-- Iranian Energy Economics------
Fall 2024, 52 (13), 133-156
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.22054/jiee.2024.76268.2045

Original Research
Received: 15/Oct/2023
Accepted: 26/Aug/2024
ISSN: 2423-5954
eISSN: 2476-6437

Optimizing Economic Costs and Greenhouse Gas Emissions in the Biomass Supply Chain Network under Conditions of Uncertainty

Mohammad Rahim Soltani — PhD Student, Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mohammad Ali Afsharkazemi * — Associate Professor, Department of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Reza Radfar — Professor, Department of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Considering climate change, which has generated many studies today, including reducing fossil fuel consumption and using renewable energies to produce clean energy, in this research, with this aim, the design of a three-level biomass supply chain network model with two minimization functions in economic and environmental costs has been considered. The main research gap solved in this study is the resilience of the model, which examines the disruption in the supply of raw materials with a scenario approach. The mathematical model of the research is mixed integer linear programming. To single-target the function, under uncertainty, the fuzzy TH mathematical model has been used and the validation of the model has been investigated in a real case study in Tehran province. According to the findings from the output of GAMS software, which shows the optimal economic cost equal to 791354423200 Tomans and the emission of 1420469 grams of carbon dioxide per year, the optimal mode of construction of 4 power plants in the cities of Pakdasht, Qarchak, Parand and Mallard have been proposed. The sensitivity analysis on the parameters of the TH method and on the change of biomass supply values met the expectations. As a result, the proposed model has the necessary efficiency and has been able to be optimal in terms of cost and reduce greenhouse gas emissions by combining economic and environmental approaches. Therefore, the model has the necessary resilience.

Introduction

Correct biomass management is becoming one of the most important factors to achieve a sustainable future for human society. Although biomass is highly

* Corresponding Author: m_afsharkazemi@iauec.ac.ir
How to Cite: Soltani, M R., Afsharkazemi, M A., Radfar, R. (2024). Optimizing Economic Costs and Greenhouse Gas Emissions in the Biomass Supply Chain Network under Conditions of Uncertainty. Iranian Energy Economics, 52(13), 133-156.

dependent on regional climatic conditions, it is currently the only practical renewable source for direct supply of sustainable fuels for all countries in the world. Urban waste management is one of the most important tasks of urban management, which has many costs and implementation problems. Mismanagement of these biomass causes various environmental risks. Over the past half century, the world's electricity consumption has increased continuously. Between 1980 and 2023, electricity consumption has more than tripled. The growth of industrialization and access to electricity worldwide has further increased the demand for electricity. Worldwide electricity generation is projected to triple over the next three decades. The growth and expansion of a sustainable bio economy, is proposed as an important strategy that can help the world to meet many of these challenges. In support of this strategy, more than 50 countries worldwide are currently pursuing bio economy strategies. The production of renewable fuels requires long-term planning, which requires the design of a flexible supply chain network. Optimum biofuel supply chain network must deal with the time difference of fuel supply and demand. Seasonal variation is very important due to the availability of biomass and it is challenging not to consider the seasons. Therefore, the modeling of the biofuel supply chain network should consider both long-term planning and decisions such as seasons should also be considered in the modeling.

Methods and Material

The method of this article is two-objective mixed integer linear programming. The two-objective model designed in this research has been converted into a non-fuzzy single-objective using the fuzzy TH method and it has been solved with the exact solution method and with the help of Games software. In the designed model, strategic and tactical decisions are made to achieve the set goals. Strategic decision variables include location and allocation. For location, it is meant to choose a place from among the proposed places for the construction of power plants so that the cost of transportation and as a result the cost of electricity production is kept to the minimum possible and reduces carbon emissions. In the discussion of allocation, the optimal capacities for each of the power plants are determined from among the proposed capacities. Tactical decision variables include determining the amount of biomass to be transferred from each supplier to each power plant, as well as the amount of electricity produced and transferred from each power plant to each applicant. Biofuel supply chains are subject to uncertainty due to their dynamic and complex nature. Here, according to the opinion of the experts, the uncertainties of the fuzzy type of the research model; the costs of ordering to the supplier are the costs of purchasing raw materials (biomass) and the costs of setting up the power plant. Also, according to the opinion of experts, the cost of repair and maintenance has uncertainty of a possible type.

Results and Discussion

Here, the real data to determine the values of the first and second functions have been entered into the Gems software to obtain the exact solution for the desired problem. Solving the problem by TH method with beta (satisfaction coefficient) of 0.5 for W1=0.7 and W2=0.3 is considered for it. The findings from the software outputs suggest that the best situation or in other words the optimal situation is to

build four power plants among the proposed points out of the seven points. These four power plants should be built in three different capacities. A power plant with a capacity of forty megawatt hours per day in Pakdasht city, with an annual production of 14,600 megawatt hours, a power plant with a capacity of twenty megawatt hours per day in the city of Mallard, equal to 7,300 megawatt hours of annual production power, a power plant with a capacity of forty megawatt hours per day in Qarchak city, With an annual production of 14,600 megawatt hours, and a power plant with a capacity of ten megawatt hours per day in Parand city, with an annual production of 3,650 megawatt hours, it produces and supplies electricity to all four residential towns in Tehran. Electricity has been supplied to three residential towns in Parand city, and electricity to a residential town in Rabat Karim will also be produced and its need will be met. The electricity of a residential town in Islamshahr and a residential town in Pardis, which were applicants, has not been supplied and both types of biomasses are consumed in different proportions in four power plants. Biomass is purchased from all ten suppliers in ten different cities.

Conclusion

In this article, the presented model has two objective functions, one for reducing total costs and the other for reducing carbon emissions, both of which aim to achieve sustainable development in the waste supply chain network. Any model that can control uncertainties and turn them into certainty, that is, that can predict uncertainties so that the supply chain network does not suffer from disruption and disorder, is a resilient model. A model can be made resilient in various ways. The current model has turned uncertainties into certainty by creating scenarios, therefore the current model is also a resilient model to use the energy known as Biomass-to-X to increase the efficiency of the network. One of the biggest challenges in the biomass supply chain is logistics management, because biomass with high moisture and low density requires more expensive transportation. Therefore, to develop the model, it is suggested to manage logistics in the waste supply chain network, in sync with today's technologies, to reduce Economic costs and reducing carbon emissions should be investigated.

Acknowledgments

The authors of the article are grateful to all those who contributed to the preparation and improvement of the quality of the article with their valuable comments.

Keywords: Optimization, Reactor, Uncertainty, Renewable Products, Biomass.

