System Engineering and Productivity/ 2026/ Vol.6/ No.2/ 247-269

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2070392.1389

Design and Optimization of a Productivity System in a Brine Purification Unit of a Chlor-Alkali Complex Using the Circular Economy Approach and Material Flow Cost Accounting Method

Mousa Firouzi[1], Habib Aghajani[2,*], Parviz Mohammadzadeh[3], Esmaeil Fatehifar[4]

[1] Ph.D., Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran

[2] Associate Professor, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran

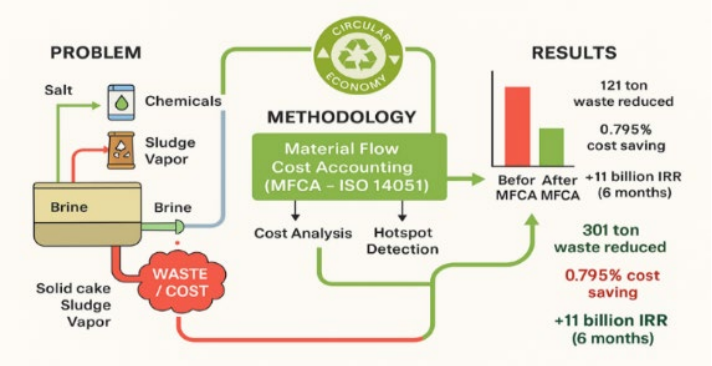
[3] Professor, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran

[4] Professor, Research Center for Optimization, Productivity and Sustainable Development, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

HIGHLIGHTS

- The method can simultaneously improve both financial and environmental productivity.
- Application of MFCA revealed hidden costs and negative by-products.
- The results provide a practical framework for expanding circular economy practices in similar industries.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 2 September 2025
Revised: 7 October 2025
Accepted: 25 October 2025
Available online: 25 October 2025
*Correspondence:
h.aghajani@tabrizu.ac.ir
How to cite this article:
Firouzi, M., Aghajani, H., Mohammadzadeh, P., & Fatehifar, E. (2026). Design and optimization of a productivity system in a brine purification unit of a chlor-alkali complex using the circular economy approach and material flow cost accounting method. *System Engineering and Productivity*, 6 (2), 247-269.

Keywords:
Material Flow Cost Accounting (MFCA)
Circular Economy
Green Productivity
Waste Reduction
Sustainable Development

ABSTRACT

One of the crucial factors influencing economic growth and sustainable development is the improvement of productivity in production factors. In today's world, scarcity of resources and the necessity of environmental preservation have led productivity approaches toward green productivity and the economy toward a circular model. Achieving circular economy goals requires appropriate methods and tools capable of evaluating the environmental and financial impacts of process improvements. Material Flow Cost Accounting (MFCA), as a standardized tool for assessing material and financial flows within companies, provides an opportunity to meet both economic and environmental objectives simultaneously. In this study, MFCA was implemented in the brine purification unit of a chlor-alkali complex to optimize its financial productivity system while integrating circular economy principles into the process. By analyzing material flows and associated costs, hidden losses related to negative by-products such as sludge and scale were identified, and improvement opportunities were highlighted. A comprehensive analysis before and after implementing MFCA-based improvements revealed a reduction of 121 tons in undesirable products and a 0.795% financial saving in waste costs. Consequently, the company's profit increased by approximately 11 billion IRR within six months (2022) due to cost reductions. These findings not only demonstrate the effectiveness of MFCA in waste minimization and system productivity enhancement but also emphasize its positive economic impact. The promising results of this research provide a practical framework for extending MFCA application across other industrial sectors, enabling data-driven decision-making for managers.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

In recent decades, green productivity (GP) has emerged as a strategy to simultaneously enhance productivity and environmental performance, promoting sustainable development by harmonizing economic growth with environmental protection. GP integrates suitable technologies and management techniques to produce environmentally friendly goods and services, boosting profitability while reducing ecological harm (Fallah et al., 2015). This aligns with the green economy, which improves human well-being and social equity without depleting resources for future generations (Gouvea et al., 2013). The green economy has driven policies toward clean technologies, renewable energy, green transportation, waste management, and sustainable agriculture.

Transitioning to a circular economy (CE) contrast with the linear economy's resource extraction, mass production, consumption, and waste disposal model. CE emphasizes recycling and reusing products and materials to minimize waste and preserve value (Sá et al., 2022; Millar et al., 2019; Gusmerotti et al., 2019). Material Flow Cost Accounting (MFCA), based on ISO 14051, 14052, and 14053 standards, serves as a key environmental management accounting tool. It quantifies material and energy flows and associated costs, identifying waste to enhance resource efficiency and support CE objectives.

This study focuses on implementing MFCA in the brine unit of a chlor-alkali complex, analyzing mass, financial, and process data over a six-month period in 2022. Data were collected from primary sources (interviews, surveys, on-site observations) and secondary sources (company records, financial reports, environmental performance data). The research identifies waste points, proposes improvements, and evaluates their impacts on waste reduction and productivity enhancement. Limitations include potential data inconsistencies, company reluctance to collaborate, and context-specific generalizability. Innovations include integrating economic perspectives into MFCA, developing a conceptual model for green financial productivity optimization, and proposing economic-management packages for profitability, financial productivity, and environmental performance.

2. Methodology

The circular economy counters the linear model's inefficiencies by promoting regenerative systems where materials are reused, reducing environmental degradation and resource depletion. MFCA links CE by quantifying waste costs and providing preventive strategies, enhancing cost management, competitiveness, and environmental protection (Sahu et al., 2021). MFCA's conceptual model categorizes products into positive (desired outputs) and negative (waste, emissions), evaluating economic and environmental inefficiencies. It allocates costs into four categories: material costs (MC), energy costs (EC), system costs (SC), and waste management costs (WC). Waste management prioritizes reduction, reuse, recycling, and disposal to minimize environmental impacts. Implementation follows a cyclical approach akin to Kaizen and Deming's PDCA cycle, combining top-down and bottom-up strategies (Christ & Burritt, 2016). Key steps include: (1) defining quantity centers (QCs) for input/output measurement; (2) data collection on material and energy flows with annual mass balance; and (3) cost calculation and evaluation, allocating MC, EC, SC, and WC. In this study, MFCA was applied to the brine unit, involving process description, mass balance, cost allocation, waste identification, and improvement proposals based on six-month data.

3. Results and Discussion

The brine unit in the chlor-alkali complex prepares saturated, purified brine through saturation, primary purification, and secondary purification stages. Raw salt (powder or chunks) is screened for impurities, mixed with recycled brine to reach 270 g/L concentration, then saturated to 300 g/L. Purification uses physical-chemical methods (filtration, microfiltration, pH adjustment with HCl) to reduce Ca and Mg ions below 20 ppb, followed by resin adsorption. Purified brine is sent for electrolysis. A conceptual model defined QC for MFCA analysis. Mass balance revealed total inputs of 142,783,211 kg over six months, with recycled brine (80.4%) and salt (10.9%) dominating. Positive outputs were mainly saturated brine, while negative products included solid cake (461,500 kg) and water vapor (21,235 kg). Overall, 99.648% converted to positive products, with 0.352% as waste—seemingly low but significant at ~500,000 kg. Cost balance identified wastes, with solid cake comprising over 90% of losses. Material allocation showed purified brine taking most recycled brine and salt, while wastes absorbed high shares of chemicals like sodium carbonate, barium chloride, and alpha-cellulose, indicating inefficiencies in purification. Total costs were dominated by materials (96.63%), followed by energy, system, and waste management. Negative products accounted for 3.2% of costs, equating to substantial financial loss given production scale. Improvements reduced mass waste by 0.085% (121 tons) and costs by 0.795% (>11 billion IRR savings) over six months, increasing positive product shares.

4. Conclusions

MFCA feasibility in recovering valuable ions from solid cake warrants lab-scale testing and industrial scaling for economic and environmental gains. Upgrading salt storage prevents quality loss and groundwater pollution. Enhancing measurement tools enables real-time mass balance monitoring. CE

principles suggest reusing vapor via heat recovery, repurposing solids as fertilizers/building materials, treating wastewater for reuse/bioenergy, and recycling resin wash water/resins. A hybrid MFCA-CE model is recommended, starting with MFCA for cost/waste reduction before CE integration. Extend MFCA with lifecycle assessments and environmental accounting for simultaneous financial-environmental optimization. Apply MFCA across the supply chain for overall efficiency. MFCA integration with CE enhances financial productivity and environmental performance, revealing waste points and enabling preventive measures. Six-month reductions in waste (121 tons) and costs (>11 billion IRR) underscore its potential for sustainability and competitiveness in similar industries.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Mousa Firouzi: Conceptual research model, Literature review and theoretical background, Data analysis, Statistical analysis draft, Drafting the manuscript, Preliminary review of the report, Research methodology development, Text revision; **Habib Aghajani:** Supervision, Text revision; **Parviz Mohamadzadeh:** Supervision, Text revision; **Esmaeil Fatehifar:** Supervision, Text revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Christ, K. L., & Burritt, R. L. (2016). ISO 14051: una nueva era para la aplicación e investigación sobre MFCA. Revista de Contabilidad-Spanish Accounting Review, 19(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.rcsar.2015.01.006

Gouvea, R., Kassicieh, S., & Montoya, M. J. (2013). Using the quadruple helix to design strategies for the green economy. Technological Forecasting and Social Change, 80(2), 221-230. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.05.003

Gusmerotti, N. M., Testa, F., Corsini, F., Pretner, G., & Iraldo, F. (2019). Drivers and approaches to the circular economy in manufacturing firms. Journal of Cleaner Production, 230, 314-327. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.044

Millar, N., McLaughlin, E., & Börger, T. (2019). The circular economy: swings and roundabouts? Ecological Economics, 158, 11-19. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.012

Sá, M. M., Oliveira-Silva, C., Cunha, M. P., Gonçalves, A., Diez, J., Méndez-Tovar, I., & Izquierdo, E. C. (2022). Integration of the circular economy paradigm in companies from the Northwest of the Iberian Peninsula. Sustainability, 14(13), 7940. https://doi.org/10.3390/su14137940

Sahu, A. K., Padhy, R. K., Das, D., & Gautam, A. (2021). Improving financial and environmental performance through MFCA: A SME case study. Journal of Cleaner Production, 279, 123751. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123751

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۵/ دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۲۴۷-۲۶۹

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2070392.1389

طراحی و بهینه‌سازی سیستم بهره‌وری در یک واحد خالص‌سازی آب نمک در مجتمع کلر آلکالی با رویکرد اقتصاد چرخشی و استفاده از روش هزینه‌یابی جریان مواد

موسی فیروزی[۱]، حبیب آقاجانی[۲،*]، پرویز محمدزاده[۳]، اسماعیل فاتحی‌فر[۴]

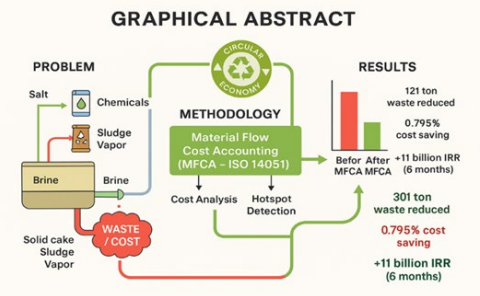
[۱] دکتری، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۲] دانشیار، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۳] استاد، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۴] استاد، مرکز تحقیقات بهینه‌سازی، بهره‌وری و توسعه پایدار، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- روش پیشنهادی می‌تواند بهره‌وری مالی و زیست‌محیطی را به طور همزمان بهبود دهد.
- پیاده‌سازی MFCA، نقاط پنهان هزینه و محصولات جانبی منفی را آشکار ساخت.
- نتایج این پژوهش الگویی عملی برای گسترش اقتصاد چرخشی در صنایع مشابه ارائه می‌کند.

