Journal Website

Article history:
Received 25 January 2026
Revised 15 May 2026
Accepted 23 May 2026
Initial Publication 24 May 2026
Final Publication 23 September 2026

Dynamic Management and Business Analysis

Volume 5, Issue 3, pp 1-23

E-ISSN: 3041-8933

A Data-Driven Decision Support System for Identifying Green Entrepreneurship Opportunities in the Banking System

Khadijeh. Rajani[1], Maryam. Rahmaty[2*], Mohammd Ali. Nasimi[3], Azam. Hajiaghajani[1]

[1] Department of Management, Cha.C., Islamic Azad University, Chalous, Iran
[2] Department of Industrial Management, Cha.C., Islamic Azad University, Chalous, Iran
[3] Department of Business Management, To.C., Islamic Azad University, Tonekabon, Iran

*** Corresponding author email address**: rahmaty.maryam@iau.ac.ir

A r t i c l e I n f o

Article type:
Original Research

How to cite this article:
Rajani, K., Rahmaty, M., Nasimi, M. A., & Hajiaghajani, A. (2026). A Data-Driven Decision Support System for Identifying Green Entrepreneurship Opportunities in the Banking System. *Dynamic Management and Business Analysis*, *5*(3), 1-23.
https://doi.org/10.61838/dmbaj.364

© 2026 the author(s). Published by Knowledge Management Scientific Association. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

A B S T R A C T

Objective: The present study aimed to develop a data-driven decision support system for identifying, evaluating, and prioritizing green entrepreneurship opportunities in the banking system by simultaneously considering financial, environmental, and credit risk indicators.

Methods and Materials: This study was conducted using a quantitative and data-driven approach. The required data were collected from three commercial and development banks and included financial indicators, green credit records, repayment histories, and environmental indicators such as carbon dioxide emission reduction, energy efficiency improvement, waste management, and resource consumption. In the multi-criteria decision-making phase, AHP and TOPSIS methods were employed for weighting and ranking projects, while Random Forest and XGBoost algorithms were used to predict project success. Furthermore, a multi-objective mathematical optimization model based on the NSGA-II algorithm was designed and implemented in Python to simultaneously optimize profitability, environmental performance, and credit risk.

Findings: The results demonstrated that the proposed decision support system successfully identified projects with the best balance between profitability and environmental performance. Projects P3 and P1 achieved the highest rankings and also showed the greatest selection frequency within the Pareto front generated by the NSGA-II algorithm. Scenario analysis indicated that increasing the available budget simultaneously improved profitability and environmental indicators, whereas stricter environmental constraints slightly reduced profit while significantly enhancing environmental performance. Sensitivity analysis further confirmed the robustness of the proposed model against moderate variations in input parameters, with substantial changes occurring only under extreme conditions.

Conclusion: The findings suggest that integrating a data-driven decision support system with multi-objective mathematical optimization can provide a comprehensive and reliable framework for green credit evaluation and optimal resource allocation in the banking sector. The proposed framework enhances decision-making accuracy while maintaining a balance among profitability, risk reduction, and sustainable development objectives, thereby offering a practical foundation for the advancement of intelligent green banking and sustainable financial policies.

Keywords: *Decision Support System, Green Banking, Green Entrepreneurship, Green Credit Evaluation, Data Mining, Multi-Objective Optimization, NSGA-II*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The accelerating pace of environmental degradation, climate change, resource depletion, and ecological instability has significantly transformed the priorities of economic and financial systems worldwide. In response to these challenges, sustainable development has emerged as a central paradigm guiding modern economic policies and institutional strategies. Within this context, the banking sector has gradually shifted from its traditional role as a passive financial intermediary toward a more proactive position in directing investments toward environmentally sustainable and socially responsible projects. Consequently, green entrepreneurship and green banking have become increasingly important components of sustainable economic transformation. Green entrepreneurship refers to entrepreneurial activities that generate economic value while simultaneously minimizing environmental harm, enhancing resource efficiency, and promoting sustainable innovation. However, identifying and evaluating green entrepreneurial opportunities remain highly complex tasks due to the simultaneous involvement of financial profitability, environmental sustainability, and credit risk considerations. Traditional banking evaluation systems, which primarily rely on financial indicators, often fail to capture the multidimensional value of environmentally sustainable projects. Therefore, there is an increasing demand for intelligent and data-driven decision-making systems capable of integrating financial and environmental criteria within a unified analytical framework (Bickley et al., 2025; Canakoglu et al., 2018).

Recent advances in big data analytics, artificial intelligence, machine learning, and Internet of Things technologies have created unprecedented opportunities for transforming organizational decision-making processes into more intelligent, adaptive, and data-driven systems. Financial institutions generate enormous volumes of operational, transactional, and behavioral data on a daily basis, and effective analysis of these datasets can substantially improve investment evaluation and risk management processes. Data-driven decision support systems enable banks to process large and complex datasets with higher speed, precision, and consistency compared to conventional methods. Moreover, integrating environmental indicators such as carbon emissions, energy efficiency, waste management, and water conservation into financial evaluation models allows banks to support projects aligned with sustainable development objectives. Previous studies have demonstrated that big data analytics capability and data-driven organizational culture significantly improve green innovation, sustainable entrepreneurship, and competitive advantage within organizations (Al-Khatib, 2022; Liu et al., 2022). Furthermore, the growing integration of artificial intelligence into sustainable entrepreneurship and green financial systems has intensified the importance of intelligent analytical frameworks in evaluating business opportunities under uncertain and dynamic conditions (Grant, 2021; Makhloufi, 2024). Similarly, research has emphasized the role of data-driven architectures, blockchain, and IoT-integrated systems in enhancing sustainable resource management and intelligent decision-making in Industry 4.0 environments (Lazaroiu et al., 2022; Rane & Narvel, 2022). Despite these advancements, a substantial gap remains in developing comprehensive data-driven decision support systems specifically designed for identifying green entrepreneurial opportunities within the banking sector. Most previous studies have focused either on financial analytics or environmental sustainability independently, while few studies have attempted to integrate multi-criteria decision-making, machine learning, and multi-objective optimization into a unified framework for green

credit evaluation. Therefore, the present study aimed to develop a comprehensive data-driven decision support system capable of simultaneously evaluating profitability, environmental performance, and credit risk in the identification of green entrepreneurship opportunities within the banking system.

Methods and Materials

The present study employed a quantitative and data-driven research design to develop and validate an intelligent decision support system for green entrepreneurship opportunity identification in the banking sector. The research process consisted of several sequential stages, including data collection, feature extraction, development of the decision support system, mathematical modeling, optimization, and validation analysis.

Data were collected from three commercial and development banks that had provided financial support for green entrepreneurial projects during the previous five years. The dataset included both financial and environmental indicators associated with green investment projects. Financial variables consisted of implementation costs, expected profitability, repayment records, and credit risk levels. Environmental variables included carbon dioxide emission reduction, energy efficiency improvement, water conservation, and waste management performance. To ensure comparability across variables, all data were normalized prior to analysis.

The first stage involved feature extraction and construction of composite indicators, including the "green opportunity index" and the "sustainability risk score." Subsequently, a multi-layered decision support system was developed. In the multi-criteria decision-making layer, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the relative importance of evaluation criteria, while the TOPSIS method was applied to rank green entrepreneurial projects. In the machine learning layer, Random Forest and XGBoost algorithms were implemented in Python to predict the probability of project success or failure based on historical and environmental data.

The outputs generated by the decision support system were subsequently integrated into a multi-objective mathematical optimization model. The optimization model was formulated as a mixed-integer programming problem with three simultaneous objective functions: maximizing profitability, maximizing environmental improvement, and minimizing credit risk. To solve the multi-objective optimization problem, the NSGA-II evolutionary algorithm was employed to generate Pareto-optimal solutions representing different trade-offs among the three objectives.

The model implementation was performed in Python using DEAP libraries for evolutionary optimization and Pandas and NumPy libraries for data processing and analysis. Validation procedures included cross-validation and bootstrapping methods to assess the reliability and stability of the proposed framework. Performance indicators such as prediction accuracy, system reliability, response time, and environmental evaluation effectiveness were also assessed to evaluate the efficiency of the developed system.

Findings

The results demonstrated that the proposed data-driven decision support system successfully identified and prioritized green entrepreneurial projects with high levels of accuracy and consistency. Based on the AHP-TOPSIS evaluation process, projects P3 and P1 obtained the highest final rankings due to their balanced performance across profitability, environmental sustainability, and acceptable credit risk levels. These projects demonstrated superior environmental performance, particularly in terms of carbon

E-ISSN: 3041-8933

emission reduction and energy efficiency improvement, while simultaneously maintaining strong financial returns.

The machine learning models showed satisfactory predictive performance in identifying successful and high-potential green projects. Random Forest and XGBoost algorithms effectively detected nonlinear relationships between financial and environmental variables and significantly improved prediction accuracy compared to traditional evaluation approaches. The integration of machine learning into the decision support system enhanced the adaptability and intelligence of the framework under uncertain decision-making conditions.

The NSGA-II optimization model generated a diverse set of Pareto-optimal solutions representing different combinations of profitability, environmental performance, and risk levels. The Pareto front analysis revealed a trade-off relationship between profitability and credit risk, indicating that projects with higher profitability generally involved higher levels of financial risk. Similarly, another Pareto front illustrated the relationship between profitability and environmental performance, demonstrating that some projects with moderate profits achieved significantly stronger environmental outcomes.

Scenario analysis revealed that budget expansion increased both total profitability and environmental performance indicators, although higher budget allocation also led to increased aggregate risk. In contrast, stricter environmental constraints resulted in the selection of projects with superior ecological performance, while slightly reducing overall profitability. Sensitivity analysis further demonstrated that the proposed model remained stable under moderate changes in key parameters such as budget levels, environmental thresholds, and risk constraints. Significant variations in project selection occurred only under extreme parameter changes, confirming the robustness and reliability of the proposed framework for practical banking applications.

Discussion and Conclusion

The findings of the present study demonstrated that integrating data-driven decision support systems with machine learning and multi-objective optimization can substantially improve the identification and evaluation of green entrepreneurship opportunities in the banking sector. The proposed framework successfully addressed one of the major limitations of traditional credit evaluation systems by simultaneously incorporating financial, environmental, and risk-related indicators into the decision-making process. This multidimensional approach enabled banks to evaluate green entrepreneurial projects not only in terms of short-term profitability but also according to their long-term sustainability contributions.