JEL Classification: L94 , Q16 , Q42 , Q51

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

ISSN: ۲۴۲۳-۵۹۵۴

eISSN: ۲۴۷۶-۶۴۳۷

-- پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران ---------

دوره ۱۳، شماره ۵۲، پاییز ۱۴۰۳، ۱۳۳-۱۵۶

Jiee.atu.ac.ir

DOI: http://dx.doi.org/10.22054/jiee.2024.76268.2045

بهینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده در شرایط عدم قطعیت[1]

محمدرحیم سلطانی — دانشجوی دکتری رشته مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

محمدعلی افشارکاظمی* — دانشیار دانشکده مدیریت، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

رضا رادفر — استاد دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

با توجه به تغییرات اقلیمی که امروزه مطالعاتی زیادی را پیرامون خود شکل داده است از جمله کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تولید انرژی پاک، در این پژوهش با همین هدف، طراحی مدل شبکه زنجیره‌تأمین زیست‌تودهٔ سه سطحی با دو تابع کمینه‌سازی در هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مدنظر قرار گرفته است. تاب‌آوری مدل عمده‌ترین شکاف پژوهشی برطرف شده در این مطالعه است که به بررسی اختلال در عرضه مواد اولیه با رویکرد سناریوپردازی اقدام می کند. مدل ریاضی پژوهش، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد. برای تک‌هدفه کردن تابع، تحت عدم قطعیت، از مدل ریاضی TH فازی استفاده گردیده و اعتبارسنجی مدل، در یک مطالعه موردی واقعی، در استان تهران بررسی شده است. با توجه به یافته‌های حاصل از خروجی نرم‌افزارگمز(GAMS)، که هزینه بهینه اقتصادی معادل ۷۹۱,۳۵۴,۴۲۳,۲۰۰ تومان و انتشار ۱۴۲۰۴۶۹ گرم دی‌اکسیدکربن در سال را نشان می‌دهد، حالت بهینه ساخت ۴ نیروگاه در شهرهای پاکدشت، قرچک، پرند و ملارد پیشنهاد شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای روش TH و بر روی تغییر مقادیر عرضه زیست توده، انتظارات را محقق نمود. در نتیجه مدل پیشنهادی، کارآمدی لازم را دارد و توانسته با ترکیب رویکرد اقتصادی و زیست‌محیطی، از نظر هزینه، بهینه باشد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش دهد. بنابراین مدل، تاب‌آوری لازم را دارا می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، راکتور، عدم قطعیت، محصولات تجدیدپذیر، زیست‌توده

طبقه‌بندی JEL: Q51 , Q42 , Q16 , L94

۱. مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات است

* نویسنده مسئول: m_afsharkazemi@iauec.ac.ir

۱. مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از نهاده‌های تولید و نهاده استراتژیک همواره مورد توجه سیاست‌گذاران و اقتصاددانان بوده و نیاز روزافزون زندگی بشر به این نهاده غیر قابل چشم‌پوشی است (باوی و همکاران، ۱۴۰۱). امروزه سوخت‌های فسیلی بیشترین استفاده را به‌عنوان منبع انرژی اولیه دارند (اگبولوت و ساریدمیر[1]، ۲۰۲۱)، اما منجر به عواقب خطرناک زیست‌محیطی نیز شده‌اند. به‌عنوان مثال، انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر عناصر آلاینده به دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی، مانند گاز و زغال سنگ، بر جو تأثیر منفی گذاشته است (مؤمنی‌تبار و همکاران، ۲۰۲۳). سوختن یک لیتر گازوئیل، موجب انتشار نزدیک به ۲/۹ کیلوگرم گازهای گلخانه‌ای می‌گردد، این در حالی است که هم‌اکنون میانگین مصرف جهانی نفت ۱۰۶ میلیون بشکه در روز است (اگبولوت و ساریدمیر[2]، ۲۰۲۱).

بحران قیمت انرژی حتی از موضوع مشکلات زیست‌محیطی در لزوم تغییر استراتژی انرژی تأثیرگذارتر است. برای هر دوی این عوامل می‌توان دو راه حل یکسان ارائه نمود: انرژی سبز تجدیدپذیر که از باد، خورشید، آب و زمین حاصل می‌گردد و گاز سبز که از مزارع، مواد غذایی و زباله‌های دفنی به‌دست می‌آید (اکستنس و پینچبک[3]، ۲۰۲۲). علاوه بر موارد فوق، افزایش جمعیت، شهرنشینی سریع، اقتصاد پررونق و افزایش سطح زندگی در کشورهای در حال توسعه به میزان زیادی، سرعت، مقدار و کیفیت تولید زباله‌های جامد شهری را افزایش داده است (عبدالشفی و منصور[4]، ۲۰۱۸). این بدان معنی است که کربن بیش ازحد، تولید می‌شود. لذا دستیابی به هدف کربن صفر، براساس «توافق پاریس» که در سال ۲۰۱۵ منعقد شده است، ضروری است (پرادو و همکاران[5]، ۲۰۲۳).

این دلایل باعث شده در دهه گذشته زیست‌توده به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر در مقادیر زیاد روی زمین، به‌عنوان یک منبع انرژی جایگزین توجه زیادی را به خود جلب کند (یو و همکاران[6]، ۲۰۲۱). ارزشی که می‌توان از زیست‌توده‌ها به دست آورد را نمی‌توان به‌عنوان یک منبع مهم انرژی زیستی نادیده گرفت. اگر به‌طور مؤثر مهار گردند، ضایعات زیست‌توده می‌توانند به‌عنوان ماده خام برای کاهش مصرف انرژی از منابع

1. Ağbulut and Saridemir
2. Ağbulut, Ü., & Sarıdemir, S.
3. Extance and Pinchbeck
4. Abdel-Shafy and Mansour
5. Prado et al.
6. Yu et al.

سوخت فسیلی تجدیدناپذیر استفاده شوند (بدیا و همکاران[1]، ۲۰۱۸). تبدیل زیست‌توده به انرژی ضمن ایفای نقشی مهم در جبران مصرف سوخت‌های فسیلی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، به تصفیه پسماندها نیز کمک می‌کند (بانک جهانی[2]، ۲۰۰۰).

بیشترین روش استفاده از منبع انرژی زیست‌توده‌ها، تبدیل زباله‌ها به سوخت زیستی و به‌کارگیری آن برای تولید برق، گرما و انرژی می‌باشد (شریفی، ۱۳۹۶). ازاین‌رو طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سوخت زیستی پایدار برای شبکه زنجیره تأمین پسماندها به دلایل: ۱) افزایش امنیت انرژی با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش تغییرات آب و هوایی، ۲) تولید پایدار سوخت‌های زیستی با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به مقداری قابل ملاحظه و ۳) فراهم نمودن مزایای اقتصادی برای تولیدکنندگان و عناصر زنجیره تأمین، ضروری است (مؤمنی‌تبار و همکاران، ۲۰۲۳). بر همین اساس، چگونگی جمع‌آوری پسماندها، مکان‌یابی تأسیسات، حمل و نقل و پردازش پسماندها، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد (فروناتو و همکاران[3]، ۲۰۲۰).

مکان‌یابی بهینه تأسیسات و بهینه‌سازی برای استفاده از انواع وسایل نقلیه، علاوه بر اینکه هزینه‌ها را کاهش داده، اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی را نیز، به دلیل کاهش در مصرف سوخت، کاهش می‌دهد (ابراهیمی قزوینی و همکاران، ۲۰۱۹). مکان‌یابی غیر بهینه، علاوه بر افزایش هزینه‌ها و تشدید تخریب محیط زیست و گسترش انتشار کربن، موجب کاهش عرضه زیست‌توده و افزایش قیمت آن می‌گردد و کاهش پاسخگویی به تقاضای مشتریان و افزایش هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین را در پی دارد و بدین‌سان، موجب اختلال در شبکه زنجیره تأمین زیست توده می‌گردد (لیو و همکاران[4]، ۲۰۲۰).

بنابراین هدف اصلی این تحقیق چگونگی کاهش هزینه‌های کل (هزینه‌های اقتصادی و هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای) در شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده در شرایط عدم قطعیت است.