چکیده

یکی از عوامل کلیدی در رشد اقتصادی و دستیابی به توسعه پایدار، ارتقای بهره‌وری عوامل تولید است. در شرایط کنونی جهان، محدودیت منابع و ضرورت استفاده بهینه از آن‌ها، همراه بااهمیت حفاظت از محیط‌زیست، موجب شده است که مفهوم بهره‌وری به سمت بهره‌وری سبز و اقتصاد به‌سوی اقتصاد چرخشی حرکت کند. تحقق اقتصاد چرخشی مستلزم به‌کارگیری ابزارها و روش‌هایی است که امکان ارزیابی همزمان اثرات زیست‌محیطی و مالی اصلاح فرآیندها را فراهم آورد. در این میان، هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) به‌عنوان ابزاری استانداردشده، قادر است جریان‌های مواد و مالی یک سازمان را مورد تحلیل قرار داده و با دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، از پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی پشتیبانی کند. در این پژوهش، با استقرار MFCA در واحد خالص‌سازی آب‌نمک در مجتمع کلر آلکالی و تکمیل چرخه اقتصاد چرخشی در فرآیندهای مرتبط، بهینه‌سازی سیستم بهره‌وری مالی این واحد موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور، جریان‌های مواد و هزینه‌های مربوط به بخش آب‌نمک شناسایی و نقاط پنهان مرتبط با محصولات جانبی نامطلوب (ازجمله جرم و هزینه‌های اضافی) آشکارسازی شد. تحلیل داده‌ها پیش و پس از اجرای اقدامات بهبود مبتنی بر MFCA نشان داد که اجرای این روش موجب کاهش ۱۲۱ تنی در تولید محصولات نامطلوب، صرفه‌جویی ۰/۷۹۵ درصدی در هزینه ضایعات و افزایش قابل‌توجه بهره‌وری سیستم گردید. علاوه بر این، در مدت شش ماه نخست سال ۱۴۰۱، کاهش هزینه‌ها منجر به افزایش سود شرکت به میزان حدود ۱۱ میلیارد ریال شد. یافته‌های این مطالعه، اثربخشی مثبت MFCA را در کاهش ضایعات، ارتقای بهره‌وری و بهبود عملکرد اقتصادی تأیید می‌کند. همچنین نتایج آن می‌تواند الگویی عملی برای تعمیم و گسترش این رویکرد در سایر صنایع فراهم سازد و امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را برای مدیران صنعتی تسهیل نماید.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

*نویسنده مسئول:

h.aghajani@tabrizu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA)

اقتصاد چرخشی

بهره‌وری سبز

کاهش پسماند

توسعه پایدار

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

یکی از اهداف اصلی کشورها دستیابی به توسعه پایدار از طریق رشد اقتصادی است. رشد اقتصادی می‌تواند از دو مسیر تحقق یابد: افزایش کمی عوامل تولید یا ارتقای کیفی آن‌ها. این رشد، هم با سرمایه‌گذاری و کشف منابع جدید امکان‌پذیر است و هم از طریق افزایش بهره‌وری عوامل تولید؛ اما رشد اقتصادی مبتنی بر بهره‌وری در مقابل رشد اقتصادی مبتنی بر افزایش کمی نهاده‌ها از پایداری و کیفیت بالاتری برخوردار است (National Productivity Organization of Iran, 2024).

لذا دستیابی به پیشرفت فراگیر و پایدار جز از طریق ارتقای بهره‌وری حاصل نمی‌شود. رشد اقتصادی مبتنی بر بهره‌وری، در پرتو توسعه فناوری، بهینه‌سازی فرآیندها و اصلاح ساختارها، ارزشمندتر و اثربخش‌تر از اتکا به افزایش سرمایه‌گذاری صرف است. چراکه بهره‌وری پایین موجب اتلاف منابع و کاهش درآمد، رفاه اجتماعی، نوآوری و توسعه فناوری می‌شود و حتی باوجود افزایش سرمایه‌گذاری، روند رشد اقتصادی را کند می‌سازد (Karimi Zarchi et al., 2023؛ Pouri, 2025؛ Kenshlow & Hosseini, 2024).

بر اساس تعریف سازمان ملی بهره‌وری ایران، بهره‌وری به معنای استفاده کارا و اثربخش از منابع تولید شامل سرمایه انسانی، سرمایه فیزیکی، سرمایه ناملموس، فناوری و نهاده‌های واسطه‌ای در راستای دستیابی به ستانده‌های بیشتر کمی و کیفی است (National Productivity Organization of Iran, 2022).

در مبحث بهره‌وری این اعتقاد وجود دارد که امکان افزایش مستمر بهره‌وری وجود دارد. ضمن این‌که برای بهره‌وری بالاتر باید ضایعات به هر شکلی که وجود دارد از قبیل ضایعات در مواد، ماشین‌آلات، زمان، نیروی انسانی، فضا و دیگر اشکال آن شناسایی و حذف شود و فرآیندهایی که موجب ایجاد ارزش‌افزوده نمی‌شود شناسایی و از چرخه تولید کنار گذاشته شود تا ارتقای بهره‌وری موجب کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در استفاده از منابع تولید و کاهش آثار سوء زیست‌محیطی شود و به بهینه‌سازی در سیستم منجر گردد (Kashanian Monfared, 2025؛ Alavi et al., 2024؛ Ghadami Gholsheikh et al., 2025).

در دهه‌های اخیر، با توجه به اهمیت روزافزون محیط‌زیست و ارتباط آن با رشد و توسعه، مفهوم بهره‌وری سبز[1] مطرح شده است. بهره‌وری سبز (GP) راهبردی برای ارتقای هم‌زمان بهره‌وری و عملکرد زیست‌محیطی است که منجر به بهبود مستمر کیفیت زندگی انسان می‌شود. استراتژی پویا برای هماهنگ‌سازی رشد اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست برای توسعه پایدار است که افزایش بهره‌وری توأم با حفظ محیط‌زیست را به دنبال دارد. در بهره‌وری سبز علاوه بر بهره‌وری، استفاده مطلوب از محیط‌زیست و منابع نیز موردتوجه قرار می‌گیرد و نوعی استراتژی برای ارتقای بهره‌وری از محیط‌زیست برای توسعه کلان اقتصادی- اجتماعی می‌باشد (Abedi et al., 2019). بهره‌وری سبز، به‌کارگیری فناوری‌های مناسب و فنون مدیریتی صحیح در راستای تولید کالاها و خدمات سازگار با محیط‌زیست و در جهت افزایش بهره‌وری و سوددهی است و از دو اصل بهره‌وری و محیط‌زیست حاصل‌شده است (Fallah et al, 2015). این رویکرد، ترکیبی از ابزارها، فناوری‌ها و روش‌های مدیریتی است که ضمن کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، موجب افزایش سودآوری بنگاه‌ها می‌شود.

اقتصاد سبز نیز در همین راستا تعریف می‌شود (Eskandari Sani & Sofalgar, 2023)؛ اقتصادی که سلامت انسان و عدالت اجتماعی را ارتقا داده و درعین‌حال مانع به خطر افتادن منابع و محیط‌زیست برای نسل‌های آینده می‌شود. بر اساس گزارش برنامه محیط‌زیست ملل متحد در سال ۲۰۱۱، اقتصاد سبز رویکردی است که ضمن کاهش معنادار مخاطرات زیست‌محیطی و کمبودهای اکولوژیک، رفاه انسانی و برابری اجتماعی را تقویت می‌کند. به همین دلیل، اقتصاد سبز طی دهه‌های اخیر به یکی از ارکان گفتمان توسعه جهانی بدل شده و بسیاری از سیاست‌های کلان به سمت فناوری‌های پاک، انرژی‌های تجدید پذیر، حمل‌ونقل سبز، مدیریت پسماند و کشاورزی پایدار سوق یافته‌اند (Dalal-Clayton, 2013؛ Gouvea et al., 2013). استقرار اقتصاد سبز ناشی از بهره‌وری سبز، اقتصاددانان را به طرح جدی اقتصاد چرخشی با عبور از اقتصاد خطی نموده است.

[1] Green Productivity (GP)

اقتصاد چرخشی در برابر اقتصاد خطی که مبتنی بر برداشت منابع، تولید انبوه، مصرف و سپس بازگشت پسماند به طبیعت است، قرار دارد. در اقتصاد چرخشی، محصولات و مواد تا حد امکان در چرخه تولید حفظ‌شده و پسماندها به حداقل می‌رسند. به‌بیان‌دیگر، ایده اصلی در این رویکرد بر بازیافت و بازچرخانی محصولات و منابع استوار است (Sá et al., 2022). باوجود مزایای شناخته‌شده، اقتصاد چرخشی هنوز در مرحله نوپایی قرار دارد و برخی پژوهشگران همچون میلار و همکاران (Millar et al., 2019) به نبود انسجام در نحوه اجرای آن اشاره کرده‌اند. در همین راستا، ابزارها و روش‌های اجرایی مناسب می‌توانند زمینه اعتماد بنگاه‌ها و سرمایه‌گذاران را برای حرکت به سمت این مدل اقتصادی فراهم کنند (Gusmerotti et al., 2019؛ Sauvé et al., 2016).

یکی از ابزارهای کلیدی در این حوزه که به تحقق اقتصاد چرخشی کمک می‌کند، هزینه‌یابی جریان مواد[1] است. MFCA به‌عنوان یک ابزار حسابداری مدیریت زیست‌محیطی[2]، بر اساس استانداردهای بین‌المللی ISO 14051، ۱۴۰۵۲ و ۱۴۰۵۳ طراحی‌شده و برای ارزیابی جریان‌های مواد و هزینه‌های مالی مرتبط در سازمان‌ها به کار می‌رود. این ابزار با شناسایی و کمی سازی هزینه‌های ناشی از ضایعات مواد و انرژی، امکان ارائه راهکارهای پیشگیرانه برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌سازد (Lieder & Rashid, 2016)؛ بنابراین، MFCA می‌تواند با بهینه‌سازی فرآیندها و سیستم از طریق بهبود بهره‌وری منابع و کاهش ضایعات، گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار[3] باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر واحد آب‌نمک در یک مجتمع کلرآلکالی، به تحلیل و استقرار MFCA می‌پردازد. به دلیل ارائه گزارش‌های شش‌ماهه در شرکت موردمطالعه، داده‌های جرمی، مالی و فرآیندی طی یک دوره شش‌ماهه در سال ۱۴۰۱ با تکیه بر منابع داده اولیه شامل؛ مصاحبه، نظرسنجی و مشاهدات در محل شرکت و منابع داده ثانویه شامل؛ سوابق شرکت، گزارش‌های مالی و داده‌های عملکرد زیست‌محیطی شرکت، جمع‌آوری و بر اساس این ابزار مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس با شناسایی نقاط اتلاف و علل آن‌ها، راهکارهای بهبود ارائه و اثرات آن‌ها بر کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری سنجیده شد. نتایج این مطالعه می‌تواند الگویی عملی برای بهره‌گیری از MFCA در سایر صنایع و گامی در جهت تلفیق بهره‌وری مالی و زیست‌محیطی در مسیر توسعه پایدار باشد. هرچند ممکن است با توجه به زمینه و تولیدات خاص واحد موردمطالعه، نتایج و یافته‌های پژوهش به‌طور مستقیم به برخی شرکت‌ها یا سازمان‌ها قابل‌تعمیم نباشد. ضمن اینکه؛ عدم تمایل شرکت‌ها به همکاری و همچنین عدم توجیه کامل آن‌ها نسبت به مزایای حاصل از بررسی و استقرار هزینه‌یابی جریان مواد در شرکت نیز می‌تواند از محدودیت‌های این تحقیق باشد. همچنین یافته‌های این مطالعه با دقیق و کامل بودن داده‌های جمع‌آوری‌شده از سوابق و گزارش‌های شرکت رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین داده‌های متناقض، ناقص و غیرشفاف ممکن است بر استحکام تجزیه‌وتحلیل و قابلیت اطمینان نتیجه‌گیری‌های به‌دست‌آمده تأثیر منفی داشته باشد. البته با درک این موضوع از ابتدای مطالعه و تحقیق، نهایت دقت در جمع‌آوری داده‌ها و استفاده از گزارش‌ها به‌عمل‌آمده است.

از برجسته‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر، نگاه تلفیقی و چندبعدی به هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) از منظر مفاهیم اقتصادی است. درحالی‌که تاکنون سیستم MFCA در اغلب مطالعات داخلی و خارجی به‌عنوان یک ابزار حسابداری برای ردیابی مواد، کاهش ضایعات و ارتقاء بهره‌وری فرایندهای صنعتی مورداستفاده قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شده است تا چارچوب‌های نظری و تحلیلی علم اقتصاد نیز به‌صورت نظام‌مند در این سیستم تلفیق شود. نکته حائز اهمیت دیگر این است که؛ این نگرش نوآورانه در یک بنگاه صنعتی فعال در حوزه صنایع شیمیایی پیاده‌سازی و ارزیابی‌شده است. حوزه‌ای که تاکنون عمدتاً تمرکز بر بهینه‌سازی تکنیکی و فنی داشته و ابعاد اقتصادی همراه با محیط‌زیست در فرآیندهای آن کمتر موردتوجه قرار گرفته است. همچنین می‌توان به طراحی یک مدل مفهومی نوین برای بهینه‌سازی بهره‌وری مالی سبز در بنگاه‌های اقتصادی به‌عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های این تحقیق اشاره کرد. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های واقعی در یک واحد تولیدی، امکان تحلیل دقیق‌تر فرآیندها و تصمیم‌گیری‌های اقتصادی

[1] Material Flow Cost Accounting (MFCA)
[2] Environmental Management Accounting (EMA)
[3] Sustainable Development Goals (SDGs)

هوشمندانه‌تر را فراهم می‌سازد. پس از استقرار هزینه‌یابی جریان مواد MFCA، ارائه بسته پیشنهادی اقتصادی و مدیریتی به‌منظور افزایش سودآوری، افزایش بهره‌وری مالی و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی بنگاه به‌عنوان معیارهایی برای بهینه‌سازی سیستم شرکت موردمطالعه از دیگر وجوه نوآوری و کاربردی این مطالعه به شمار می‌رود.

