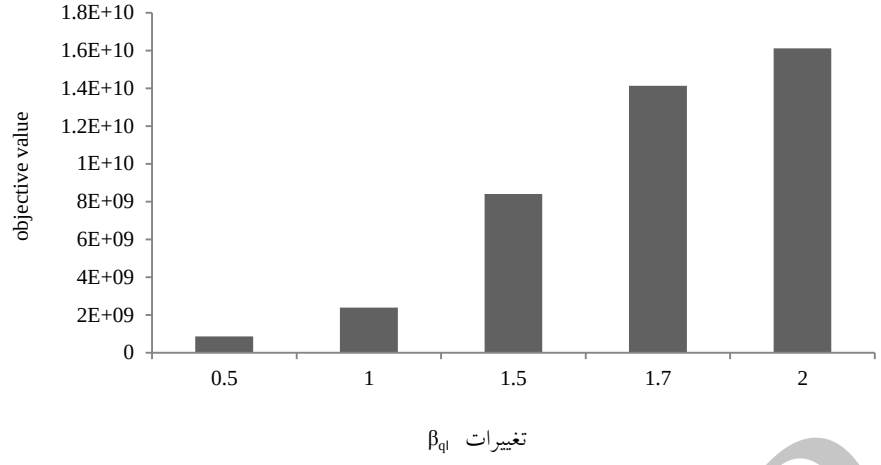




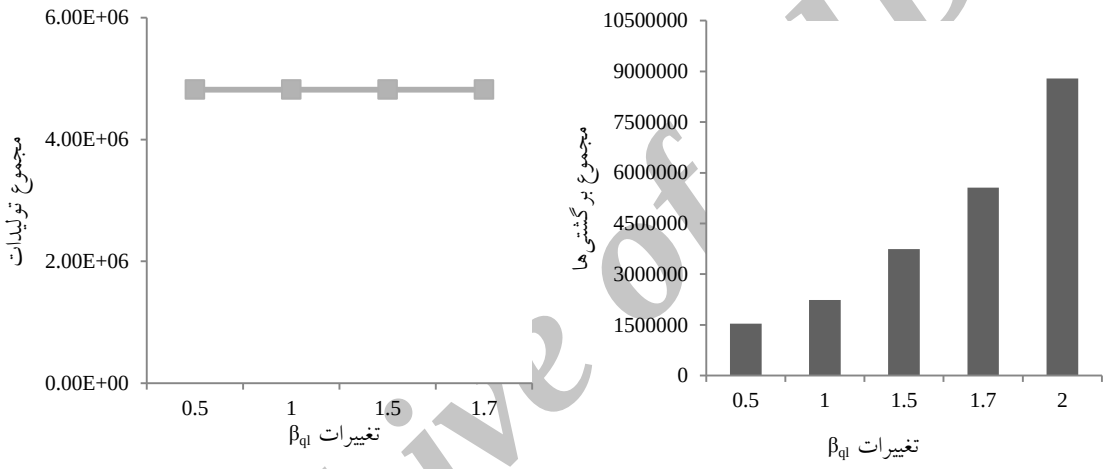
شکل ۵- تغییرات متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی و متوسط قیمت فروش محصول نهایی

