



Multi-Criteria Decision Analysis of Clean Energy Technologies

Seyed Kamal Sadeghi^{*1}, Raed Ghazi Mohammed Al-Oufi[†]

RECEIVE:

15 FEBRUARY
2025

ACCEPT:

17 APRIL 2025

KEYWORDS:

CLEAN ENERGY
TECHNOLOGIES,
SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
GOALS, MULTI-
CRITERIA
DECISION-MAKING,
SOLAR ENERGY,
WIND ENERGY

ABSTRACT:

THIS STUDY EXAMINES THE POTENTIAL OF CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES IN ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS), PARTICULARLY GOAL 7 (SDG 7), IN IRAN. GIVEN THE ENVIRONMENTAL CHALLENGES POSED BY CLIMATE CHANGE AND THE NEED TO REDUCE RELIANCE ON FOSSIL FUELS, IDENTIFYING AND EVALUATING CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES IS ESSENTIAL FOR ACHIEVING THESE GOALS. THIS RESEARCH UTILIZES MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM) METHODOLOGIES TO ANALYZE AND EVALUATE VARIOUS CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES. THE EVALUATION CRITERIA IN THIS STUDY INCLUDE ENERGY TRANSITION, GEOGRAPHIC, ECONOMIC, POLITICAL, SOCIAL, AND ENVIRONMENTAL FACTORS. THESE CRITERIA COMPREHENSIVELY ANALYZE DIFFERENT ASPECTS OF ENERGY SUSTAINABILITY, ENABLING THE COMPARISON AND RANKING OF VARIOUS TECHNOLOGIES. USING MCDM METHODS SUCH AS ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP), TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION (TOPSIS), VIKOR, AND PROMETHEE II, THE RESULTS REVEAL THAT SOLAR AND WIND ENERGY EMERGE AS THE TOP CHOICES IN VARIOUS DOMAINS, INCLUDING PRODUCTION CAPACITY, COST-EFFECTIVENESS, AND SOCIAL ACCEPTANCE. THESE FINDINGS CAN ASSIST POLICYMAKERS AND DECISION-MAKERS IN FORMULATING EFFECTIVE STRATEGIES FOR SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT. ADDITIONALLY, THE RESULTS OF THIS STUDY CAN CONTRIBUTE TO IMPROVING THE ENERGY LANDSCAPE OF THE COUNTRY AND SUPPORTING THE ACHIEVEMENT OF GLOBAL CLIMATE GOALS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OBJECTIVES. ULTIMATELY, THIS RESEARCH HIGHLIGHTS THE IMPORTANCE OF UTILIZING CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES AND MULTI-CRITERIA APPROACHES IN ENERGY DECISION-MAKING AND SERVES AS A REFERENCE FOR FUTURE STUDIES IN THIS FIELD.

¹ Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (sadeghiseyedkamal@gmail.com)

² PhD Student, Department of Economics, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (ty.ccc81@gmail.com)

Extended Abstract

Introduction

The increasing reliance on fossil fuels for various activities is one of the primary drivers of intensified climate change worldwide. In the current scenario, there is a pressing need for immediate actions to reduce carbon emissions, which can be achieved through a focus on clean energy technologies. Given global concerns for creating a sustainable world, the Sustainable Development Goals (SDGs) have been introduced as strategies to institutionalize sustainability in various aspects such as technology, environment, society, and economy. Among the 17 SDGs, Goal 7 (SDG 7) is recognized as a primary objective that influences other goals. SDG 7 emphasizes ensuring access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy for all, serving as a foundation for climate action and the Paris Agreement. The targets set by the United Nations for SDG 7 by 2030 include universal access to modern energy services, significant increases in the share of renewable energy in the global energy mix, doubling the global rate of improvement in energy efficiency, enhancing international cooperation in clean energy infrastructure, and expanding infrastructure for sustainable energy services in developing countries. Target 7.1 is particularly significant concerning climate goals and access to clean energy. Target 7.2 is directly related to the penetration of clean energy in the energy mix, and the penetration of clean energy indirectly impacts Target 7.3, which refers to energy intensity. Energy intensity is viewed as the ratio of energy consumption to gross domestic product (GDP). If a country fully reliant on fossil fuels transitions to renewable energy, energy intensity would decrease due to reconstructed economic growth. This economic growth is mainly achieved through the creation of new job opportunities, modern energy facilities, and the long-term reduction of costs arising from environmental degradation.

Research Methodology

In Iran, access to energy, particularly in electricity and clean fuels, has improved. However, the high share of fossil fuels in the energy mix and electricity generation, alongside supportive policies for fossil fuel markets and incentives for renewable energy, complicate the achievement of energy sustainability. Furthermore, the oil and gas sector plays a crucial role in Iran's economy, significantly contributing to the country's development. Carbon dioxide (CO₂) emissions per capita and energy consumption in Iran are key factors. Economic growth in Iran leads to increased CO₂ emissions in both the long and short term, while trade and renewable energy consumption reduce it in the short term. Findings suggest that decarbonizing the energy sector could lead to an 80% reduction in carbon emissions. Additionally, high energy imports could hinder progress in achieving emission reduction targets.