۲- بررسی ادبیات

با وقوع انقلاب صنعتی در قرن هجدهم و نوزدهم، بهره‌برداری گسترده از منابع طبیعی برای تولید انبوه افزایش یافت. استخراج زغال‌سنگ و فلزات از معادن و بهره‌برداری از جنگل‌ها برای چوب، بخشی از این روند بود. تولید انبوه کالا در راستای رشد اقتصادی، مصرف گسترده را به همراه داشت که پیامدهای منفی جدی برای محیط‌زیست ایجاد کرد. در آن زمان، ظرفیت بالاتر طبیعت برای جذب پسماندها باعث شد دغدغه‌های زیست‌محیطی چندان موردتوجه اندیشمندان و سیاست‌گذاران قرار نگیرد. چنین الگویی از اقتصاد که مبتنی بر برداشت منابع، تولید انبوه، مصرف و رهاسازی پسماند است، به‌عنوان اقتصاد خطی شناخته شد (Elyasi et al., 2019). اقتصاد خطی، به دلیل اتکای یک‌سویه به منابع و تولید پسماند، در درازمدت تأمین منابع را با چالش مواجه می‌کند. اقتصاد چرخشی در مقابل اقتصاد خطی قرار دارد که در آن مواد و محصولات بازیافت شده و مجدداً به چرخه تولید وارد می‌شوند. بدین ترتیب، ارزش محصولات تا حد امکان حفظ‌شده و مصرف مواد و تولید پسماند کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که محصولات تا پایان چرخه حیات خود بارها مورداستفاده مجدد قرار می‌گیرند (Mozafari & Savari, 2025؛ Sá et al., 2022).

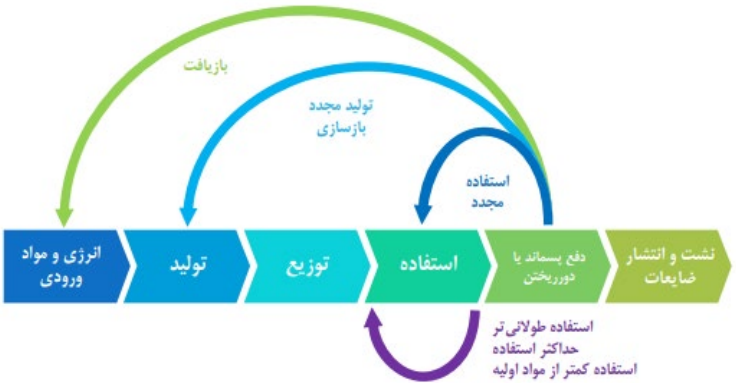
در شکل **۱** مقایسه اقتصاد خطی و چرخشی نشان داده شده است. اقتصاد چرخشی، درواقع یک سیستم صنعتی است که عمداً به‌صورت تجدیدپذیر و قابل احیا طراحی‌شده و در آن گرایش به استفاده از انرژی تجدیدپذیر و عدم استفاده از مواد شیمیایی سمی وجود دارد (Elyasi et al., 2019). اقتصاد چرخشی اهدافی همچون حفظ و احیای منابع طبیعی، حفاظت از محیط‌زیست و کاهش پیامدهای منفی توسعه اقتصادی را دنبال می‌کند (Lehmann et al., 2014؛ Safaei et al., 2025). این مفهوم که ریشه‌های اولیه آن به دهه ۱۹۷۰ بازمی‌گردد، پس از نشست سالانه مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۴ اهمیت ویژه‌ای یافت (Ahangar Partovi et al., 2023). امروزه، در مواجهه با چالش‌هایی چون رقابت بازارها، تنوع محصولات، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع طبیعی، حرکت از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی اجتناب‌ناپذیر است (Davoudabadi et al., 2017). در اقتصاد چرخشی، طراحی محصولات به‌گونه‌ای است که امکان استفاده مجدد، بازتولید و بازیافت فراهم شود. این امر موجب تغییر نگرش نسبت به مصرف‌کننده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که نقش او از مصرف‌کننده به استفاده‌کننده تغییریافته و محصول پس از پایان عمر، وارد چرخه مصرف مجدد می‌شود (Qaderpanah, 2021). به همین دلیل، دوام و کارایی محصول در این الگو اهمیت ویژه‌ای دارد. در شکل **۲** مفهوم اقتصاد چرخشی نمایش داده شده است. در این چارچوب، محصولات مصرفی اغلب از مواد بیولوژیکی غیررسمی تولید می‌شوند که قابلیت بازگشت امن به محیط‌زیست دارند. همچنین محصولاتی مانند موتورها یا رایانه‌ها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که قابلیت استفاده مجدد، ارتقا یا به‌روزرسانی داشته باشند. در شکل **۳** چرخه بیولوژیکی و چرخه فنی اقتصاد چرخشی نشان داده شده است. هزینه‌یابی جریان مواد یکی از روش‌های نوین برای افزایش بهره‌وری مالی و زیست‌محیطی است. این روش با مدیریت هزینه‌ها، کاهش ضایعات و ارتقای رقابت‌پذیری سازمان‌ها، به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای مدیران صنایع مطرح شده است و با کمی‌سازی جریان‌های مواد و انرژی در واحدهای فیزیکی و پولی، امکان ارزیابی دقیق منابع را فراهم می‌سازد (Schaltegger & Zvezdov, 2015). اهداف اصلی MFCA عبارت‌اند از:

۱) افزایش شفافیت در جریان‌های مواد، انرژی و هزینه‌های زیست‌محیطی؛
۲) پشتیبانی از تصمیمات سازمانی در حوزه‌هایی مانند طراحی محصول، کنترل کیفیت و مدیریت زنجیره‌تأمین؛
۳) بهبود تبادل اطلاعات درون‌سازمانی درباره کاربری مواد و انرژی؛

۴) کاهش ضایعات و بهبود بهره‌وری تجاری از طریق شناسایی ناکارآمدی‌ها.

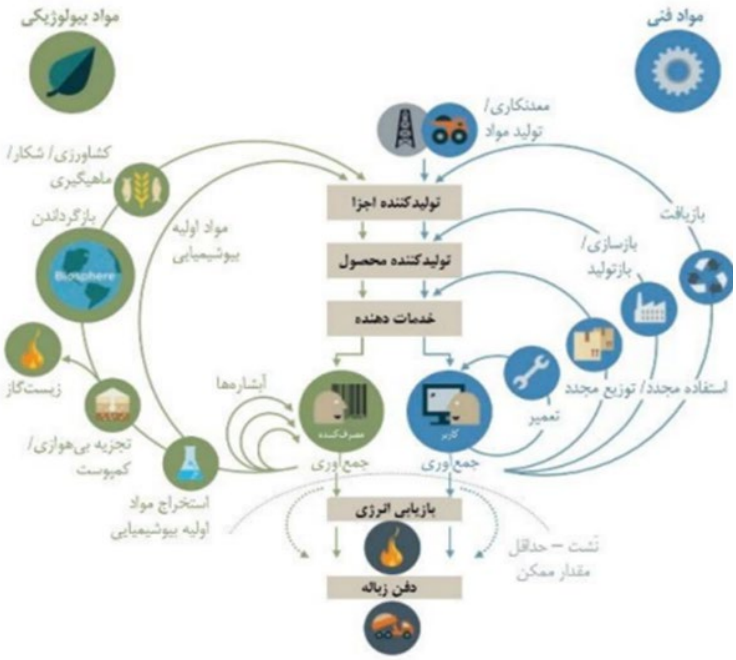
شکل ۱. مقایسه اقتصاد خطی و اقتصاد چرخشی (Elyasi et al., 2019).

Figure 1. Comparison of linear economy and circular economy (Elyasi et al., 2019).



شکل ۲. مفهوم اقتصاد چرخشی (Qaderpanah, 2021).

Figure 2. The concept of the circular economy.



شکل ۳. سیستم کلی اقتصاد چرخشی شامل چرخه بیولوژیکی و چرخه فنی (Elyasi et al., 2019).

Figure 3. The overall circular economy system including the biological cycle and the technical cycle.

MFCA هزینه‌ها را در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی می‌کند:

۱) هزینه مواد؛
۲) هزینه انرژی؛
۳) هزینه سیستم؛
۴) مدیریت و تصفیه پسماند.

با محاسبه و شناسایی هزینه‌های هدررفته در محصولات منفی (پسماندها و ضایعات)، سازمان‌ها می‌توانند منابع اتلاف را شناسایی و راهکارهای اصلاحی ارائه کنند. این رویکرد، ضمن کاهش هزینه‌های مرتبط با مدیریت پسماند و تصفیه، موجب تخصیص دقیق‌تر هزینه‌ها و قیمت‌گذاری واقعی محصولات می‌شود. همچنین MFCA با ایجاد انگیزه برای نوآوری و استفاده از فناوری‌های جدید، موجب بهبود کنترل مدیریتی و بهره‌گیری کارآمدتر از منابع می‌شود (Schaltegger & Zvezdov, 2015). به‌طور خلاصه، MFCA ابزاری است که ارتباط میان اقتصاد و محیط‌زیست را تقویت می‌کند و با کاهش هزینه‌ها، حفاظت از محیط‌زیست و افزایش سودآوری، نقش مهمی در تحقق اهداف اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار دارد.

مفهوم هزینه‌یابی جریان مواد در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان نتیجه‌ای از پروژه‌های مدیریت زیست‌محیطی در آلمان معرفی شد و در دهه ۲۰۰۰ با حمایت وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت ژاپن توسعه یافت (Kokubu & Kitada, 2015; Wagner, 2015). در ادامه، ژاپن با قرار دادن این رویکرد در چارچوب استانداردهای ایزو ۱۴۰۰۰، زمینه انتشار آن در سطح بین‌المللی را فراهم کرد و ایزو ۱۴۰۵۱ (MFCA؛ چارچوب عمومی) را در سال ۲۰۱۱، ایزو ۱۴۰۵۲ (MFCA؛ راهنمای پیاده‌سازی عملی در زنجیره‌تأمین) را در سال ۲۰۱۷، ایزو ۱۴۰۵۳ (MFCA؛ راهنمای پیاده‌سازی مرحله‌ای در سازمان‌ها) را در سال ۲۰۲۱ منتشر کرد. از آن زمان، MFCA به‌ویژه در کشورهای آسیایی گسترش یافته است و تجربیات متعددی از اجرای موفق آن در صنایع مختلف گزارش شده است (Zeng et al., 2021؛Nakajima, 2020).

در ایران؛ استاندارد هزینه-یابی جریان مواد بر اساس استاندارد بین‌المللی ISO 14051 تحت عنوان مدیریت زیست‌محیطی-حسابداری هزینه جریان مواد- چارچوب عمومی تدوین گردیده است.

مطالعات متعددی بر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی MFCA تأکید کرده‌اند. برای مثال، وانگ و همکاران (Wang et al., 2010) در پژوهشی بر صنایع چین نشان دادند که استفاده از این روش می‌تواند هم‌زمان منجر به بهبود عملکرد اقتصادی بنگاه‌ها و ارتقای کارایی زیست‌محیطی در سطح جامعه شود.

کوکوبو و کیتادا (Kokubu & Kitada, 2015) نیز بر نقش MFCA به‌عنوان یک ابزار حیاتی مدیریت مالی و زیست‌محیطی تأکید کرده و آن را مکمل سایر رویکردهای کارایی دانسته‌اند. بررسی‌های موردی در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که سازمان‌ها توانسته‌اند با اجرای MFCA، ضایعات خود را به‌طور چشمگیری کاهش دهند. به‌عنوان نمونه، شرکت نیکو دنکو در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ توانست محصولات منفی خود را از ۳۲ درصد به ۱۰ درصد برساند و شرکت شیمیایی سکیسوی در سال ۲۰۰۷ با اجرای این روش، ضایعات خود را ۱۱ درصد کاهش داد (Jasch, 2009). نتایج مشابهی در شرکت صنایع شیمیایی سومیتومو نیز مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که اجرای MFCA منجر به کاهش قابل‌توجه مصرف محلول‌های شیمیایی و حجم فاضلاب گردید (Nishitani et al., 2022).