Archive of SID

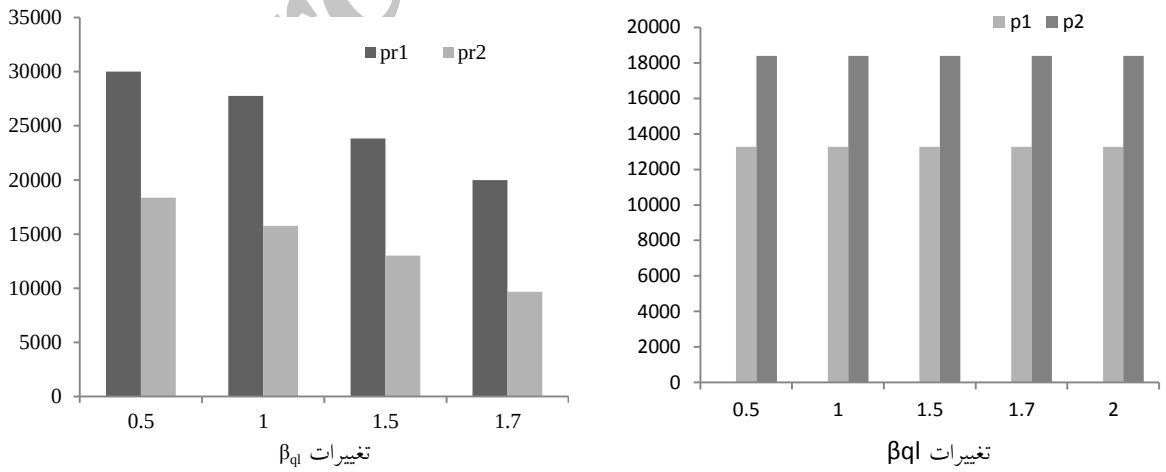
www.SID.ir



شکل ٦- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول



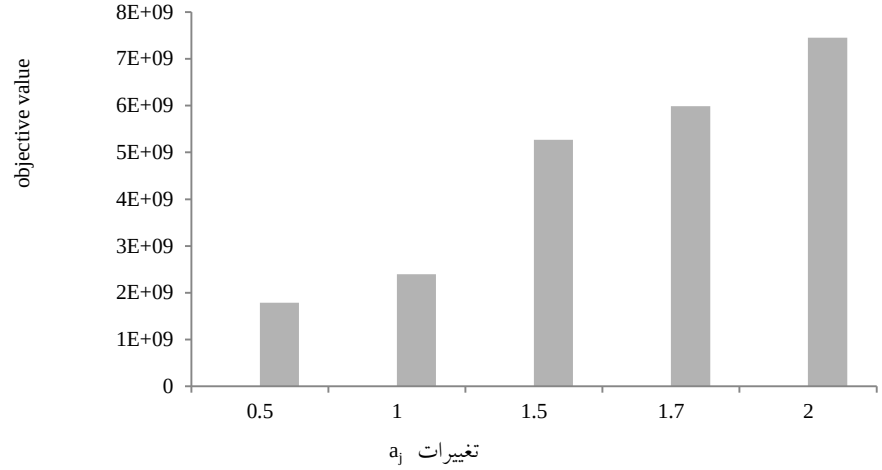
شکل ۷- تغییرات مجموع میزان محصولات برگشتی و مجموع تولیدات در برابر تغییرات پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول



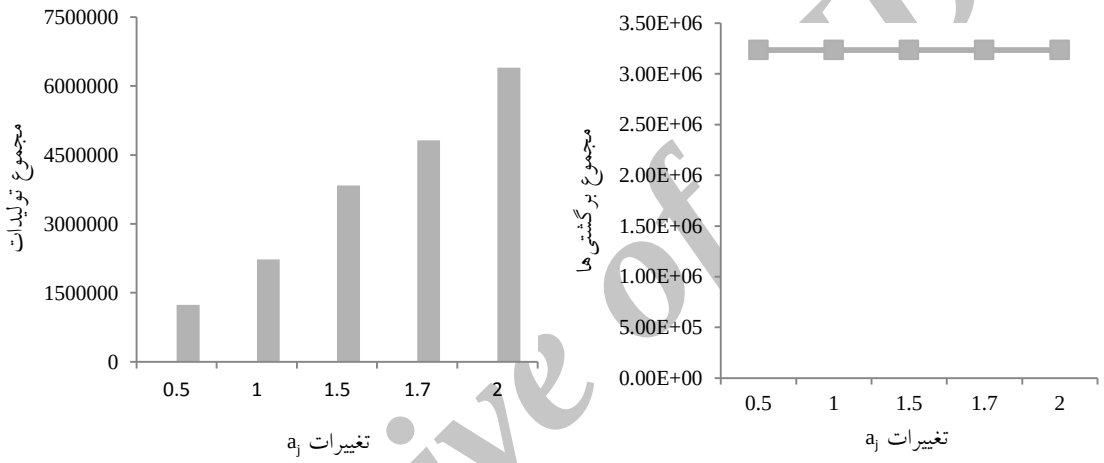
شکل ۸- تغییرات متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی و متوسط قیمت فروش محصول نهایی در برابر تغییرات پارامتر حساسیت به قیمت در تابع برگشت محصول

