علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره سه، خرداد ماه ۱۴۰۰

طراحی شبکه زنجیره تامین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن مدیریت ارتباط با مشتری و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه

محسن اعتماد[۱]

نوید نظافتی [۲*]

N_nezafati@sbu.ac.ir

محمد رضا فتحی [۳]

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۱۷ **تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۶**

چکیده

زمینه و هدف: افزایش حجم گازهای گلخانه ای و آلاینده ها باعث شده است که مدیران سازمان ها و محققان در پی طراحی و راه اندازی شبکه هایی برآیند که علاوه بر بهینه سازی اقتصادی بر عوامل زیست محیطی و کاهش آلاینده ها در همهٔ بخش ها تمرکز ویژه ای داشته باشند. لذا هدف اصلی این تحقیق ارایه یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی برای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن مدیریت ارتباط با مشتری است.

روش بررسی: این پژوهش از نوع کاربردی- توسعه ای می باشد که در شرکت صبا باتری اجرا شده است. در این پژوهش، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته که به دنبال حداقل سازی هزینه ها و حداقل سازی اثرات زیست محیطی می باشد، ارائه شده است. همچنین مفهوم مدیریت ارتباط با مشتری در قالب تابع هدف سوم به صورت حداکثر کردن میزان محصول فرسوده جمع آوری شده به این مدل اضافه شده است.

یافته ها: با توجه به این که مدل ارائه شده به دسته NP-hard تعلق دارد، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت حل مدل استفاده شده و در نهایت جواب های پارتو مشخص شد. براساس نتایج به دست آمده، دو تابع هدف اقتصادی و محیط زیستی با یکدیگر در تضاد هستند. به این معنا که حرکت هر یک به سمت مطلوب مستلزم حرکت تابع هدف دیگر به سمت نامطلوب خواهد بود.

بحث و نتیجه گیری: در این پژوهش مدل برنامه ریزی ریاضی پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل شده است که نتایج آن نشان دهنده مکان و ظرفیت تسهیلات، میزان تولید محصولات، میزان موجودی و میزان حمل محصولات می باشند.

واژه های کلیدی : شبکه زنجیره تامین، زنجیره تامین سبز، مدیریت ارتباط با مشتری، الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

---

۱ - گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ - استادیار گروه سیستم های اجتماعی و فنی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. * (مسوول مکاتبات)

۳ - دانشیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران.

J. Env. Sci. Tech., Vol 23, No. 3, June, 2021

Green- Closed Loop Supply Chain Network Design by Considering Customer Relationship Management and solving it using Multi-Objective Genetic Algorithm

Mohsen Etemad [1]
Navid Nezafati [2*]
N_nezafati@sbu.ac.ir
Mohammad Reza Fathi [3]

Admission Date:October 28, 2019 Date Received: June 7, 2019

Abstract

Background and Objective: Increasing greenhouse gas emissions and pollutants has led organizers and researchers to seek to design and set up networks that focus on environmental factors and reduce pollutants in all sectors. Therefore, the main objective of this paper is to present a fuzzy mathematical programming model for the green closed loop supply chain network, taking into account customer relationship management.

Method: This is an applied-development study implemented in Saba Battery Company. In this study, a mixed integer linear programming model is proposed for designing a closed loop supply chain network that seeks to minimize costs and minimize environmental impacts. Also, the concept of customer relationship management in the form of the third objective function has been added to maximize the amount of worn-out product collected to this model.

Findings: Given that the proposed model belongs to the NP-hard category, a multi-objective genetic algorithm is used to solve the model, and finally, the Pareto's solutions are determined. Based on the results, the two objectives of the economic and environmental objectives are contradictory. That is, moving each one toward the desired one requires movement of the other objective function to the undesirable.

Discussion and Conclusion: In this research, the proposed mathematical programming model has been solved with a multi-objective genetic algorithm, which results indicate the location and capacity of the facility, the amount of production, the amount of inventory and the amount of transportation of the products.

Keywords: Supply Chain Network Design, Green Supply Chain, Customer Relationship Management, Multi-objective Genetic Algorithm.

مقدمه

طراحی شبکه زنجیره تامین سعی در شناسایی بهترین ساختار برای زنجیره تامین را دارد. یک طراحی مناسب بایستی بتواند سازمان را به عملکرد بلندمدت خود برساند. در حقیقت نبرد اصلی در بازارها و تنوع ترجیحات مشتریان در کنار توسعه سریع

1- Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor., Department of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*(*Correspondence Author*)
3- Associate Professor., Department of Management and Accounting, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran.