در ایران نیز تجربه‌های موفقی از به‌کارگیری این ابزار گزارش شده است. نخستین اجرای رسمی MFCA در واحد آمین شرکت پالایش نفت تبریز انجام شد و نتایج آن نشان داد که شناسایی و کمی‌سازی ضایعات می‌تواند زمینه بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را فراهم سازد (Fatehifar, 2016). در مطالعه‌ای دیگر در صنعت پتروشیمی، MFCA با شناسایی اتلاف مواد و هزینه‌های مربوطه توانست راهکارهایی برای کاهش ضایعات پیشنهاد کند؛ به‌طوری‌که کاهش ۴۰ درصدی ضایعات کک و افزایش ۱۰ درصدی تولید اتیلن به‌عنوان نتایج پیش‌بینی‌شده گزارش شد (Fatehifar et al., 2023).

دامنه کاربرد MFCA طی سال‌های اخیر فراتر از صنایع شیمیایی گسترش یافته است. به‌عنوان نمونه، کریست و بوریت (Christ & Burritt, 2017) آن را در صنعت رستوران‌داری به کار گرفتند و نشان دادند که این روش می‌تواند ضایعات مواد غذایی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین پاولیوک (Pauliuk, 2018) داشبوردی از شاخص‌های اقتصاد چرخشی را معرفی کرد

که بر پایه MFCA و LCA طراحی‌شده بود. در صنعت کاغذسازی چین نیز لی و همکاران (Li et al., 2019) این ابزار را برای تحلیل ارزش منابع به کار بردند و زو و همکاران (Zou et al., 2019) با تلفیق آن با LCA، مدلی چندبعدی از حسابداری مدیریت زیست‌محیطی ارائه کردند.

افزون بر این، مطالعاتی در حوزه‌های متنوع ازجمله تولید لاتکس در سریلانکا (Dunuwil et al., 2020)، تولید آب‌میوه در آلمان (May & Günther, 2020), مدیریت آب در آفریقای جنوبی (Fakoya & & Imuezerua, 2021) و زنجیره‌تأمین سبز در ژاپن (Higashida, 2020) انجام شده‌اند که همگی بر قابلیت MFCA در کاهش هزینه‌ها و ارتقای کارایی زیست‌محیطی تأکید دارند.به‌موازات این موارد، پژوهش‌های متعددی بر استفاده از MFCA به‌عنوان ابزاری در انتخاب فناوری‌های بهینه و ارتقای عملکرد مالی تأکید کرده‌اند. برای مثال، هو و همکاران (Ho et al., 2021) آن را در انتخاب فناوری‌های تصفیه فاضلاب به کار گرفتند و ساهو و همکاران (Sahu et al., 2021) در صنعت فولاد هند نشان دادند که اجرای MFCA می‌تواند بازده سرمایه‌گذاری را نزدیک به ۳۰ درصد افزایش دهد. همچنین والز و گونتر (Walz & Guenther, 2021) با تحلیل فرا مطالعه‌ای ۷۳ تجربه موردی، تصویری جامع از دستاوردهای این روش ارائه کردند. در پژوهشی دیگر، نیشیتانی و همکاران (Nishitani et al., 2022) با استفاده از داده‌های شرکت‌های ژاپنی، روابط میان MFCA، عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی را بررسی و تأیید کردند. درنهایت، سودکم‌خم و همکاران (Sodkomkham et al., 2024) با ادغام MFCA، اینترنت اشیا و مدیریت ناب نشان دادند که این ترکیب می‌تواند در صنعت نوشیدنی به کاهش مصرف آب و هزینه‌ها منجر شود.

به‌طورکلی، مروری بر ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که MFCA ابزاری کارآمد برای پیوند میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است و شواهد تجربی متعددی، چه در صنایع تولیدی و چه در خدمات، کارایی آن را تأیید کرده‌اند. این نتایج مبنای نظری مناسبی برای توسعه مطالعات آینده و تعمیم کاربرد MFCA در حوزه‌های گوناگون صنعتی و خدماتی فراهم می‌کند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

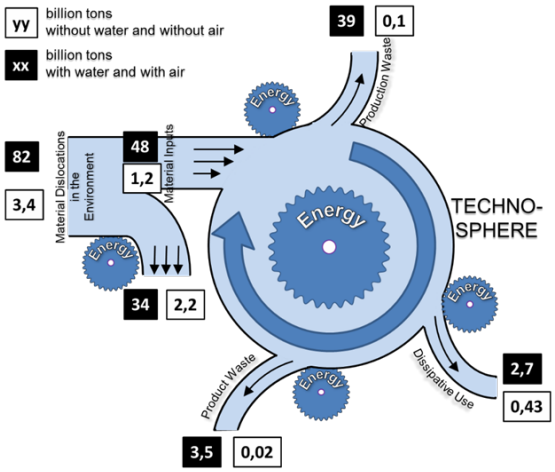
۳-۱- ارتباط اقتصاد چرخشی و MFCA

کاهش و بازیافت یا استفاده مجدد از ضایعات در فرآیند تولید، هدف اصلی و آرمانی اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود. استقرار اقتصاد چرخشی مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجهی برای شرکت‌ها و بنگاه‌های اقتصادی به همراه دارد. عملیاتی‌سازی این الگو در فرآیندهای تولیدی نیازمند ابزارهایی است که بتوانند اتلاف منابع را به حداقل رسانده و بهره‌وری را افزایش دهند. در این میان، هزینه‌یابی جریان مواد به‌عنوان روشی نوآورانه مطرح است که با کمی‌سازی هزینه‌های ناشی از ضایعات مواد و انرژی، تصویری جامع از فرصت‌های کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری در اختیار سازمان قرار می‌دهد (Sahu et al., 2021; Lieder & Rashid, 2016).

MFCA ضمن شناسایی هزینه‌های تحمیل‌شده ناشی از اتلاف منابع، راهبردهایی برای پیشگیری از بروز این هزینه‌ها ارائه می‌دهد و درنتیجه به‌عنوان ابزاری پیشگیرانه برای حمایت از اقتصاد چرخشی عمل می‌کند. این رویکرد نه‌تنها به بهبود مدیریت هزینه‌ها و ارتقای رقابت‌پذیری شرکت‌ها کمک می‌کند، بلکه اثرات زیست‌محیطی منفی تولید را نیز کاهش می‌دهد. بدین ترتیب، MFCA ابزاری ارزشمند مدیریتی، اقتصادی و مالی برای مدیران صنعتی در سطح راهبردی و عملیاتی به شمار می‌آید (Hejazi, 2025; Khalili et al., 2025).

۳-۲- مدل مفهومی MFCA

بررسی جریان مواد در سازمان‌ها نشان می‌دهد که مقدار قابل‌توجهی از منابع در فرآیند تولید به ضایعات تبدیل می‌شود. اشمیت-بلیک (Schmidt-Bleek, 1994) تخمین زده است که حجم ضایعات تولیدی (به‌جز آب‌وهوا) ناشی از مصرف و دفع پراکنده محصولات، حدود یک‌چهارم کل منابع را شامل می‌شود. این موضوع یکی از دلایل اصلی حرکت به سمت تولید پاک و بهبود بهره‌وری است (Schmidt-Bleek, 1994؛ Mello Santos et al., 2022). در شکل ۴ جریان مواد در فرآیندهای رایج تولید در آلمان نمایش داده شده است.



شکل ۴. نمودار جریان مواد در فرآیندهای رایج آلمان (Schmidt-Bleek, 1994).

Figure 4. Material flow diagram in common German processes (Schmidt-Bleek, 1994).

MFCA به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی حسابداری مدیریت زیست‌محیطی، امکان تخمین ارزش واقعی محصولات و ضایعات را فراهم می‌آورد. در این رویکرد، محصولات به دودسته تقسیم می‌شوند: محصولات مثبت که همان محصولات اصلی و موردنیاز هستند و محصولات منفی که شامل ضایعات، آلاینده‌ها و پسماندها می‌شوند (Guenther et al., 2015). ویژگی اساسی MFCA، ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی است که موجب شفاف‌سازی ناکارآمدی‌ها در فرآیندهای تولیدی می‌شود.

استاندارد ایزو ۱۴۰۵۱ به‌عنوان چارچوب عمومی MFCA، بر شناسایی ناکارآمدی‌های سیستم در ابعاد فیزیکی و مالی تأکید دارد. در این چارچوب، چهار نوع هزینه در نظر گرفته می‌شود: هزینه مواد (MC)، هزینه انرژی (EC)، هزینه سیستم (SC) و هزینه مدیریت پسماند (WC) (Strobel & Redmann, 2002؛ Sulong et al., 2015) در شکل **۵** این اجزا به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند.

۳-۳- مدیریت پسماند

مدیریت پسماند شامل راهبردهایی همچون دفع، بازیافت، استفاده مجدد و کاهش ضایعات است. بر اساس اصول مهندسی محیط‌زیست، دفع پسماند بیشترین آثار مخرب را بر محیط‌زیست دارد، درحالی‌که بازیافت و استفاده مجدد آثار زیست‌محیطی نسبتاً کمتری ایجاد می‌کنند (Wang et al., 2021; Kousha & Safarzadeh, 2024).

شکل **۶** اولویت کاهش پسماند را بر اساس چارچوب MFCA نشان می‌دهد. MFCA با تمرکز بر کاهش هم‌زمان هزینه‌ها و پسماندها از طریق بهینه‌سازی فرآیندها و استفاده کارآمدتر از منابع، راهکاری عملی برای تحقق اهداف مدیریت پسماند و توسعه پایدار ارائه می‌دهد.

۳-۴- مراحل پیاده‌سازی MFCA

اجرای MFCA مشابه بسیاری از رویکردهای بهبود بهره‌وری، می‌تواند از بالا به پایین (تصمیم مدیریت عالی) یا از پایین به بالا (ابتکار کارکنان و واحدهای عملیاتی) آغاز شود. بااین‌حال، تجربه نشان داده است که تشخیص نیاز به اجرای این روش در سطح مدیریت عالی، برای موفقیت ضروری است؛ بنابراین، MFCA ترکیبی از هر دو رویکرد را به کار می‌گیرد (Christ & Burritt, 2016).

ماهیت چرخه‌ای این روش مشابه فلسفه کایزن و چرخه دمینگ (PDCA) است. در این چارچوب، تنها محاسبه هزینه‌های مواد کافی نیست و لازم است تمامی هزینه‌های مرتبط با پسماند شامل هزینه مواد، انرژی، سیستم (نیروی کار، استهلاک و ...) و مدیریت پسماند به‌طور جامع در نظر گرفته شود. شکل **۷** نحوه عملکرد چرخه بهبود مستمر در MFCA را نشان می‌دهد. فرآیند پیاده‌سازی MFCA معمولاً شامل سه‌گام اصلی است:

۱) تعیین مراکز کمی: شناسایی نقاطی که داده‌های ورودی و خروجی باید اندازه‌گیری شوند.

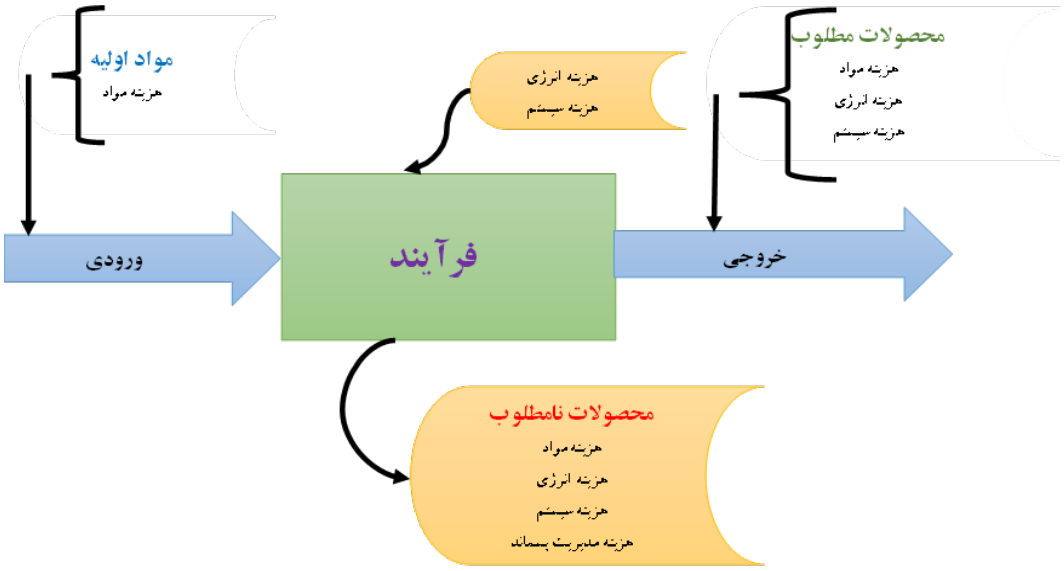
۲) جمع‌آوری داده‌ها: گردآوری اطلاعات مربوط به جریان مواد و انرژی و انجام تراز جرم سالانه.