Archive of SID

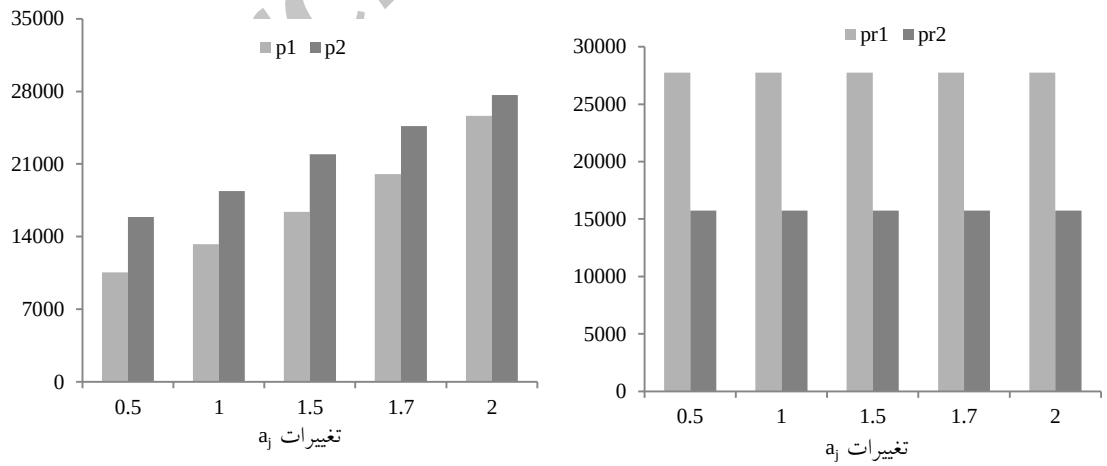
www.SID.ir



شکل ۹- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات مقیاس تابع تقاضای محصول



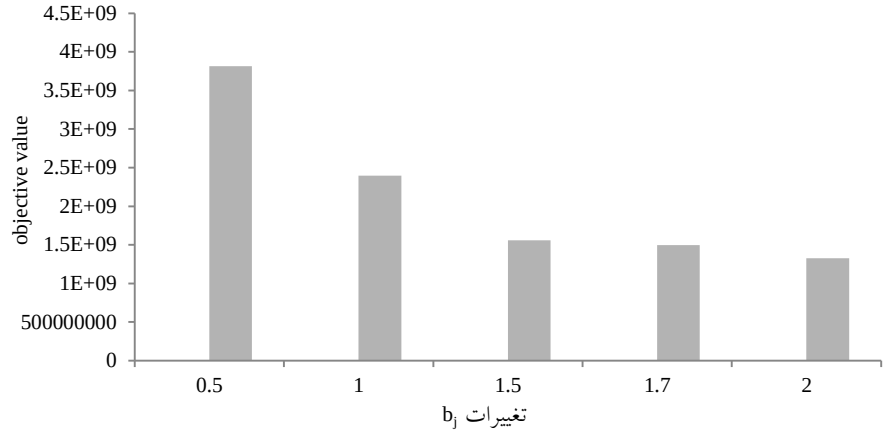
شکل ۱۰- تغییرات مجموع میزان تولیدات محصول در مراکز تولید و مجموع برگشتی‌ها در برابر تغییرات مقیاس تابع تقاضای محصول



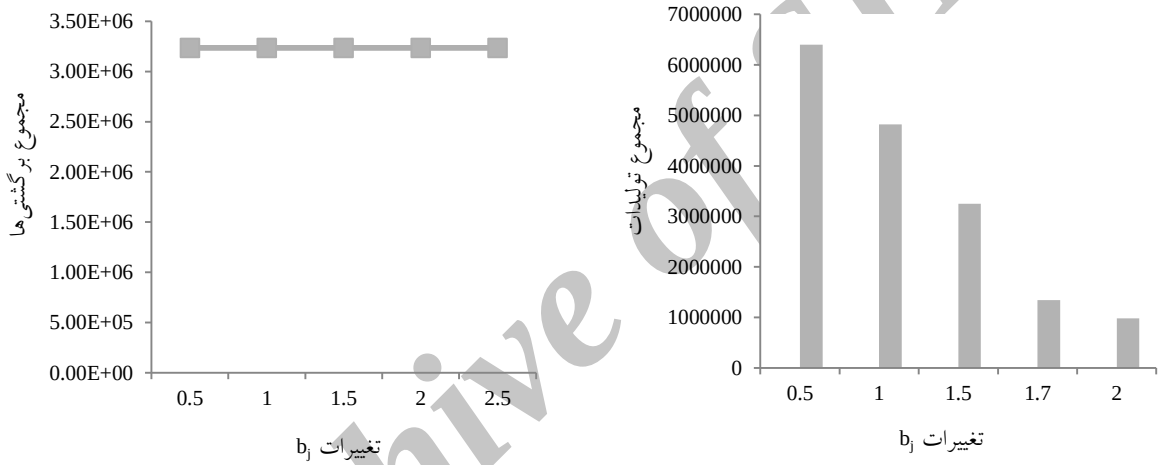
شکل ۱۱- تغییرات متوسط قیمت فروش محصول و متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی در برابر تغییرات مقیاس تابع تقاضای محصول