To analyze the potential of various clean energy technologies in achieving energy sustainability, several energy sustainability-related factors need to be considered. This topic can be viewed as a multidimensional puzzle, and its assessment can be conducted using multi-criteria decision-making (MCDM) methodology. MCDM is a recognized branch of operations research models that supports complex decision-making problems with conflicting criteria and high uncertainty. In the energy sector, MCDM methods typically include Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The study investigates the potential of clean energy technologies in achieving Sustainable Development Goals (SDGs), particularly Goal 7 (SDG 7) in Iran. Given the environmental challenges and the need to reduce reliance on fossil fuels, this research employs a structured, multi-criteria methodology to analyze and evaluate various clean energy technologies. The target population for this research includes energy experts, academic researchers, and executive managers in relevant government and non-governmental organizations in Iran. A random sampling method will be utilized to determine the sample size, selecting a total of 50 experts and specialists representing a diversity of opinions and experiences in the clean energy sector.

Data collection methods include designing a questionnaire related to the evaluation criteria for clean energy technologies, conducting semi-structured interviews with selected experts for deeper insights, and reviewing existing information and data from scientific articles and reputable national and international reports. Data analysis will employ descriptive analysis to summarize the data and sample characteristics, multi-criteria decision analysis (MCDM) methods to evaluate and rank clean energy technologies, and sensitivity analysis to examine the impact of changes in weights and criteria on final results.

Research Findings

The findings highlight the effectiveness of various clean energy technologies based on their potential energy sources, production costs, and environmental impacts.

Solar energy stands out with an impressive potential of 71,700 terawatts and an LCOE of \$0.049 per kilowatt-hour, showcasing the highest effectiveness at 14.387 kg CO₂ equivalent per dollar. Furthermore, the analysis reveals that solar energy is the most favored technology, scoring significantly well in terms of access to clean energy, environmental sustainability, and social acceptance. Additionally, solar energy benefits from robust policy support, emphasizing its prominent position as a leading option for sustainable energy development.

Conclusion

The research concludes that clean energy technologies, particularly solar and wind energy, possess significant potential for not only contributing to energy production but also for reducing greenhouse gas emissions, thus aiding in achieving climate goals. The multi-criteria decision-making approach employed in this study provides a comprehensive framework for evaluating various clean energy

technologies based on multiple sustainability criteria. The insights gained from this research can assist policymakers in formulating robust strategies that align with SDG 7, facilitating a transition towards sustainable energy systems in Iran. Future research should continue to explore the integration of different MCDM methods and emphasize the importance of sensitivity analyses to strengthen the reliability of results, ensuring that the transition to sustainable energy is both effective and equitable.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره فناوری‌های انرژی

سیدکمال صادقی^{۱*}، رائد غازی محمد العوفی^۲

چکیده:

این پژوهش به بررسی پتانسیل فناوری‌های انرژی پاک در دستیابی به اهداف توسعه پایدار (SDGs)، به ویژه هدف ۷ (SDG 7) در ایران می‌پردازد. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، شناسایی و ارزیابی فناوری‌های انرژی پاک به عنوان راهکاری مؤثر برای تحقق این اهداف ضروری است. در این مطالعه، از روش‌شناسی تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای تحلیل و ارزیابی فناوری‌های مختلف انرژی پاک استفاده شده است. معیارهای ارزیابی در این پژوهش شامل انتقال انرژی، جغرافیایی، اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و محیطی می‌باشند. این معیارها به‌طور جامع به تحلیل جنبه‌های مختلف پایداری انرژی پرداخته و امکان مقایسه و رتبه‌بندی فناوری‌های مختلف را فراهم می‌آورند. با استفاده از روش‌های MCDM مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، تکنیک اولویت‌دهی به شباهت با راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)، VIKOR و PROMETHEE II، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که انرژی خورشیدی و بادی به عنوان گزینه‌های برتر در زمینه‌های مختلف از جمله ظرفیت تولید، اقتصادی بودن و پذیرش اجتماعی شناسایی می‌شوند. این یافته‌ها می‌توانند به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان در تدوین استراتژی‌های مؤثر برای توسعه پایدار انرژی کمک کنند. همچنین، نتایج این پژوهش می‌توانند به بهبود وضعیت انرژی در کشور یاری رسانده و به تحقق اهداف اقلیمی و توسعه پایدار جهانی کمک کنند. در نهایت، این مطالعه بر اهمیت استفاده از فناوری‌های انرژی پاک و رویکردهای چندمعیاره در تصمیم‌گیری‌های انرژی تأکید می‌کند و به‌عنوان یک مرجع برای پژوهش‌های آینده در این حوزه عمل می‌کند.

تاریخ دریافت:

۲۷ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۸ فروردین ۱۴۰۴

کلید واژه‌ها:

فناوری‌های انرژی پاک،
اهداف توسعه پایدار،
تصمیم‌گیری چندمعیاره،
انرژی خورشیدی، انرژی
بادی.

مقدمه

افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی برای فعالیت‌های مختلف یکی از عوامل اصلی تشدید تغییرات اقلیمی در جهان است. در شرایط کنونی، نیاز به اقداماتی فوری برای کاهش انتشار کربن احساس می‌شود و این امر می‌تواند با تمرکز بر فناوری‌های انرژی پاک محقق گردد (Madurai Elavarasan et al., 2021). با توجه به نگرانی‌های جهانی برای ایجاد دنیایی پایدار، اهداف توسعه پایدار (SDGs) به‌عنوان راهکارهایی برای نهادینه کردن پایداری در جنبه‌های مختلف مانند

^۱استاد، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (sadeghiseyedkamel@gmail.com)