۳) محاسبه و ارزیابی هزینه‌ها: تخصیص هزینه‌های مواد، انرژی، سیستم و مدیریت پسماند بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده (Dierkes & Siepelmeyer, 2019؛ Dekamin & Barmaki, 2019).

برای اجرای این گام‌ها، از روابط ریاضی استفاده می‌شود. معادله ۱ تراز جرم سالانه مرکز کمی و معادله ۲ هزینه کل همان مرکز را نشان می‌دهد:

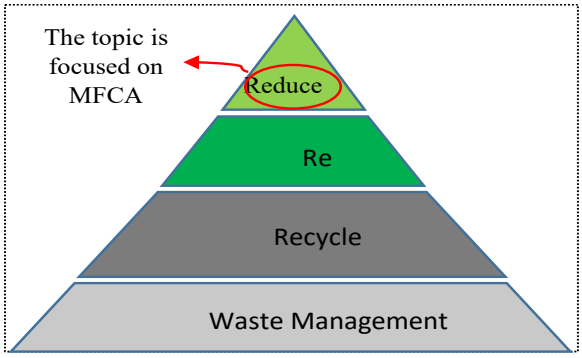
$$\sum M_{p_i.w_i(in)} = \sum_{i=1}^{p} M_{p_i(in)} + \sum_{i=1}^{w} M_{w_i(in)} \quad (۱)$$

$$Cost_i^{PC} = Cost_i^{MAT} + Cost_i^{ENGY} + Cost_i^{SYS} + Cost_i^{WST} \quad (۲)$$



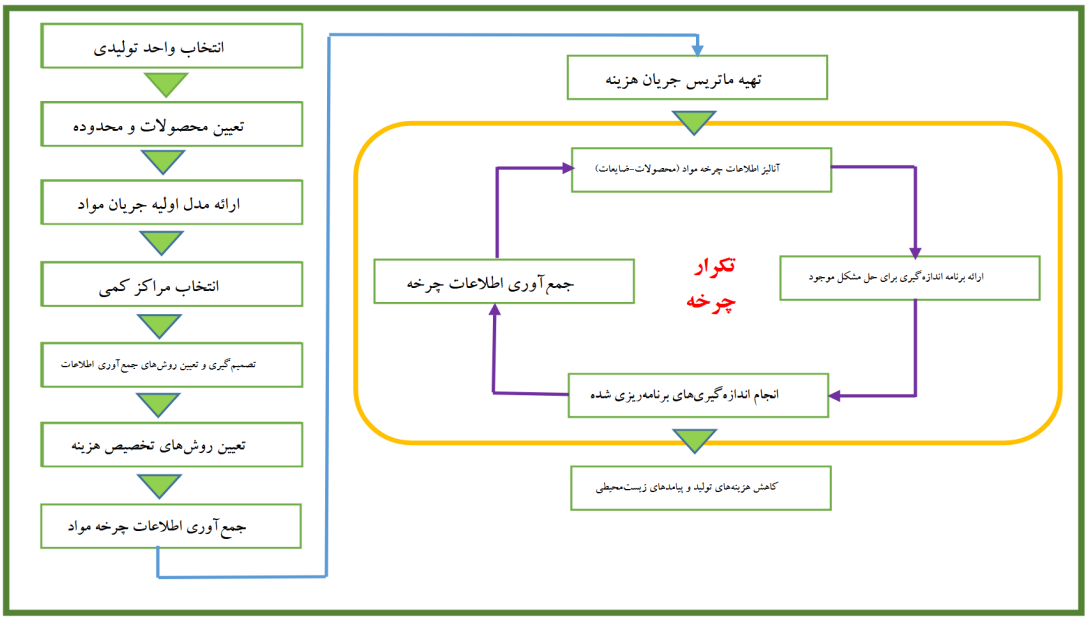
شکل ۵. اجزای اصلی هزینه‌یابی جریان مواد (Strobel & Redmann, 2002).

Figure 5. Main components of material flow costing (Strobel & Redmann, 2002).



شکل ۶. اولویت کاهش تولید ضایعات در چارچوب MFCA (Fatehifar et al., 2023).

Figure 6. Priority for waste reduction in the framework MFCA (Fatehifar et al., 2023).



شکل ۷. مکانیسم بهبود مستمر در MFCA (Christ & Burritt, 2016).

Figure 7. Continuous improvement mechanism in MFCA (Christ & Burritt, 2016).

در معادله ۱، $M_{p_i.w_i(in)}$ میزان جرم ماده اولیه ورودی p در فرآیند i ، $M_{p_i(in)}$ میزان جرم محصولات تولیدی مثبت p در فرآیند i و $M_{w_i(in)}$ میزان جرم محصولات تولیدی منفی p در فرآیند i می‌باشد.

در معادله ۲، $Cost_i^{PC}$ هزینه کل فرایند i، $Cost_i^{MAT}$ هزینه مواد اولیه برای فرایند i، $Cost_i^{ENGY}$ هزینه انرژی فرایند i و $Cost_i^{SYS}$ هزینه سیستم فرایند i و $Cost_i^{WST}$ هزینه مدیریت پسماند فرایند i می‌باشند که؛ به ترتیب از معادلات ۳ الی ۶ محاسبه می‌شوند:

$$Cost_i^{MAT} = \sum_{m=1}^{M} Cost_{i.m} M_{i.m} \quad (۳)$$

$$Cost_i^{ENGY} = \sum_{e=1}^{E} Cost_{i.e} E_{i.e} \quad (۴)$$

$$Cost_i^{SYS} = \sum_{l=1}^{L} Cost_{i.l} L_{i.l} \quad (۵)$$

$$Cost_i^{WST} = \sum_{w=1}^{W} Cost_{i.w} L_{i.w} \quad (۶)$$

معادله ۳ مجموع هزینه‌های مواد اولیه ورودی، معادله ۴ مجموع هزینه‌های انرژی شامل؛ برق و یوتیلیتی، معادله ۵ مجموع هزینه‌های سیستم شامل؛ تعمیرات، نگه‌داری، اداری و بالاسری، حقوق، مزایا، استهلاک و قطعات و معادله ۶ مجموع هزینه‌های مدیریت پسماند شامل؛ هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات منفی می-باشد.

۴- تجزیه‌وتحلیل نتایج

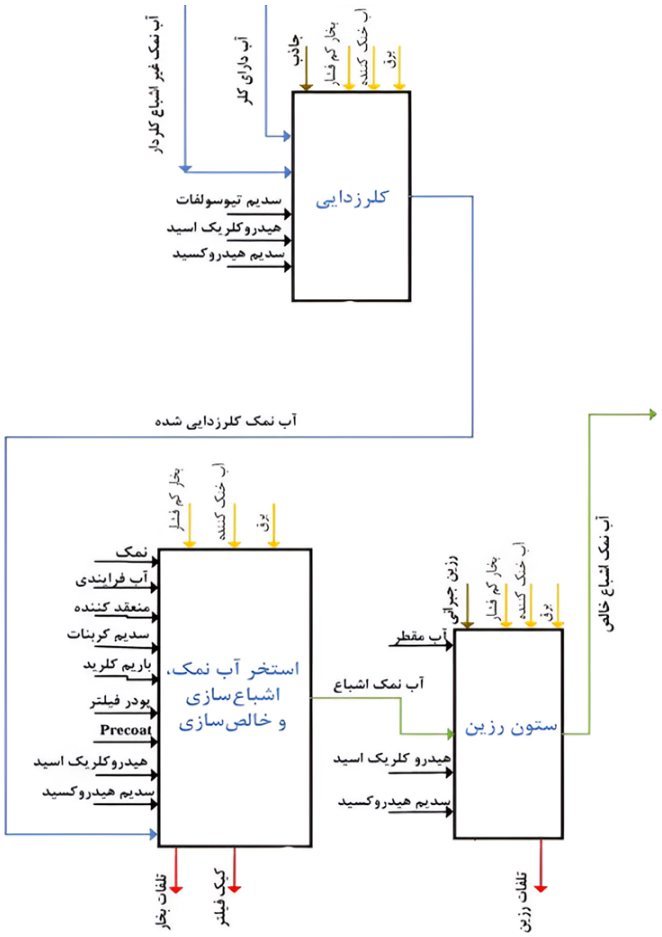
۴-۱- شرح فرآیند

واحد آب‌نمک در مجتمع کلرآلکالی وظیفه تأمین آب‌نمک اشباع و تصفیه‌شده را بر عهده دارد. این فرایند در سه مرحله اصلی شامل اشباع‌سازی، تصفیه اولیه و تصفیه ثانویه انجام می‌شود. در ابتدا، سنگ نمک به دو شکل پودر و قطعات درشت وارد واحد شده و ناخالصی‌هایی مانند سنگ و خاک‌نمک در مرحله غربال‌گری جدا می‌گردد. سپس خوراک به همراه آب‌نمک برگشتی (آب‌نمک بدون کلر) در استخر اولیه جمع‌آوری‌شده و غلظت آن تا حدود ۲۷۰ گرم بر لیتر افزایش می‌یابد. در ادامه، محلول به اشباع‌کننده‌ها هدایت‌شده و غلظت آن به حدود ۳۰۰ گرم بر لیتر می‌رسد. مرحله بعدی، تصفیه آب‌نمک است که در دو فاز انجام می‌گیرد. در مرحله اول از روش‌های فیزیکی و شیمیایی شامل فیلتراسیون و میکروفیلتراسیون استفاده می‌شود. همچنین با افزودن اسید هیدروکلریک، pH تنظیم و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم به کمتر از ۲۰ قسمت در میلیارد (ppb) کاهش می‌یابد. در مرحله دوم، تصفیه ثانویه از طریق واحدهای جذب رزینی صورت می‌گیرد تا ناخالصی‌های باقی‌مانده حذف شوند. درنهایت، آب‌نمک تصفیه‌شده آماده انتقال به واحد الکترولیز و استفاده در تولید کلر خواهد بود. تمامی مراحل یادشده در قالب مرکز کمی (QC) تعریف و داده‌های مربوط به جریان مواد و هزینه‌ها طی یک بازه زمانی شش‌ماهه جمع‌آوری و در قالب چارچوب MFCA موردمطالعه قرارگرفته و تحلیل شدند. برای درک بهتر نحوه استقرار و پیاده‌سازی هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) در واحد آب‌نمک شرکت موردمطالعه، مدل مفهومی فرآیندهای پژوهش طراحی و در شکل **۸** آورده شده است. در واحد آب‌نمک دو نوع مواد اولیه جهت خالص‌سازی وارد استخر آب‌نمک می‌شوند. دسته اول شامل مواد اولیه‌ای است که مستقیماً وارد فرآیند می‌شوند و دسته دوم شامل مواد برگشتی از سایر فرآیندها (الکترولایزر و خشک‌کنی کلر) می‌باشند. بر اساس مدل مفهومی شکل **۸** و طبق شرح فرآیند گفته‌شده، در این مرکز نهایتاً آب‌نمک تصفیه‌شده آماده انتقال به واحد الکترولیز و استفاده در تولید کلر می‌شود.