Archive of SID

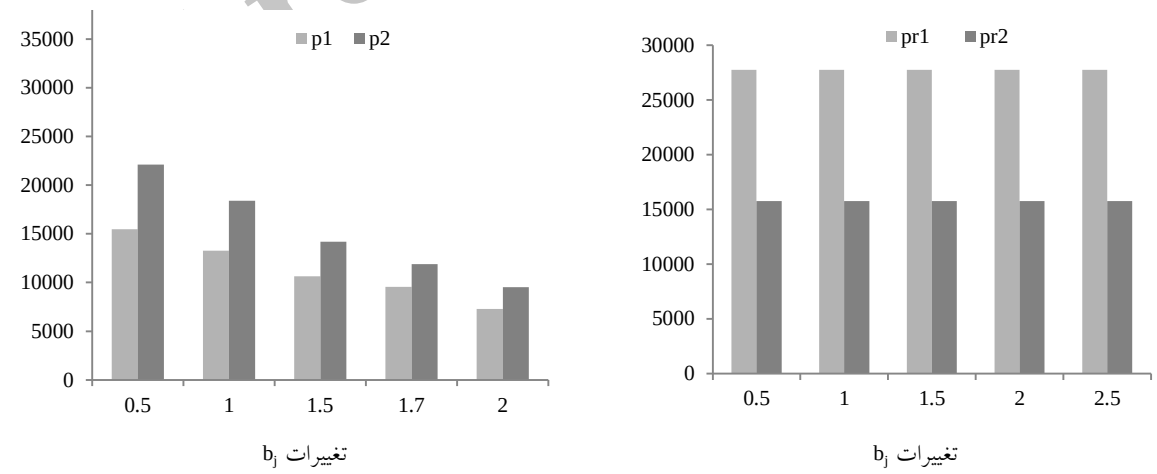
www.SID.ir



شکل ۱۲- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات پارامتر حساس به قیمت در تابع تقاضای محصول



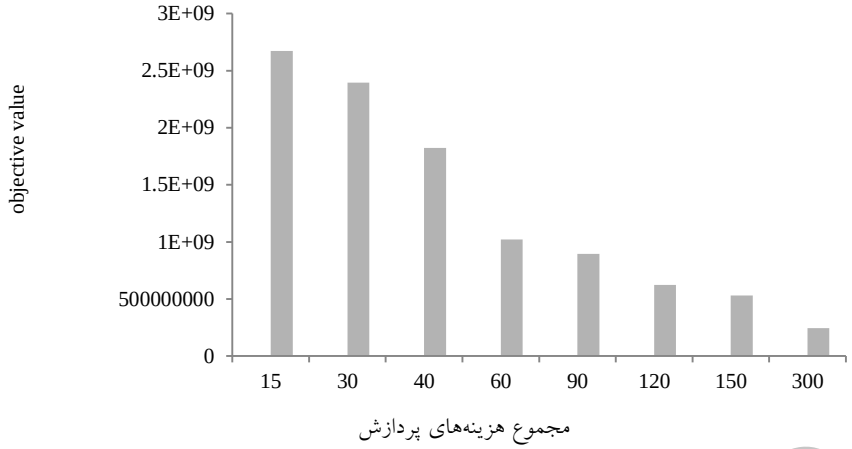
شکل ۱۳- تغییرات مجموع تولیدات در مراکز تولید و مجموع برگشتی‌ها در برابر تغییرات پارامتر حساس به قیمت در تابع تقاضای محصول