لذا سازماندهی این مطالعه بدین صورت است که در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه پژوهش آورده شده و سپس در بخش سوم روش پژوهش ارائه گردیده است. در بخش چهارم یافته‌های تحقیق و در بخش آخر به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

---

1. Bedia et al.
2. World Bank.
3. Ferronato et al.
4. Liu et al.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

اولیور و وبر[1] در سال ۱۹۸۲، برای نخستین‌بار اصطلاح مدیریت زنجیره تأمین را مطرح نمودند. هولیهان[2] این مفهوم را در یک رشته مقالات برای تشریح مدیریت گردش مواد خام، خارج از مرزهای سازمانی به‌کار برد. این واژه از دهه ۱۹۹۰ به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (سیپلیک و زولاک[3]، ۲۰۲۲).

از زمان پیدایش آتش، انسان‌ها برای دریافت انرژی، زیست‌توده‌ها را آتش می‌زدند. در سال ۱۸۸۴ در آلمان، طرحی به اجرا درآمد که به‌وسیله بیوگاز حاصل از انرژی زیست‌توده، انرژی به دست می‌آمد (کوندوری و همکاران[4]، ۲۰۱۰).

لو و همکاران[5](۲۰۲۳)، توبا و همکاران[6](۲۰۲۳)، وانگ و وانگ[7](۲۰۲۳)، دتوال و همکاران[8](۲۰۲۳) و موسوی آهرنجانی و همکاران (۲۰۲۰) کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش انتشار کربن را، عامل توسعه پایدار برشمرده‌اند.

اقبالی و همکاران (۲۰۲۲) طراحی و برنامه‌ریزی ایستگاه‌های انتقال زباله، تأسیسات تصفیه و محل دفن زباله را از اجزای ضروری مدیریت پسماند جامد شهری می‌دانند. ایشان معتقدند فرآیند جداسازی از مبدأ هزینه‌های جداسازی زباله را کاهش می‌دهد و کیفیت محصولات بازیافتی را با جلوگیری از تولید زباله‌های مخلوط و کمک به فرآیند بازیافت زباله بهبود می‌بخشد. هدف مقاله ایشان ارائه یک مدل چند دوره‌ای و چند هدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه و پایدار برای مدیریت زباله جامد شهری است که جداسازی منبع را در نظر می‌گیرد و مکانیزم پاداش ـ جریمه را به کار می‌برد. عملکردهای هدف شامل به حداقل رساندن هزینه کل سیستم، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات نامطلوب زیست محیطی بر مناطق مسکونی است.

شریعت حسینی و همکاران (۲۰۲۱) چندین عامل که بیشترین تأثیر در راندمان نیروگاه بیوگاز دارند را معرفی نمودند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پسماند تولید شده از

1. Oliver and Webber.
2. Houlihan.
3. Cyplik and Zwolak.
4. Condori et al.
5. Lu et al
6. Toba et al
7. Wang & Wang
8. Detwal et al

توانایی بالقوه برای تولید و تأمین انرژی برخوردار است که صحت این موضوع با برآورد ارزش حرارتی بیوگاز، توان و انرژی الکتریکی سالانه تولید شده، تأیید می‌شود. به‌طورکلی با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پسماندهای جامد شهری به‌عنوان مادهٔ اولیه ارزان و قابل دسترس در مولدهای بیوگاز می‌تواند اثرات بسیار مثبتی در تولید و تأمین انرژی و هزینه‌های اقتصادی داشته باشد.

سقایی و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین برق زیست‌توده با عدم قطعیت در کیفیت مواد، در دسترس بودن و تقاضای بازار، اذعان داشتند زنجیره‌های تأمین برق زیست‌توده، مستعد طیفی از عدم قطعیت‌ها هستند که از داخل یا خارج ناشی می‌شوند. ایشان طراحی زنجیره‌های تأمین قوی که در مواجهه با اختلالات انعطاف‌پذیر باقی می‌مانند را مورد توجه قرار دادند و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط تصادفی دو مرحله‌ای همراه با محدودیت شانس به حداقل رساندن هزینه کل تولید برق از زیست‌تودهٔ چوبی در یک زنجیره تأمین انرژی زیستی یکپارچه چهار سطحی را ارائه دادند. تصمیمات استراتژیک مانند مکان و ظرفیت زیرساخت در مرحله اول و تصمیمات برای تأمین مواد، سیاست موجودی در مرحله دوم گنجانده شده است.

فیضی و همکاران (۲۰۱۹) انتخاب محل نصب نیروگاه زباله‌سوز شهری با چشم‌انداز توسعه پایدار را به‌عنوان یک تصمیم چند معیاره بررسی نمودند. سه معیار اصلی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ـ فرهنگی تدوین شده است. ابتدا از تکنیک دیمتل[1] برای شناسایی روابط متقابل بین عوامل استفاده شد. سپس با استفاده از فرآیند شبکه تحلیلی فازی براساس اهمیت رتبه‌بندی کردند. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین اهمیت به ترتیب به معیارهای اصلی اقتصادی، اجتماعی ـ فرهنگی و زیرمعیارها اختصاص یافته است.

گونزالز نونز و همکاران[2] (۲۰۲۳) در مقاله خود با استفاده از یک رویکرد چندمقیاسی فنی ـ اقتصادی و با ارزش‌گذاری زباله‌های جامد شهری و لجن از طریق سوزاندن هم‌زمان برای تولید انرژی استفاده کرده و به دنبال یک روش سیستماتیک برای تعیین شرایط عملیاتی بهینه و برآورد هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری تأسیسات به‌عنوان تابعی از ظرفیت پردازش زباله هستند. برای اینکه تأسیسات برق با قیمت رقابتی ۰/۰۶ یورو در کیلووات ساعت تولید شود، باید زباله‌های تولید شده در شهرهای بالای ۲۵۰ هزار نفر پردازش شوند.

1. DEMATEL.
2. González-Núñez et al.

هزینه سرمایه‌گذاری فراتر از ۳۰ میلیون یورو است. در مرحله بعد، در سطح کشور، یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات چند هدفه فرموله می‌شود. از نقطه نظر اقتصادی، تنها بزرگ‌ترین شهرها انتخاب می‌شوند. با این حال، با هدف رسیدن به یک هدف اجتماعی، توان قیمت رقابتی را می‌توان با انتخاب مکان‌های مناسب برای بودجه در دسترس تولید کرد.

کوسار و همکاران[1] (۲۰۲۳) در پژوهشی با موضوع بهینه‌سازی هزینه حمل و نقل برای زنجیره تأمین زیست‌توده، تبدیل زیست‌توده را تا حد زیادی تحت تأثیر هزینه حمل و نقل مواد زیست‌توده بیان کرده‌اند. درنتیجه، کسب و کارها به راه‌حل‌های بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی عملیات حمل و نقل، تخصیص مؤثر منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی خود نیاز دارند.

باتیستا و همکاران[2] (۲۰۲۳) در مقاله خود از زیست‌توده‌ها به‌عنوان منابع تجدیدپذیری که در فرآیندهای تبدیل انرژی برای به دست آوردن محصولات متنوع از طریق فناوری‌های مختلف استفاده می‌شوند، یاد کردند. ایشان اذعان داشتند زنجیره تولید (شامل تحویل، تدارکات، پیش تصفیه، ذخیره‌سازی و تبدیل به‌عنوان اجزای کلی) به دلیل تنوع ذاتی می‌تواند پرهزینه و نامطمئن باشد. روش‌های بهینه‌سازی به‌طور گسترده برای مدل‌سازی زنجیره تأمین زیست‌توده برای فرآیندهای انرژی استفاده می‌شود.