^۲دانشجوی دکترا، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

مانند فناوری، محیط زیست، جامعه و اقتصاد معرفی شده‌اند. از میان ۱۷ هدف SDG، هدف ۷ (SDG 7) به‌عنوان هدف اصلی شناخته می‌شود که بر سایر اهداف تأثیر می‌گذارد (UN Environment Programme, 2021). هدف ۷ بر تأمین دسترسی به انرژی مقرون‌به‌صرفه، قابل اعتماد، پایدار و مدرن برای همه تأکید دارد و به‌عنوان پایه‌ای برای اقدام‌های اقلیمی و توافق‌نامه پاریس عمل می‌کند. اهداف تعیین‌شده توسط سازمان ملل برای SDG 7 تا سال ۲۰۳۰ به شرح زیر است:

- هدف ۷،۱: دسترسی جهانی به خدمات انرژی مدرن، قابل اعتماد و مقرون‌به‌صرفه برای همه.
- هدف ۷،۲: افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی به‌طور قابل توجه.
- هدف ۷،۳: دو برابر کردن نرخ بهبود در کارایی انرژی.
- هدف ۷،۴: تقویت همکاری‌های بین‌المللی در زمینه تحقیق و فناوری انرژی پاک و ترویج سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی و فناوری‌های انرژی پاک.
- هدف ۷،۵: گسترش زیرساخت‌ها و به‌روزرسانی فناوری برای تأمین خدمات انرژی مدرن و پایدار برای همه در کشورهای در حال توسعه.

هدف ۷،۱ به‌ویژه در ارتباط با اهداف اقلیمی و دسترسی به انرژی پاک اهمیت دارد. هدف ۷،۲ به‌طور مستقیم با نفوذ انرژی پاک در ترکیب انرژی مرتبط است و نفوذ انرژی پاک به‌طور غیرمستقیم بر هدف ۷،۳، یعنی شدت انرژی تأثیر می‌گذارد. شدت انرژی به‌عنوان نسبت مصرف انرژی به تولید ناخالص داخلی (GDP) در نظر گرفته می‌شود. اگر کشوری که به‌طور کامل با سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود، با انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین شود، شدت انرژی به دلیل رشد اقتصادی بازسازی شده، کاهش خواهد یافت. این رشد اقتصادی عمدتاً از طریق ایجاد فرصت‌های شغلی جدید، تسهیلات انرژی مدرن و کاهش هزینه‌های ناشی از تخریب محیط زیست در بلندمدت حاصل می‌شود (IRENA, 2020).

در ایران، دسترسی به انرژی به‌ویژه در زمینه برق و سوخت‌های پاک بهبود یافته است (Khorasani & Niazi, 2025:7). بااین‌حال، سهم بالای سوخت‌های فسیلی در ترکیب انرژی و تولید برق، به همراه سیاست‌های حمایتی از بازارهای سوخت‌های فسیلی و برنامه‌های مشوق برای انرژی‌های تجدیدپذیر، وضعیت دستیابی به پایداری انرژی را پیچیده می‌کند. علاوه‌براین، بخش نفت و گاز به‌عنوان یکی از ارکان اقتصادی ایران، نقش مهمی در توسعه کشور ایفا می‌کند (Behzadpour & Zargar, 2020: 32).

انتشار کربن دی‌اکسید (CO₂) به ازای هر نفر و مصرف انرژی در ایران از عوامل کلیدی به‌شمار می‌آید. رشد اقتصادی در ایران به افزایش انتشار CO₂ در هر دو دوره بلندمدت و کوتاه‌مدت منجر می‌شود؛ درحالی‌که تجارت و مصرف انرژی تجدیدپذیر به‌طور کوتاه‌مدت آن را کاهش می‌دهند (Zandi et al., 2024:44). یافته‌ها نشان می‌دهند که کربن‌زدایی از بخش انرژی می‌تواند به کاهش ۸۰ درصدی در انتشار کربن منجر شود (IRENA, 2020). همچنین، واردات بالای

انرژی می تواند پیشرفت در دستیابی به اهداف کاهش انتشار را مختل کند (Madurai Elavarasan et al., 2021: 292).

برای تحلیل پتانسیل فناوری های مختلف انرژی پاک در دستیابی به پایداری انرژی، باید چندین عامل مربوط به پایداری انرژی مورد توجه قرار گیرد. این موضوع می تواند به عنوان یک معمای چندبعدی در نظر گرفته شود و ارزیابی آن می تواند با استفاده از روش شناسی تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) انجام شود. روش MCDM یک شاخه معتبر از مدل های تحقیقاتی عملیات است که از مشکلات پیچیده تصمیم گیری با معیارهای متضاد و عدم قطعیت بالا پشتیبانی می کند (IRENA, 2020). در حوزه انرژی، روش های MCDM معمولاً شامل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP)، تکنیک اولویت دهی به شباهت با راه حل ایده آل (TOPSIS) و دیگر روش ها هستند (Madurai Elavarasan et al., 2021: 293).

در این مطالعه، هدف اصلی بررسی پتانسیل فناوری های انرژی پاک در ایران و ارائه استراتژی هایی برای دستیابی به SDG 7 با استفاده از روش های MCDM است. بنابراین، این مطالعه به دنبال شناسایی معیارهای ارزیابی منحصربه فرد برای ارزیابی عملکرد پایداری انرژی، جمع آوری داده ها برای معیارهای نوین و ارائه نتایج قوی و قابل اعتماد است.