۴-۲- موازنه جرم

یکی از مهم‌ترین مراحل در MFCA، محاسبه و تحلیل تراز جرمی فرآیند است. ازنظر جرمی، باید میزان مواد ورودی و خروجی هر مرکز کمی در طول فرآیند برابر بوده و موازنه جرمی برقرار باشد. در این واحد، میزان ورودی مواد، محصولات مثبت، محصولات منفی و ضایعات بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از سیستم کنترل واحد تعیین شد. در طول فرآیند نیز میزان جرم محصولات مثبت و منفی محاسبه و ثبت گردید. نتایج این محاسبات در جداول **۱** تا **۳** ارائه شده است. همان‌طور که جدول **۱** نشان می‌دهد، عمده خوراک مصرفی واحد مربوط به آب‌نمک برگشتی از الکترولیز با سهم ۸۰/۴ درصد و نمک با سهم ۱۰/۹ درصد بوده است. سایر مواد شیمیایی ازجمله تیوسولفات سدیم، کربنات سدیم سبک، کلرید

باریم و اسید در مقادیر کمتر مصرف‌شده‌اند. طبق جدول **۲**، بیشترین خروجی مثبت به آب‌نمک اشباع‌شده اختصاص دارد، درحالی‌که ضایعات اصلی شامل کیک جامد (۴۶۱,۵۰۰ کیلوگرم) و بخارآب (۲۱,۲۳۵ کیلوگرم) هستند.



شکل ۸. مدل مفهومی و مراکز کمی (QC) در واحد آب‌نمک مجتمع کلرآلکالی.

Figure 8. Conceptual model and quantitative centers (QC) in the brine unit of the chlor-alkali complex.

جدول ۱. انواع مواد ورودی به واحد آب‌نمک

Table 1. Types of materials entering the brine unit

ردیف	نام خوراک	درصد نسبی	مقدار در واحد (kg)
۱	نمک	۱۰/۹۲۱۷	۱۵۵۹۴۴۶۷
۲	تیوسولفات سدیم	۰/۰۰۹۹	۱۲۱۳۵
۳	کربنات سدیم سبک	۰/۰۹۲۳	۱۳۱۸۰۰
۴	کلرور باریم	۰/۱۰۵۳	۱۵۰۴۵۰
۵	آلفاسلولز (پریکوت)	۰/۰۰۵۰	۷۲۵۰
۶	پساب	۳/۹۷۸۰	۵۶۸۰۰۰۰
۷	آب‌نمک برگشتی الکترولایزر	۸۰/۴۰۹۷	۱۱۴۸۱۱۶۲۷
۸	فلوکولانت	۰/۰۰۰۲	۳۳۸
۹	آب برگشتی از رطوبت زدایی	۲/۰۸۱۸	۲۹۷۲۵۵۱
۱۰	سود	۰/۶۲۰۰	۸۸۵۳۸۹
۱۱	اسید	۱/۷۷۶۹	۲۵۳۷۲۰۴
۱۲	کل ورودی خوراک	۱۰۰	۱۴۲۷۸۳۲۱۱

جدول ۲. تفکیک محصولات مثبت و منفی تولیدشده در واحد آب‌نمک

Table 2. Separation of positive and negative products produced in the brine unit

نام	مثبت/منفی	مقدار در واحد (kg)
آب‌نمک اشباع	مثبت	۱۴۲۲۸۰۴۷۶
بخارآب	منفی	۲۱۲۳۵
کیک جامد	منفی	۴۶۱۵۰۰
لجن	منفی	۲۰۰۰۰
جمع		۱۴۲۷۸۳۲۱۱

جدول ۳. موازنه کلی جرم در واحد آب‌نمک

Table 3. Overall mass balance per unit of brine

ورودی/خروجی/تلفات	وزن (kg)	درصد از کل
کل جرم ورودی	۱۴۲۷۸۳۲۱۱	۱۰۰
کل محصول تولیدی	۱۴۲۲۸۰۴۷۶	۹۹/۶۴۸
کل تلفات	۵۰۲۷۳۵	۰/۳۵۲

بر اساس نتایج جدول **۳**، در طول دوره موردبررسی، کل مواد ورودی ۱۴۲,۷۸۳,۲۱۱ کیلوگرم بوده است. از این مقدار، حدود ۹۹/۶۴۸ درصد به محصول نهایی (آب‌نمک تصفیه‌شده) تبدیل‌شده و تنها ۰/۳۵۲ درصد به‌صورت ضایعات شامل بخار، کیک جامد و لجن دفع گردیده است. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه میزان ضایعات در مقیاس درصدی پایین است، اما در مقیاس وزنی (حدود نیم میلیون کیلوگرم در شش ماه) بسیار قابل‌توجه و قابل مدیریت است.

۴-۳- تراز هزینه و شناسایی ضایعات

به‌منظور اجرای کامل روش‌شناسی MFCA، ابتدا بازدید میدانی از واحد آب‌نمک صورت گرفت و تمامی داده‌های مربوط به جریان مواد، نقشه‌های فرآیندی و اطلاعات مالی جمع‌آوری و دسته‌بندی شدند. در این مرحله، فهرست ضایعات شناسایی و در جدول **۴** ارائه گردید. همان‌گونه که جدول **۴** نشان می‌دهد، بخش عمده‌ای از ضایعات به کیک جامد اختصاص دارد که بیش از ۹۰ درصد کل مواد هدررفته را شامل می‌شود. بخار و لجن نیز سهم کمتری دارند اما همچنان به‌عنوان محصولات منفی بار مالی و زیست‌محیطی به واحد تحمیل می‌کنند. یکی از چالش‌های اصلی در محاسبات MFCA در صنایع چندماده‌ای، تخصیص هزینه مواد اولیه به محصولات مختلف است. در این پژوهش، مبنای تخصیص هزینه، مقدار واقعی مصرف مواد اولیه در هر محصول بوده است. بدین ترتیب، قیمت تمام‌شده مواد اولیه برای هر محصول متناسب با سهم جرمی آن از کل خوراک تعیین گردید. نسبت جرمی مواد خام در محصولات مختلف در جدول **۵** نمایش داده شده است. بر اساس نتایج جدول **۵**، آب‌نمک اشباع‌شده بیشترین سهم از آب‌نمک برگشتی و نمک تازه را به خود اختصاص داده است، درحالی‌که ضایعاتی مانند کیک جامد و لجن سهم بالایی از کربنات سدیم سبک، کلرید باریم و آلفاسلولز را جذب کرده‌اند. این امر نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از هزینه‌های مواد اولیه در فرآیند تصفیه به دلیل تشکیل محصولات منفی تلف می‌شود. در ادامه، هزینه‌های مرتبط با مواد، انرژی، سیستم و مدیریت پسماند برای واحد آب‌نمک محاسبه شد. جدول **۶** توزیع این هزینه‌ها را در کل فرآیند و بین محصولات مثبت و منفی نشان می‌دهد. همان‌طور که جدول **۶** نشان می‌دهد، بیشترین بخش هزینه‌ها مربوط به مواد اولیه (۹۶/۶۳٪) است، درحالی‌که هزینه‌های انرژی، سیستم و مدیریت پسماند سهم کمتری دارند. این موضوع بیانگر آن است که کنترل ضایعات مواد اولیه می‌تواند بیشترین اثر را بر کاهش هزینه‌های کل داشته باشد. به‌منظور شفاف‌سازی بیشتر، توزیع درصدی هزینه‌ها برای محصولات مثبت و منفی در جدول **۷** ارائه شده است. بر اساس این جدول، حدود ۳/۲ درصد از کل هزینه‌ها به محصولات منفی (ضایعات) تعلق دارد. هرچند این نسبت در نگاه نخست اندک به نظر می‌رسد، اما در عمل با توجه به حجم بالای تولید، رقم مالی معادل قابل‌توجهی را تشکیل می‌دهد. بنابراین، شناسایی و مدیریت این هزینه‌ها از طریق MFCA می‌تواند سودآوری و بهره‌وری واحد را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی

۵-۱- امکان‌سنجی بازیابی مواد باارزش

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، حجم بالای ضایعات به‌ویژه کیک جامد است که به‌طور سنتی به‌عنوان زباله دفع می‌شود. این ضایعات نه‌تنها هزینه‌های اضافی دفع را تحمیل می‌کنند بلکه منبعی بالقوه برای بازیابی مواد معدنی ارزشمند نیز هستند.

جدول ۴. فهرست ضایعات شناسایی‌شده در واحد آب‌نمک

Table 4. List of wastes identified in the brine unit

نام اتلاف	نوع اتلاف	شکل تلفات	اتلاف جرمی (kg)	اتلاف جرمی (٪)	اتلاف مالی (mr)	اتلاف ریالی (٪)
بخارآب	نرمال	دورریز	۲۱۲۳۵	۴/۲	۱۲/۲	۰/۰۳
کیک جامد	تئوری	دورریز	۴۶۱۵۰۰	۹۱/۸	۴۶۶۲۷/۲	۹۹/۷۸
لجن	تئوری	دورریز	۲۰۰۰۰	۴	۸۹/۶	۰/۱۹
جمع	-	-	۵۰۲۷۳۵	۱۰۰	۴۶۷۲۹	۱۰۰

جدول ۵. نسبت جرمی مواد خام در محصولات مختلف واحد آب‌نمک

Table 5. Mass ratio of raw materials in different products of the brine unit

	آب‌نمک اشباع	بخارآب	کیک جامد	لجن
نمک	۰/۱۰۷۶۲۴	۰	۰/۵۶۷	۰/۹۸
تیوسولفات سدیم	۰/۰۰۰۰۲۵	۰	۰/۰۱۸	۰
کربنات سدیم سبک	۰/۰۰۰۴۰۲	۰	۰/۱۶۱	۰
کلرور باریم	۰/۰۰۰۳۵۷	۰	۰/۲۱۵	۰
آلفاسلولز (پریکوت)	۰	۰	۰/۰۱۵	۰
پساب بازچرخانی شده	۰/۰۳۹۷۳	۱	۰/۰۲	۰/۰۲
آب‌نمک برگشتی الکترولایزر	۰/۸۰۶۹	۰	۰	۰
فلوکولانت	۰	۰	۰/۰۰۰۷۳	۰
آب برگشتی از رطوبت‌زدایی	۰/۰۲۰۸۹	۰	۰	۰
سود	۰/۰۰۶۲۲۳	۰	۰	۰
اسید	۰/۰۱۷۸۳۲	۰	۰	۰
مجموع	۱/۰۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰

جدول ۶. تفکیک هزینه‌ها در واحد آب‌نمک

Table 6. Cost breakdown per unit of brine

ردیف هزینه	هزینه کل (mr)	هزینه محصولات مثبت (mr)	هزینه محصولات منفی (mr)
هزینه مواد	۱۳۷۴۹۸۳	۱۳۲۸۶۶۰	۴۶۳۲۳
هزینه انرژی	۳۳۲۶	۳۳۱۵	۱۱
هزینه سیستم	۴۴۳۰۳	۴۴۱۴۸	۱۵۵
هزینه مدیریت پسماند	۲۴۰	-	۲۴۰
هزینه کل	۱۴۲۲۸۵۲	۱۳۷۶۱۲۳	۴۶۷۲۹
درصد محصول مثبت جرمی	۹۹/۶۴۸	-	-
درصد محصول منفی جرمی	۰/۳۵۲	-	-
نسبت محصول مثبت به منفی	۲۸۳	-	-

جدول ۷. توزیع درصدی هزینه‌ها در محصولات مثبت و منفی

Table 7. Percentage distribution of costs in positive and negative products

ردیف هزینه	٪ از هزینه کل	٪ هزینه محصولات مثبت	٪ هزینه محصولات منفی
هزینه مواد	۹۶/۶۳۵	۹۳/۳۸۰	۳/۲۲۵
هزینه انرژی	۰/۲۳۳۷	۰/۲۳۳۰	۰/۰۰۰۷
هزینه سیستم	۰/۱۱۳	۳/۱۰۲	۰/۰۱۰
هزینه مدیریت پسماند	۰/۰۱۶	۰	۰/۰۱۶
جمع	۱۰۰	۹۶/۷۱۴	۳/۲۸۱

توصیه می‌شود با تشکیل یک تیم تخصصی، روش‌های شیمیایی و فیزیکی برای استخراج یون‌های باارزش از این کیک موردبررسی قرار گیرد. در صورت دستیابی به نتایج مثبت در مقیاس آزمایشگاهی، لازم است امکان‌سنجی فنی و اقتصادی در مقیاس صنعتی نیز انجام شود. چنین اقدامی می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های دفع، ارزش‌افزوده اقتصادی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد.

۵-۲- نوسازی و بهسازی انبار نمک

ازآنجاکه نمک ماده اولیه اصلی فرآیند به شمار می‌رود، نگهداری نامناسب آن می‌تواند منجر به افت کیفیت آب‌نمک، اتلاف منابع و حتی آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نوسازی انبار موجود و احداث یک انبار جدید برای ذخیره سنگ نمک، اقدامی ضروری است. این اقدام نه‌تنها موجب حفاظت از منابع آبی و کاهش ضایعات نمک خواهد شد بلکه مدیریت و حمل‌ونقل خوراک ورودی را نیز تسهیل می‌کند.