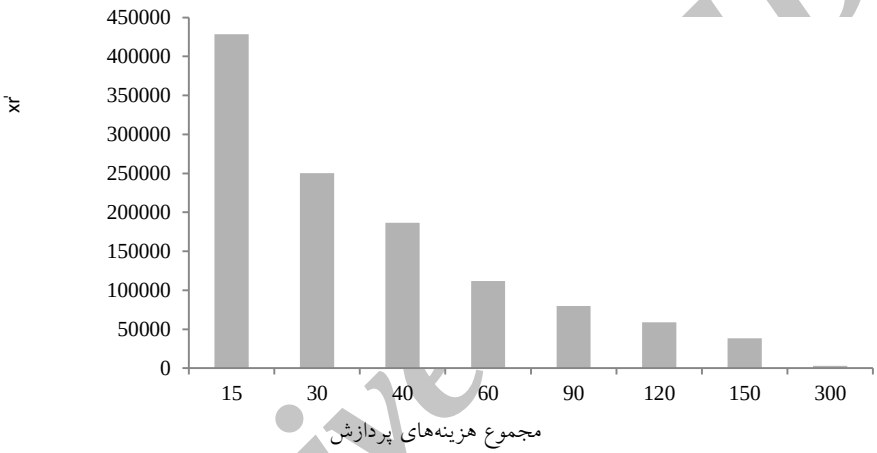
شکل ۱٤- تغییرات متوسط قیمت فروش محصول و متوسط قیمت خرید محصولات بازگشتی در برابر تغییرات پارامتر حساس به قیمت در تابع تقاضای محصول

Archive of SID

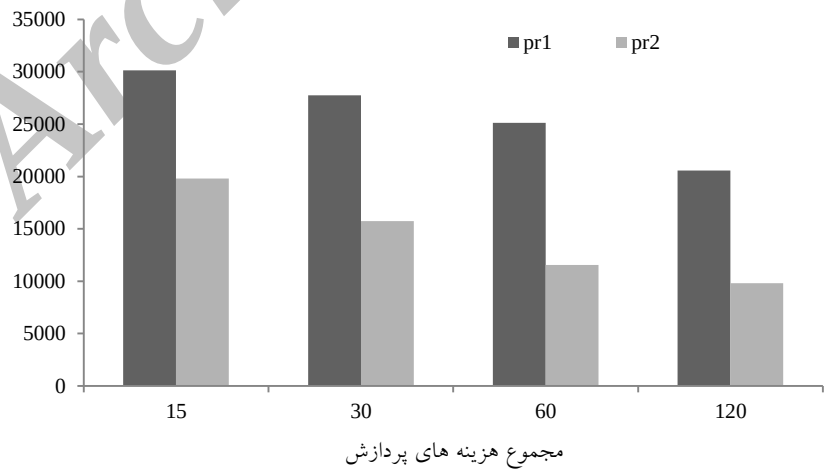
www.SID.ir



شکل ۱۵- تغییرات سود زنجیرهٔ تأمین در برابر تغییرات مجموع هزینه‌های پردازش در مراکز بازیافت



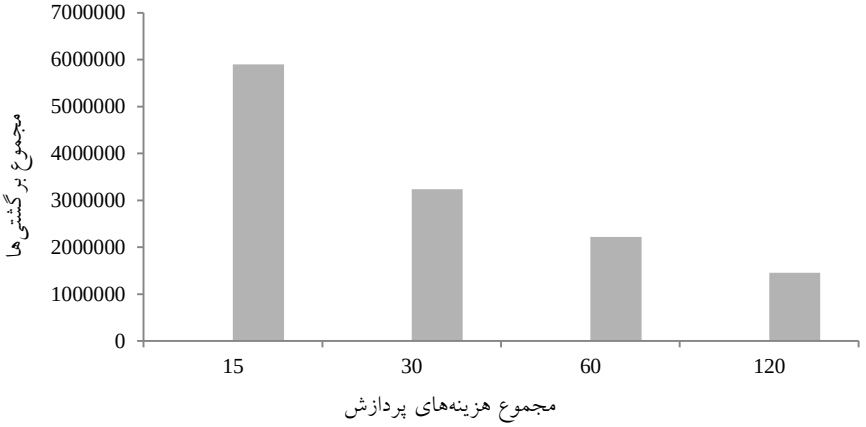
شکل ۱۶- تغییرات میزان استفادهٔ محصول برگشتی در محصول اصلی در برابر تغییرات مجموع هزینه‌های پردازش در مراکز بازیافت



شکل ۱۷- تغییرات متوسط قیمت خرید محصولات برگشتی در برابر تغییرات مجموع هزینه‌های پردازش در مراکز بازیافت

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۸- تغییرات مجموع محصولات برگشتی در برابر تغییرات مجموع هزینه‌های پردازش در مراکز بازیافت

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مربوط به محصولات حاصل از بازیافت

محصول خروجی	میزان تولید (در هر یک کیلو)	قیمت فروش (ریال/کیلو)
۱	۰/۳	۱۱۵۰۰
۲	۰/۲	۱۱۰۰۰
۳	۰/۲	۱۰۰۰۰
٤	۰/۱	۱۹۰۰۰
٥	۰/۲	۷۰۰