تکنولوژی و جهانی سازی، سازمان ها را وادار کرده است که به عنوان عضوی از زنجیره تامین کار کنند. عملیات زنجیره تامین و لجستیک بخشی از فعالیت های مهم اقتصادی امروز هستند و برای رقابت در کسب و کار حیاتی می باشند. طراحی شبکه زنجیره تامین پایه ای ترین تصمیم در مدیریت زنجیره تامین است که تمام تصمیمات زنجیره تامین را یکپارچه می کند و اثری قابل توجه بر روی بازگشت سرمایه و عملکرد کلی در زنجیره دارد (۱). اهمیت استفاده از سرب در صنعت از یک سو و خطرات بالقوه بهداشتی و زیست محیطی آن از سوی دیگر، موجب توجه جامعه جهانی به چگونگی مدیریت صحیح زیست محیطی بازیافت باتری های سربی اسیدی شده است. مطالعات انجام شده نشان می دهد امروزه حدود ۶۰ درصد کل تولید سرب تصفیه شده از معادن سرب تأمین و ۴۰ درصد باقی مانده از بازیافت قراضه ها و سرباره های باتری های فرسوده حاصل می شود. این مسأله در سراسر دنیا یکی از منابع مهم دستیابی به سرب خالص است. باید توجه کرد که اجرای بازیافت زیست محیطی و بهداشتی این مواد درکشور نیازمند در نظرگیری راهبردها و خط مشی هایی است که بر اساس اولویت های کشور تعیین شده و باید در جهت تدوین چارچوبی قانونی برای جمع آوری، حمل و نقل و بازیافت صورت گیرد تا اثرات و خطرات زیست محیطی و بهداشتی بازیافت این پسماندها که تحت کنوانسیون بازل هستند، به حداقل کاهش یابد. براساس تحقیقات صورت گرفته از سوی دفتر بررسی آلودگی آب و خاک سازمان حفاظت محیط زیست، باتری های اسیدی به دلیل غیرقابل بازگشت بودن واکنش های شیمیایی دارای دوره عمری مشخص هستند و پس از رسیدن به انتهای دوره عمری خود، با وجود محتوای فلزی بالا به ویژه سرب، غیراستفاده و فرسوده و در گروه پسماندهای ویژه تقسیم بندی می شوند. تحقیقات نشان می دهد بازیافت آنها و وارد کردن فلزاتی نظیر سرب، قلع، آنتیموان، آرسنیک و مواد آلی نظیر پلی پروپیلن حاصل از بازیافت آنها به چرخه صنعت امری اقتصادی است، ولی به دلیل خطرات مواد مختلف موجود در ساختار آنها بویژه فلزات سنگین، رعایت اصول بهداشتی و زیست محیطی، استفاده از فناوری های نوین در جمع آوری و مراحل پیش بازیافت و بازیافت آنها ابداع شده است. کارشناسان معتقدند اجرای بازیافت زیست محیطی و بهداشتی برای این پسماند های ویژه در کشور نیازمند در نظرگیری راهبردها و خط مشی هایی است که بر اساس اولویت های کشور تعیین و تعریف شده و باید در جهت تدوین چارچوبی قانونی برای جمع آوری، حمل و نقل و بازیافت باشد. تحقیقات نشان می دهد این سیاست بازگشت باتری های فرسوده به کارخانجات تولید باتری را فراهم می آورد. لذا مساله اصلی این تحقیق طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن بحث مدیریت ارتباط با مشتری برای محصول باتری در شرکت صبا باتری می باشد.

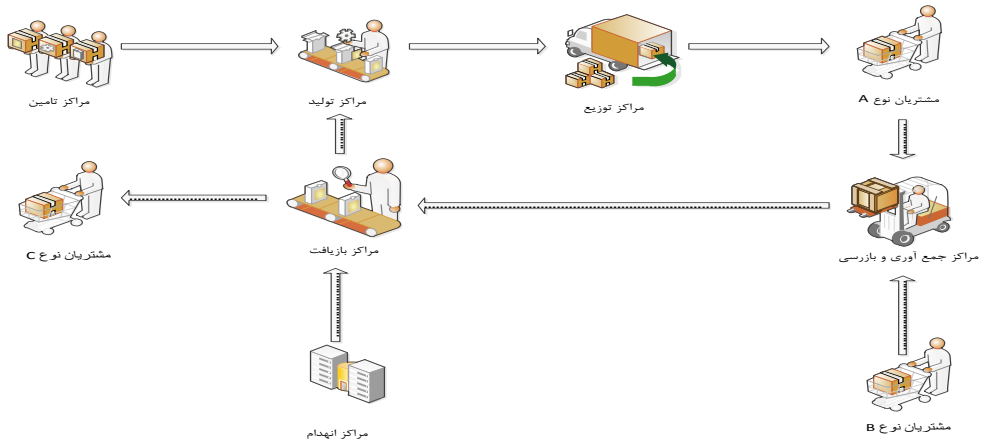
پیشینه پژوهش

در این بخش، پژوهش هایی که در حوزه طراحی شبکه زنجیره تامین انجام پذیرفته، به طور خلاصه ارائه شده است. عالم تبریز و همکاران (۲) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته احتمالی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارایه دادند. مدل ارایه شده در این پژوهش، چند محصولی و چند رده ای می باشد که همزمان، هزینه های حمل و نقل و احداث را در بر می گیرد. مدل مورد نظر با در نظر گرفتن کمینه سازی هزینه ها (هزینه های استقرار تسهیلات و هزینه های حمل و نقل) و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای محصولات برگشتی، از نوع مسائل NP-Hard می باشد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. سهرابی و همکاران (۳) در پژوهشی یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه فازی را که به دنبال حداقل کردن هزینه ها، حداقل کردن اثرات زیست محیطی و حداقل کردن ریسک تامین مواد اولیه می باشد را ارائه کرده اند. این مدل در برگیرنده تمام سطوح زنجیره تامین حلقه بسته می باشد و نسبت به مدل های طراحی شبکه زنجیره تامین قبلی جامعیت دارد. جهت پیاده سازی مدل تدوین شده، از داده های شرکت شیشه سازی همدان استفاده شده است. بشیری و همکاران (۴) به طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پرداختند. آن ها به منظور افزایش کارایی زنجیره تامین پیشنهادی خود، مدل را به صورت چند محصولی فرض کرده و