۵-۳- بهبود ابزارهای اندازه‌گیری و کنترل جریان‌ها

یکی از چالش‌های کلیدی در اجرای MFCA، نبود تجهیزات دقیق برای اندازه‌گیری جریان‌های ورودی و خروجی در واحد آب‌نمک بود. نصب و کالیبره کردن دوره‌ای دستگاه‌های اندازه‌گیری شدت‌جریان (دبی‌سنج‌ها) در تمامی واحدها می‌تواند امکان پایش برخط تعادل جرم را فراهم آورد. اتصال این تجهیزات به یک سیستم مرکزی ثبت داده، شرایطی را فراهم می‌سازد که هرگونه نشت یا ضایعات به‌صورت لحظه‌ای شناسایی و کنترل شود.

۵-۴- بهره‌گیری از رویکرد اقتصاد چرخشی در مدیریت ضایعات

کاربرد اصول اقتصاد چرخشی در واحد آب‌نمک می‌تواند مسیرهای متعددی برای استفاده مجدد از ضایعات فراهم آورد:

۱) بخار: با نصب سیستم‌های بازیافت حرارتی، بخار هدررفته به انرژی حرارتی تبدیل و در واحدهای دیگر استفاده شود.
۲) پسماند جامد: این مواد می‌توانند پس از فرآوری مجدد به‌عنوان ماده اولیه در تولید کودهای شیمیایی یا مصالح ساختمانی به کار گرفته شوند.
۳) فاضلاب: با تصفیه فاضلاب، امکان بازگردانی آب برای آبیاری یا استفاده صنعتی فراهم می‌شود و حتی می‌توان از آن برای تولید انرژی (بیوگاز) بهره برد.
۴) فاضلاب شستشوی رزین: استفاده از فناوری‌های نوین در این بخش می‌تواند مصرف آب را کاهش داده و آب بازیافتی را مجدداً وارد چرخه تولید کند.
۵) رزین‌های مصرف‌شده: بازیافت شیمیایی یا فیزیکی این مواد می‌تواند آن‌ها را برای استفاده در فرآیندهای جدید یا صنایع دیگر آماده سازد.

۵-۵- اجرای مدل ترکیبی هزینه‌یابی جریان مواد و اقتصاد چرخشی (MFCA – CE)

هدف اصلی اقتصاد چرخشی و یکی از اهداف اصلی هزینه‌یابی جریان مواد کاهش ضایعات و صیانت از محیط-زیست می‌باشد؛ بنابراین؛ پیاده‌سازی و استقرار هردوی آن‌ها نیاز اساسی همه سازمان‌ها و بنگاه‌های اقتصادی است؛ اما با عنایت به اینکه اجرای (MFCA) علاوه بر کمک به کاهش ضایعات و حفظ محیط‌زیست، با کاهش هزینه‌ها به افزایش درآمد و سود سازمان و شرکت منجر می‌شود. پیشنهاد می‌گردد ابتدا هزینه‌یابی جریان مواد به‌عنوان یک روش اثرگذار بر بهره‌وری سیستم شرکت اجرا و سپس اقتصاد چرخشی در فرآیندهای آن عملیاتی گردد. به همین منظور و بر اساس یافته‌های این پژوهش اجرای مدل ترکیبی MFCA – CE به بنگاه اقتصادی توصیه می‌گردد.

۵-۶- توسعه MFCA با رویکردهای محیط‌زیستی

در حال حاضر به دلیل اهمیت مسائل زیست‌محیطی در توسعه پایدار، استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مختلف مانند؛ ارزیابی چرخه، ارزیابی چرخه حیات محیطی، حسابداری مدیریت زیست‌محیطیدر دنیا مرسوم و در مورد

بنگاه‌های اقتصادی عملیاتی می‌شود. نظر به اینکه هزینه‌یابی جریان مواد به‌صورت هم‌زمان به مسائل زیست‌محیطی و مالی شرکت‌ها و بنگاه‌های اقتصادی توجه می‌کند و با کاهش هزینه و افزایش درآمد، تلاش می‌کند تا ضایعات به وجود آمده را کاهش و به سمت صفر سوق دهد که هدف عالی ابزارها و تکنیک‌های گفته‌شده می‌باشد؛ بنابراین؛ پیشنهاد می‌گردد. این ابزارها و استانداردهای آن‌ها در MFCA ادغام گردد تا با استقرار و پیاده‌سازی آن در واحدها، موضوعات مالی و زیست‌محیطی به‌صورت هم‌زمان موردبررسی قرار گیرد. این کار فرآیندهای مختلف را از مالی و محیط‌زیستی بهینه‌سازی می‌کند.

۵-۷- هزینه‌یابی جریان مواد در کل زنجیره‌تأمین شرکت‌ها و شرکت موردمطالعه

زنجیره‌تأمین همه فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد، از مرحله تهیه ماده اولیه تا مرحله تحویل کالای نهایی به مصرف‌کننده را شامل می‌شود و به‌عنوان مکانیسم کاهش هزینه نهایی تولید محصول، فرایندهای تولید مربوط به شرکت را برای کارایی عملیاتی کلی بهینه می‌کند. با توجه به بهینه‌سازی سیستم بهره‌وری مالی سبز شرکت موردمطالعه با استفاده از هزینه‌یابی جریان مواد، پیشنهاد می‌گردد. با تعیین مراکز کمی مختلف در طول زنجیره‌تأمین، MFCA در کل زنجیره‌تأمین عملیاتی گردد.

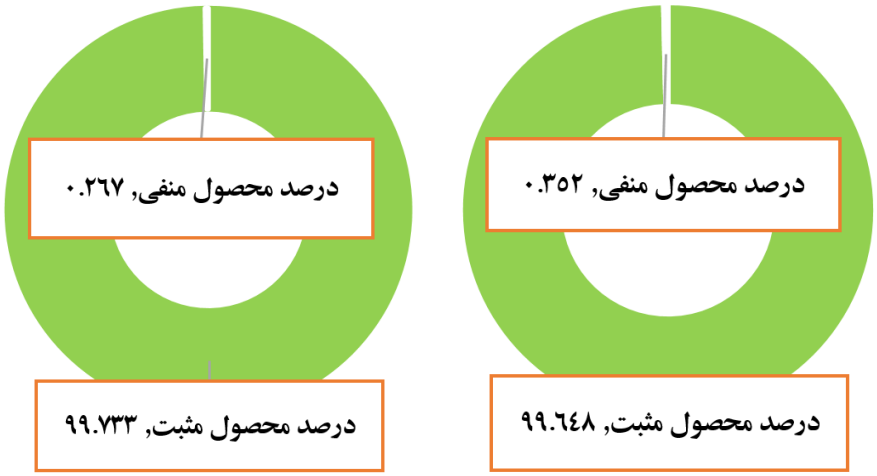
۵-۸- تحلیل اثربخشی

نتایج تحلیل MFCA پس از اجرای راهکارهای بهبود نشان می‌دهد که ضایعات جرمی حدود ۰/۰۸۵ درصد کاهش‌یافته است. این کاهش کوچک در سطح درصدی، در مقیاس وزنی معادل ۱۲۱ تن مواد در شش ماه است که اثر مالی قابل‌توجهی به همراه دارد. همان‌طور که جدول **۸** و شکل **۹** نشان می‌دهند، این کاهش ضایعات منجر به افزایش سهم محصولات مثبت گردیده است. همچنین بر اساس شکل **۱۰**، کاهش ضایعات سبب کاهش ۰/۷۹۵ درصدی هزینه‌های مالی شده است که معادل صرفه‌جویی بیش از ۱۱ میلیارد ریال طی شش ماه است.

جدول ۸. موازنه جرم کلی واحد پس از اجرای راهکارها

Table 8. Overall mass balance of the unit after implementing the solutions

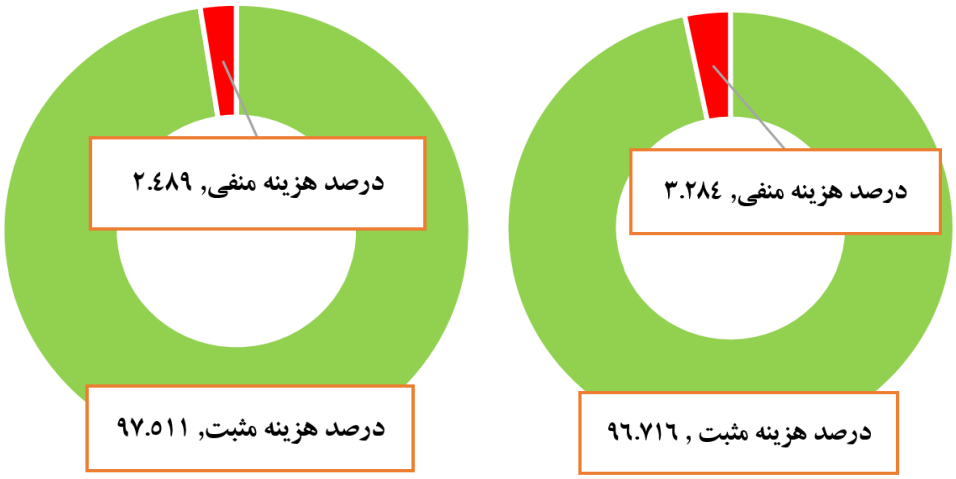
ورودی/خروجی/تلفات	وزن (Kg)	درصد از کل
کل جرم ورودی	۱۴۲۷۸۳۲۱۱	۱۰۰
کل محصول تولیدی	۱۴۲۴۰۲۱۹۷	۹۹/۷۳۳
کل تلفات	۳۸۱۰۱۴	۰/۲۶۷



(الف) (ب)

شکل ۹. مقایسه محصولات مثبت و منفی قبل و بعد از اجرای راهکارهای بهبود بر اساس MFCA.

Figure 9. Comparison of positive and negative products before and after implementing improvement strategies based on MFCA.



(ب) (الف)

شکل ۱۰. مقایسه مالی محصولات مثبت و منفی قبل و بعد از اجرای راهکارهای بهبود بر اساس MFCA.

Figure 10. Financial comparison of positive and negative products before and after implementing improvement strategies based on MFCA.

۵-۹- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق به‌روشنی نشان می‌دهد که ادغام MFCA در چارچوب اقتصاد چرخشی می‌تواند به بهبود هم‌زمان بهره‌وری مالی و عملکرد زیست‌محیطی منجر شود. اجرای MFCA در واحد آب‌نمک نه‌تنها نقاط اتلاف مواد و هزینه‌ها را آشکار کرده بلکه راهکارهایی برای پیشگیری و بهبود ارائه داده است. کاهش ۱۲۱ تنی ضایعات در کنار صرفه‌جویی بیش از ۱۱ میلیارد ریالی طی یک دوره شش‌ماهه در سال ۱۴۰۱، بیانگر ظرفیت بالای این رویکرد برای ارتقای پایداری و رقابت‌پذیری صنایع مشابه است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در روش‌های نوین حسابداری زیست‌محیطی و بهره‌گیری از اقتصاد چرخشی می‌تواند به‌طور مستقیم به بهبود اقتصادی بنگاه‌ها کمک کند، درحالی‌که اثرات منفی زیست‌محیطی را نیز به حداقل می‌رساند. به‌طورکلی، MFCA می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سیاستی و مدیریتی کارآمد برای صنایع معرفی شود که ضمن ارتقای بهره‌وری مالی، به تحقق اهداف توسعه پایدار نیز یاری می‌رساند.

مشارکت‌های نویسندگان

موسی فیروزی: تهیه پیش نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش و روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش نویس تحلیل آماری و بازبینی متن؛ **حبیب آقاجانی:** راهنمایی، بازبینی متن؛ **پرویز محمدزاده:** راهنمایی، بازبینی متن؛ **اسماعیل فاتحی‌فر:** راهنمایی، بازبینی متن.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترمی که با ارائه نظرات سازنده، در ارتقاء کیفیت این مقاله نقش مؤثری ایفا کردند، ابراز می‌دارند.