The successful performance of the Random Forest and XGBoost algorithms highlighted the significant role of artificial intelligence and big data analytics in enhancing banking decision-making processes. The ability of machine learning algorithms to identify complex nonlinear relationships among variables improved prediction accuracy and reduced uncertainty in evaluating green investment opportunities. Furthermore, the NSGA-II optimization model effectively generated balanced and flexible solutions for decision-makers by considering conflicting objectives simultaneously. This capability is particularly important in sustainable banking environments, where financial profitability, environmental responsibility, and risk management often compete with one another.

The scenario and sensitivity analyses further confirmed the practical applicability of the proposed framework under varying economic and environmental conditions. The model demonstrated the capacity

to maintain stability and provide reliable solutions even when budget constraints, environmental standards, or risk thresholds changed. Such flexibility is essential for modern banking systems operating in dynamic and uncertain environments characterized by evolving sustainability regulations and market volatility.

Overall, the present study contributes to the growing literature on sustainable entrepreneurship, green banking, and intelligent decision support systems by proposing an integrated and practical framework that combines big data analytics, machine learning, multi-criteria decision-making, and evolutionary optimization. The findings suggest that data-driven green credit evaluation systems can significantly improve sustainable resource allocation, enhance environmental responsibility, and strengthen the strategic role of banks in supporting sustainable economic development. The proposed framework may therefore serve as an effective foundation for the future development of intelligent green banking systems and sustainable financial policies.

E-ISSN: 3041-8933

شاپای الکترونیکی: ۸۹۳۳-۳۰۴۱

مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار

دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۲۳-۱

وبسایت مجله

تاریخچه مقاله
دریافت شده در تاریخ ۵ بهمن ۱۴۰۴
اصلاح شده در تاریخ ۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۵
پذیرفته شده در تاریخ ۲ خرداد ۱۴۰۵
اولین انتشار در تاریخ ۳ خرداد ۱۴۰۵
انتشار نهایی در تاریخ ۱ مهر ۱۴۰۵

سیستم تصمیم‌یار داده‌محور برای شناسایی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی

خدیجه رجنی[۱]، مریم رحمتی[۲*]، محمدعلی نسیمی[۳]، اعظم حاجی آقاجانی[۱]

۱. گروه مدیریت، واحد چالوس دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
۲. گروه مدیریت صنعتی، واحد چالوس دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
۳. گروه مدیریت بازرگانی، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: rahmaty.maryam@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:
رجنی، خدیجه.، رحمتی، مریم.، نسیمی، محمدعلی.، و حاجی آقاجانی، اعظم. (۱۴۰۵). سیستم تصمیم‌یار داده‌محور برای شناسایی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی. *مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار*، ۵(۳)، ۲۳-۱.

© ۱۴۰۵ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده(گان) است. انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY 4.0) صورت گرفته است.

چکیده

هدف: هدف این پژوهش توسعه یک سیستم تصمیم‌یار داده‌محور برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی با در نظر گرفتن همزمان شاخص‌های مالی، زیست‌محیطی و ریسک اعتباری بود. **روش‌شناسی:** پژوهش حاضر با رویکرد کمی و داده‌محور انجام شد و داده‌های مورد نیاز از سه بانک تجاری و توسعه‌ای گردآوری گردید. اطلاعات شامل شاخص‌های مالی، اعتبارات سبز، سوابق بازپرداخت و شاخص‌های زیست‌محیطی مانند کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، بهره‌وری انرژی، مدیریت پسماند و مصرف منابع بود. در بخش تصمیم‌گیری چندمعیاره، از روش‌های AHP و TOPSIS برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی پروژه‌ها استفاده شد و در ادامه الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل Random Forest و XGBoost جهت پیش‌بینی موفقیت پروژه‌ها به کار گرفته شدند. همچنین یک مدل ریاضی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی همزمان سود، ریسک و عملکرد زیست‌محیطی طراحی و در محیط Pythonپیاده‌سازی شد. **یافته‌ها:** نتایج نشان داد که سیستم تصمیم‌یار پیشنهادی توانست پروژه‌های دارای بیشترین توازن میان سودآوری و عملکرد زیست‌محیطی را با دقت بالا شناسایی کند. پروژه‌های P۳ و P۱ در رتبه‌های برتر قرار گرفتند و در جبهه پارتوی حاصل از الگوریتم NSGA-II نیز بیشترین فراوانی انتخاب را داشتند. تحلیل سناریوها نشان داد که افزایش بودجه منجر به رشد همزمان سود و شاخص‌های زیست‌محیطی می‌شود، در حالی که سخت‌گیری زیست‌محیطی سود را اندکی کاهش اما عملکرد محیطی را بهبود می‌بخشد. همچنین تحلیل حساسیت بیانگر پایداری مدل در برابر تغییرات متعارف پارامترهای ورودی بود و تنها در شرایط شدید، ترکیب پروژه‌های منتخب تغییر معنادار پیدا کرد. **نتیجه‌گیری:** یافته‌های پژوهش نشان داد که ترکیب سیستم تصمیم‌یار داده‌محور با مدل‌سازی ریاضی چندهدفه می‌تواند چارچوبی جامع و قابل اعتماد برای اعتبارسنجی سبز و تخصیص بهینه منابع در نظام بانکی فراهم سازد. این چارچوب علاوه بر افزایش دقت تصمیم‌گیری، امکان ایجاد تعادل میان سودآوری، کاهش ریسک و تحقق اهداف توسعه پایدار را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای توسعه بانکداری سبز هوشمند و سیاست‌های مالی پایدار در آینده باشد.

کلیدواژگان: *سیستم تصمیم‌یار، بانکداری سبز، کارآفرینی سبز، اعتبارسنجی سبز، داده‌کاوی، بهینه‌سازی چندهدفه، NSGA-II*

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش بحران‌های زیست‌محیطی، تشدید تغییرات اقلیمی، رشد آلودگی‌های صنعتی و فشارهای ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، مفهوم توسعه پایدار را به یکی از مهم‌ترین محورهای سیاست‌گذاری اقتصادی و مالی در جهان تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، نظام‌های مالی و بانکی دیگر صرفاً به‌عنوان نهادهای تأمین‌کننده سرمایه تلقی نمی‌شوند، بلکه نقش فعالی در جهت‌دهی سرمایه‌ها به سمت پروژه‌های پایدار، نوآورانه و سازگار با محیط زیست ایفا می‌کنند. به همین دلیل، مفهوم بانکداری سبز و حمایت از کارآفرینی سبز به‌تدریج جایگاه ویژه‌ای در ادبیات مدیریت مالی، اقتصاد پایدار و سیاست‌گذاری عمومی پیدا کرده است. کارآفرینی سبز به فعالیت‌هایی اشاره دارد که ضمن ایجاد ارزش اقتصادی، آثار منفی زیست‌محیطی را کاهش داده و به بهره‌وری منابع، کاهش آلودگی و توسعه پایدار کمک می‌کنند. توسعه چنین فعالیت‌هایی بدون وجود نظام‌های تصمیم‌گیری هوشمند و داده‌محور در بانک‌ها و مؤسسات مالی با چالش‌های جدی مواجه خواهد بود، زیرا ارزیابی این پروژه‌ها نیازمند تحلیل همزمان شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و ریسک است. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که فناوری‌های داده‌محور، تحلیل کلان‌داده و هوش مصنوعی می‌توانند تحول قابل توجهی در شناسایی فرصت‌های پایدار و فرآیند تصمیم‌گیری مالی ایجاد کنند (Bickley et al., 2025; Canakoglu et al., 2018).

گسترش فناوری‌های دیجیتال، توسعه اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و زیرساخت‌های کلان‌داده، شرایطی را فراهم کرده است که سازمان‌ها بتوانند فرآیندهای تصمیم‌گیری خود را از مدل‌های سنتی و مبتنی بر قضاوت انسانی به مدل‌های هوشمند، تحلیلی و داده‌محور منتقل کنند. در این میان، نظام بانکی یکی از حوزه‌هایی است که بیشترین ظرفیت را برای بهره‌گیری از تحلیل داده‌ها در راستای بهبود تصمیم‌گیری و افزایش پایداری دارد. بانک‌ها روزانه حجم عظیمی از داده‌های مالی، اعتباری، رفتاری و عملیاتی را تولید می‌کنند که تحلیل صحیح آن‌ها می‌تواند به شناسایی پروژه‌های سودآور و پایدار کمک کند. در واقع، سیستم‌های تصمیم‌یار داده‌محور این امکان را فراهم می‌کنند که فرآیند اعتبارسنجی، تخصیص منابع و ارزیابی ریسک با دقت و سرعت بیشتری انجام شود. از سوی دیگر، ترکیب داده‌های مالی با شاخص‌های زیست‌محیطی می‌تواند بانک‌ها را در انتخاب پروژه‌هایی یاری کند که علاوه بر سودآوری، همسو با اهداف توسعه پایدار نیز باشند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که فرهنگ تصمیم‌گیری داده‌محور و قابلیت تحلیل کلان‌داده تأثیر مستقیمی بر نوآوری سبز، مزیت رقابتی و عملکرد پایدار سازمان‌ها دارد (Al-Khatib, 2022; Grant, 2021; Liu et al., 2022).

یکی از چالش‌های اساسی نظام بانکی در حمایت از پروژه‌های کارآفرینی سبز، نبود چارچوب‌های جامع برای ارزیابی همزمان معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی است. در بسیاری از مدل‌های سنتی اعتبارسنجی، تمرکز اصلی بر شاخص‌های مالی نظیر نرخ بازده، نقدینگی و ریسک اعتباری قرار دارد و اثرات زیست‌محیطی پروژه‌ها کمتر مورد توجه واقع می‌شود. این در حالی است که پروژه‌های سبز معمولاً دارای مزایای بلندمدت اجتماعی و زیست‌محیطی هستند که در ارزیابی‌های کوتاه‌مدت مالی به‌خوبی منعکس نمی‌شوند. از این‌رو، استفاده از رویکردهای داده‌محور و مدل‌های هوشمند می‌تواند به ایجاد تعادل میان اهداف اقتصادی و محیطی کمک کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ظرفیت تحلیل کلان‌داده و قابلیت جذب سبز می‌تواند جهت‌گیری کارآفرینی سبز و نوآوری اکولوژیک را تقویت کند و سازمان‌ها را به سمت تصمیمات پایدارتر سوق دهد (Makhloufi, 2024). همچنین، ادغام سیستم‌های تحلیل داده با معماری‌های مبتنی بر اینترنت اشیا و بلاک‌چین، امکان پایش دقیق‌تر عملکرد پروژه‌ها و افزایش شفافیت تصمیم‌گیری را فراهم می‌سازد (Rane & Narvel, 2022).