معیار های کیفی موثر را مورد توجه قرار داد ند. همچنین با استفاده از روش تجزیه و تحلیل مولفه های اصلی، ملاکی تحت عنوان امتیاز مولفه های اصلی را در نظر گرفتند. در این تحقیق به منظور واقعی تر شدن شرایط، مساله در یک محیط فازی مدل سازی شده است که ضمن فازی بودن پارامترها میزان برآورده شدن محدودیت ها نیز فازی در نظر گرفته شده است. فتحی و همکاران (۵) در پژوهشی به مدل سازی ریاضی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی و اجتماعی پرداختند. در پژوهش یاد شده، مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه شده است. این مدل به دنبال حداقل سازی هزینه ها، حداقل سازی اثرات زیست محیطی، حداکثر کردن میزان محصول فرسوده جمع آوری شده و حداکثر کردن پاسخگویی اجتماعی زنجیره تامین می باشد. مدل پیشنهادی در شرکت صبا باتری پیاده سازی شده است. امیرخان و همکاران (۶) یک مدل برنامه ریزی خطی عددصحیح مختلط دو هدفه برای طراحی شبکه تامین مواد اولیه یک مجتمع صنایع غذایی ارائه کردند. آن ها علاوه بر عامل هزینه، دو عامل کیفیت و زمان را در مدل لحاظ نمودند. در این مدل، محدودیت ها و پارامترهای مسئله از نوع فازی در نظر گرفته شده است و برای حل مدل یاد شده از یک رویکرد فازی دو مرحله ای استفاده شده است. اعتماد و همکاران (۷) در پژوهشی به مدل سازی و طراحی شبکه زنجیره تامین دو هدفه با در نظر گرفتن مدیریت ارتباط با مشتری پرداختند. مدل ارائه شده به دنبال حداقل سازی هزینه ها و حداکثر کردن میزان محصول فرسوده جمع آوری شده در زنجیره تامین بوده است.

مسئله مورد بررسی

شبکه زنجیره تامین این پژوهش، یک شبکه چند سطحی و چند محصولی است که ساختار ان به صورت حلقه بسته می باشد. سطوح این شبکه به سمت جلو شامل مراکز تامین، مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز مشتری نوع A می باشد و همچنین به سمت عقب شامل مشتریان نوع B، مراکز جمع آوری و بازرسی، مراکز بازیافت، مراکز انهدام و مراکز مشتریان نوع C می باشد. سطوح تصمیم گیری هم به صورت راهبردی، یعنی مسائل مربوط به طراحی شبکه و هم به صورت تاکتیکی در قالب مسائل مربوط به تخصیص، حمل و نقل، موجودی و غیره است. در این شبکه ابتدا محصولات در مراکز تولیدی تولید شده و سپس از طریق مراکز توزیع به مشتریان نوع A فرستاده می شوند. سپس در جریان رو به سمت عقب برخی از محصولات فرسوده مشتریان نوع A به مراکز جمع آوری و بازرسی ارسال می گردد. به منظور جمع آوری محصولات فرسوده از مشتریان با استفاده از مفهوم مدیریت ارتباط با مشتری، سیاست های انگیزشی و تشویقی برای مشتریان به منظور همکاری هر چه بیشتر ان ها برای بازگرداندن محصولات فرسوده تعریف می گردد. یکی از راهبردها، تمرکز بر مشتریان کلیدی و اهمیت بخشیدن بر آن ها است. لذا مشتریان نوع A که در هم جریان رو به سمت جلو و هم در جریان رو به سمت عقب مشارکت دارند، مشتریان کلیدی در نظر گرفته شده اند و به خاطر حفظ این نوع از مشتریان وفادار، خدمات خاصی برای آن ها در نظر گرفته شده است. مشتریان نوع B مشتریانی هستند که در زنجیره رو به سمت جلو از سایر زنجیره ها محصول مورد نظر خود را خریداری کرده اند، اما ما می خواهیم با سیاست هایی ان ها محصولات فرسوده خود را به زنجیره ما تحویل دهند. در نهایت محصولات فرسوده مشتریان نوع A و B در مراکز جمع آوری و بازرسی تجمیع می گردند و در ادامه به مراکز بازیافت انتقال می یابند. در مراکز بازیافت بسته به وضعیت کیفیت محصول فرسوده اقداماتی بر روی ان صورت می گیرد و بخشی از قطعات قابل استفاده مجدد با ترمیم به مراکز تولید ارسال می گردند، برخی قسمت های سمی و الاینده به مراکز انهدام ارسال می شوند و در نهایت محصولات فرسوده ای که با شارژ مجدد دوره زمانی کوتاهی قابلیت استفاده مجدد را دارند به مراکز مشتریان نوع C جهت فروش ارسال می شوند. مشتریان نوع C مشتریانی هستند که محصولات بازیافت شده را به عنوان دست دوم خریداری می کنند. شبکه زنجیره تامین مورد مطالعه در این پژوهش در قالب شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پیشنهادی برای شرکت صبا باتری

Figure 1. Suggested Closed loop supply chain network for Saba Battery Company

مدل سازی مساله

اندیس‌ها

مجموعه مکان های ثابت برای تامین کنندگان k=1,2,...,K	k
مجموعه مکان های بالقوه مراکز تولید جهت احداث کردن m=1,2,...,M	m
مجموعه مکان های بالقوه مراکز توزیع جهت احداث کردن l=1,2,...,L	l
مجموعه مکان های ثابت برای مشتری های نوع A n=1,2,...,N	n
مجموعه مکان های بالقوه مراکز جمع آوری و بازرسی جهت احداث کردن o=1,2,...,O	o
مجموعه مکان های ثابت برای مشتریان نوع B s=1,2,...,S	s
مجموعه مکان های ثابت برای مشتریان نوع C c=1,2,...,C	c
مجموعه مکان های بالقوه مراکز انهدام جهت احداث کردن i=1,2,...,I	i
مجموعه مکان های بالقوه مراکز بازیافت جهت احداث کردن p=1,2,...,P	p
مجموعه محصولات d=1,2,...,D	d
مجموعه مواد اولیه b=1,2,...,B	b
مجموعه سطوح ظرفیت برای مکان های بالقوه h=1,2,...,H	h
مجموعه گزینه های بالقوه برای حمل و نقل u=1,2,...,U	u
مجموعه گزینه های CRM تعریف شده	AM