جدول ٤- مقادیر ظرفیت مراکز

مراکز	ظرفیت
تامین‌کنندگان	۱۰۰۰۰۰۰۰
تولید	۲۳۰۰۰۰۰۰
توزیع	۵۰۰۰۰۰۰
جمع‌آوری/بازرسی	۵۰۰۰۰۰۰
بازیافت	۷۰۰۰۰۰۰۰

جدول ٥- مقادیر پارامترهای مربوط به مواد اولیه

مادهٔ اولیه	تأمین کنندگان	میزان مصرف در یک کیلو	هزینهٔ خرید (ریال/کیلو)	هزینهٔ حمل (ریال/کیلو)
۱	۱	۰/۳٤۸	۹۰۰۰۰	۷۰۰
۲	۲	۰/۲۳۲	٥۰۰۰۰	٦۰۰
۳	۳	۰/۱٤٥	۱٦۰۰۰	۷۳۰
٤	٤	۰/۱۷٤	٤۰۰۰۰	٥۰۰
	٥		٤۰۰۰۰	۱٥۰۰
	٦		٤۰۰۰۰	۱٥۰۰
٥	۷	۰/۰٤٦	۷٥۰۰	٥۰۰
٦	۸	۰/۰۰٥۷	۷۰۰۰۰	۷۰۰
	۹		۱۰۰۰۰۰	
۷	۱۰	۰/۰٤۰٥	٥٥۰۰	٥۰۰
۸	۸	۰/۰۰٥۷	٤۰۰۰۰۰	۷۰۰
	۹		٥۰۰۰۰۰	
۹	۱۱	۰/۰۱۸٤	۲۰۰۰۰۰	۷۰۰
	۱۲		۱۸۰۰۰۰	۸۳۰
۱۰	۱۳	۰/۰۰٦۸	٥٥۰۰۰	٥۰۰

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٦- مقادیر پارامترهای هزینه‌ای

هزینه	مقدار	هزینه	مقدار	هزینه	مقدار	هزینه	مقدار
Co_{11}	۵۰۰	Cs_{111}	۲۰	θ_1	۲۰۰	f_1	۱۰۰۰۰۰۰۰
Co_{12}	۷۰۰	Cs_{211}	۲۰	θ_2	۲۰۰	f_2	۱۰۰۰۰۰۰۰
Cv_{11}	۱	Cs_{311}	۲۰	θ_3	۲۰۰	f_3	۱۰۰۰۰۰۰۰
Cv_{21}	۲	Cs_{411}	۲۰	λ_1	۱۰۰	g_1	۲۰۰۰۰۰۰۰
Cv_{31}	۱	Cs_{511}	۲۰	ρ_{11}	۵۰۰۰		
Cw_{11}	۷۰۰	δ_1	٤۰۰	b_1	۳۵۰۰۰۰۰۰		
Cw_{21}	۳۰۰	δ_2	٤۰۰	c_1	۱۰۰۰۰۰۰۰		
Cw_{31}	۲۵۰	γ_1	٦۰۰۰۰	c_2	۱۰۰۰۰۰۰۰		

جدول۷- مقادیر برخی متغیرهای مدل در مسئله مورد بررسی

متغیر	مقادیر	متغیر	مقادیر
Pr_{11}	۱۸۰٤	P_1	۱۲۸۷۳۰
Pr_{12}	۲۰۰٤	P2	۱۲۸۸۳۰
Pr_{13}	۲۰۲۹	z	۱۰E+۱/۵۵۵

پیوست

اثبات لم ۱ : در صورتی که محدودیت دوم به‌صورت مساوی برقرار شود، اولین ترم غیرخطی یعنی $P_{ej} * QP_{eijs}$ به‌صورت $p_{ej} * (a_{ej} - b_{ej}p_{ej} +$ و دومین ترم غیرخطی $Pr_{ql} * R_{qls}$ به‌صورت $ud_{ejs})$ خواهد بود از اولی دو بار نسبت به p_{ej} و از دومی دوبار نسبت به Pr_{ql} مشتق می‌گیریم که حاصل به‌ترتیب برابر با $-2b_{ej}$ و $-2\beta_{ql}$ خواهد بود که منفی است و نشان‌دهندهٔ مقعربودن دو ترم در تابع هدف بیشینه‌سازی است. از آنجایی که جمع چند تابع مقعر باز مقعر است بنابراین کل تابع هدف مقعر است.