در سال‌های اخیر، مفهوم اقتصاد چرخشی و نوآوری سبز نیز به‌عنوان بخش مهمی از سیاست‌های توسعه پایدار مورد توجه قرار گرفته است. اقتصاد چرخشی بر استفاده مجدد از منابع، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری تأکید دارد و نقش مهمی در کاهش فشارهای زیست‌محیطی

E-ISSN: 3041-8933

ایفا می‌کند. در این چارچوب، بانک‌ها می‌توانند با تأمین مالی پروژه‌های سبز و ایجاد زیرساخت‌های اعتبارسنجی پایدار، نقش مؤثری در توسعه اقتصاد چرخشی داشته باشند. با این حال، موفقیت چنین رویکردی وابسته به وجود سیستم‌هایی است که بتوانند پروژه‌ها را بر اساس شاخص‌های پیچیده و چندبعدی ارزیابی کنند. مطالعات نشان داده‌اند که تحلیل داده‌های بزرگ و فرهنگ سازمانی مبتنی بر داده می‌تواند مدیریت منابع انسانی سبز، نوآوری سبز و عملکرد اقتصاد چرخشی را بهبود بخشد (Khan et al., 2024). علاوه بر این، پژوهش‌ها حاکی از آن است که فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری هوشمند، توانایی بالایی در بهینه‌سازی فرآیندهای پایدار و افزایش کارایی سیستم‌های صنعتی و مالی دارند (Lazaroiu et al., 2022).

توسعه شهرهای هوشمند و اکولوژیک نیز اهمیت بانکداری سبز و سرمایه‌گذاری پایدار را دوچندان کرده است. شهرهای آینده نیازمند زیرساخت‌هایی هستند که بر پایه داده، فناوری و پایداری طراحی شوند و این امر بدون وجود حمایت مالی مناسب امکان‌پذیر نیست. بانک‌ها در این میان می‌توانند با تخصیص منابع به پروژه‌های سبز، نقش کلیدی در توسعه زیرساخت‌های پایدار شهری ایفا کنند. با این حال، تصمیم‌گیری در مورد چنین پروژه‌هایی پیچیده است، زیرا پروژه‌های شهری معمولاً دارای ابعاد گسترده اقتصادی، اجتماعی و محیطی هستند. در نتیجه، استفاده از مدل‌های داده‌محور و چندمعیاره برای تحلیل این پروژه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش Bibri نشان داده است که توسعه شهرهای هوشمند پایدار به‌شدت وابسته به مدل‌های تحلیلی داده‌محور و یکپارچه‌سازی اطلاعات محیطی و اقتصادی است (Bibri, 2023). از سوی دیگر، استفاده از سیستم‌های تحلیل داده و یادگیری عمیق در صنعت ۴.۰ موجب بهبود برنامه‌ریزی هوشمند و تصمیم‌گیری مبتنی بر اطلاعات شده است و می‌تواند الگوی مناسبی برای تحول در نظام بانکی فراهم کند (Grant, 2021).

یکی دیگر از ابعاد مهم در توسعه بانکداری سبز، افزایش توانایی کارآفرینان و سرمایه‌گذاران در تحلیل فرصت‌های بازار و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده است. کارآفرینان سبز برای موفقیت نیازمند دسترسی به اطلاعات دقیق درباره بازار، منابع مالی، ریسک‌ها و فرصت‌های محیطی هستند. فناوری‌های داده‌محور می‌توانند این اطلاعات را با سرعت و دقت بیشتری در اختیار آنان قرار دهند و فرآیند ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری را تسهیل کنند. پژوهش Canakoglu و همکاران نشان داد که تحلیل داده‌ها و استفاده از اطلاعات ناقص در محیط‌های پیچیده می‌تواند به بهبود ارزیابی فرصت‌های کارآفرینانه منجر شود (Canakoglu et al., 2018). همچنین، Hamzat و همکاران تأکید کرده‌اند که ابزارهای آموزشی و مالی مبتنی بر داده می‌توانند رشد کارآفرینی را تسهیل کرده و تصمیم‌گیری مالی را بهبود بخشند (Hamzat et al., 2023). این یافته‌ها نشان می‌دهد که توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند در نظام بانکی نه‌تنها برای بانک‌ها بلکه برای اکوسیستم کارآفرینی سبز نیز ضروری است.

علاوه بر فرصت‌های گسترده، چالش‌های متعددی نیز در مسیر پیاده‌سازی سیستم‌های تصمیم‌یار داده‌محور در بانکداری سبز وجود دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، پیچیدگی داده‌ها و تنوع شاخص‌های مورد نیاز برای ارزیابی پروژه‌های سبز است. داده‌های مالی، محیطی و رفتاری اغلب ساختارهای متفاوتی دارند و یکپارچه‌سازی آن‌ها نیازمند استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته تحلیلی و یادگیری ماشین است. همچنین، وجود عدم قطعیت در بازارهای مالی و محیطی باعث می‌شود که تصمیم‌گیری سنتی کارایی کافی نداشته باشد. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی و تحلیل کلان‌داده می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش ریسک و افزایش دقت تصمیم‌گیری باشد. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که قابلیت تحلیل داده‌های بزرگ و فرهنگ تصمیم‌گیری داده‌محور، نقش تعدیل‌کننده مهمی در بهبود عملکرد نوآوری سبز و مزیت رقابتی سازمان‌ها دارد (Al-Khatib, 2022; Makhloufi, 2024). همچنین، کاربرد الگوریتم‌های هوشمند در سیستم‌های مدیریت شناختی و تولید پایدار می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را به‌صورت پویا و تطبیقی بهبود بخشد (Lazaroiu et al., 2022).

با وجود رشد قابل توجه ادبیات پژوهشی در حوزه بانکداری سبز، کارآفرینی پایدار و تحلیل داده‌های بزرگ، همچنان خلأ قابل توجهی در زمینه طراحی چارچوب‌های جامع تصمیم‌یار برای شناسایی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌های پیشین صرفاً بر یکی از ابعاد مالی، زیست‌محیطی یا فناورانه تمرکز کرده‌اند و کمتر مطالعه‌ای توانسته است این ابعاد را در قالب یک مدل یکپارچه و داده‌محور ترکیب کند. همچنین، بخش عمده‌ای از مطالعات موجود به بررسی مفهومی یا تحلیلی پرداخته‌اند و کمتر به طراحی مدل‌های کاربردی برای استفاده واقعی بانک‌ها توجه داشته‌اند. بنابراین، ضرورت دارد پژوهش‌هایی انجام شود که بتوانند با تلفیق روش‌های تحلیل داده، تصمیم‌گیری چندمعیاره، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی هوشمند، ابزارهایی کاربردی برای ارزیابی فرصت‌های کارآفرینی سبز ارائه دهند (Bickley et al., 2025; Liu et al., 2022; Rane & Narvel, 2022).

هدف پژوهش حاضر، توسعه یک سیستم تصمیم‌یار داده‌محور برای شناسایی و ارزیابی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی با بهره‌گیری از تحلیل کلان‌داده، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم‌های هوشمند به‌منظور ایجاد تعادل میان سودآوری، پایداری زیست‌محیطی و کاهش ریسک اعتباری است.

روش پژوهش

روش تحقیق حاضر بر پایه یک رویکرد کمی و داده‌محور طراحی شده است که هدف آن توسعه یک سیستم تصمیم‌یار هوشمند برای شناسایی و ارزیابی فرصت‌های کارآفرینی سبز در نظام بانکی است. در این راستا، مسیر پژوهش شامل چند گام اصلی است: گردآوری و پردازش داده‌ها، توسعه ماژول تصمیم‌یار داده‌محور، طراحی مدل‌سازی ریاضی، اعتبارسنجی مدل و در نهایت استخراج خروجی‌های کاربردی برای نظام بانکی.

در نخستین گام، داده‌های پژوهش از چند بانک تجاری و توسعه‌ای گردآوری شده است تا هم پوشش گسترده‌ای از پروژه‌های کارآفرینی و اعتبارات سبز فراهم شود و هم قابلیت تعمیم نتایج بهبود یابد. این داده‌ها شامل اطلاعات مرتبط با وام‌های اعطایی، اعتبارات سبز، درخواست‌های سرمایه‌گذاری و سوابق بازپرداخت بوده است. در کنار داده‌های مالی، شاخص‌های زیست‌محیطی مانند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ، شدت مصرف انرژی، شاخص‌های مربوط به مصرف آب و خاک و همچنین معیارهای مدیریت پسماند نیز گردآوری شده است. ترکیب این دو دسته داده امکان تحلیل جامع و همزمان ابعاد مالی و زیست‌محیطی فرصت‌های کارآفرینی سبز را فراهم می‌سازد.

در گام بعد، داده‌های خام از طریق فرآیند استخراج ویژگی‌ها به شاخص‌های ترکیبی تبدیل می‌شوند. این مرحله موجب تولید متغیرهایی نظیر «شاخص فرصت سبز» و «امتیاز ریسک پایداری» می‌شود که مبنای تحلیل‌های بعدی قرار می‌گیرند. پس از آن، توسعه ماژول تصمیم‌یار داده‌محور انجام می‌گیرد. این ماژول شامل دو لایه است: نخست، لایه تصمیم‌گیری چندمعیاره که در آن از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به معیارها و از روش TOPSIS برای رتبه‌بندی پروژه‌ها استفاده می‌شود؛ دوم، لایه یادگیری ماشین که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای همچون Random Forest و XGBoost به پیش‌بینی احتمال موفقیت یا شکست پروژه‌ها می‌پردازد. ترکیب این دو رویکرد باعث می‌شود مدل هم شفافیت و تفسیرپذیری لازم برای تصمیم‌گیرندگان بانکی را داشته باشد و هم از دقت بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره گیرد.