پارامترها

هزینه تولید محصول d در مرکز تولید m	$\widetilde{TCD}_{dm}$
هزینه جمع آوری و بازرسی محصول d در مرکز جمع آوری o	$\widetilde{TCO}_{do}$
هزینه بازیافت هر واحد محصول d در مرکز بازیافت p	$\widetilde{TCP}_{dp}$
هزینه نگهداری موجودی محصول d در مراکز تولید m	$\widetilde{TCH}_{dm}$
هزینه نگهداری موجودی محصول d در مراکز توزیع l	$\widetilde{TCL}_{dl}$

هزینه نگهداری موجودی محصول d در مراکز جمع آوری و بازرسی o	$\widetilde{TCDO}_{dp}$
هزینه جریمه برای تقاضای ارضا نشده محصول d در مراکز مشتری n	TCJ_d
هزینه خرید یا تهیه هر واحد ماده اولیه b از تامین کننده k	$\widetilde{HKH}_{bk}$
ماکزیمم تعداد مراکز تولید جهت احداث	MAXM
ماکزیمم تعداد مراکز جمع آوری و بازرسی جهت احداث	MAXO
ماکزیمم تعداد مراکز بازیافت جهت احداث	MAXP
ماکزیمم تعداد مراکز انهدام جهت احداث	MAXI
میزان تقاضا برای محصول d در مراکز مشتری n	$\widetilde{QD}_{dn}$
میزان تقاضا برای محصول d در مراکز مشتری c	$\widetilde{QC}_{dc}$
قیمت فروش محصول بازیافت شده d در مراکز مشتری c	$\widetilde{MP}_{dc}$
قیمت فروش محصول d	$\widetilde{MPD}_d$
ظرفیت تولید مراکز تولید m با سطح ظرفیت h	$\widetilde{APM}_{mh}$
ظرفیت توزیع مراکز توزیع l با سطح ظرفیت h	$\widetilde{APL}_{lh}$
ظرفیت مراکز جمع آوری o با سطح ظرفیت h	$\widetilde{APO}_{oh}$
ظرفیت بازیافت محصولات در مرکز بازیافت p با سطح ظرفیت h	$\widetilde{APP}_{ph}$
ظرفیت انهدام محصولات در مراکز انهدام یا دفع i با سطح ظرفیت h	$\widetilde{API}_{ih}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مرکز تولید m به مرکز توزیع l توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTM}_{dmlu}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مرکز توزیع l به مناطق مشتری n توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTL}_{dlnu}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مناطق مشتری n به مراکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTN}_{dnou}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مناطق مشتری s به مراکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTS}_{dsou}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مراکز جمع آوری و بازرسی o به مراکز باز تولید p توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTO}_{dopu}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مراکز بازیافت p به مراکز مشتری c توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTP}_{dpcu}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مراکز بازیافت p به مراکز تولید m توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTD}_{dpmu}$
هزینه حمل هر واحد محصول d از مراکز بازیافت p به مراکز انهدام i توسط وسیله حمل و نقل u	$\widetilde{CTI}_{dpiu}$
کسری از محصولات قابل بازیافت	γ
کسری از محصولات ضایع جهت انهدام	β
هزینه ثابت احداث مرکز تولید m با سطح ظرفیت h	$\widetilde{SF}_{mh}$
هزینه ثابت احداث مرکز توزیع l با سطح ظرفیت h	$\widetilde{SL}_{lh}$
هزینه ثابت احداث مرکز جمع آوری و بازرسی o با سطح ظرفیت h	$\widetilde{SO}_{oh}$
هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت p با سطح ظرفیت h	$\widetilde{SP}_{ph}$
هزینه ثابت احداث مرکز انهدام i با سطح ظرفیت h	$\widetilde{SI}_{ih}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل مواد اولیه از تامین کننده k به مرکز تولیدm	$\widetilde{DAK}_{ukm}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصول از مرکز تولید m به مرکز توزیع l	$\widetilde{DAM}_{uml}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصول از مرکز توزیع l به مرکز مشتری n	$\widetilde{DAL}_{uln}$

ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصول استفاده شده از مناطق مشتری n به مرکز جمع آوری و بازرسی o	$\widehat{DAN}_{uno}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصول استفاده شده از مناطق مشتری s به مرکز جمع آوری و بازرسی o	$\widehat{DAS}_{uso}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصول استفاده شده از مرکز جمع آوری و بازرسی o به مرکز بازیافت p	$\widehat{DAO}_{uop}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصولات بازیافت شده از مرکز بازیافت p به مراکز تولید m	$\widehat{DAP}_{upm}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصولات بازیافت شده از مرکز بازیافت p به مراکز انهدام i	$\widehat{DAI}_{upi}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل u برای حمل محصولات بازیافت شده از مرکز بازیافت p به مراکز مشتری c	$\widehat{DAC}_{upc}$
میزان انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول d در مراکز تولید m	CA_{dm}
میزان انتشار کربن به ازای بازیافت هر واحد محصول d استفاده شده در مراکز بازیافت p	CAD_{dp}
میزان انتشار کربن به ازای انهدام هر واحد محصول d استفاده شده در مراکز انهدام i	CAI_{di}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d از مرکز تولید m به مرکز توزیع l توسط وسیله حمل و نقل u	CDM_{dmlu}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d از مرکز توزیع l به مناطق مشتری n توسط وسیله حمل و نقل u	CDL_{dlnu}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مناطق مشتری n به مرکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	CDN_{dnou}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مناطق مشتری s به مرکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	CDS_{dsou}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مرکز جمع آوری و بازرسی o به مرکز باز تولید p توسط وسیله حمل و نقل u	CDO_{dopu}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مرکز بازیافت p به مرکز تولید m توسط وسیله حمل و نقل u	CDP_{dpmu}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مرکز بازیافت p به مرکز انهدام i توسط وسیله حمل و نقل u	CDI_{dpiu}
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول d استفاده شده از مرکز بازیافت p به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل و نقل u	CDC_{dpcu}
میانگین حجم محصول فرسوده تولیدی کشور	X
تعداد محصول فرسوده ای که در ازای اهدای یک عدد محصول رایگان گرفته می شود	Y
ماتریس ضرایب تاثیرگذاری گزینه های تعریف شده بر میزان رضایت مشتری	$BAM=[AM_1, AM_2, AM_3, AM_4, AM_5, AM_6]$
هزینه پیاده سازی گزینه اهدای یک عدد محصول رایگان به مشتری در ازای دریافت Y عدد محصول جمع اوری شده به زنجیره به منظور بازیافت	$CZ=\widehat{MPD}_d\times(QCR_{dn} + QCS_{ds})$
هزینه پیاده سازی گزینه ضمانت، فقط برای مشتریان کلیدی به منظور حفظ مشتریان کلیدی حاضر و تشویق دیگر مشتریان جهت پیوستن به گروه مشتریان کلیدی زنجیره	CX
هزینه ایجاد سامانه پیامکی و اینترنتی	CY

هزینه اطلاع رسانی به مشتری از طریق پیامک	CR
هزینه پیاده سازی گزینه ارسال وسیله حمل و نقل به مکان مشتری	CK
هزینه پیاده سازی گزینه فرهنگ سازی از طریق تبلیغات	CL

متغیرهای تصمیم

میزان ماده اولیه حمل شده b از تامین کننده k به مرکز تولید m توسط وسیله حمل و نقل u	ABK_{bkmu}
میزان محصول حمل شده d از مرکز تولید m به مرکز توزیع l توسط وسیله حمل و نقل u	AML_{dmlu}
میزان محصول حمل شده d از مرکز توزیع l به مناطق مشتری n توسط وسیله حمل و نقل u	ANL_{dlnu}
میزان محصول حمل شده d از مناطق مشتری n به مرکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	ANO_{dnou}
میزان محصول حمل شده d از مناطق مشتری s به مرکز جمع آوری و بازرسی o توسط وسیله حمل و نقل u	ANS_{dsou}
میزان محصول حمل شده d از مرکز جمع آوری و بازرسی o به مرکز بازیافت p توسط وسیله حمل و نقل u	AMO_{dopu}
میزان محصول حمل شده d از مرکز بازیافت p به مرکز تولید m توسط وسیله حمل و نقل u	AMP_{dpmu}
میزان محصول حمل شده d از مرکز بازیافت p به مرکز انهدام i توسط وسیله حمل و نقل u	ANP_{dpiu}
میزان محصول حمل شده d از مرکز بازیافت p به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل و نقل u	ANC_{dpcu}
میزان محصول تولید شده d در مرکز تولید m	TM_{dm}
میزان موجودی محصول d در مراکز توزیع l	TL_{dl}
میزان موجودی محصول d در مراکز جمع آوری o	TO_{do}
میزان موجودی محصول d در مراکز تولید m	TD_{dm}
تعداد تقاضای ارضا نشده مشتری n برای محصول d	TED_{nd}
میزان محصول d که براساس سیاست های CRM به صورت رایگان به مشتری مراکز n اهدا می شود	QCR_{dn}
میزان محصول d که براساس سیاست های CRM به صورت رایگان به مشتری مراکز s اهدا می شود	QCS_{ds}
میزان محصول بازیافت شده d در مرکز بازیافت p	TDD_{dp}
اگر وسیله حمل u برای حمل مواد اولیه از تامین کننده k به مراکز تولید m انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	AB_{ukm}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز تولید m به مراکز توزیع l انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	BC_{uml}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز توزیع l به مراکز مشتری n انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	CE_{uln}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز مشتریn به مراکز جمع آوری o انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	EF_{uno}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز مشتریs به مراکز جمع آوری o انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	FI_{uso}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز جمع آوریo به مراکز بازیافت p انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	IJ_{uop}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز بازیافت p به مرکز تولید m انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	JK_{upm}
اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز بازیافت p به مرکز تولید i انتخاب شود 1 در غیر این صورت 0	KL_{upi}

LM_{upc}	اگر وسیله حمل u برای حمل محصول از مراکز بازیافت p به مرکز انهدام c انتخاب شود در غیر این صورت
M_{mh}	اگر مرکز تولید m با سطح ظرفیت h احداث شود در غیر این صورت
L_{lh}	اگر مرکز توزیع l با سطح ظرفیت h احداث شود در غیر این صورت
O_{oh}	اگر مرکز جمع آوری o با سطح ظرفیت h احداث شود در غیر این صورت
P_{ph}	اگر مرکز بازیافت p با سطح ظرفیت h احداث شود در غیر این صورت
I_{ih}	اگر مرکز انهدام i با سطح ظرفیت h احداث شود در غیر این صورت
KCZ	اگر گزینه اهدای یک عدد محصول رایگان در ازای دریافت 4 عدد محصول جمع آوری شده اجرا شود در غیر این صورت
KCX	اگر گزینه ضمانت اجرا شود در غیر این صورت
KCY	اگر گزینه سامانه پیامکی و اینترنتی اجرا شود در غیر این صورت
KCR	اگر گزینه اطلاع رسانی به مشتری اجرا شود در غیر این صورت
KCK	اگر گزینه ارسال وسیله حمل و نقل اجرا شود در غیر این صورت
KCL	اگر گزینه تبلیغات و فرهنگ سازی اجرا شود در غیر این صورت