پیشینه پژوهش

با توجه به چالش های روزافزون ناشی از تغییرات اقلیمی و نیاز به گذار به منابع انرژی پایدار، مطالعات مربوط به ارزیابی و بهبود سیستم های انرژی تجدیدپذیر اهمیت فزاینده ای یافته است. انرژی های تجدیدپذیر به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای شناخته می شوند. در این راستا، روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) ^۱ به عنوان ابزارهای مؤثر در انتخاب و ارزیابی گزینه های انرژی تجدیدپذیر و پایدار به کار گرفته می شوند. این روش ها به تحلیل معیارهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و فنی کمک و امکان مقایسه و رتبه بندی گزینه های مختلف را فراهم می کنند. در این مرور ادبیات، به بررسی و تحلیل مطالعات مختلفی که به ارزیابی سیستم های انرژی تجدیدپذیر و پایدار اختصاص دارند، پرداخته می شود. این بررسی به شناسایی روش های مورد استفاده، نتایج به دست آمده و شکاف های تحقیقاتی موجود در این حوزه می پردازد و به درک بهتر روندهای جاری و نیازهای آینده در زمینه انرژی های تجدیدپذیر کمک می کند.

جدول ۱ به مرور ادبیات موجود در زمینه استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) در مسائل مرتبط با انرژی می پردازد. این جدول شامل ۱۲ مطالعه است که در آن ها اهداف مختلفی مانند تعیین سناریوهای مناسب انرژی، ارزیابی مصرف انرژی پایدار، بررسی پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر و انتخاب مکان های بهینه برای نیروگاه ها مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ Multi-Criteria Decision Making

بسیاری از این مطالعات از روش‌های متنوعی مانند TOPSIS، PROMETHEE II، AHP و VIKOR برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی گزینه‌های انرژی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای که توسط Barney et al. (۲۰۲۲) انجام شده، به بررسی سناریوهای انرژی در جزایر فارو پرداخته و نشان داده که استفاده از روش TOPSIS بر فناوری‌های ساحلی تأکید دارد؛ در حالی که PROMETHEE II بیشتر بر سیستم‌های انرژی دریایی تمرکز کرده است. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، Kizielewicz و Bączkiewicz (۲۰۲۱) به ارزیابی مصرف انرژی پایدار در بخش صنعتی اروپا پرداخته‌اند و سوئد و فنلاند را به عنوان کشورهای برتر شناسایی کرده‌اند.

در زمینه پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر، مطالعات متعددی مانند Caldeira et al. (۲۰۲۴) و Islam et al. (۲۰۲۴) به بررسی پتانسیل زمین گرمایی و تناسب مکان برای نیروگاه‌های خورشیدی در برزیل و بنگلادش پرداخته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های MCDM می‌تواند به شناسایی مناطق با پتانسیل بالا کمک کند، اما همچنین به این نکته اشاره دارند که نتایج ممکن است به روش‌های MCDM دیگر حساس باشد. همچنین، مطالعات جدیدی در حال ظهور هستند که به ارزیابی فناوری‌های انرژی مانند ارزیابی پایداری تأسیسات بادی ساحلی و ارزیابی تولیدکنندگان PV خورشیدی برای تصمیم‌گیری مؤثر می‌پردازند. از مرور ادبیات، چندین شکاف تحقیقاتی قابل استنباط است. مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات از یک روش MCDM استفاده می‌کنند، با وجود عدم قطعیت موجود در ساختار ریاضی MCDM. مرور ادبیات همچنین نشان می‌دهد که مطالعات بر روی چندین روش MCDM تمرکز دارند تا نتایج قابل اعتمادی با تجزیه و تحلیل حساسیت ارائه دهند. با این حال، استفاده از نتایج به دست آمده به سناریوهای عملی با فرمول‌بندی استراتژی‌ها و سیاست‌ها برای دستیابی به هدف پیشنهادی گسترش نیافته است. از سوی دیگر، مطالعات در تحلیل تأثیر روش‌های وزن‌دهی دارای استحکام کافی نیستند و تنها چند مطالعه به بررسی تغییرات در نتایج با استفاده از روش‌های وزن‌دهی عینی و ذهنی پرداخته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که معیارها یا شاخص‌های مشابه به طور مداوم در مطالعات مختلف استفاده می‌شوند، اما دستیابی به انتقال انرژی و پایداری انرژی نیاز به تجزیه و تحلیل چندبعدی تازه‌ای دارد که ارزیابی جامعی را به همراه داشته باشد. در این مطالعه، استفاده از MCDM محدود به یک روش نیست؛ زیرا هریک از روش‌ها رویکرد خاصی برای استخراج تصمیم بهینه و محدودیت‌های مرتبط با آن دارد. نویسندگان از هفت روش MCDM شامل PROMETHEE II، VIKOR، بهینه‌سازی چندهدفه براساس تحلیل نسبت (MOORA)، TOPSIS، مدل مجموع وزنی (WSM)، مدل محصول وزنی (WPM) و ارزیابی محصول جمعی وزنی (WASPAS) برای رتبه‌بندی فناوری‌های انرژی پاک استفاده می‌کنند. همچنین، برای تعیین وزن‌ها، دو رویکرد مختلف از طریق آنتروپی شانون و AHP فازی به کار گرفته شده است. هدف از استفاده از هفت روش MCDM و دو روش تعیین وزن، استخراج نتایج قوی و قابل اعتماد است. رویکردهای خاصی برای SDG 7 در استرالیا براساس نتایج مدل‌های MCDA فرموله شده است. علاوه بر این، معیارهای ارزیابی شده برای ارزیابی گزینه‌ها به طور خاص انتخاب یا فرموله شده‌اند تا جنبه‌های پایداری انرژی را به تصویر بکشند. تا جایی که نویسندگان می‌دانند، هیچ مطالعه‌ای وجود ندارد که به طور جامع پتانسیل فناوری‌های انرژی پاک را برای حمایت از چشم‌انداز پایداری انرژی استرالیا ارزیابی کند. ویژگی این

مطالعه بر توسعه رویکردهایی برای ارزیابی عملکرد پایداری انرژی با استفاده از روش‌های مختلف MCDM و ادغام نتایج مدل‌های MCDM برای توسعه استراتژی‌هایی است که در نهایت از پیشرفت به سمت 7 SDG حمایت می‌کند.