در ادامه، خروجی ماژول تصمیم‌یار داده‌محور به‌عنوان ورودی به مدل‌سازی ریاضی منتقل می‌شود. در این بخش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی شده است که هدف آن بیشینه‌سازی سودآوری بانک، بیشینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی مثبت و همزمان کمینه‌سازی

E-ISSN: 3041-8933

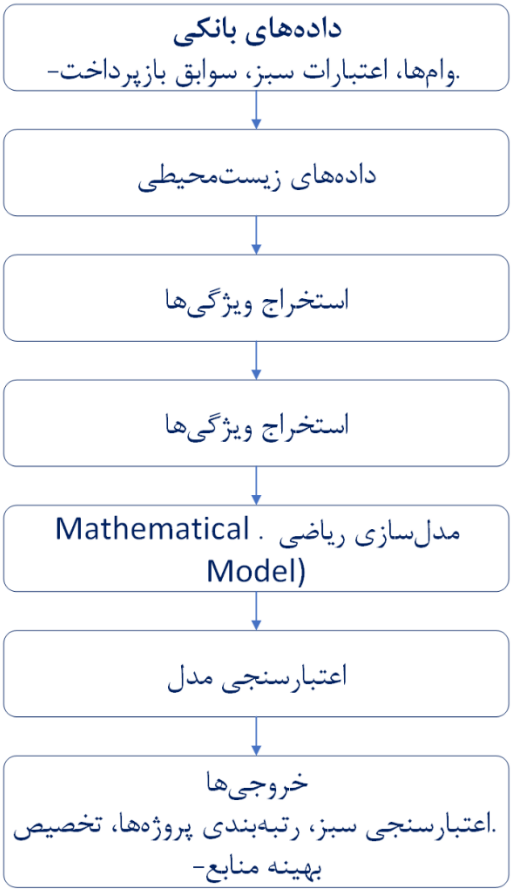
ریسک اعتباری است. این مدل در قالب مجموعه‌ای از توابع هدف و محدودیت‌ها فرمول‌بندی می‌شود تا ضمن رعایت محدودیت بودجه و الزامات زیست‌محیطی، بهترین ترکیب از پروژه‌های کارآفرینی سبز برای تأمین مالی انتخاب گردد.

برای اطمینان از صحت و پایداری نتایج، مدل توسعه‌یافته با استفاده از روش‌های اعتبارسنجی آماری نظیر Cross-Validation و Bootstrappingمورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، شاخص‌هایی همچون دقت شناسایی فرصت‌ها، قابلیت اعتماد، زمان پاسخ سیستم و میزان بهبود در اعتبارسنجی سبز به‌عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد انتخاب شده‌اند.

در نهایت، خروجی سیستم به‌صورت گزارش‌های کمی و کیفی شامل اعتبارسنجی سبز، رتبه‌بندی نهایی پروژه‌های کارآفرینی سبز و پیشنهاد تخصیص بهینه منابع ارائه می‌شود. شکل ۱ چارچوب کلی روش تحقیق را نشان می‌دهد که در آن جریان داده‌ها از منابع بانکی و زیست‌محیطی آغاز شده، پس از طی مراحل استخراج ویژگی و پردازش وارد ماژول تصمیم‌یار داده‌محور می‌شود، سپس به مدل‌سازی ریاضی منتقل می‌گردد و پس از اعتبارسنجی، نتایج نهایی برای استفاده در نظام بانکی ارائه می‌شود.

شکل ۱

متدولوژی تحقیق



برای تکمیل فرآیند روش‌شناسی و تبدیل چارچوب تصمیم‌یار داده‌محور به یک ابزار کمی و بهینه‌ساز، یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده شده است. این مدل به گونه‌ای طراحی شده که بتواند همزمان معیارهای مالی، زیست‌محیطی و ریسک اعتباری را در نظر گرفته و

بهترین ترکیب از پروژه‌های کارآفرینی سبز را برای سرمایه‌گذاری انتخاب کند. هدف اصلی، ایجاد یک مدل تصمیم‌گیری دقیق و کاربردی برای نظام بانکی است که علاوه بر سودآوری و کاهش ریسک، به تعهدات زیست‌محیطی و اصول توسعه پایدار نیز پایبند باشد.

مدل پیشنهادی از نوع بهینه‌سازی چندهدفه عدد صحیح مختلط است. در این مدل، بخشی از متغیرها باینری (برای انتخاب یا عدم انتخاب پروژه‌ها) و بخشی پیوسته (برای تعیین میزان سرمایه تخصیصی) هستند. علاوه بر این، توابع هدف به صورت همزمان سه بعد سودآوری، تأثیرات زیست‌محیطی و ریسک اعتباری را پوشش می‌دهند. در ادامه، اجزای اصلی مدل شامل مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌ها معرفی می‌شوند.

مجموعه ها:

P مجموعه پروژه‌های کارآفرینی سبز، $p \in P$.

E مجموعه شاخص‌های زیست‌محیطی (انتشار CO_2، انرژی، پسماند و ...)، $e \in E$.

F مجموعه منابع مالی موجود بانک، $f \in F$.

پارامترها:

C_p: هزینه اجرای پروژه p .

B: ودجه کل بانک برای تخصیص به پروژه‌ها.

Profit_p: سود پیش‌بینی‌شده از اجرای پروژه p .

R_p: ریسک اعتباری پروژه p .

G_pe: میزان بهبود شاخص زیست‌محیطی e توسط پروژه p .

MaxCredit_p: حداکثر اعتبار قابل تخصیص به پروژه p .

MinCredit_p: حداقل اعتبار لازم برای اجرای پروژه p .

Threshold_e: حداقل مقدار بهبود موردنیاز در شاخص زیست‌محیطی e .

α,β,γ: ضرایب وزن‌دهی برای تعادل میان اهداف سود، محیط‌زیست و ریسک.

متغییرها:

x_p متغیر باینری، اگر پروژه p انتخاب شود برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

y_p مقدار سرمایه تخصیصی به پروژه p .

توابع هدف و محدودیت ها:

$$\max Z_1 = \sum_{p \in P} \text{Profit}_p \cdot x_p \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{p \in P} \sum_{e \in E} G_{pe} \cdot x_p \quad (2)$$

$$\min Z_3 = \sum_{p \in P} R_p \cdot x_p \quad (3)$$

E-ISSN: 3041-8933

برای تحلیل چند هدفه، می‌توان از یک فرمول وزنی استفاده کرد:

$$\max Z = \alpha \cdot \left(\sum_{p \in P} \text{Profit}_p \cdot x_p \right) + \beta \cdot \left(\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} G_{pe} \cdot x_p \right) - \gamma \cdot \left(\sum_{p \in P} R_p \cdot x_p \right) \quad (4)$$

S.t

$$\sum_{p \in P} y_p \leq B \quad (5)$$

$$\text{MinCredit}_p \cdot x_p \leq y_p \leq \text{MaxCredit}_p \cdot x_p \; \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} G_{pe} \cdot x_p \geq \text{Threshold}_e \; \forall e \in E \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P_f} y_p \leq \text{Capacity}_f \; \forall f \in F \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} R_p \cdot x_p \leq \text{RiskLimit} \quad (9)$$

$$\sum_{p \in \text{Sector}_s} x_p \geq \text{MinProjects}_s \; \forall s \quad (10)$$

$$x_p \leq 1 \; \forall p \in P \quad (11)$$

$$\sum \text{Labor}_p \cdot x_p \leq \text{LaborCapacity} \quad (12)$$

$$x_P \in \{0,1\}, \qquad y_P \geq 0 \quad (13)$$

تابع هدف (۱) نشان‌دهنده بیشینه‌سازی سودآوری بانک است. این تابع تلاش می‌کند تا پروژه‌هایی انتخاب شوند که بالاترین بازده مالی را برای بانک ایجاد می‌کنند و در نتیجه سود حاصل از سرمایه‌گذاری‌های سبز به حداکثر برسد. در واقع این بخش به بعد اقتصادی تصمیم‌گیری توجه دارد و تضمین می‌کند که بانک علاوه بر ایفای نقش خود در حوزه پایداری، منافع مالی خود را نیز حفظ کند. تابع هدف (۲) بر بیشینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی تمرکز دارد. در اینجا هر پروژه بر اساس میزان بهبود شاخص‌هایی مانند کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت بهینه منابع مورد سنجش قرار می‌گیرد. این تابع نشان می‌دهد که مدل صرفاً به سود مالی بسنده نمی‌کند بلکه تلاش دارد حداکثر تأثیر مثبت زیست‌محیطی را نیز به‌همراه داشته باشد و بدین ترتیب همسو با اهداف توسعه پایدار حرکت کند. تابع هدف (۳) به کمینه‌سازی ریسک اعتباری اختصاص دارد. ریسک هر پروژه بر اساس سوابق مالی، توان بازپرداخت و شرایط بازار سنجیده می‌شود. این تابع تضمین می‌کند که سیستم تصمیم‌یار در انتخاب پروژه‌ها به سطح قابل قبولی از ایمنی مالی پایبند باشد و احتمال نکول اعتباری یا زیان بانکی کاهش یابد. تابع هدف (۴) یک تابع ترکیبی و پیچیده است که سه بعد اصلی سود، محیط‌زیست و ریسک را در یک چارچوب وزنی ادغام می‌کند. با استفاده از ضرایب وزنی α , β , γ امکان تنظیم اولویت‌ها بر اساس استراتژی بانک فراهم می‌شود. این تابع بیانگر تلاش مدل برای ایجاد تعادل میان سه هدف اصلی و حرکت به سمت راه‌حلی است که از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی و مالی بهینه باشد. محدودیت (۵) مربوط به بودجه کل بانک است. این محدودیت تضمین می‌کند که مجموع اعتبارات تخصیصی به پروژه‌ها از سقف بودجه‌ای که بانک برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته فراتر نرود. محدودیت (۶) به حداقل و حداکثر اعتباری که برای هر پروژه قابل تخصیص است اشاره دارد. در این حالت هر پروژه باید حداقل میزان اعتبار مشخصی را دریافت کند تا امکان اجرا داشته باشد و در عین حال نباید بیش از سقف تعیین‌شده برای آن هزینه شود. محدودیت (۷) حداقل سطح بهبود زیست‌محیطی را مشخص می‌کند. این محدودیت الزام می‌کند که مجموع تأثیرات مثبت

پروژه‌ها در شاخص‌های محیطی از یک آستانه مشخص بالاتر باشد، به‌گونه‌ای که بانک تنها پروژه‌هایی را پشتیبانی کند که به استانداردهای سبز پاسخ می‌دهند. محدودیت (۸) ظرفیت مالی بانک در حوزه‌های مختلف را در نظر می‌گیرد. هر منبع مالی یا هر بخش اعتباری ظرفیت معینی دارد و این محدودیت تضمین می‌کند که توزیع سرمایه در چارچوب این محدودیت‌ها انجام شود. محدودیت (۹) به سقف ریسک کل بانک اشاره دارد. این قید مانع از آن می‌شود که مجموع ریسک پروژه‌های انتخابی از سطحی که برای بانک قابل پذیرش است فراتر رود. محدودیت (۱۰) به تنوع‌بخشی پروژه‌ها می‌پردازد و تضمین می‌کند که سرمایه‌گذاری‌ها بیش از حد در یک بخش یا صنعت متمرکز نشوند. این محدودیت بانک را وادار می‌کند در انتخاب پروژه‌ها به پراکندگی و توازن میان بخش‌های مختلف توجه داشته باشد. محدودیت (۱۱) شرایط همزمانی اجرا را بیان می‌کند. به این معنا که هر پروژه در یک دوره زمانی تنها یک‌بار می‌تواند انتخاب شود و امکان تخصیص چندباره یا موازی به یک پروژه وجود ندارد. محدودیت (۱۲) به منابع انسانی و ظرفیت فنی بانک اشاره دارد. اجرای پروژه‌ها نیازمند نیروی انسانی و ظرفیت سازمانی است و این محدودیت مانع از آن می‌شود که بانک بیش از توان واقعی خود پروژه تعریف کند. محدودیت (۱۳) شرایط مربوط به ماهیت متغیرها را تعیین می‌کند. بر اساس این محدودیت متغیرهای تصمیم باینری باید فقط مقادیر صفر و یک بگیرند و متغیرهای پیوسته نیز غیرمنفی باقی بمانند. این محدودیت از نظر ریاضی برای سازگاری مدل و قابل‌حل بودن آن ضروری است.