لیو و همکاران[3] (۲۰۱۹) براساس تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح مختلط، یک چارچوب مبتنی بر بهینه‌سازی برای تعیین مکان‌ها و مراکز توزیع و همچنین تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی تولید و توزیع با به حداقل رساندن هزینه کل واحد پیشنهاد داده‌اند که شامل هزینه‌های مواد خام، بسته‌بندی، مبادلات، موجودی، حمل و نقل و استهلاک می‌باشد.

ماکاریچی و همکاران[4] (۲۰۱۸) تکامل زباله‌سوزی برای تبدیل شدن به انرژی را با هدف ارزیابی پیشرفت در شیوه انجام کار، مرور کردند. بررسی ایشان نشان می‌دهد که سوزاندن زباله برای تولید انرژی نقش مهمی در کاهش مشکل جهانی زباله ایفا کرده است.

جئونگ و رامیرز ـ گومز[1] (۲۰۱۸) انتخاب محل یک نیروگاه زیست‌توده را یک نگرانی مهم دانسته‌اند زیرا مواد خام زیست‌توده از نظر جغرافیایی و مکانی پراکنده

1. Kousar et al.
2. Batista et al.
3. Liu et al.
4. Makarichi et al.

هستند. سیستم اطلاعات جغرافیایی ـ تکنیک‌های تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره، روش‌های قدرتمندی‌اند که در رشته‌های مختلف با استفاده از معیارهای مناسب به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها می‌توانند برای حل مشکلات برنامه‌ریزی برق، مانند تعیین مکان‌های بهینه نیروگاه‌های زیست‌توده در زمینه انرژی تجدیدپذیر، مورد استفاده قرار گیرند.

دی‌متئو و همکاران[2] (۲۰۱۷) در مقاله خود با عنوان سهم انرژی بخش آلی پسماند جامد شهری در پایداری انرژی ـ محیط زیست در مناطق شهری در مقیاس کوچک، مدیریت پسماند شهری را یکی از چالش برانگیزترین موضوعات در برنامه‌ریزی انرژی شهرهای متوسط و بزرگ عنوان کرده‌اند. ایشان برداشت انرژی از زباله را نه به عنوان یک نوش‌دارو، بلکه به عنوان یک راه حل قابل پیش‌بینی دانسته‌اند. مطالعه آن‌ها بر تبدیل زباله جامد شهری به بیوگاز به عنوان منبع انرژی محلی برای شهرها تمرکز دارد.

مطالعات بر روی پیشینه‌ها مشخص نموده است که در تمامی پژوهش‌های گذشته، برای تعیین مختصات نیروگاه‌ها، در ابتدا، کل مناطق به‌عنوان منطقه با امکان ساخت نیروگاه در نظر گرفته می‌شده است. سپس با مطالعاتی که انجام می‌داده‌اند، مناطق ممنوعه را برای ساخت نیروگاه استخراج می‌نمودند. با این روش، مناطق غیرمجاز، امکانی برای انتخاب شدن برای ساخت نیروگاه نداشتند. این روش، با الگوریتم ژنتیک و توسط برنامه[3] متلب، انجام می‌گرفته است. در این روش‌ها، هیچ تضمینی وجود ندارد که پژوهشگر توانسته باشد تمامی مناطق ممنوعه را شناسایی نماید. ضمن اینکه در مناطقی که امکان ساخت نیروگاه وجود داشته باشد ممکن است مختصات بهینه نیروگاه در مناطقی قرار بگیرد که از منظری دیگر قابلیت ساخت وجود نداشته باشد و یا با وجود قابلیت ساخت، هزینه‌ها افزایش یافته و مشکلات دیگری بهمراه دارد. به‌طور مثال ممکن است مختصات پیشنهادی برای ساخت نیروگاه در محدوده‌ای با دسترسی سخت مانند کوه‌ها قرار گرفته و یا در نزدیکی باغ‌ها، صنایع غذایی و سایر محدودیت‌های دیگر واقع شود.

در این تحقیق، این شکاف پژوهشی را این‌گونه برطرف شده است که در ابتدا تمامی مکان‌هایی که امکان ساخت نیروگاه در آن‌ها وجود داشته باشد را با همکاری با

---

1. Jeong and Ramírez-Gómez
2. González-Núñez et al.
3. MATLAB

سازمان‌های مربوطه مانند شهرداری، سازمان صنایع، سازمان کشاورزی و غیره مشخص می‌نماید، مختصات هر کدام را به دست می‌آورد، سپس این مشخصات را به نرم‌افزار می‌دهد تا نرم‌افزار از بین این مختصات به دنبال نقطه بهینه برای ساخت نیروگاه بگردد.

این روش، این قابلیت را دارد که هر نقطه‌ای که توسط نرم‌افزار انتخاب گردید، قطعاً امکان ساخت نیروگاه در آن وجود دارد و قطعاً این نقطه، بهترین نقطه برای ساخت نیروگاه خواهد بود. نوآوری بعدی این پژوهش مربوط به جامعه مورد بررسی می‌باشد، چرا که تاکنون استان تهران برای ساخت راکتورهایی که با منابع تجدیدپذیر فعالیت نمایند، مورد پژوهش قرار نگرفته است، اما در این پژوهش، این جامعه مورد بررسی قرار گرفته است. عمده‌ترین شکاف پژوهشی برطرف شده در این مطالعه، تاب‌آوری مدل است که به بررسی اختلال در عرضه مواد اولیه با رویکرد سناریوپردازی اقدام می‌کند.

۳. روش

در این مقاله، ۱) فرض‌هایی براساس ویژگی‌های شبکه زنجیره تأمین پسماند، مطرح می‌گردند. ۲) مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با دو تابع هدف، ارائه شده است. توابع هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و انتشار کربن، را بررسی می‌نمایند. ۳) روش حل TH فازی برای تک هدفه کردن توابع استفاده می‌شود و ۴) بر روی مطالعهٔ موردی، تحلیل حساسیت انجام می‌پذیرد.

فرض‌های مدل:

۱. قیمت زمین تخصیص‌یافته مناطق برای ساخت نیروگاه، در مدل وارد نشده است زیرا دولت به این صنعت، زمین رایگان واگذار می‌کند.

۲. هر تأمین‌کننده، میزان متفاوتی از انواع پسماند برای عرضه در اختیار دارد.

۳. در زنجیره تأمین، جریان معکوس وجود ندارد.

۴. هر مشتری، میزان تقاضای متفاوتی نسب به دیگر مشتریان دارد.

۵. از وسایل حمل و نقل متفاوت و ناهمگنی در شبکه زنجیره تأمین استفاده می‌گردد.

۶. از پسماندهای جامد شهری به‌عنوان ماده اولیه ارزان و قابل دسترس در مولدهای بیوگاز استفاده شده است.

• مدل ریاضی

در مسائل زنجیره تأمین انرژی زیستی، مدل‌سازی از روش شناسایی عوامل مؤثر در مدل و متغیرهای مستقل، جمع‌آوری داده‌ها برای متغیرها و انتخاب مدل ریاضی مناسب از نگاه خطی یا غیرخطی بودن، مشخص نمودن محدودیت‌های مدل و لحاظ کردن نااطمینانی در پارامترها صورت می‌پذیرد (حمیدی‌زاده، ۱۴۰۱).