مدل ریاضی مساله

$$\text{Min } Z_1 = [\sum_m \sum_h \widetilde{SF}_{mh} . M_{mh} + \sum_l \sum_h \widetilde{SL}_{lh} . L_{lh} + \sum_o \sum_h \widetilde{SO}_{oh} . O_{oh} + \sum_p \sum_h \widetilde{SP}_{ph} . P_{ph} + \sum_i \sum_h \widetilde{SI}_{ih} . I_{ih}] + [\sum_d \sum_m \sum_l \sum_u \widetilde{CTM}_{dmlu} . AML_{dmlu} + \sum_d \sum_l \sum_n \sum_u \widetilde{CTL}_{dlnu} . ANL_{dlnu} + \sum_d \sum_n \sum_o \sum_u \widetilde{CTN}_{dnou} . ANO_{dnou} + \sum_d \sum_s \sum_o \sum_u \widetilde{CTS}_{dsou} . ANS_{dsou} + \sum_d \sum_o \sum_p \sum_u \widetilde{CTO}_{dopu} . AMO_{dopu} + \sum_d \sum_p \sum_c \sum_u \widetilde{CTP}_{dpcu} . ANC_{dpcu} + \sum_d \sum_p \sum_m \sum_u \widetilde{CTD}_{dpmu} . AMP_{dpmu} + \sum_d \sum_p \sum_i \sum_u \widetilde{CTI}_{dpiu} . ANP_{dpiu}] + [\sum_d \sum_m \widetilde{TCH}_{dm} . TD_{dm} + \sum_d \sum_l \widetilde{TCL}_{dl} . TL_{dl} + \sum_d \sum_o \widetilde{TCDO}_{do} . TO_{do}] + [\sum_d \sum_m \widetilde{TCD}_{dm} . TM_{dm} + \sum_d \sum_p \widetilde{TCP}_{dp} . TDD_{dp} + \sum_b \sum_k \sum_m \sum_u \widetilde{HKH}_{bk} . ABK_{bkmu} + \sum_d \sum_o \sum_n \sum_u \widetilde{TCO}_{do} . ANO_{donu} + \sum_d \sum_o \sum_s \sum_u \widetilde{TCO}_{do} . ANS_{dosu}] + [\sum_n \sum_d TCJ_d . TED_{nd}] + [\sum_d \sum_n \widetilde{MPD}_d . QCR_{dn} . KCZ + \sum_d \sum_s \widetilde{MPD}_d . QCS_{ds} . KCZ + CX . KCX + CY . KCY + CR . KCR + CK . KCK + CL . KCL] - [\sum_d \sum_c \sum_p \sum_u \widetilde{MP}_{dc} . ANC_{dpcu}]$$

(۱)

$$\text{Min } Z_2 = [\sum_d \sum_m \sum_h CA_{dm} . M_{mh} + \sum_d \sum_p \sum_h CAD_{dp} . P_{ph} + \sum_d \sum_i \sum_h CAI_{di} . I_{ih}] + [\sum_d \sum_m \sum_l \sum_u ETM_{dmlu} . QZI_{dmlu} + \sum_d \sum_l \sum_n \sum_u ETN_{dlnu} . QPJ_{dlnu} + \sum_d \sum_p \sum_i \sum_u ETO_{dpiu} . QPK_{dpiu} + \sum_d \sum_p \sum_c \sum_u ETP_{dpcu} . QPL_{dpcu} + \sum_d \sum_n \sum_o \sum_u ETQ_{dnou} . QPMO_{dnou} + \sum_d \sum_s \sum_o \sum_u ETR_{dsou} . QPMC_{dsou} + \sum_d \sum_0 \sum_p \sum_u ETS_{dopu} . QPMV_{dopu} + \sum_d \sum_p \sum_m \sum_u ETT_{dpmu} . QPMN_{dpmu}]$$

(۲)

$$\text{MAX } Z_3 = \frac{1}{X}.g(f(a)) \quad f(a)=[AM_1 \quad AM_2 \quad AM_3 \quad AM_4 \quad AM_5 \quad AM_6].\begin{bmatrix} KCZ \\ KCX \\ KCY \\ KCR \\ KCK \\ KCL \end{bmatrix}$$

(۳)

تابع هدف اول شامل حداقل سازی هزینه های کل می باشد عبارت (۱) فرمول ریاضی این تابع هدف را نشان می دهد. تابع هدف دوم شامل حداقل سازی اثرات محیط زیستی است. عبارت (۲) فرمول ریاضی این تابع هدف را نشان می دهد. تابع هدف سوم شامل حداکثر کردن مقدار محصول فرسوده جمع آوری شده می باشد تا از این طریق بتوان تمامی محصولات فرسوده تولید شده در کشور را برای انجام دادن فرایند بازیافت جمع آوری کرد. در همین راستا از مفهوم مدیریت ارتباط با مشتری جهت ترغیب کردن مشتریانی که تاکنون محصولی را از این زنجیره خریداری نکرده اند، برای تحویل محصولات فرسوده خود و همچنین جذب مشتریان قدیمی برای تحویل محصولات فرسوده خود و تبدیل آن ها به مشتریان وفادار، استفاده شده است. عبارت (۳) فرمول ریاضی این تابع هدف را نشان می دهد. در ادامه برخی از محدودیت های مدل پیشنهادی را به خاطر محدودیت فضا به صورت نمونه مورد بررسی قرار می دهیم. محدودیت (۴) تضمین می نمایند که تضمین می نمایند که مراکز توزیع حداکثر با یک سطح ظرفیت احداث شوند.