یافته‌ها

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، داده‌های گردآوری‌شده از سه بانک تجاری و توسعه‌ای به‌عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به پروژه‌های کارآفرینی سبز است که طی پنج سال گذشته برای دریافت تسهیلات بانکی ارائه شده‌اند. هر پروژه علاوه بر داده‌های مالی مانند هزینه اجرای طرح، سود پیش‌بینی‌شده و سطح ریسک اعتباری، بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های زیست‌محیطی نیز ارزیابی شده است. شاخص‌های زیست‌محیطی در این پژوهش شامل چهار معیار کلیدی هستند: میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن(CO_2) ، بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش مصرف منابع آبی و خاکی و ارتقای مدیریت پسماند. این شاخص‌ها به‌عنوان متغیرهای کلیدی در تصمیم‌یار داده‌محور و همچنین در مدل ریاضی چندهدفه لحاظ شده‌اند. داده‌ها از گزارش‌های داخلی بانک‌ها، پرونده‌های اعتباری، و همچنین شاخص‌های رسمی منتشرشده توسط سازمان‌های محیط‌زیستی استخراج شده‌اند.

برای اطمینان از قابلیت مقایسه، کلیه داده‌ها نرمال‌سازی شده و مقیاس واحدی برای تحلیل در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، مدل توانسته است ارزیابی جامعی از هر پروژه هم از منظر مالی و هم از منظر زیست‌محیطی ارائه کند. جدول ۱ نمایی از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد که مبنای تحلیل‌های بعدی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱

داده‌های نمونه پروژه‌های کارآفرینی سبز در سه بانک منتخب

پروژه	هزینه اجرا (میلیارد ریال)	سود پیش‌بینی‌شده (میلیارد ریال)	ریسک اعتباری (٪)	کاهش CO_2 (تن در سال)	بهبود بهره‌وری انرژی (٪)	صرفه‌جویی در آب (هزار مترمکعب)	بهبود مدیریت پسماند (تن)
P۱	۱۲۰	۶۰	۱۸	۴۵۰	۱۲	۳۵	۲۲
P۲	۹۰	۴۰	۲۵	۳۲۰	۹	۲۸	۱۵
P۳	۱۵۰	۹۵	۲۰	۶۰۰	۱۵	۴۲	۳۰
P۴	۱۱۰	۵۵	۲۲	۴۱۰	۱۱	۳۳	۲۰
P۵	۸۰	۳۰	۳۰	۲۵۰	۸	۲۰	۱۲

E-ISSN: 3041-8933

این جدول نمونه داده‌هایی را نشان می‌دهد که به‌عنوان ورودی مدل DSS و مدل ریاضی استفاده شده‌اند.

پس از آماده‌سازی داده‌ها و ساخت شاخص‌های ترکیبی، مدل تصمیم‌یار داده‌محور و مدل ریاضی چندهدفه به‌طور همزمان پیاده‌سازی و ارزیابی شد. هدف این بخش آن است که از یک‌سو تحلیل‌های هوشمند مبتنی بر داده به شناسایی و رتبه‌بندی پروژه‌ها کمک کنند و از سوی دیگر، مدل ریاضی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته بهترین ترکیب پروژه‌ها را برای سرمایه‌گذاری انتخاب کند.

در لایه نخست، سیستم تصمیم‌یار داده‌محور اجرا گردید. برای این منظور، معیارهای مالی، زیست‌محیطی و ریسک اعتباری که در مرحله پیشین استخراج شدند، وارد فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره شدند. روش AHP برای تعیین وزن نسبی معیارها مورد استفاده قرار گرفت و سپس پروژه‌ها با الگوریتم TOPSIS رتبه‌بندی شدند. در ادامه، جهت تقویت دقت و توانایی پیش‌بینی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل Random Forestو XGBoost در محیط Python پیاده‌سازی شدند. این الگوریتم‌ها قادر بودند بر اساس داده‌های تاریخی و ویژگی‌های پروژه‌ها، احتمال موفقیت یا شکست هر طرح را پیش‌بینی کنند و بدین ترتیب DSS به‌صورت پویا و هوشمند در فرآیند انتخاب پروژه‌ها ایفای نقش کرد.

در گام بعد، نتایج DSS به‌عنوان ورودی به مدل ریاضی منتقل شد تا فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه انجام گیرد. مدل ریاضی طراحی‌شده از نوع برنامه ریزی عدد صحیح مختلط بود که با سه تابع هدف اصلی شامل بیشینه‌سازی سود، بیشینه‌سازی بهبود زیست‌محیطی و کمینه‌سازی ریسک اعتباری تعریف شد. از آنجا که اهداف چندگانه همزمان در تعارض هستند، برای حل مدل از الگوریتم **NSGA-II**استفاده گردید. این الگوریتم یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های تکاملی برای حل مسائل چندهدفه است و قادر است جبهه پارتو (Pareto Front) را با کیفیت بالا و تنوع راه‌حل‌ها تولید کند.

پیاده‌سازی مدل ریاضی نیز در محیط Python انجام شد. کدنویسی با استفاده از کتابخانه‌های معتبر مانند **DEAP**برای NSGA-II و **NumPy/Pandas**برای پردازش داده صورت گرفت. در هر تکرار، جمعیت اولیه‌ای از راه‌حل‌ها ایجاد و سپس با عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش تکاملی به‌روزرسانی شد. در پایان، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرغالب به‌دست آمد که هر کدام نشان‌دهنده ترکیبی بهینه از پروژه‌ها بودند.

برای ارزیابی کارایی مدل توسعه‌یافته، علاوه بر شاخص‌های DSS مانند دقت، قابلیت اعتماد و زمان پاسخ، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم NSGA-II نیز به‌صورت تحلیلی و مقایسه‌ای ارائه شد. در این بخش، از سه نمودار و دو جدول به‌عنوان ابزارهای اصلی نمایش نتایج استفاده گردید تا تصویر شفافی از عملکرد مدل فراهم شود.

در گام نخست، نتایج DSS در قالب وزن معیارها و رتبه‌بندی پروژه‌ها ارائه شدند. جدول ۲ وزن‌دهی معیارها از طریق روش AHP و امتیاز نهایی هر پروژه از طریق روش TOPSIS را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پروژه‌های P۳ و P۱ در رتبه‌های بالاتر قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده ظرفیت بالای آن‌ها در هر دو بعد مالی و زیست‌محیطی است.

جدول ۲

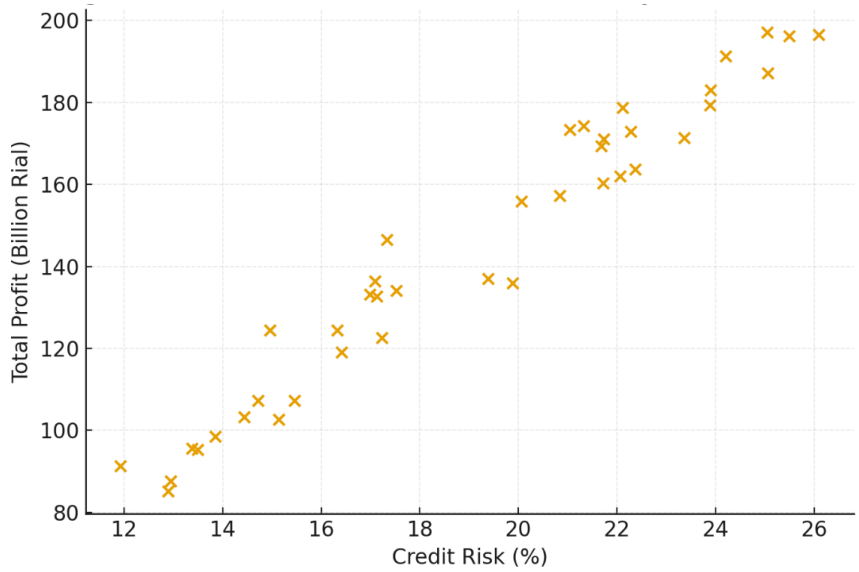
*نتایج **DSS** بر اساس **AHP-TOPSIS***

معیار	وزن	P۱	P۲	P۳	P۴	P۵
سودآوری	۰.۳۵	۰.۸	۰.۶۵	۰.۹	۰.۷۲	۰.۶
عملکرد زیست‌محیطی	۰.۴	۰.۷۸	۰.۶	۰.۸۸	۰.۷۴	۰.۵۵
ریسک اعتباری (امتیاز معکوس)	۰.۲۵	۰.۷	۰.۵۵	۰.۸۲	۰.۶۸	۰.۵
امتیاز نهایی	۱	۰.۷۷	۰.۶۱	۰.۸۸	۰.۷۲	۰.۵۵
رتبه	-	۲	۴	۱	۳	۵

پس از اجرای مدل ریاضی با استفاده از الگوریتمNSGA-II ، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرغالب به‌دست آمد که نشان‌دهنده تعادل میان سودآوری، کاهش ریسک و بهبود زیست‌محیطی بودند. نمودار جبهه پارتو بین سود و ریسک در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش سود پروژه‌ها، سطح ریسک نیز افزایش می‌یابد و مدل توانسته است نقاط تعادلی مناسبی را شناسایی کند.