منابع نااطمینانی و عدم قطعیت در زنجیره تأمین زیست‌توده‌ها دارای انواع گوناگونی است که از آن جمله می‌توان به عرضه فصلی زیست‌توده‌ها، نامشخص بودن وضعیت آب و هوا و سایر ویژگی‌های زیست‌توده اعم از هزینه زیست‌توده، میزان رطوبت، تغییرات فناوری، نوسان‌های تقاضا، قیمت بیوسوخت، برنامه‌های توسعه و همچنین تغییر مشوق‌ها، قوانین و سیاست‌های دولتی، تغییر زیرساخت حمل و نقل و توزیع محلی و نیز بلایای طبیعی و انسانی اشاره کرد (شارما و همکاران[1]، ۲۰۱۳).

ویژگی‌های مدل ریاضی طراحی شده شامل این موارد می‌باشد: مناسب برای تصمیم‌گیری در شرایط نااطمینانی است. مکان‌یابی بهینه راکتور را پیشنهاد می‌دهد، میزان تخصیص بهینه هر کدام از انواع پسماندها را از مراکز مختلف تأمین‌کنندگان به راکتورها تعیین می‌نماید، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل و نقل را به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های تهیه مواد اولیه مشخص می‌نماید. بدین صورت که مشخص می‌کند کدام مراکز تأمین‌کننده به کدام راکتور، پسماند ارسال نماید. همچنین تعیین می‌کند که ظرفیت اقتصادی و بهبنه هر کدام از راکتورها به چه میزان باشند.

در این بخش، (الف) نمادها شامل اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها، معرفی شده است. در بخش‌های (ب) و(ج) به ترتیب، توابع و محدودیت‌های مدل، طراحی گردیده است.

الف) نمادها

جدول ۱. جدول اندیس‌ها

عنوان	نماد	عنوان	نماد
مکان‌های کاندید برای ساخت نیروگاه	n	مناطق متقاضی برق	k
سناریو خشک‌سالی	s	نوع وسیله حمل	v
انواع زیست‌توده	b	سطح ظرفیت نیروگاه	c
عرضه کننده زیست‌توده	m		

1. Sharma et al.

جدول۲. جدول متغیرها

نماد	عنوان
QB_{bmns}	میزان انواع زیست‌توده حمل‌شده از محل m به نیروگاه تحت s
QE_{nks}	مقدار برق انتقالی به منطقه تقاضای k
QV_{vmns}	تعداد وسیله حمل موردنیاز برای انتقال b از m به n تحت s
BN_{cn}	نیروگاه در منطقه n با ظرفیت c راه‌اندازی شود یک وگرنه صفر
BM_{bms}	اگرتأمین کننده m تحت s وجود داشته باشد یک وگرنه صفر

جدول۳. جدول پارامترها

نوع پارامتر	عنوان	نماد
ظرفیت	حداکثر ظرفیت تأمین کننده تحت سناریو s	UM_{bms}
	حداقل سطح ظرفیت c نیروگاهn برای تولید برق	LN_c
	حداکثر سطح ظرفیت c نیروگاهn برای تولید برق	UN_c
هزینه‌ای	هزینه ساخت و راه اندازی نیروگاه با سطوح ظرفیت c درمکان n	CN_{cn}
	هزینه خرید هر واحد انواع b از انواع عرضه کنندگان	CB_{bms}
	هزینه تولید هر واحد برق از انواع b	CE_b
	هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق	CJ
	هزینه سفارش b به تأمین کننده	CM_m
فرآیندی نیروگاه	میزان تقاضای برق مشتریان k از نیروگاه تحت سناریو s	DE_{ks}
	هزینه انتقال هر واحد برق	EP
	ضریب تبدیل زیست‌توده به برق	φ_b
حمل و نقل	ظرفیت وسایل حمل و نقل	TV_V
	فاصله بین m و n	DI_{mn}
	هزینه حمل و نقل زیست‌توده بین m و n براساس مسافت طی شده به vها	CH_V
کربن	میزان انتشار کربن از حمل و نقل زیست‌توده	CT_v
	میزان کربن ایجادشده به ازای تولید هر واحد برق	PM
حجم زیست‌توده	حجم هر واحد زیست‌توده b	GM_b
سناریو	احتمال وقوع هرکدام از سناریوهای s	PU_S

ب) توابع هدف و محدودیت‌های مدل:

• تابع هدف اول

تابع هدف اول، یک تابع از نوع کمینه سازی می باشد. در این تابع، هدف، کمینه نمودن هزینه‌های اقتصادی است. در این تابع، هزینه‌های کل، کمینه می‌شوند.

$$\min Z_1 = \sum_{bms} PU_s \times CM_m \times BM_{bms} + \sum_{nc} CN_{cn} \times BN_{cn} + \sum_{bmns} PU_s \times CB_{bms} \times QB_{bmns} + \sum_{bmns} PU_s \times CE_b \times QE_{nks} + \sum_{vmns} PU_s \times CH_V \times DI_{mn} \times QV_{Vmns} + \sum_{nc} BN_{cn} \times CJ + \sum_{nks} PU_s \times QE_{nks} \times EP \quad (۱)$$

تابع هدف اول در بالا، دارای هفت متغیر می‌باشد که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: هزینه سفارش به تأمین‌کنندگان + هزینه ساخت و راه‌اندازی نیروگاه + هزینه خرید هر واحد از انواع زیست‌توده + هزینه تولید برق + هزینه حمل و نقل زیست‌توده + هزینه تعمیر و نگهداری خطوط انتقال برق + هزینه برق انتقالی به منطقه متقاضی.

• تابع هدف دوم

تابع هدف دوم انتشار دی‌اکسیدکربن در شبکه زنجیره تأمین پسماند را کمینه می‌کند. این تابع عبارت است از میزان احتمال پخش کربن در فاصله بین تأمین‌کنندگان تا نیروگاه و انتشار کربن هنگام تولید برق هر واحد نیروگاه.

$$\min Z_2 = \sum_{vmns} PU_s \times CT_v \times DI_{mn} \times QV_{vmns} + \sum_{nks} PU_s \times PM \times QE_{nks} \quad (۲)$$

ج) محدودیت‌های مدل

• محدودیت ظرفیت نیروگاه

نشان‌دهنده میزان زیست‌توده انتقال داده شده از تأمین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

$$\sum_m QB_{bmns} \leq UM_{bms} \qquad \forall \ bms \quad (۳)$$

• محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده

نشان‌دهنده میزان زیست‌توده انتقال داده شده از تأمین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

$$\sum_m QB_{bmns} + M \times (1 - BN_{cn}) \geq LNc \quad \forall \ bmncs \quad (۴)$$

- **محدودیت راه‌اندازی**

اگر نیروگاه راه‌اندازی شود یک و گرنه صفر

$$\sum_C BN_{cn} \leq 1 \qquad \forall \text{ n} \tag{۵}$$

- **محدودیت حداقلی برق انتقالی**

حداقل میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه به متقاضیان تحت سناریو

$$\sum_k QE_{nks} + M \times (1 - BN_{cn}) \geq \text{LNc} \quad \forall \text{ncs} \tag{۶}$$

- **محدودیت حداکثری برق انتقالی**

حداکثر میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه به مشتریان تحت سناریو

$$\sum_k QE_{nks} \leq M \times (1 - BN_{cn}) + UN_c \quad \forall \text{ncs} \tag{۷}$$