شکاف‌های تحقیقاتی متعددی نیز در این مطالعات شناسایی شده است. بسیاری از مطالعات تنها از یک روش MCDM استفاده کرده‌اند و این می‌تواند به محدودیت‌هایی در دقت و قابلیت اعتماد نتایج منجر شود. به علاوه، نیاز به تحلیل‌های بیشتر برای درک علل نتایج و بهبود روش‌های وزندهی نیز به عنوان یک شکاف تحقیقاتی مطرح شده است. به طور کلی، این جدول نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در استفاده از MCDM در مسائل انرژی، هنوز فرصت‌های بسیاری برای بهبود روش‌ها و گسترش دامنه تحلیل‌ها وجود دارد.

جدول ۱. مرور ادبیات

پژوهش‌گران	هدف	روش MCDM استفاده شده	مکان	گزینه‌ها	معیارها	نتایج	شکاف‌های تحقیقاتی
Ruiz et al. (2020)	ارزیابی منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق	AHP مبتنی بر GIS	اندونزی	نیروگاه‌های هیدرو، PV، بادی، زیست‌توده و بیوگاز	اقتصادی، فنی، محیطی و اجتماعی-سیاسی	هیدرو و زیست‌توده بالاترین پتانسیل را برای تولید برق دارند.	این مطالعه تنها از یک روش MCDM استفاده می‌کند؛ در حالی که نتایج ممکن است با استفاده از سایر روش‌های MCDM متفاوت باشد.
Pavlović et al. (2021)	برای ارزیابی پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق	نظریه ارزش چندمعیاره (MAVT)	صربستان	گاز، زغال سنگ، نفت، هیدرو و انرژی خورشیدی	محیطی، اقتصادی و اجتماعی	انرژی خورشیدی پایدارترین گزینه است. با این حال، تنها زمانی که معیارهای محیطی اولویت‌دار شوند، هیدروپاور به عنوان بهترین گزینه ظاهر می‌شود.	پایداری تحت تأثیر چندین معیار دیگر قرار دارد و گزینه‌ها می‌توانند برای تحلیل پتانسیل‌های آینده بیشتر گسترش یابند.

این مطالعه شکاف تحقیقاتی را در			سوئد و فنلاند به -		
تحلیل‌های بیشتر از			عنوان کشورهای		
رتبه‌بندی کشورهای			برتر شناسایی		
فردی برای تعیین علل			شدند.		
نتایج ایجاد می‌کند.					

روش Topsis بر			با وجود تعیین سناریوی فناوری‌های		
مناسب انرژی برای			ساحلی تأکید		
کربن‌زدایی مؤثر،			دارد؛ درحالی که محیطی،		
استراتژی‌های بیشتری			تکنیک اقتصادی،		
برای دستیابی به این			PROMETHEE فنی و		
هدف نیاز است که شامل			II بیشتر بر اجتماعی		
شناسایی سیاست‌های			سیستم‌های		
تقویت‌کننده باشد.			انرژی دریایی		
تأکید می‌کند.					

مطالعه نشان داد			که ۲۵,۲۸٪،		
			و ۵,۹۳٪		
			از ۴۰,۰۲٪		
این مطالعه تنها از یک			مناطق برای		
روش MCDM استفاده			نیروگاه‌های		
می‌کند؛ درحالی که نتایج خورشیدی PV			اقليمی، فنی، مکان‌های		
ممکن است با استفاده از مقیاس بزرگ،			جغرافیایی، مختلف در پاکستان		
سایر روش‌های MCDM نیروگاه‌های بادی			موقعیت پاکستان		
متفاوت باشد.			مقیاس بزرگ و		
			نیروگاه‌های		
			خورشیدی PV		
			کوچک مناسب		
			هستند.		

شکاف تحقیقاتی در				
بهبود قابلیت اطمینان				
عددی در محاسبه				
معیارهای کیفی وجود				
دارد. استفاده از				
روش‌های جدید می‌تواند				
با روش‌های موجود				
MCDM مقایسه شود تا				
استحکام را نشان دهد.				
این مطالعه تنها از یک				
روش برای تعیین				
تنها ۳٪ از منطقه				
پتانسیل بالای انرژی				
مطالعه برای				
خورشیدی استفاده				
نیروگاه‌های				
می‌کند؛ درحالی‌که نتایج خورشیدی PV				
ممکن است با استفاده از مقیاس بزرگ				
سایر روش‌های MCDM مناسب بود.				
متفاوت باشد.				
این مطالعه تنها از یک				
روش برای تعیین				
مغناطیسی،				
جریان				
نقشه مناطق				
بررسی پتانسیل				
پتانسیل زمین‌گرایی بالا چهار منطقه با				
حرارتی،				
پتانسیل شمالی و				
استفاده می‌کند و نتایج				
پتانسیل بالا				
فاصله تا				
شناسایی شدند. گسل،				
ممکن است به سایر				
روش‌های MCDM				
واحد‌های				
مورد نظر (برزیل)				
پارانا، برزیل				
سنگی				
حساس باشد.				
این مطالعه تنها از یک				
حدود ۴۴،۵۹٪ از				
منطقه مطالعه				
برای تعیین				
روش برای تعیین				
پتانسیل بالای انرژی				
خورشیدی استفاده				
می‌کند و نتایج ممکن				
مقیاس بزرگ				
مناسب است.				