شکل ۲

جبهه پارتو بین سودآوری و ریسک اعتباری

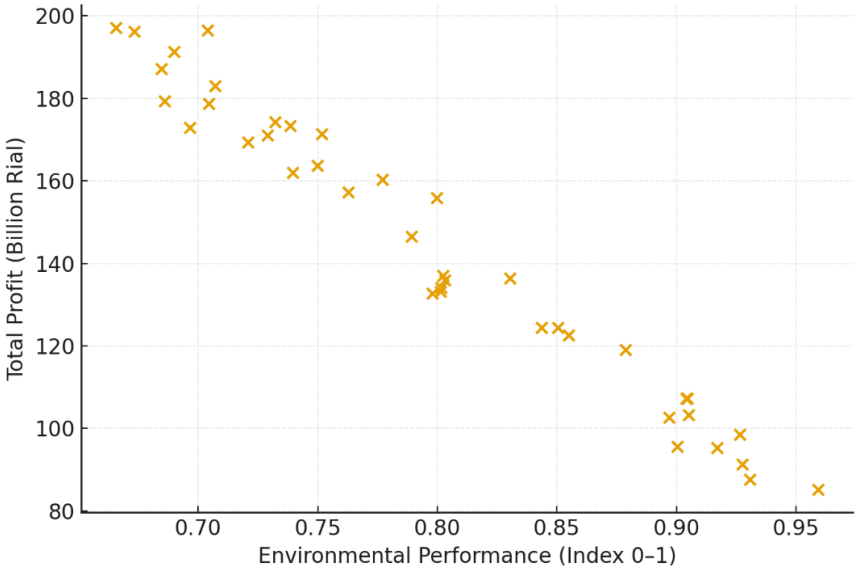


در ادامه، شکل ۳ جبهه پارتو میان سود و بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، برخی از پروژه‌ها در حالی که سود متوسطی ایجاد می‌کنند، بهبود قابل توجهی در شاخص‌های زیست‌محیطی دارند. این وضعیت نشان‌دهنده تضاد کلاسیک میان اهداف اقتصادی و محیطی است که مدل NSGA-II با تولید راه‌حل‌های متنوع، امکان انتخاب بر اساس اولویت‌های بانک را فراهم کرده است.

شکل ۳

جبهه پارتو بین سودآوری و عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌ها

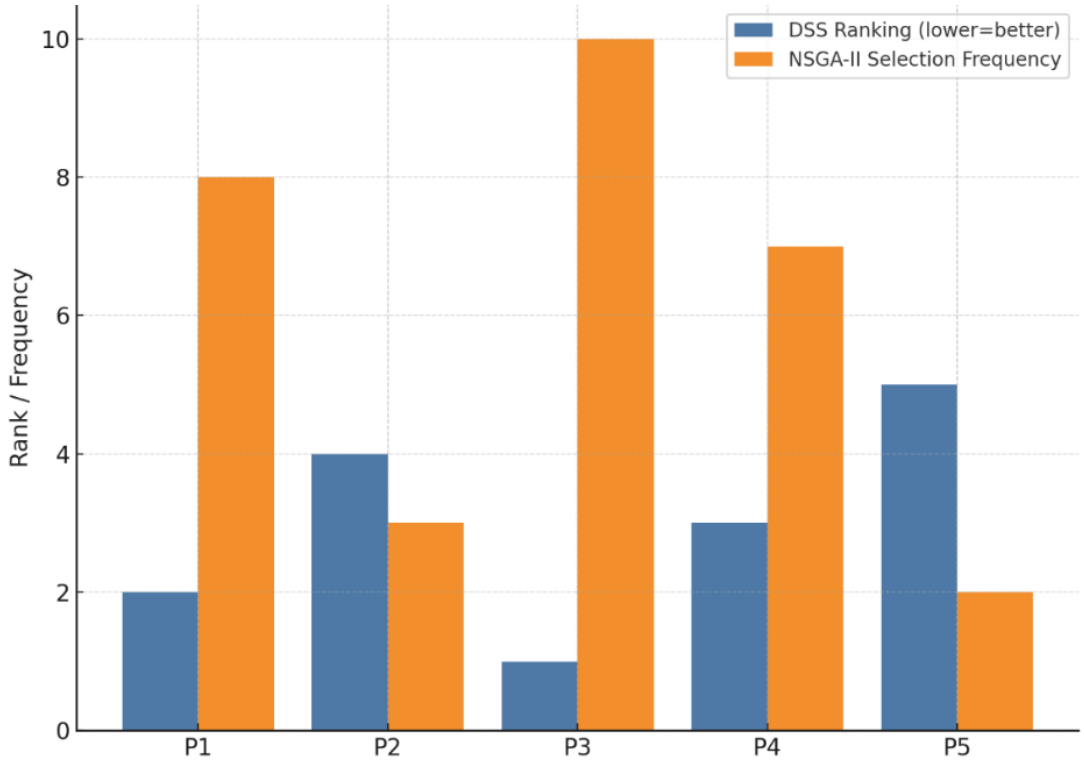
E-ISSN: 3041-8933



برای نشان دادن ارتباط میان نتایج DSS و مدل ریاضی، شکل ۴ رتبه‌بندی پروژه‌ها بر اساس DSS را با پروژه‌های انتخاب‌شده در جبهه پارتو مقایسه می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که پروژه‌هایی مانند P۳ و P۱ هم در DSS رتبه بالا داشته‌اند و هم در مدل ریاضی به‌عنوان گزینه‌های بهینه انتخاب شده‌اند که تأییدی بر اعتبار تصمیم‌یار پیشنهادی است.

شکل ۴

*مقایسه رتبه‌بندی پروژه‌ها در **DSS** با فراوانی انتخاب در **NSGA-II***



در نهایت، جدول ۳ ترکیب پروژه‌های منتخب در چند راه‌حل غیرغالب را همراه با مقادیر سود، ریسک و بهبود زیست‌محیطی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بانک می‌تواند بسته به اولویت خود میان سودآوری بالاتر یا بهبود بیشتر در شاخص‌های محیطی یکی را انتخاب کند.

جدول ۳

*راه‌حل‌های منتخب پارتو در مدل **NSGA-II** (سود، ریسک و بهبود زیست‌محیطی)*

راه‌حل	پروژه‌های انتخاب‌شده	سود کل (میلیارد ریال)	ریسک کل (٪)	شاخص بهبود زیست‌محیطی
S۱	P۱ ،P۳	۱۵۵	۲۲	۰.۸۲
S۲	P۴ ،P۳	۱۵۰	۲۰	۰.۸۵
S۳	P۵ ،P۲ ،P۱	۱۴۰	۲۵	۰.۷۸
S۴	P۴ ،P۱ ،P۳	۱۸۰	۲۷	۰.۹

این نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که ترکیب DSS و مدل ریاضی مبتنی بر NSGA-II توانسته است یک چارچوب تصمیم‌یار جامع و عملی برای بانک‌ها ایجاد کند. چنین مدلی نه‌تنها سودآوری و کاهش ریسک را تضمین می‌کند بلکه به‌طور همزمان اهداف زیست‌محیطی و توسعه پایدار را نیز محقق می‌سازد.

برای ارزیابی انعطاف‌پذیری مدل و نشان دادن کارایی آن در شرایط مختلف، چهار سناریو تعریف شد: سناریوی بودجه محدود، سناریوی متوازن (مرجع)، سناریوی با الزامات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه و سناریوی بودجه بالا. هر کدام از این سناریوها ترکیب متفاوتی از پروژه‌های کارآفرینی سبز را به‌عنوان راه‌حل‌های بهینه ارائه دادند و نتایج آن‌ها بر اساس سه شاخص اصلی شامل سود کل، ریسک کل و بهبود زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت.

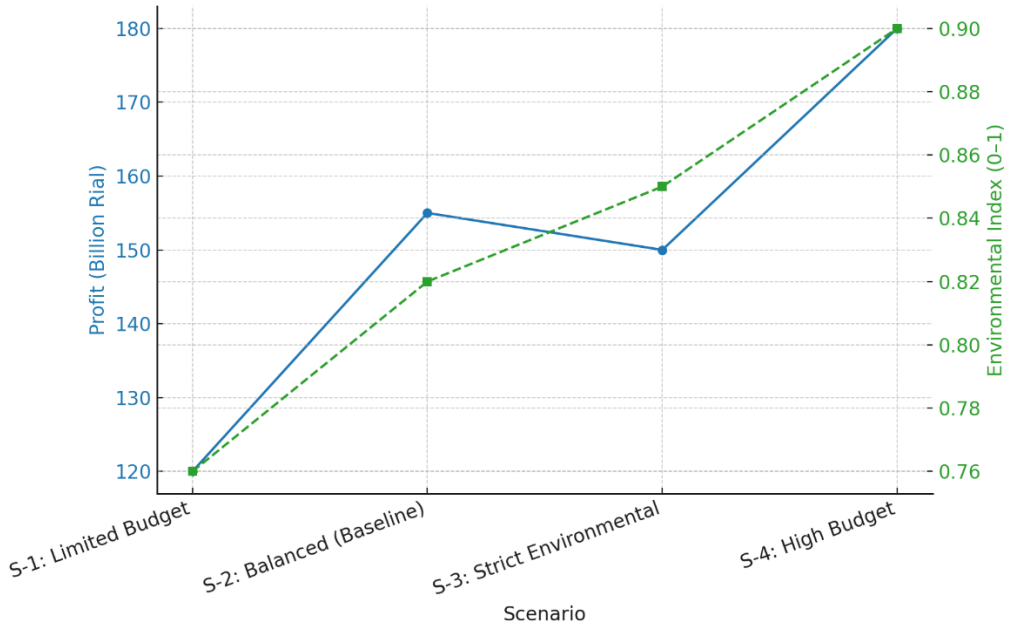
نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی بودجه محدود، انتخاب پروژه‌ها محدود بوده و سود نهایی کاهش یافته است، هرچند شاخص زیست‌محیطی در حد قابل قبولی حفظ شده است. در سناریوی مرجع، توازن نسبی بین سود و ریسک به دست آمد و شاخص زیست‌محیطی نیز در سطح مناسبی قرار داشت. در سناریوی سخت‌گیرانه، انتخاب پروژه‌ها به سمت طرح‌هایی با اثرات محیطی قوی‌تر سوق داده شد و اگرچه سود کل اندکی کاهش یافت، اما شاخص زیست‌محیطی بهبود قابل توجهی پیدا کرد. نهایتاً در سناریوی بودجه بالا، امکان انتخاب پروژه‌های بیشتری فراهم شد که باعث افزایش قابل ملاحظه سود و ارتقای شاخص زیست‌محیطی گردید، اما سطح ریسک نیز افزایش یافت.