- **محدودیت بالانس موجودی در نیروگاه**

این محدودیت، میزان برق تولیدی به ازای مصرف هر واحد زیست توده انتقال داده شده از مراکز تأمین‌کننده به نیروگاه تحت سناریو

$$\sum_{\text{bn}} QB_{bmns} \times \varphi_b = \sum_i QE_{nks} \qquad \forall \text{ ns} \tag{۸}$$

- **محدودیت برآورد تقاضا**

میزان برق انتقال داده شده از نیروگاه تحت سناریو برابر است با میزان تقاضای برق مشتریان تحت سناریو

$$\sum_n QE_{nks} \leq DE_{ks} \qquad \forall \text{ ks} \tag{۹}$$

- **محدودیت تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز بین m و n**

برای انتقال زیست‌توده از مراکز تأمین‌کنندگان تحت سناریو به نیروگاه.

$$\frac{\sum_b QB_{bmns} \times GM_b}{TV_v} \leq QV_{vmns} \leq \frac{\sum_b QB_{bmns} \times GM_b}{TV_v} + 1 \qquad \forall vms \tag{۱۰}$$

• محدودیت شرط انتخاب تأمین‌کننده

بدین‌معنا که اگر تأمین‌کننده‌ای انتخاب نشود آن تأمین‌کننده نباید زیست‌توده‌ای به نیروگاه ارسال نماید.

$$\sum_m QB_{bmns} \leq M \times BM_{bms} \qquad \forall bms \qquad (۱۱)$$

• محدودیت شرط مکان‌یابی برای نیروگاه‌ها

اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید زیست‌توده‌ای به آن ارسال کرد.

$$\sum_{bm} QB_{bmns} \leq M \times \sum_c BN_{cn} \qquad \forall ns \qquad (۱۲)$$

• محدودیت ارسال برق

اگر نیروگاهی راه اندازی نشد، نباید برقی به مشتریان ارسال کرد.

$$\sum_k QE_{nks} \leq M \times \sum_c BN_{cn} \qquad \forall ns \qquad (۱۳)$$

روش حل

در این پژوهش از روش TH استفاده گردیده است. روش TH برای تبدیل مسائل چند هدف فازی به مسئله تک هدفه غیرفازی (قطعی) توسط ترابی و هسینی[1] (۲۰۰۸) ارائه گردید. در این روش، بهترین مقدار هر تابع هدف با در نظر گرفتن کمترین میزان رضایت‌مندی توابع هدف و ترکیب نمودن آن با رویکرد چند هدفه فازی وزن‌دار، به دست می‌آید. هدف این روش کم کردن فاصله بین توابع هدف از مقدار ایدئال‌شان است.

گام‌های این روش عبارتند از:

الف) تخمین حد بالا و پایین تابع هدف جهت به دست آوردن بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف که روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها این است که مدل به ازای هر تابع هدف به‌طور جداگانه بهینه شود و مقدار شدنی برای سایر توابع هدف ذخیره گردد. کمترین عدد ذخیره شده برای هر تابع هدف به‌عنوان حد پایین و بیشترین عدد ثبت شده به‌عنوان حد بالا در نظر گرفته شوند.

1. Torabi and Hassini

ب) پس از تعیین حدهای بالا و پایین توابع هدف، تابع عضویت(درجه رضایت) توابع هدف محاسبه می‌شوند:

$$\mu_1(V) = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad Z_1 > Z_1^{NIS} \\ \frac{Z_1^{NIS} - Z_{g1}}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & \text{if} \quad Z_1^{PIS} \le Z_1 \le Z_1^{NIS} \\ 0 & \text{if} \quad Z_1 < Z_1^{PIS} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

$$\mu_2(V) = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad Z_2 > Z_2^{NIS} \\ \frac{Z_2^{NIS} - Z_{g2}}{Z_2^{NIS} - Z_2^{PIS}} & \text{if} \quad Z_2^{PIS} \le Z_2 \le Z_2^{NIS} \\ 0 & \text{if} \quad Z_2 < Z_2^{PIS} \end{cases} \qquad (۱۵)$$

مدل ریاضی تک هدفه غیر فازی (تبدیل مدل غیر قطعی به مدل قطعی)

جدول ٤. معرفی پارامترهای TH

نماد	عنوان
δ	اهمیت نسبی حداقل میزان رضایت از توابع هدف
λ_0	حداقل میزان رضایت از توابع هدف
w_g	وزن اهمیت نسبی درجه رضایت تابع هدف Zg_1 و Zg_2
u_g	درجه رضایت تابع هدف Zg_1 و Zg_2

• مطالعه موردی زنجیره تأمین زیست توده در استان تهران

استان تهران با داشتن ۲۰ درصد جمعیت کل کشور و تولید پسماندهایی که بیش از ۲۰ درصد کل تولید پسماندهای کشور می‌باشند، استانی بسیار مهم و با اولویت یک برای بررسی مسائل پسماند می‌باشد. در این پژوهش، شهرهای پرجمعیت این استان که بیشترین تولید پسماند را دارا می‌باشند، به‌عنوان مراکز تأمین‌کننده زیست‌توده مورد مطالعه قرار گرفته است تا تخمین نسبتا دقیقی از میزان پسماندهای این استان در مدل‌سازی اعمال گردد همچنین تعدادی مراکز پیشنهادی برای ساخت نیروگاه پیشنهاد می‌گردد تا مدل بتواند از بین این مراکز پیشنهادی برای ساخت نیروگاه، مکان‌یابی بهینه را انجام دهد.

اندیس‌های مدل، توسط خبرگان، مشخص شده‌اند. در زیر، اندیس‌های مطالعه موردی، ارائه گردیده است.

جدول ۵. معرفی اندیس‌های مطالعه موردی

متقاضیان برق K	مکان‌های پیشنهادی نیروگاه n	تأمین‌کنندگان m
شرق تهران	قرچک	تهران
غرب تهران	پرند	پرند
جنوب تهران	پیشوا	شهریار
جنوب‌غربی تهران	پاکدشت	پاکدشت
اسلامشهر	ورامین	اسلامشهر
رباط‌کریم	ملارد	ورامین
پردیس	رباط‌کریم	ملارد
فاز یک پرند		رباط‌کریم
فاز دو پرند		پیشوا
فاز سه پرند		قرچک

٤. یافته‌ها

در اینجا، داده‌های واقعی برای تعیین مقادیر توابع اول و دوم، وارد نرم‌افزار گمز گردیده است تا حل دقیق برای مسئله مورد نظر به دست آید. حل مسئله با روش TH با بتا (ضریب رضایت‌مندی) ۰/۵به ازای W1۰/۷ = و W2=۰/۳ برای آن در نظر گرفته شده است. یافته‌های حاصل از خروجی‌های نرم‌افزار، بهترین وضعیت یا به عبارتی حالت بهینه را ساخت چهار نیروگاه در بین نقاط پیشنهادی از بین هفت نقطه پیشنهاد می‌دهد این چهار نیروگاه در سه ظرفیت متفاوت ساخته شوند.