$$\sum_{h} P_{lh} \le 1 \quad \forall\, l \qquad (۴)$$

محدودیت (۵) بیشینه تعداد مراکز توزیع که پتانسیل احداث را دارا می باشند محدود می کنند.

$$\sum_{l}\sum_{h} L_{lh} \le MAXL \qquad (۵)$$

محدودیت های (۶) محدودیت ظرفیت حمل جریان محصـــول بین مراکز مختلف را نشان می دهد.

$$\sum_{b} ABK_{bkmu} \le AB_{ukm}.\widehat{DAK}_{ukm} \quad \forall\, u,k,m \qquad (۶)$$

محدودیت های (۷) نشان می دهند که حداکثر یک نوع تسهیل برای انتقال جریان بین تسهیلات وجود دارد.

$$\sum_{u} AB_{ukm} \le 1 \quad \forall\, k,m \qquad (۷)$$

محدودیت (۸) نشان می دهند که باید محصولی بین تسهیل مراکز مختلف برقرار شود تا وسیله ای برای حمل انتخاب گردد.

$$AB_{ukm} \le \sum_{b} ABK_{bkmu} \quad \forall\, k,m,u \qquad (۸)$$

محدودیت (۹) تضمین می کنند که هیچ گونه حمل و نقلی بین مکان هایی که ارتباطی با یکدیگر ندارند، وجود نخواهد داشت. همچنین بیان می کنند که جریان فقط مجاز است که از طریق گزینه های حمل و نقل فعال در شبکه عبور کند.

$$\sum_{b} ABK_{bkmu} \le M.AB_{ukm} \quad \forall\, u,k,m \qquad (۹)$$

محدودیت (۱۰) حدودیت تعادل موجودی برای مراکز تولید را نشان می دهد.

$$TD_{dm} = TM_{dm} - \sum_{l}\sum_{u} AML_{dmlu} \quad \forall\, d,m \qquad (۱۰)$$

محدودیت (۱۱) نشان می دهد که میزان محصول بازیافتی ارسال شده به مراکز مشتری C حداکثر برابر میزان تقاضا در این مرکز می باشد.

$$\sum_{u}\sum_{p} ANC_{dpcu} \le \widetilde{QC}_{dc} \quad \forall\, d,c \qquad (۱۱)$$

در محدودیت (۱۲) صورت کسر نشان دهنده مجموع محصولات فرسوده ای که مشتریان به زنجیره تحویل می دهند می باشد. با محاسبه بزرگترین عدد صحیح کوچکتر از این کسر، تعداد محصول رایگانی که توسط زنجیره به مشتریان اهدا می شود، محاسبه می گردد.

$$\left\lfloor \frac{\sum_{n} ANO_{dnou} + \sum_{s} ANS_{dsou}}{Y} \right\rfloor = \sum_{n} QCR_{dn} + \sum_{s} QCS_{ds} \quad \forall\, d,o,u \qquad (۱۲)$$

محدودیت (۱۳) به منظور محدود کردن جریان کالای برگشتی می باشد.

$$\sum_{n}\sum_{o}\sum_{u} ANO_{dnou} + \sum_{s}\sum_{o}\sum_{u} ANS_{dsou} \le X \quad \forall\, d \qquad (۱۳)$$

محدودیت های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب نشان دهنده محدودیت های ضروری منطقی روی متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته می باشند.

$$AB_{ukm}, BC_{uml}, CE_{uln}, EF_{uno}, FI_{uso}, IJ_{uop}, JK_{upm}, KL_{upi}, LM_{upc}, M_{mh}, L_{lh}, O_{oh}, P_{ph}, I_{ih} \in \{0,1\}$$
$$\forall\, k,m,l,n,o,s,c,i,p,d,h,u,b \qquad (۱۴)$$

$$ABK_{bkmu}, AML_{dmlu}, ANL_{dlnu}, ANO_{dnou}, ANS_{dsou}, AMO_{dopu}, AMP_{dpmu}, ANP_{dpiu}, ANC_{dpcu}, QCR_{dn}, QCS_{ds}, TDD_{dp} \geq 0 \qquad (۱۵)$$

تجزیه و تحلیل داده ها

زنجیره تامین مورد بررسی دارای پنج تامین کننده (k=1,...,5)، چهار مرکز بالقوه تولیدی (m=1,...,4)، چهار مرکز بالقوه توزیع (l=1,...,4) ، ۱۲ خوشه مشتری نوع A (n=1,...,12) ، سه مرکز بالقوه جمع آوری و بازرسی (o=1,...,3)، سه مرکز بالقوه بازیافت (p=1,...,3)، سه مرکز بالقوه انهدام (i=1,...,3)، پنج مرکز مشتری نوع B (s=1,...,5)، سه مرکز مشتری نوع C (c=1,2,3)، دو نوع محصول (d=1,2)، چهار نوع ماده اولیه برای تولید محصولات (b=1,...,4)، سه سطح ظرفیت (h=1,2,3) و دو نوع وسیله حمل و نقل (u=1,2) می باشد. جدول ۱ نتایج حاصل از حل مدل قطعی کمکی با استفاده از روش خیمنز را به ازای مقادیر مختلف درجه برقراری محدودیت (α) نشان می دهد.