است به سایر روش‌های

MCDM حساس باشد.

				جمع‌آوری نتایج به‌دست-	
				کاتالیزور مبتنی	
				آمده از روش‌های	
				بر نانوذرات Pd	
				MCDM استفاده شده به	
Topsis،				می‌تواند به‌عنوان	
ک کمک به انتخاب				وزن‌های استفاده شده	
				حساس است. تحلیل	
				عدم قطعیت و تأثیر	
				روش‌های وزن‌دهی دیگر	
				به‌عنوان شکاف دانش	
				باقی می‌ماند.	
		</			

در پژوهش‌های کیفی، حساسیت نظری به مفهوم درک عمیق و تحلیلی از موضوع تحقیق اشاره دارد. این نوع پژوهش به دنبال شناسایی تجربیات، احساسات و دیدگاه‌های افراد درباره نوآوری‌ها و فناوری‌های جدید است (Creswell, 2013). با توجه به نظریه پذیرش اجتماعی، می‌توان از روش‌های کیفی مانند مصاحبه‌های عمیق و گروه‌های متمرکز استفاده کرد تا به درک بهتری از موانع و تسهیل‌کننده‌های پذیرش فناوری‌های انرژی پاک دست یافت (Charmaz, 2006).

به‌علاوه، بررسی ادبیات موجود در زمینه فناوری‌های انرژی پاک نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در استفاده از روش‌های MCDM در مسائل مرتبط با انرژی، هنوز فرصت‌های بسیاری برای بهبود روش‌ها و گسترش دامنه تحلیل‌ها وجود دارد. به‌طور خاص، در جدول ۱ مرور ادبیات، پژوهش‌های مختلفی که در این زمینه انجام شده‌اند، شکاف‌های تحقیقاتی متعددی را نشان می‌دهند. برای مثال، Ruiz et al. (۲۰۲۰) به این نکته اشاره دارند که مطالعه آن‌ها تنها از یک روش MCDM استفاده کرده و نتایج ممکن است با استفاده از سایر روش‌ها متفاوت باشد. همچنین، Bączkiewicz و Kizielewicz (۲۰۲۱) به شکاف تحقیقاتی در تحلیل‌های بیشتر از رتبه‌بندی کشورهای فردی برای تعیین علل نتایج اشاره می‌کنند.

در نتیجه، چارچوب نظری حاضر به تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های انرژی پاک می‌پردازد و با استفاده از نظریه پذیرش اجتماعی راجرز، به شناسایی و ارزیابی معیارهای کلیدی در این زمینه کمک می‌کند. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای پژوهش‌های کمی و کیفی در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود روش‌های MCDM در ارزیابی فناوری‌های انرژی پاک کمک کند (Zhou et al., 2020).

روش تحقیق

این پژوهش به بررسی پتانسیل فناوری‌های انرژی پاک در دستیابی به اهداف توسعه پایدار (SDGs) به‌ویژه هدف ۷ (SDG 7) در کشور ایران می‌پردازد. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، این تحقیق از یک روش‌شناسی ساختاریافته و چندمعیاره برای تحلیل و ارزیابی فناوری‌های مختلف انرژی پاک استفاده می‌کند. این پژوهش در چارچوب پارادایم آمیخته (Mixed Methodology) قرار دارد. از آنجایی که این تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌های کیفی و کمی است، از لحاظ بازه زمانی، تحقیق مقطعی (Cross-sectional) است؛ زیرا در یک دوره خاص و در زمان معین انجام می‌شود و به بررسی وضعیت فعلی فناوری‌های انرژی پاک در ایران می‌پردازد.

جامعه آماری

جامعه آماری این تحقیق شامل خبرگان حوزه انرژی است که شامل کارشناسان و متخصصان حوزه انرژی، محققان دانشگاهی و مدیران اجرایی در سازمان‌های دولتی و غیردولتی مرتبط با انرژی در ایران می‌باشد. این افراد به دلیل

تجربه و دانش خود در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و سیاست‌های مربوط به آن، به‌عنوان منابع ارزشمندی برای جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ویژگی‌های خبرگان در این پژوهش شامل موارد زیر بود:

تحصیلات: حداقل مدرک کارشناسی ارشد در یکی از رشته‌های مرتبط با انرژی، محیط زیست، مهندسی یا علوم اجتماعی.

تجربه: حداقل ۵ سال تجربه کاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر یا سیاست‌گذاری‌های مرتبط.

عضویت هیأت علمی: اعضای هیأت علمی دانشگاه‌ها که در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر فعالیت دارند.

مدیران اجرایی: مدیران و کارشناسان ارشد در سازمان‌های دولتی و غیردولتی که مسئولیت‌های مرتبط با انرژی و محیط زیست را بر عهده دارند.

تنوع: تلاش برای ایجاد تنوع در جامعه آماری به لحاظ سن، جنسیت و تجربه کاری.

حجم نمونه

برای تعیین حجم نمونه، از روش نمونه‌گیری هدفمند استفاده می‌شود. با توجه به جامعه آماری مشخص شده، حجم نمونه به تعداد ۵۰ نفر از کارشناسان و متخصصان انتخاب شد. این تعداد به گونه‌ای انتخاب شده است که نمایانگر تنوع نظرات و تجربیات در حوزه انرژی پاک در سطح ملی باشد.