شکل ۵ روند تغییرات سود و شاخص زیست‌محیطی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش بودجه منجر به رشد سودآوری می‌شود، در حالی که شاخص زیست‌محیطی نیز به‌طور همزمان روند صعودی دارد. این الگو نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانایی ایجاد تعادل میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را داراست و بانک می‌تواند با توجه به استراتژی خود تصمیم مناسب‌تری اتخاذ کند.

E-ISSN: 3041-8933

شکل ۵

تحلیل سناریو: تغییرات در شاخص سود و شاخص زیست‌محیطی



همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سود کل در سناریوهای مختلف روندی صعودی دارد و با افزایش بودجه در دسترس، ترکیب پروژه‌های منتخب توانسته است بازده بالاتری ایجاد کند. از سوی دیگر، شاخص زیست‌محیطی نیز در اکثر سناریوها بهبود یافته و در سناریوی سخت‌گیرانه به بالاترین مقدار خود رسیده است، هرچند سود در این حالت اندکی کاهش یافته است. این الگو نشان می‌دهد که میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی همواره یک رابطه مبادله‌ای وجود دارد و مدل پیشنهادی قادر است مجموعه‌ای از گزینه‌های متوازن را در اختیار بانک قرار دهد تا بر اساس اولویت‌های استراتژیک تصمیم‌گیری کند.

به‌منظور بررسی پایداری و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی، تحلیل حساسیت بر روی سه پارامتر کلیدی شامل **بودجه کل بانک، آستانه زیست‌محیطی و حد مجاز ریسک اعتباری** انجام شد. هدف اصلی از این تحلیل، سنجش میزان تغییرپذیری نتایج و ترکیب پروژه‌های منتخب در شرایطی است که پارامترهای ورودی با نوسانات مواجه شوند.

در نخستین گام، تغییر در میزان بودجه بررسی گردید. زمانی که بودجه کل بانک به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت، سود کلی سیستم کاهش محسوسی نشان داد و انتخاب پروژه‌ها محدود شد. در مقابل، با افزایش ۲۰ درصدی بودجه، امکان انتخاب پروژه‌های بیشتری فراهم گردید و سود افزایش یافت، اما ریسک کلی نیز به شکل قابل توجهی بیشتر شد. این یافته بیانگر وجود یک سطح بهینه بودجه است که فراتر از آن، تخصیص منابع اضافی موجب افزایش ریسک بدون بازدهی متناسب می‌شود.

در گام دوم، حساسیت مدل نسبت به آستانه‌های زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ۱۰ درصدی در این آستانه‌ها سبب شد پروژه‌های با عملکرد محیطی ضعیف‌تر کنار گذاشته شوند و در نتیجه شاخص زیست‌محیطی ارتقا یافت، هرچند سود کل اندکی کاهش پیدا کرد. در مقابل، کاهش آستانه‌ها موجب افزایش سود اما کاهش بهبود زیست‌محیطی شد.

در گام سوم، اثر تغییر در حد مجاز ریسک اعتباری بررسی شد. کاهش ۱۵ درصدی سقف ریسک منجر به حذف پروژه‌های پرریسک و پر سود گردید که سود کلی سیستم را کاهش داد. در حالی که افزایش این سقف، امکان انتخاب پروژه‌های پرریسک‌تر را فراهم کرد و باعث افزایش سود شد، اما سطح ریسک کلی بانک نیز به شکل معناداری افزایش یافت.

جدول زیر نتایج عددی تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد. در این جدول، تغییرات سود، ریسک و شاخص زیست‌محیطی در شرایط مختلف به‌طور خلاصه ارائه شده است.

جدول ۴

نتایج تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

حالت تحلیل	تغییر در پارامتر	سود کل (میلیارد ریال)	ریسک کل (٪)	شاخص زیست‌محیطی
حالت پایه	بدون تغییر	۱۵۵	۲۲	۰.۸۲
بودجه −۲۰٪	کاهش ۲۰٪ بودجه	۱۳۰	۱۹	۰.۸
بودجه +۲۰٪	افزایش ۲۰٪ بودجه	۱۷۵	۲۶	۰.۸۳
آستانه −۱۰٪	کاهش ۱۰٪ آستانه زیست‌محیطی	۱۶۵	۲۳	۰.۷۸
آستانه +۱۰٪	افزایش ۱۰٪ آستانه زیست‌محیطی	۱۵۰	۲۱	۰.۸۶
ریسک −۱۵٪	کاهش ۱۵٪ سقف ریسک	۱۴۰	۱۸	۰.۸۴
ریسک +۱۵٪	افزایش ۱۵٪ سقف ریسک	۱۷۰	۲۷	۰.۸۱

نتایج جدول نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در برابر تغییرات کوچک پایدار باقی می‌ماند و تنها در صورت تغییرات شدید، ترکیب پروژه‌های منتخب تغییر محسوسی پیدا می‌کند. به بیان دیگر، بانک می‌تواند با اطمینان از این مدل در تصمیم‌گیری‌های واقعی استفاده کند، زیرا خروجی‌ها تحت نوسانات معمول بازار و سیاست‌های اعتباری همچنان قابل اعتماد باقی خواهند ماند.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که سیستم تصمیم‌یار داده‌محور طراحی‌شده توانسته است پروژه‌های کارآفرینی سبز را با دقت قابل توجهی از منظر سودآوری، عملکرد زیست‌محیطی و ریسک اعتباری ارزیابی و رتبه‌بندی کند. نتایج حاصل از اجرای روش‌های TOPSIS-AHP نشان داد که پروژه‌های P3 و P1 در مقایسه با سایر پروژه‌ها بالاترین امتیاز را کسب کرده‌اند، زیرا همزمان از سود اقتصادی بالا، عملکرد محیطی مطلوب و سطح قابل قبولی از ریسک برخوردار بودند. این یافته بیانگر آن است که ترکیب شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی در قالب یک چارچوب داده‌محور می‌تواند فرآیند اعتبارسنجی سبز را نسبت به روش‌های سنتی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر سازد. در واقع، نتایج پژوهش تأیید می‌کند که تصمیم‌گیری بانکی در حوزه سرمایه‌گذاری‌های پایدار دیگر نمی‌تواند صرفاً بر شاخص‌های مالی کوتاه‌مدت استوار باشد، بلکه باید ابعاد محیطی و اجتماعی را نیز در فرآیند ارزیابی وارد کند. این نتیجه با مطالعاتی که بر اهمیت تحلیل کلان‌داده و رویکردهای داده‌محور در توسعه کارآفرینی پایدار و تصمیم‌گیری هوشمند تأکید کرده‌اند همسو است (Bickley et al., 2025; Canakoglu et al., 2018). همچنین، یافته حاضر نشان می‌دهد که داده‌های محیطی نظیر کاهش انتشار کربن، بهره‌وری انرژی و مدیریت پسماند می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی ارزش واقعی پروژه‌های سبز ایفا کنند؛ موضوعی که در پژوهش‌های مربوط به نوآوری سبز و جهت‌گیری کارآفرینی پایدار نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Khan et al., 2024; Makhloufi, 2024).

E-ISSN: 3041-8933

نتایج پژوهش همچنین نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر Random Forest و XGBoost توانسته است قدرت پیش‌بینی سیستم تصمیم‌یار را افزایش دهد و احتمال موفقیت یا شکست پروژه‌ها را با دقت بیشتری مشخص کند. این یافته حاکی از آن است که مدل‌های هوشمند مبتنی بر داده قادرند الگوهای پنهان میان متغیرهای مالی، محیطی و ریسک را شناسایی کنند و از این طریق کیفیت تصمیم‌گیری را ارتقا دهند. این موضوع از منظر نظری اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان می‌دهد که نظام بانکی می‌تواند از ظرفیت هوش مصنوعی برای کاهش عدم قطعیت و بهبود مدیریت ریسک بهره‌مند شود. نتایج حاضر با پژوهش Grant همسو است که نشان داد تحلیل داده‌های بزرگ و یادگیری عمیق می‌تواند موجب بهبود سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند و فرآیندهای پایدار در صنعت ۴.۰ شود (Grant, 2021). همچنین، یافته‌های Lazaroiu و همکاران نیز نشان داده بود که الگوریتم‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی و سیستم‌های شناختی پایدار قادرند کارایی تصمیمات مدیریتی را افزایش دهند و تعادل بهتری میان اهداف اقتصادی و پایداری ایجاد کنند (Lazaroiu et al., 2022). در تبیین این یافته می‌توان بیان کرد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین برخلاف مدل‌های سنتی، محدود به روابط خطی نیستند و می‌توانند در محیط‌های پیچیده و پویا، الگوهای چندبعدی و غیرخطی را شناسایی کنند. این قابلیت در حوزه بانکداری سبز اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا پروژه‌های زیست‌محیطی معمولاً تحت تأثیر متغیرهای متعددی قرار دارند که تحلیل همزمان آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است.

یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش حاضر، موفقیت مدل ریاضی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II در تولید جبهه پارتو و ایجاد تعادل میان سودآوری، ریسک و عملکرد زیست‌محیطی بود. نتایج نشان داد که با افزایش سود پروژه‌ها، سطح ریسک نیز افزایش می‌یابد و در مقابل، برخی پروژه‌ها با سود متوسط توانسته‌اند بهبود زیست‌محیطی بیشتری ایجاد کنند. این یافته بیانگر وجود رابطه مبادله‌ای میان اهداف اقتصادی و محیطی است و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری در حوزه بانکداری سبز نیازمند رویکردهای چندهدفه و انعطاف‌پذیر است. این نتیجه با پژوهش‌های مربوط به تصمیم‌گیری داده‌محور و سیستم‌های مدیریت پایدار همخوانی دارد که تأکید می‌کنند دستیابی همزمان به حداکثر سود و حداکثر پایداری معمولاً امکان‌پذیر نیست و سازمان‌ها باید بر اساس اولویت‌های استراتژیک خود تصمیم‌گیری کنند (Bibri, 2023; Rane & Narvel, 2022). در واقع، استفاده از الگوریتم NSGA-II این امکان را فراهم کرد که مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرغالب در اختیار مدیران بانکی قرار گیرد تا بتوانند بر اساس شرایط اقتصادی، سیاست‌های زیست‌محیطی و سطح ریسک‌پذیری، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب کنند. این موضوع از منظر مدیریتی اهمیت فراوانی دارد، زیرا بانک‌ها در محیط‌های واقعی با محدودیت بودجه، الزامات قانونی و فشارهای اجتماعی مواجه هستند و نیاز دارند که میان اهداف متعارض تعادل برقرار کنند.