نیروگاه با ظرفیت چهل مگاوات ساعت روزانه در شهر پاکدشت، با سالانه ۱۴۶۰۰ مگاوات ساعت برق تولیدی، نیروگاه با توان بیست مگاوات ساعت روزانه در شهر ملارد، برابر با ۷۳۰۰ مگاوات ساعت سالانه برق تولیدی، نیروگاه با ظرفیت چهل مگاوات ساعت روزانه در شهر قرچک، با سالانه ۱۴۶۰۰ مگاوات ساعت برق تولیدی، و نیروگاه با توان ده مگاوات ساعت روزانه در شهر پرند، با سالانه برابر با ۳۶۵۰ مگاوات ساعت برق تولیدی، برق تمامی چهار شهرک مسکونی مورد نظر در تهران را تولید و تأمین می‌نماید. برق سه شهرک مسکونی شهر پرند، تأمین گردیده و برق یک شهرک مسکونی در رباط کریم نیز تولید و نیاز آن مرتفع خواهد شد. برق یک شهرک مسکونی در اسلامشهر و یک شهرک مسکونی در پردیس، که متقاضی بودند، تأمین نگردیده و هر دو نوع زیست‌توده به نسبت‌های مختلف در چهار نیروگاه، مصرف می‌شوند. از تمامی ده تأمین‌کننده‌ای که در

ده شهر مختلف می‌باشند، خرید زیست‌توده انجام می‌شود. میزان بهینهٔ زیست‌توده تحت هر سناریو بین مراکز تأمین کننده زیست‌توده و نیروگاه‌ها، تعیین گردیده است. مقدار تابع هدف اول، ۷۹۱۳۵۴۴۲۳۲۰۰ تومان سالیانه می‌باشد و مقدار تابع هدف دوم، برابر با ۱۴۲۰۴۶۹ گرم دی‌اکسیدکربن سالیانه می‌باشد یعنی تقریبا ۱۴۲۰ کیلوگرم سالیانه، دی‌اکسیدکربن در فضا منتشر می‌شود. یافته‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

تحلیل حساسیت:

برای بررسی اعتبارسنجی و دقت مدل، بر روی پارامترهای θ و Ω، که ضرایب تابع هدف اول و دوم هستند تحلیل حساسیت انجام گرفته است. درنتیجه مقادیر توابع هدف به ازای ضرایب مختلف به دست آمده است. جدول زیر، روند تغییرات برای توابع هدف اول و دوم را با در نظر گرفتن سه سناریو مختلف ارائه می‌نماید.

جدول ٦. تحلیل حساسیت بر روی ضرایب تابع هدف

شماره سناریو	θ	Ω	تابع هدف اول (تومان)	تابع هدف دوم (گرم)
۱	۰/٤	۰/٦	۸۷۵۱۰٦۲۵۲۳٦۵	۹۹۹۸۷۲
۲	۰/۵	۰/۵	۷۹۱۳۵٤٤۲۳۲۰۰	۱٤۲۰٤٦۹
۳	۰/٦	۰/٤	۷۰۸۹٤۰۹٤۰٤۵۰	۱۹٤۲٤۸۵

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول ۶ در بالا نشان می‌دهد که افزایش ضریب در تابع هدف اول، مقدار این تابع هدف را کاهش می‌دهد و میزان تابع هدف دوم را افزایش می‌دهد و با کاهش ضریب تابع هدف اول، مقدار تابع هدف اول، افزایش می‌یابد و میزان تابع هدف دوم کاهش می‌یابد.

مشابهت این نتایج با برخی از پژوهش‌ها عبارتند از: پیکویرو و همکاران[1] (۲۰۲۳)، سان و همکاران[2] (۲۰۲۳)، و هلال و همکاران[3] (۲۰۲۳).

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در مدل ارائه‌شدهٔ این مقاله: دو تابع هدف یکی برای کاهش هزینه‌های کل و دیگری برای کاهش انتشار کربن دارد که هر دو این توابع، به دنبال دستیابی به توسعه پایدار در شبکه زنجیره تأمین پسماند می‌باشند. هر مدلی که قادر باشد عدم قطعیت‌ها را کنترل نماید و

1. Piqueiro et al
2. Sun et al
3. Helal et al

تبدیل به قطعیت نماید، یعنی اینکه بتواند عدم قطعیت‌ها را پیش‌بینی کند تا شبکه زنجیره تأمین، دچار اختلال و بی‌نظمی نگردد، مدلی تاب‌آور است.

به شیوه‌های گوناگونی می‌توان یک مدل را تاب‌آور نمود. مدل حاضر، با سناریوسازی، عدم قطعیت‌ها را به قطعیت، تبدیل نموده است از این‌رو مدل حاضر، مدلی تاب‌آور نیز هست. پیشنهاد می‌شود برای کاهش هر چه بیشتر هزینه‌های اقتصادی و کاهش کربن، از فناوری‌های دیجیتالی تبدیل پسماند به انرژی که به Biomass-to-X معروف گشته‌اند استفاده شود تا کارایی شبکه نیز افزایش یابد. یکی از بزرگترین چالش‌ها در زنجیره تأمین زیست‌توده مدیریت لجستیک است زیرا زیست‌توده با رطوبت بالا و چگالی کم به حمل و نقل گران‌تری نیاز دارند ازاین‌رو برای توسعه مدل، پیشنهاد می‌شود مدیریت لجستیک در شبکه زنجیره تأمین پسماند، همگام با فناوری‌های روز، به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش انتشار کربن مورد بررسی قرار گیرد.

٦. تعارض منافع

تعارض منافع نداریم.

۷. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از کلیه کسانی که با نظرات ارزشمندشان در تهیه و بهبود کیفیت مقاله نقش داشتند سپاسگزارند.

ORCID

Mohammad Rahim Soltani https://orcid.org/0009-0000-1024-4891
Mohammad Ali Afsharkazemi https://orcid.org/0000-0003-4327-8320
Reza Radfar https://orcid.org/0000-0002-3951-9905

۸. منابع

باوی، زینب؛ معتمدی، سحر؛ سعیدی، ناصر و حسین پور، فاطمه. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر قیمت بنزین بر شاخص توسعه انسانی در اقتصاد ایران. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۴۳(۱۱)، ۳۳-۱۱.

حمیدی‌زاده، محمدرضا. (۱۴۰۱). *برنامه‌ریزی غیرخطی*. تهران: سمت.

شریعت حسینی، سید علی اصغر؛ باشی شهابی، پیمان و بشیرنژاد، کاظم. (۱۴۰۰). ارزیابی تولید بیوگاز از پسماند جامد شهری با استفاده از راکتورهای تخمیر بی‌هوازی پیوسته. *نشریه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، ۲۲، ۱۳۰-۸۷.

شریفی بارفروشی، سحر. (۱۳۹۶). طراحی یک زنجیره‌تأمین پسماند به انرژی همراه با انتخاب تکنولوژی تبدیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع. دانشکده مهندسی صنایع. دانشگاه صنعتی بابل.