برای محاسبه حجم نمونه در این پژوهش، از فرمول کوکران استفاده شده است که به‌ویژه برای تعیین حجم نمونه در جوامع بزرگ و نامحدود کاربرد دارد. در این پژوهش حجم جامعه ۲۰۰ نفر بود که براساس فرمول کوکران تعداد ۵۰ نفر به‌عنوان نمونه انتخاب شد.

روش‌های جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌ها، از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

پرسش‌نامه: پرسش‌نامه‌ای طراحی می‌شود که شامل سؤالات مربوط به معیارهای ارزیابی فناوری‌های انرژی پاک است. این پرسش‌نامه به‌صورت آنلاین و کاغذی توزیع شد. پرسش‌نامه‌ای طراحی شده است که شامل سؤالات مرتبط با معیارهای ارزیابی فناوری‌های انرژی پاک بود. پرسش‌نامه‌ای طراحی شده است که شامل سؤالات مرتبط با معیارهای ارزیابی فناوری‌های انرژی پاک می‌باشد و به دو صورت آنلاین و کاغذی توزیع شد. در بخش توزیع آنلاین، پرسش‌نامه به متخصصان و پژوهش‌گران حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، اعضای دانشگاه‌ها و کارشناسان صنایع مرتبط ارسال شد. این افراد از طریق شبکه‌های حرفه‌ای، وبسایت‌های دانشگاهی و انجمن‌های علمی شناسایی و همچنین از طریق ایمیل و شبکه‌های اجتماعی تخصصی مانند LinkedIn دعوت به همکاری شدند. در مجموع، ۴۰ نفر از این گروه آنلاین

شرکت کردند. در بخش توزیع کاغذی، پرسشنامه به متخصصان و کارشناسان در شهرهای تهران و تبریز توزیع شد. این افراد به صورت هدفمند انتخاب و از آنها خواسته شد تا پرسشنامه را پر کنند که در نهایت، ۱۰ پرسشنامه کاغذی در این دو شهر جمع آوری شد. برای شناسایی افراد، از معیارهایی نظیر تخصص در زمینه انرژیهای تجدیدپذیر، سابقه کاری و تحصیلات مرتبط با انرژی، محیط زیست یا مهندسی استفاده شد. نسخه آن لاین پرسشنامه از طریق لینک خاصی که در ایمیل های دعوت به همکاری ارسال شد، در دسترس قرار گرفت و نسخه کاغذی نیز در تهران و تبریز به متخصصان توزیع و جمع آوری شد.

مصاحبه: مصاحبه های نیمه ساختاریافته با برخی از کارشناسان منتخب انجام می شود تا معیارهای ارزیابی را مورد تأیید قرار دهند. در این پژوهش، به منظور تأمین اعتبار و غنای داده ها، از مصاحبه های نیمه ساختاریافته با کارشناسان منتخب در حوزه انرژی های تجدیدپذیر استفاده شده است. این نوع مصاحبه به ما این امکان را می دهد که ضمن داشتن چارچوب مشخصی از سؤالات، فضای لازم را برای بیان نظرات و تجربیات عمیق تر کارشناسان فراهم کنیم.

در مرحله اول، با شناسایی و انتخاب کارشناسانی که دارای تخصص و تجربه مرتبط با حوزه انرژی های تجدیدپذیر هستند، تلاش کردیم تا تنوع نظرات و دیدگاه ها را به حداکثر برسانیم. این کارشناسان شامل محققان، مهندسان و مدیران پروژه های انرژی های تجدیدپذیر بودند که هر کدام از آنها از منظر خاص خود به موضوعات مربوط به ارزیابی فناوری ها نگرسته و تجربیات مفیدی داشتند.

سؤالات مصاحبه به گونه ای طراحی شده بودند که بتوانند به بررسی معیارهای مختلف ارزیابی، از جمله اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، بپردازند. به عنوان مثال، سؤالاتی نظیر “به نظر شما کدام معیارها در ارزیابی فناوری های انرژی پاک از اهمیت بیشتری برخوردارند؟”

خروجی این مصاحبه ها شامل دیدگاه های متنوع و غنی است که به تأیید و یا اصلاح معیارهای ارزیابی کمک کرده و به غنای تحلیل های کمی و کیفی تحقیق افزوده است.

روش های تحلیل اطلاعات

برای تحلیل داده های جمع آوری شده از روش های زیر استفاده می شود:

تحلیل توصیفی: برای توصیف و خلاصه سازی داده ها و ویژگی های نمونه ها از تحلیل توصیفی استفاده می شود.

در این پژوهش، برای تحلیل اطلاعات از روش های مختلفی استفاده شده است که شامل روش های چند معیاره و تحلیل حساسیت می باشد. به ویژه، از روش های زیر بهره برداری شده است:

روش AHP (تحلیل سلسله‌مراتبی): این روش به منظور ارزیابی و مقایسه فناوری‌های مختلف انرژی پاک به کار رفته است. به‌ویژه، از روش AHP فازی برای تعیین وزن‌های مربوط به معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است. این روش به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با توجه به اولویت‌های مختلف، گزینه‌های بهتری را برای سرمایه‌گذاری انتخاب کنند. روش آنالیز شانون: این روش به‌عنوان یک ابزار برای تعیین وزن‌های نسبی معیارهای مختلف در ارزیابی فناوری‌ها به کار رفته است. با استفاده از این روش، می‌توان اهمیت نسبی هر زیرمعیار را مشخص کرد و به تحلیل دقیق‌تری از عملکرد فناوری‌های مختلف پرداخت.