جدول ۱- نتایج حاصل از حل مدل قطعی کمکی با روش خیمنز

Table 1. The results of solving model

α	مقدار تابع هدف اقتصادی (Z_1)	مقدار تابع هدف زیست محیطی (Z_2)	مقدار تابع هدف بعد مدیریت ارتباط با مشتری (Z_3)
۰/۶	۱۵۳۷۷۲۵۲	۵۶۱۱۹	۰/۰۴۱۱۵
۰/۷	۱۵۵۲۱۳۴۶	۵۴۹۴۶	۰/۰۴۱۱۵
۰/۸	۱۵۷۱۵۸۲۳	۵۴۲۷۵	۰/۰۴۱۱۵
۰/۹	۱۵۷۹۵۴۱۰	۵۳۱۶۹	۰/۰۴۱۱۵

در جدول ۱ مقادیر سه تابع هدف حداقل کردن هزینه کل، حداقل کردن اثرات زیست محیطی و حداکثر کردن میزان محصول جمع اوری شده از مشتریان به ازای مقادیر مختلف درجه برقرای محدودیت نشان داده شده است. این مقادیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه بدست آمده اند. همان طور که از نتایج نمایش داده شده در جدول ۱ بر می آید، دو تابع هدف اقتصادی و زیست محیطی با یکدیگر در تضاد هستند. به این معنا که حرکت هر یک به سمت مطلوب مستلزم حرکت تابع هدف دیگر به سمت نامطلوب خواهد بود.

نتیجه گیری

پس از بررسی کلیه تحقیقات صورت گرفته مشخص گردید که در بیشتر تحقیقات یا زنجیره رو به جلو و یا رو به عقب بوده است ولی در این پژوهش زنجیره حلقه بسته مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این عدم قطعیت در بیشتر مسائل فقط تقاضا را شامل می‌شد ولی در این مسئله عدم قطعیت در بیشتر پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. این مدل ها به گونه ای طراحی شده اند که شامل چهار سطح (تامین، تولید، توزیع و مشتریان A) در شبکه رو به سمت جلو و پنج سطح (مراکز جمع آوری و بازرسی، مراکز مشتری B، مراکز بازیافت، مراکز انهدام و مشتریان C در شبکه

برگشتی می باشند. مدل ارائه شده در این پژوهش دارای سه تابع هدف حداقل کردن هزینه کل، حداقل کردن اثرات زیست محیطی و حداکثر کردن میزان محصول فرسوده جمع آوری شده می باشد. در مورد تابع هدف هزینه به دلیل این که در این پژوهش سعی شده است تا تمامی تسهیلات و جریان بین آن ها در نظر گرفته شود و مدل جامعی ارائه گردد، اکثر هزینه ها در نظر گرفته شده است. تابع هدف هزینه شامل پارامترهای هزینه خرید (تهیه مواد اولیه از تامین کنندگان)، هزینه جریمه (هزینه جریمه برای تقاضای ارضا نشده)، هزینه های عملیاتی (هزینه تولید، هزینه جمع آوری، بازیافت و هزینه انهدام)، هزینه موجودی (هزینه برای قسمت تولید، توزیع و جمع آوری)، هزینه حمل و نقل یا انتقال جریان بین تسهیلات، هزینه ثابت راه اندازی و هزینه های سیاست های مدیریت ارتباط با مشتری می باشد. در تابع هدف دوم همواره سعی شده است تا اثرات زیست محیطی که به محیط زیست تاثیرات نامطلوبی می گذارد، حداقل گردد. تابع هدف سوم همواره سعی در حداکثر کردن میزان محصول فرسوده جمع آوری شده را دارد. در نهایت مدل مطرح شده با رویکرد قطعی سازی خیمنز قطعی شد و مدل کمکی قطعی مطرح شد. این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل شد.

References

1. Simchi- Levi, D., P. Kaminsky and E. Simchi- Levi. (2004). managing the Supply chain: The Definitive Guide for the Business professional, Mcgraw-hill.
2. Alamtabriz, A., Roghanian, E., Hosseinzadeh, M., (2011). Design and optimization of reverse logistics network under uncertainty conditions using Genetic Algorithm, Journal of Industrial Management Outlook, 1, 61-89. (In Persian)
3. Sohrabi, T., Etemad, M., Fathi, M.R. (2018). Mathematical modeling of Green closed loop supply chain network with consideration of supply risk: Case Study, Journal of Advances in Mathematical Modeling, 7(2), 103-122. (In Persian)
4. Bashiri, M, Sharafati, M. (2013). Two-objective design of a closed-loop supply chain network with consideration of related criteria in a fuzzy environment, Journal of Industrial Engineering Research in Manufacturing Systems, (1) 1, 25-36. (In Persian)
5. Fathi, M.R., Nezafati, N., Behrooz, A.H., and Etemad, M. (2021). Mathematical Modeling of Closed-loop Supply Chain Network based on Environmental and Social Impacts, Journal of Animal Environmental Research, In Press. (In Persian)
6. AmirKhan, M., Norang, A., Tavakoli Moghaddam, R. (2014). Presentation of a fuzzy mathematical programming model for the problem of designing a raw material supply network under uncertainty conditions- A Case Study, International Journal of Industrial Engineering and Production Management, 2 (25), 218-235. (In Persian)
7. Etemad, M., Nezafati, N., Fathi, M.R. (2020). Modeling and Designing a Two-Objective Supply Chain Network based on Customer Relationship Management: A Case Study., 12(46), 273-293. (In Persian)