$-Pr_{ql} * (\alpha'_{ql} + \beta_{ql}Pr_{ql} + ur_{qls})$

اثبات لم ۲: مقدار حداقل برای ترم غیرخطی $P_{ej} * QP_{eijs}$ وقتی است که P_{ej} برابر با صفر و مقدار حداکثر موقعی است که $p_{ej} * (a_{ej} - b_{ej}p_{ej} +$ $ud_{ejs})$ در حداکثر خود قرار گیرد که با مشتق‌گیری نسبت به p_{ej} و جای‌گذاری در معادله به دست می‌آید. حداقل برای ترم غیرخطی $Pr_{ql} \times R_{qls}$ وقتی است که Pr_{ql} برابر با صفرباشد . با توجه به محدودیت‌های ٤ و ۹ حداکثر مقدار برای R_{qls} برابر با $Max_{\forall m}(Rca_m)$ است که این مقدار با توجه به رابطهٔ کالای بازگشتی در (۵) به‌ازای قیمت $Pr_{ql} = (Max_{\forall m}(Rca_m) - \alpha'_{ql} - ur_{qls})/\beta_{ql}$ به دست می‌آید که با ضرب این دو مقدار، حد بالای $Pr_{ql} \times R_{qls}$ به دست می‌آید.

Archive of SID

www.SID.ir

References

Amin, Saman Hassanzadeh, & Zhang, Guoqing. (2012). "An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach". *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6782-6791.

Aras, Necati, & Aksen, Deniz. (2008). "Locating collection centers for distance- and incentive-dependent returns". *International Journal of Production Economics*, 111(2), 316-333

Aras, Necati, Aksen, Deniz, & Gönül Tanuğur, Ayşe. (2008). "Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles". *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1223-1240.

Azaron, A, Brown, KN, Tarim, SA, & Modarres, M. (2008). "A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk". International *Journal of Production Economics*, 116(1), 129-138.

Birge, John R, & Louveaux, François V. (1997). Introduction to stochastic programming: Springer.

Choi, S Chan. (1996). "Price competition in a duopoly common retailer channel. *Journal of retailing"*, 72(2), 117-134.

Consigli, Giorgio, & Dempster, MAH. (1998). " Dynamic stochastic programmingfor asset-liability management". *Annals of Operations Research*, 81, 131-162.

Dantzig, George B. (1955). "Linear programming under uncertainty". *Management science*, 1(3-4), 197-206.

Dolgui, Alexandre, Sodek, Jerzy, & Zaikin, Oleg. (2005). "Supply chain optimisation: product/process design, facility location and flow control" (Vol. 94): Springer Science+ Business Media.

El-Sayed, M, Afia, N, & El-Kharbotly, A. (2010). "A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk". *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423-431.

Ferrer, Geraldo, & Swaminathan, Jayashankar M. (2010). "Managing new and differentiated remanufactured products". *European Journal of Operational Research*, 203(2), 370-379.

Fleischmann, Moritz, Beullens, Patrick, Bloemhof-ruwaard, JacQueline M, & Wassenhove, Luk N. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design". *Production and operations management*, 10(2), 156-173.

Fleten, Stein-Erik, & Kristoffersen, Trine Krogh. (2008). "Short-term hydropower production planning by stochastic programming."*Computers & Operations Research*, 35(8), 2656-2671.

Franke, C, Basdere, B, Ciupek, M, & Seliger, S. (2006). "Remanufacturing of mobile phones—capacity, program and facility adaptation planning". *Omega, 34(6), 562-570.*

Gupta, Anshuman, Maranas, Costas D, & McDonald, Conor M. (2000). "Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management". *Computers & Chemical Engineering*, 24(12), 2613-2621.

Kara, S, Rugrungruang, F, & Kaebernick, H. (2007). "Simulation modelling of reverse logistics networks". *International Journal of Production Economics*, 106(1), 61-69.

Ko, Hyun Jeung, & Evans, Gerald W. (2007). " A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs". *Computers & Operations Research, 34*(2), 346-366.

Lee, Jeong-Eun, Gen, Mitsuo, & Rhee, Kyong-Gu. (2009). "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm". *Computers & Industrial Engineering, 56*(3), 951-964.

McGuire, Timothy W, & Staelin, Richard. (1983). "An industry equilibrium analysis of downstream vertical integration". *Marketing Science, 2*(2), 161-191.