مراجع

Abedi, S., Daneshmand, A., & Nourian, S. (2019). Investigating the factors affecting green productivity growth in Iran's economy. *Economic Research Quarterly, 54*(3), 633–658 (In Persian). https://doi.org/10.22059/jte.2019.72777

Ahangar Partovi, N., Yarahmadi, R., Shobeiri, S. M., Ghaffari, H., & Emami Meybodi, A. (2023). Designing a Qualitative Model of Circular Economy Education with the 3C Approach (Competency-Based) in Small and Medium Industries. *Journals of Environmental Education*

Esakandari Sani, M., & Sofalgar, S. (2023). Platforms for the application of blockchain technology in order to achieve the sustainable development of urban tourism in Iran. *Journal of Vision Future Cities*, *4*(3), 79–102. https://doi.org/10.61186/jvfc.4.3.79

Fakoya, M. B., & Imuezerua, E. O. (2021). Improving water pricing decisions through material flow cost accounting model: a case study of the Politsi Water Treatment Scheme in South Africa: MB Fakoya, EO Imuezerua. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(2), 2243-2260. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00672-7

Fallah, S., Hosseini, M., & Shojaei, M. (2015). Towards modeling the regional rainfall changes over Iran due to the climate forcing of the past 6000 years. *Quaternary International*, 429, 108-118. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.061

Fatehifar, E. (2016). *Implementation of Material Flow Cost Accounting (ISO 14051) in Tabriz Petrochemical Company*. Technical Report.

Fatehifar, E., Karimi, A., Mohammadi, M. M. M., Daryani, M., Saatlo, S. J. E., & Mirsaidi, S. R. (2023). Reducing Waste and Increasing Productivity in a Petrochemical Olefin Unit in the South of Iran with the Material Flow Costing Method. *Journal of Farayandno–Vol*, *18*(82), 24-37.

Ghadami Gholsheikh, N., Sanavi Garousiyan, V., & Hosseinzadeh, A. (2025). Design and validation of smart customer experience in Agricultural Bank of Khorasan Razavi Province with a mixed-methods approach. *System Engineering and Productivity*, *5*(1), 65-91 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049020.1244

Gouvea, R., Kassicieh, S., & Montoya, M. J. (2013). Using the quadruple helix to design strategies for the green economy. *Technological Forecasting and Social Change*, *80*(2), 221-230. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.05.003

Guenther, E., Jasch, C., Schmidt, M., Wagner, B., & Ilg, P. (2015). Material flow cost accounting–looking back and ahead. *Journal of Cleaner Production*, *108*, 1249-1254. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.018

Gusmerotti, N. M., Testa, F., Corsini, F., Pretner, G., & Iraldo, F. (2019). Drivers and approaches to the circular economy in manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, *230*, 314-327. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.044

Hejazi, A. R. (2025). Analysis of the Substantive Factors in Strategic Knowledge Management within the Domain of Higher Education Development. *System Engineering and Productivity,* *4*(3), 155–178 (In Persian). *and Sustainable Development*, *11*(3), 41-61 (In Persian). https://doi.org/10.30473/ee.2023.66437.2589

Alavi, S., Janatyan, N., & Zeinalnezhad, M. (2024). Benchmarking of fifteen urban services units of Isfahan Municipality by using aggressive data envelopment analysis. *System Engineering and Productivity*, *4*(3), 63-81 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2040865.1227

Christ, K. L., & Burritt, R. (2017). Material flow cost accounting for food waste in the restaurant industry. *British Food Journal, 119*(3), 600–617. https://doi.org/10.1108/BFJ-07-2016-0318

Christ, K. L., & Burritt, R. L. (2016). ISO 14051: una nueva era para la aplicación e investigación sobre MFCA. *Revista de Contabilidad-Spanish Accounting Review*, *19*(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.rcsar.2015.01.006

Dalal-Clayton, B. (2013). *Turning green the strategic way: the role and potential of strategic environmental assessment in securing a green economy*. International Institute for Environment and Development.

Davoudabadi, M., Sajadifar, S. H., Ghane, A. A., & Shalpoosh, S. (2017). Circular economy approaches to wastewater in sustainable development. *Water and Sustainable Development,* *4*(2), 1–12 (In Persian). https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.1.65197

de Mello Santos, V. H., Campos, T. L. R., Espuny, M., & de Oliveira, O. J. (2022). Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(1), 349-370. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16615-2

Dekamin, M., & Barmaki, M. (2019). Implementation of material flow cost accounting (MFCA) in soybean production. *Journal of Cleaner Production, 210*, 459–465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.057

Dierkes, S., & Siepelmeyer, D. (2019). Production and cost theory-based material flow cost accounting. *Journal of Cleaner Production, 235*, 483–492. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.212

Dunuwila, P., Rodrigo, V. H. L., & Goto, N. (2020). Improving financial and environmental sustainability in concentrated latex manufacture. *Journal of Cleaner Production*, *255*, 120202. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120202

Elyasi, M., Mohammadi, M., Fartash, K., Mousazadeh Mousavi, S. M., Mohseni Kiassari, M., & Pourasgari, P. (2019). *Circular economy: The path toward sustainable development*. Danesh-Bonyan Fanavar (In Persian).

Kousha, H. R., & Safarzadeh, S. (2024). valuation of outsourcing projects using real options (case study: Mashhad water and wastewater company). *System Engineering and Productivity, 4*(4), 13–29 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2026208.1201

Lehmann, M., Leeuw, B. D., Fehr, E., & Wong, A. (2014). Circular economy. Improving the management of natural resources. In *World Resources Forum: Bern, Switzerland*.

Li, Z., Zeng, H., Xiao, X., Cao, J., Yang, C., & Zhang, K. (2019). Resource value flow analysis of paper-making enterprises: A Chinese case study. *Journal of Cleaner Production*, *213*, 577-587. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.158

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, *115*, 36-51. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042

Mahmoudi, E., Jodeiri, N., & Fatehifar, E. (2017). Implementation of material flow cost accounting for efficiency improvement in wastewater treatment unit of Tabriz oil refining company. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 530-536. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.137

May, N., & Guenther, E. (2020). Shared benefit by Material Flow Cost Accounting in the food supply chain–The case of berry pomace as upcycled by-product of a black currant juice production. *Journal of Cleaner Production*, *245*, 118946. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118946

Millar, N., McLaughlin, E., & Börger, T. (2019). The circular economy: swings and roundabouts? *Ecological Economics*, *158*, 11-19. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.012

Mozafari, M., & Savari, J. (2025). Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using Cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity, 5*(1), 135–153 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050452.1248

Nakajima, M. (2020). Development and possibilities of MFCA as a tool of sustainability management: In view of Japanese, German, and some Asian experiences. In *Sustainability Management and Business Strategy in Asia* (pp. 65-80). https://doi.org/10.1142/11274

National Productivity Organization of Iran. (2022). APO Productivity Outlook 2022. Asian Productivity Organization. https://www.apo-tokyo.org/wp-content/uploads/2022/06/APO-Productivity-Outlook_final.pdf

https://doi.org/10.22034/sep.2025.2033665.1217

Higashida, A. (2020). Supply chain MFCA implementation: emphasizing evidence on coordination. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal, 12 (4), 695–718*. https://doi.org/10.1108/SAMPJ-03-2019-0104

Ho, J. Y., Ng, D. K., Wan, Y. K., & Andiappan, V. (2021). Synthesis of wastewater treatment plant based on minimal waste generation cost: a material flow cost accounting (MFCA) approach. *Process Safety and Environmental Protection*, *148*, 559–578. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.024

Jasch, C. (2009). *Environmental and material flow cost accounting: principles and procedures*. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9028-8_1

Karimi Zarachi, M., Fathi, M. R., Raeesi Nafchi, S., & Hosseini Zarch, S. M. (2023). The impact of supply chain relationship quality on knowledge sharing and innovation performance in the packaging industry. *System Engineering and Productivity*, *3*(3), 63-81 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2023.711490

Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseininezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System Engineering and Productivity*, *5*(2), 97-118 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049327.1252

Kenshlow, H., & Hosseini, S. A. (2024). Studying the relationship between human resource development and justice, satisfaction and increasing the efficiency of social security employees. *System Engineering and Productivity*, *4*(3), 1-15 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2013266.1161

Khalili, S., Saeedi, F., Yousefi, S., & Zandpourasl, M. (2025). Investigating the impact of the "attitude and mindset" component on the success of project managers in the Iranian construction industry. *System Engineering and Productivity, 5*(1), 1–19 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046688.1237

Kokubu, K., & Kitada, H. (2015). Material flow cost accounting and existing management perspectives. *Journal of Cleaner Production*, *108*, 1279-1288. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.037

Kokubu, K., & Nakajima, M. (2018). Theory and Practice of Material Flow Cost Accounting. *Tokyo: Dobunkan Shuppan. Co. Ltd.* [In Japanese].

National Productivity Organization of Iran. (2024). The NPO of IR Iran published the report of "Iran Productivity Visage". https://www.npo.gov.ir/en/NEWS/ID/2906/the-npo-of-ir-iran-published-the-report-of-iran-productivity-visage

Nishitani, K., Kokubu, K., Wu, Q., Kitada, H., Guenther, E., & Guenther, T. (2022). Material flow cost accounting (MFCA) for the circular economy: An empirical study of the triadic relationship between MFCA, environmental performance, and the economic performance of Japanese companies. *Journal of Environmental Management*, *303*, 114219. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114219

Pauliuk, S. (2018). Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001: 2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, *129*, 81-92. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019

Pouri, K. (2025). Designing a bi-objective mathematical model for cost and environmental pollution control in circular supply chain management for petrochemical product production. *System Engineering and Productivity* (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2060799.1321

Qaderpanah, A. (2021). Circular economy: A step toward sustainable development. *Zist-Sepehr Journal, 14*, 7–13 (In Persian).

Sá, M. M., Oliveira-Silva, C., Cunha, M. P., Gonçalves, A., Diez, J., Méndez-Tovar, I., & Izquierdo, E. C. (2022). Integration of the circular economy paradigm in companies from the Northwest of the Iberian Peninsula. *Sustainability*, *14*(13), 7940. https://doi.org/10.3390/su14137940

Safaei, N., Heydari Soochelmai, Y., & Mirzaei GHazani, M. (2025). A data-driven hybrid approach for examining the factors influencing the price of EUA during phase IV of the EUETS. *System Engineering and Productivity, 5*(1), 113–134 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050780.1253

Sahu, A. K., Padhy, R. K., Das, D., & Gautam, A. (2021). Improving financial and environmental performance through MFCA: A SME case study. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123751. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123751

Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, *17*, 48-56. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002

Schaltegger, S., & Zvezdov, D. (2015). Expanding material flow cost accounting. Framework, review and potentials. *Journal of Cleaner Production*, *108*, 1333-1341. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.040

Schmidt-Bleek, F. (1994). How to reach a sustainable economy. *Wuppertal Papers*, *24*.

Sodkomkham, T., Ratanatamskul, C., & Chandrachai, A. (2024). A novel integrated material flow cost accounting (MFCA)-IoT-lean management system approach to improving water use efficiency and reducing costs in the beverage industry. *Cleaner Environmental Systems*, *15*, 100232. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100232

Strobel, M., & Redmann, C. (2002). Flow cost accounting, an accounting approach based on the actual flows of materials. In *Environmental Management Accounting: Informational and Institutional Developments* (pp. 67-82). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-48022-0_5

Sulong, F., Sulaiman, M., & Norhayati, M. A. (2015). Material Flow Cost Accounting (MFCA) enablers and barriers: the case of a Malaysian small and medium-sized enterprise (SME). *Journal of Cleaner Production*, *108*, 1365-1374. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.038

Wagner, B. (2015). A report on the origins of Material Flow Cost Accounting (MFCA) research activities. *Journal of Cleaner Production*, *108*, 1255-1261. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.020

Walz, M., & Guenther, E. (2021). What effects does material flow cost accounting have for companies?: Evidence from a case studies analysis. *Journal of Industrial Ecology*, *25*(3), 593-613. https://doi.org/10.1111/jiec.13064

Wang, H., Pan, X., Zhang, S., & Zhang, P. (2021). Simulation analysis of implementation effects of construction and demolition waste disposal policies. *Waste Management*, *126*, 684-693. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.056

Wang, J., Cui, Y., Zhu, J., & Li, L. (2010). Discussion about material flow cost accounting. In *ICLEM 2010: Logistics for Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration* (pp. 3950-3955). https://doi.org/10.1061/41139(387)551

Yagi, M., & Kokubu, K. (2018). Corporate material flow management in Thailand: The way to material flow cost accounting. *Journal of Cleaner Production*, *198*, 763-775. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.007

Zeng, H., Zhou, Z., & Xiao, X. (2021). MFCA extension from a life cycle perspective: Methodical refinements and use case. *Resources*

Policy, *74*, 101507. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101507

Zou, T., Zeng, H., Zhou, Z., & Xiao, X. (2019). A three-dimensional model featuring material flow, value flow and organization for environmental management accounting. *Journal of Cleaner Production*, *228*, 619-633. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.309