References

Abdel-Shafy, H.I., & Mansour, M.S.M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 1275-1290. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003

Ağbulut, Ü., & Sarıdemir, S. (2018). A general view to converting fossil fuels to cleaner energy source by adding nanoparticles. *International Journal of Ambient Energy*, 42(13), 1569-1574. https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563822

Batista, R.M., Converti, A., Pappalardo, J., Benachour, M., & Sarubbo, L.A. (2023). Tools for optimization of biomass-to-energy conversion processes. *Journal of Processes*, 11, 854. https://doi.org/10.3390/pr11030854

Bavi, Z., Motamedi, S., Saeedi, N., Hosseinpour, F. (2022). Investigating the Impact of gasoline price on human development index in the Iranian Economy. Iranian Energy Economics, 43 (11), 11-33. [In Persian] http://dx.doi.org/10.22054/jiee.2023.67827.1920

Bedia, J., Peñas-Garzón, M., Avilés. A. G, Rodriguez. J. J., & Belver. C. (2018). A review on the synthesis and characterization of biomass derived carbons for adsorption of emerging contaminants from water. *C-Journal of Carbon Research 4*, 4, 1-53. https://doi.org/10.3390/c4040063

Condori, B., Hijmans, R.J., Quiroz, R., & Ledent, J-F. (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling. *Journal of Field Crops Research*, 119, 135-144. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.003

Cyplik, P., & Zwolak, M. (2022). Industry 4.0 and 3D print: a new heuristic approach for decoupling point in future supply chain management. *Journal of LogForum*, 18(2), 161-171. http://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.733

Detwal, P. K., Agrawal, R., Samadhiya, A., Kumar, A., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Research developments in sustainable supply chain management considering optimization and industry 4.0 techniques: a systematic review. Benchmarking: *An International Journal*. 1-21. https://doi.org/10.1108/BIJ-01-2023-0055

Di Matteo, U., Nastasi, B., Albo, A., & Garcia, D.A. (2017). Energy contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to energy-environmental sustainability in urban areas at small scale. *Journal of Energies*, 10(2), 229. https://doi.org/10.3390/en10020229

Ebrahimi Qazvini, Z., Haji, A., & Mina, H. (2019). A fuzzy solution approach for supplier selection and order allocation in green supply chain considering location-routing problem. *Journal of Scientia Iranica*, 28(1), 446-464. https://doi.org/10.24200/sci.2019.50829.1885

Eghbali, H., Arkat, J., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2022). Sustainable supply chain network design for municipal solid waste management: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135211. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135211

Extance, A., & Pinchbeck, A. (2022). Moving from fossil fuels to renewable energy. *Royal Society of Chemistry (Education in Chemistry)*. https://edu.rsc.org/feature/moving-from-fossil-fuels-to-renewable-energy/4015752.article#commentsJump

Ferronato, N., Alarcon, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. (2021). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105234. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105234

Feyzi, S., Khanmohammadi, M., Abedinzadeh, N., & Aalipour, M. (2019). Multi-criteria decision analysis FANP based on GIS for siting municipal solid waste incineration power plant in the north of Iran. *Journal of Sustainable Cities and Society*, 47, 101513. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101513

González-Núñez, S., Guerras, L. S., & Martín, M. (2023). A multiscale analysis approach for the valorization of sludge and MSW via co-incineration. *Journal of Energy*, 263, 126081. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126081

Hamidizadeh, M.R. (2022). Nonlinear programming. 3th ed. Tehran: SAMT. [In Persian] ISBN: 978-964-459-666-7

Helal, M. A., Anderson, N., Wei, Y., & Thompson, M. (2023). A Review of biomass-to-bioenergy supply chain research using bibliometric analysis and visualization. *Journal of Energies*, 16(3), 1187. https://doi.org/10.3390/en16031187

Jeong, J.S., & Ramírez-Gómez, Á. (2018). Optimizing the location of a biomass plant with a fuzzy-decision-making trial and evaluation laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 182, 509-520. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.072

Kousar, S., Sangi, M.N., Kausar, N., Agarwal, P., Ozbilge, E., & Bulut, A. (2023). Optimizing transportation cost for biomass supply chain. *Journal of Thermal Science*. 27(1), 245-251. https://doi.org/10.2298/TSCI23S1245K

Liu, S., Papageorgiou, L.G., & Shah, N. (2019). Optimal design of low-cost supply chain networks on the benefits of new product formulations. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 139,106189. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106189

Liu, X., Tian, G., Fathollahi-Fard, A.M., & Mojtahedi M. (2020). Evaluation of ship's green degree using a novel hybrid approach combining group fuzzy entropy and cloud technique for the order of preference by similarity to the ideal solution theory. *Journal of Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(8), 493-512. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01798-7

Lu, Y., Ge, Y., Zhang, G., Abdulwahab, A., Salameh, A. A., Ali, H. E., & Le, B. N. (2023). Evaluation of waste management and energy saving for sustainable green building through analytic hierarchy process and artificial neural network model. *Journal of Chemosphere*, 318, 137708. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137708

Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. (2018). The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 812-821. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088

Momenitabar, M., Dehdari Ebrahimi, Z., Abdollahi, A., Helmi, W., Bengtson, K. & Ghasemi, P. (2023). An integrated machine learning and quantitative optimization method for designing sustainable bioethanol supply chain networks. *Decision Analytics Journal*, 7, 100236. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100236

Mousavi Ahranjani, P., Ghaderi, S.F., Azadeh, A., & Babazadeh, R. (2019). Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks. J*ournal of Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(23), 1-33. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01773-2

Piqueiro, H., Gomes, R., Santos, R., & de Sousa, J. P. (2023). Managing disruptions in a biomass supply chain: A decision support system based on simulation/optimization. *Journal of Sustainability*, 15(9), 7650. https://doi.org/10.3390/su15097650

Prado, A., Chiquier, S., Fajardy, M., & Mac Dowell, N., (2023). Assessing the impact of carbon dioxide removal on the power system. *Journal of iScience*, 26(4), 106303. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106303

Saghaei, M., Ghaderi, H., & Soleymani, H. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Journal of Energy*, 197, 117165. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117165

Shariat Hosseini, S. A. A., Bashi Shahabi, P., & Bashirnezhad, K. (2021). Evaluation of Biogas Production from Municipal Solid Waste Using

Continuous Anaerobic Fermentation Reactors: Case of City of Mashhad. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 7 (1) :87-130. [In Persian] http://epprjournal.ir/article-1-920-fa.html

Sharifi Barforooshi. S. (2017). Designing a waste to energy supply chain with conversion technology selection. Master's thesis, Babol Noshirvani University of Technology. [In Persian]

Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608-627. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049

Sun, J., Wang, H., & Cui, Z. (2023). Alleviating the bauxite maritime supply chain risks through resilient strategies: QFD-MCDM with intuitionistic fuzzy decision approach. *Journal of Sustainability*, 15(10), 8244. https://doi.org/10.3390/su15108244

Toba, A. L., Paudel, R., Lin, Y., Mendadhala, R. V., & Hartley, D. S. (2023). Integrated land suitability assessment for depots siting in a sustainable biomass supply chain. *Journal of Sensors*, 23(5), 2421. https://doi.org/10.3390/s23052421

Torabi, S.A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Journal of Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 193-214. https://doi.org/10.1016/j.fss. 2007.08.010

Wang, Z., & Wang, Z. (2023). Sustainable supply chain design for waste to biohydrogen. *Waste to Renewable Biohydrogen*, 211-227. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821675-0.00002-5

World Bank. (2000). Decision makers guide to municipal solid waste incineration. *World Bank: Washington DC.*

https://documents1.worldbank.org/curated/en/206371468740203078/pdf/multi-page.pdf

Yu, S., Sun, J., Shi, Y., Wang, Q., Wu, J., & Liu, J. (2021). Nano cellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products. *Journal of Environmental Science and Eco technology*, 5, 100077. https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100077

.

استناد به این مقاله: سلطانی، محمدرحیم؛ افشارکاظمی؛ محمدعلی؛ رادفر، رضا. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده در شرایط عدم قطعیت، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۵۲ (۱۳)، ۱۳۳-۱۵۶.

Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.