نتایج تحلیل سناریو نیز نشان داد که تغییر در میزان بودجه و سطح سخت‌گیری زیست‌محیطی تأثیر مستقیمی بر ترکیب پروژه‌های منتخب و شاخص‌های عملکردی دارد. در سناریوی بودجه بالا، امکان انتخاب پروژه‌های بیشتری فراهم شد و در نتیجه سود و شاخص زیست‌محیطی هر دو افزایش یافتند، اما سطح ریسک نیز بیشتر شد. در مقابل، در سناریوی سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، پروژه‌هایی انتخاب شدند که اثرات محیطی مطلوب‌تری داشتند، هرچند سود کل کاهش نسبی پیدا کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که سیاست‌های بانکی و چارچوب‌های نظارتی می‌توانند جهت‌گیری سرمایه‌گذاری‌ها را به شکل قابل توجهی تغییر دهند. نتایج حاضر با مطالعات Liu و همکاران همسو است که نشان دادند فرهنگ تصمیم‌گیری داده‌محور و قابلیت تحلیل داده‌های بزرگ می‌تواند موجب تقویت یکپارچگی زنجیره تأمین سبز و بهبود عملکرد پایدار شود (Liu et al., 2022). همچنین، پژوهش Khan و همکاران نیز تأکید کرده بود که داده‌محوری و نوآوری سبز می‌تواند عملکرد اقتصاد چرخشی را بهبود بخشد و سازمان‌ها را به سمت تصمیمات سازگارتر با محیط زیست سوق دهد (Khan et al., 2024). تبیین این یافته را می‌توان در این نکته جستجو کرد که سیاست‌های مالی و محیطی در واقع سیگنال‌هایی برای تخصیص منابع ایجاد می‌کنند و سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند قادرند این سیگنال‌ها را در فرآیند انتخاب پروژه‌ها منعکس کنند.

یافته‌های تحلیل حساسیت نیز نشان داد که مدل پیشنهادی در برابر تغییرات متعارف پارامترها از پایداری مناسبی برخوردار است و تنها در شرایط شدید، ترکیب پروژه‌های منتخب به‌طور معناداری تغییر می‌کند. این نتیجه بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی از قابلیت اعتماد بالایی برای استفاده در محیط‌های واقعی برخوردار است و می‌تواند در شرایط عدم قطعیت اقتصادی و محیطی نیز عملکرد قابل قبولی ارائه دهد. چنین یافته‌ای با مطالعات مرتبط با سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند و داده‌محور همسو است که بر نقش فناوری‌های تحلیل داده در کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت پیش‌بینی تأکید کرده‌اند (Al-Khatib, 2022; Grant, 2021). افزون بر این، پژوهش Hamzat و همکاران نشان داده بود که ابزارهای داده‌محور می‌توانند موجب بهبود سواد مالی، تحلیل بازار و تصمیم‌گیری کارآفرینانه شوند (Hamzat et al., 2023). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم تصمیم‌یار پیشنهادی نه‌تنها برای بانک‌ها بلکه برای اکوسیستم گسترده‌تر کارآفرینی سبز نیز ارزش کاربردی دارد و می‌تواند فرآیند تخصیص منابع را شفاف‌تر و کارآمدتر سازد.

از منظر نظری، پژوهش حاضر توانست شکاف موجود در ادبیات بانکداری سبز و تصمیم‌گیری داده‌محور را تا حدی پر کند. بیشتر مطالعات پیشین یا بر تحلیل‌های مالی متمرکز بوده‌اند یا صرفاً به جنبه‌های محیطی و فناورانه پرداخته‌اند، در حالی که پژوهش حاضر تلاش کرد با ادغام تحلیل داده‌های بزرگ، یادگیری ماشین، تصمیم‌گیری چندمعیاره و بهینه‌سازی ریاضی، چارچوبی جامع برای اعتبارسنجی سبز ارائه دهد. این نوآوری موجب می‌شود که نظام بانکی بتواند همزمان اهداف سودآوری، پایداری و مدیریت ریسک را دنبال کند. همچنین، نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از رویکردهای داده‌محور در نظام بانکی می‌تواند به توسعه بانکداری هوشمند، ارتقای مسئولیت‌پذیری اجتماعی و تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کند. یافته‌های حاضر با پژوهش‌های Bickley و همکاران و Bibri همسو است که بر نقش هوش مصنوعی، کلان‌داده و زیرساخت‌های هوشمند در توسعه پایدار و آینده اقتصاد سبز تأکید کرده‌اند (Bibri, 2023; Bickley et al., 2025).

یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر آن بود که داده‌های مورد استفاده از تعداد محدودی بانک گردآوری شد و این موضوع ممکن است تعمیم‌پذیری نتایج را به سایر نظام‌های بانکی با شرایط متفاوت محدود سازد. همچنین، بخشی از شاخص‌های زیست‌محیطی بر اساس اطلاعات موجود و گزارش‌های رسمی استخراج شدند و احتمال دارد در برخی موارد، داده‌ها به‌صورت کامل یا یکپارچه در دسترس نبوده باشند. افزون بر این، اگرچه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل NSGA-II عملکرد مطلوبی نشان دادند، اما اجرای این مدل‌ها نیازمند زیرساخت‌های فناورانه و داده‌ای پیشرفته است که ممکن است در همه بانک‌ها فراهم نباشد.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده این مدل را در مقیاس گسترده‌تر و با استفاده از داده‌های واقعی بانک‌های بیشتر و متنوع‌تر مورد آزمون قرار دهند. همچنین، می‌توان متغیرهای دیگری مانند شاخص‌های اجتماعی، مسئولیت‌پذیری سازمانی و معیارهای رفتاری مشتریان را به مدل افزود تا ارزیابی جامع‌تری از پروژه‌های سبز ارائه شود. استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی عمیق و مدل‌های ترکیبی یادگیری تقویتی نیز می‌تواند قدرت پیش‌بینی و دقت سیستم تصمیم‌یار را افزایش دهد. افزون بر این، بررسی کاربرد این مدل در سایر حوزه‌های مالی نظیر بیمه سبز، سرمایه‌گذاری پایدار و بازار سرمایه می‌تواند زمینه‌های جدیدی برای توسعه پژوهش فراهم کند.

از منظر کاربردی، پیشنهاد می‌شود بانک‌ها و مؤسسات مالی به سمت ایجاد زیرساخت‌های داده‌محور و توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند حرکت کنند تا بتوانند فرآیند اعتبارسنجی سبز را با دقت و شفافیت بیشتری انجام دهند. همچنین، سیاست‌گذاران مالی می‌توانند با تدوین استانداردهای زیست‌محیطی و ایجاد مشوق‌های مالی، بانک‌ها را به حمایت بیشتر از پروژه‌های کارآفرینی سبز ترغیب کنند. آموزش کارکنان بانکی در زمینه تحلیل داده، هوش مصنوعی و ارزیابی پروژه‌های پایدار نیز می‌تواند اثربخشی این سیستم‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، توسعه همکاری میان بانک‌ها، شرکت‌های فناور و نهادهای محیط‌زیستی می‌تواند زمینه را برای ایجاد اکوسیستم بانکداری سبز هوشمند و تحقق اهداف توسعه پایدار فراهم سازد.

E-ISSN: 3041-8933

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

Al-Khatib, A. W. (2022). Can Big Data Analytics Capabilities Promote a Competitive Advantage? Green Radical Innovation, Green Incremental Innovation and Data-Driven Culture in a Moderated Mediation Model. *Business Process Management Journal*, *28*(4), 1025-1046. https://doi.org/10.1108/BPMJ-05-2022-0212

Bibri, S. E. (2023). Data-Driven Smart Eco-Cities of the Future: An Empirically Informed Integrated Model for Strategic Sustainable Urban Development. *World Futures*, *79*(7-8), 703-746. https://doi.org/10.1080/02604027.2021.1969877

Bickley, S. J., Macintyre, A., & Torgler, B. (2025). Artificial Intelligence and Big Data in Sustainable Entrepreneurship. *Journal of Economic Surveys*, *39*(1), 103-145. https://doi.org/10.1111/joes.12611

Canakoglu, E., Erzurumlu, S. S., & Erzurumlu, Y. O. (2018). How Data-Driven Entrepreneur Analyzes Imperfect Information for Business Opportunity Evaluation. *Ieee Transactions on Engineering Management*, *65*(4), 604-617. https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2826983

Grant, E. (2021). Big Data-Driven Innovation, Deep Learning-Assisted Smart Process Planning, and Product Decision-Making Information Systems in Sustainable Industry 4.0. *Economics, Management, and Financial Markets*, *16*(1), 9-19. https://doi.org/10.22381/emfm16120211

Hamzat, L., Abiodun, D., & Joseph, A. (2023). Empowering Entrepreneurial Growth through Data-Driven Financial Literacy, Market Research, and Personalized Education Tool. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *19*, 1692-1711. https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1568

Khan, W., Nisar, Q. A., Roomi, M. A., Nasir, S., Awan, U., & Rafiq, M. (2024). Green Human Resources Management, Green Innovation and Circular Economy Performance: The Role of Big Data Analytics and Data-Driven Culture. *Journal of Environmental Planning and Management*, *67*(10), 2356-2381. https://doi.org/10.1080/09640568.2023.2189544

Lazaroiu, G., Androniceanu, A., Grecu, I., Grecu, G., & Negurita, O. (2022). Artificial Intelligence-Based Decision-Making Algorithms, Internet of Things Sensing Networks, and Sustainable Cyber-Physical Management Systems in Big Data-Driven Cognitive Manufacturing. *Oeconomia Copernicana*, *13*(4), 1047-1080. https://doi.org/10.24136/oc.2022.030

Liu, Y., Fang, W., Feng, T., & Gao, N. (2022). Bolstering Green Supply Chain Integration via Big Data Analytics Capability: The Moderating Role of Data-Driven Decision Culture. *Industrial Management & Data Systems*, *122*(11), 2558-2582. https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2021-0696

Makhloufi, L. (2024). Predicting the Impact of Big Data Analytics Capability and Green Absorptive Capacity on Green Entrepreneurship Orientation and Eco-Innovation. *Journal of Enterprising Communities: People and Places in the Global Economy*, *18*(4), 746-770. https://doi.org/10.1108/JEC-05-2023-0069

Rane, S. B., & Narvel, Y. A. M. (2022). Data-Driven Decision Making with Blockchain-IoT Integrated Architecture: A Project Resource Management Agility Perspective of Industry 4.0. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *13*(2), 1005-1023. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01377-4

E-ISSN: 3041-8933