Meade, L.; Sarkis, J.; Presley, A.. (2007). "The theory and practice of reverse logistics".

Archive of SID

www.SID.ir

International Journal of Logistics System Management, Vol. 3, 56–84.

Min, H., Jeung Ko., H., & Seong Ko, C. (2006). "A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns". *Omega, 34*(1), 56-69.

Pishvaee, M. S., FarahaniZanjirani, R, & Dullaert, W.. (2010). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design". *Computers & Operations Research, 37*(6), 1100-1112.

Pishvaee, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). " A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design". *Journal of Manufacturing Systems, 28*(4), 107-114.

Pishvaee, M. S., Kianfar, K., & Karimi, B. (2010). "Reverse logistics network design using simulated annealing". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 47(1-4), 269-281.

Pishvaee, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty". *Applied Mathematical Modelling, 35*(2), 637-649.

Raju, J. S, & Roy, A. (2000). "Market information and firm performance". *Management science, 46*(8), 1075-1084.

Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). "A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty". *European Journal of Operational Research,* 167(1), 96-115.

Schultmann, F., Zumkeller, M., & Rentz, O. (2006). "Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry". *European Journal of Operational Research, 171*(3), 1033-1050.

Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011a). "Optimal production and pricing policy for a closed loop system". *Resources, Conservation and Recycling, 55*(6), 639-647.

Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011b). "Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return". *Computers & Operations Research,* 38(3), 641-650.

Shi, J., Zhang, G., & Sha, J.& Amin, S. H. (2010). "Coordinating production and recycling decisions with stochastic demand and return". *Journal of Systems Science and Systems Engineering,* 19(4), 385-407.

Sodhi, M. S. (2005). "LP modeling for asset-liability management: A survey of choices and simplifications". *Operations Research,* 53(2), 181-196.

Tan, Y., & Yuan, Y. (2011). "Optimal Pricing Decision and Assessing Factors in Closed-Loop Supply Chain". *Applied Mathematical Sciences,* 5(80), 4015-4031.

Tibben-Lembke, R. S, & Rogers, D. S. (2002). "Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management": An International Journal,* 7(5), 271-282.

Wei, J., & Zhao, J. (2011). "Pricing decisions with retail competition in a fuzzy closed-loop supply chain". *Expert Systems with Applications,* 38(9), 11209-11216.

Wu, C.-H. (2012). "Product-design and pricing strategies with remanufacturing". *European Journal of Operational Research*.

Xu, J., & Zhu, Y. (2011). "Dynamic Pricing Model for the Operation of Closed-Loop Supply Chain System". *Intelligent Control and Automation*, 2(4), 418-423.

Yue, X., & Liu, J. (2006). "Demand forecast sharing in a dual-channel supply chain". *European Journal of Operational Research,* 174(1), 646-667.

[1]- Mead
[2]- Reverse Logistics
[3]- Dolgui et al
[4]- Tibben-Lembke & Rogers
[5]- Closed Loop Supply Chain
[6]- Frank et al
[7]- Aras et al
[8]- Pricing
[9]- Uncertainty
[10]- Mixed Integer Non Linear Programming

Archive of SID

www.SID.ir

[11]- Aras & Aksen
[12]- Pishvaee, Jolai & Razmi
[13]- Pishvaee, Farahani & Dullaert
[14]- Fleischmann et al
[15]- Aras & Aksen
[16]- Min et al
[17]- Lee et al
[18]- Kara et al
[19]- Ko & Evans
[20]- Pishvaee et al
[21]- El-Sayed et al
[22]- Shi et al
[23]- Shi et al(b)
[24]- Pishvaee, Rabbani, & Torabi
[25]- Amin & Zhang
[26]- Schultmann et al
[27]- Pishvaee, Kianfar, & Karimi
[28]- Xu & Zhu
[29]- Ferrer & Swaminathan
[30]- Tan & Yuan
[31]- Wei & Zhao
[32]- Wu
[33]- Stochastic Programming
[34]- Dantzig
[35]- Consigli
[36]- Sodhi
[37]- Azaron
[38]- El-Sayed et al
[39]- Santoso
[40]- Fleten
[41]- Gupta
[42]- Birge & Louveaux
[43]- Birge & Louveaux
[44]- Choi
[45]- Raju & Roy
[46]- Yue & Liu
[47]- Shi, Zhang, & Sha
[48]- The Value Of Stochastic Solution
[49]- Expected Value of Verfect Information
[50]- Wait-and-see Solution

Archive of SID

www.SID.ir