روش MOORA (ترکیب و تحلیل نتایج): این روش به‌ویژه در ماتریس تصمیم نرمال‌شده برای ارزیابی و مقایسه فناوری‌های انرژی مختلف استفاده شده است. این روش به تحلیل معیارهای مفید و هزینه پرداخته و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بهترین گزینه‌ها را برای توسعه و سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر انتخاب کنند.

تحلیل حساسیت^۱: در این پژوهش، تحلیل حساسیت به منظور بررسی عملکرد پایداری انرژی تجمعی برای چهار نوع فناوری انرژی (آبی، بادی، خورشیدی و زیست‌توده) در سناریوهای مختلف انجام شده است. این تحلیل به ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد فناوری‌ها کمک می‌کند و به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا درک بهتری از پایداری انرژی و گزینه‌های موجود داشته باشند.

معیارهای ارزیابی

در این پژوهش، معیارهای ارزیابی برای انتخاب فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر براساس مرور منابع علمی و تجربیات به‌دست‌آمده از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با کارشناسان منتخب در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر استخراج شده است. این معیارها شامل شش حوزه کلیدی هستند که به تحلیل جنبه‌های مختلف فناوری‌های انرژی پاک کمک می‌کنند.

اولین معیار، انتقال انرژی است که توانایی گزینه‌ها در حمایت از انتقال سریع از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر را ارزیابی می‌کند. این معیار بر اساس نتایج مطالعه Barney et al (۲۰۲۲) و Bączkiewicz و Kizielewicz (۲۰۲۱) به زیرمعیارهای سهم انرژی، رشد ظرفیت تخمینی و رشد تولید انرژی تخمینی تقسیم می‌شود. دومین معیار، جغرافیایی است که بر تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی و عوامل اقلیمی بر نرخ نفوذ فناوری‌های انرژی پاک متمرکز است و شامل زیرمعیارهای پتانسیل منابع انرژی، ضریب ظرفیت و چگالی قدرت می‌شود. این معیار از یافته‌های تحقیق Caldeira et al (۲۰۲۴) و Raza et al (۲۰۲۳) الهام گرفته است.

سومین معیار، اقتصادی است که ارزیابی قابلیت اقتصادی فناوری‌های مختلف انرژی پاک را در بر می‌گیرد و زیرمعیارهای آن شامل هزینه سطح‌سازی انرژی (LCOE)، هزینه‌های کل نصب و نسبت انرژی خالص است. این معیار بر اساس مبانی تحقیقاتی مانند Pavlović et al (۲۰۲۱) و Noyan Tekeli et al (۲۰۲۴) شکل گرفته است. معیار سیاسی نیز به میزان حمایتی که سیاست‌های تدوین شده در ایران برای دستیابی به پایداری انرژی ارائه می‌دهند، می‌پردازد و براساس سیاست‌های عملی و امتیازدهی به میزان حمایت ارائه شده ارزیابی می‌شود.

معیار اجتماعی به جنبه‌های مختلف جامعه نظیر عموم مردم، سرمایه‌گذاران و بازارها می‌پردازد و شامل زیرمعیارهای ترویج دسترسی به انرژی پاک، ایجاد شغل و پذیرش اجتماعی است. این معیار به‌ویژه تحت تأثیر نتایج تحقیقاتی نظیر Ismail et al (۲۰۲۳) قرار دارد. درنهایت، معیار محیطی به ارزیابی سبزبودن گزینه‌های انرژی پاک پرداخته و شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه عمر، دوست‌داری محیط زیست و اثربخشی اقدامات اقلیمی است.

برای اعتبارسنجی و غنی‌سازی این معیارها، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با کارشناسان منتخب در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر انجام شد. این مصاحبه‌ها به جمع‌آوری نظرات و تجربیات عمیق‌تری کمک کرد و به ما این امکان را داد تا از دیدگاه‌های تخصصی برای تقویت نتایج تحقیق استفاده کنیم. درنهایت، این معیارها و اطلاعات حاصل از مصاحبه‌ها به ما در شناسایی و ارزیابی گزینه‌های مناسب برای توسعه پایدار انرژی یاری رساند.

جدول ۲. معیارهای ارزیابی

توضیحات	معیار ارزیابی	شماره
انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر از سوخت‌های فسیلی، اولین و مهم‌ترین گام برای تحقق پایداری انرژی است. این معیار توانایی گزینه‌ها در حمایت از انتقال سریع انرژی را ارزیابی می‌کند و شامل زیرمعیارهای سهم انرژی، رشد ظرفیت تخمینی و رشد تولید انرژی تخمینی است.	انتقال انرژی	۱
ویژگی‌های جغرافیایی و عوامل اقلیمی بر نرخ نفوذ فناوری‌های انرژی پاک تأثیر می‌گذارند. این معیار به سه زیرمعیار پتانسیل منابع انرژی، ضریب ظرفیت و چگالی قدرت تقسیم می‌شود.	جغرافیایی	۲
ارزیابی قابلیت اقتصادی فناوری‌های مختلف انرژی پاک از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند به جذب سرمایه‌گذاران کمک کند. زیرمعیارهای این معیار شامل هزینه سطح‌سازی انرژی (LCOE)، هزینه‌های کل اقتصادی نصب و نسبت انرژی خالص است.		۳
این معیار میزان حمایتی را که سیاست‌های تدوین شده در ایران برای دستیابی به پایداری انرژی ارائه می‌دهند، بررسی می‌کند. ارزیابی براساس سیاست‌های عملی و امتیازدهی به میزان حمایت ارائه شده انجام‌سیاسی می‌شود.		۴

معیارهای اجتماعی به جنبه‌های مختلف جامعه مانند عموم مردم، سرمایه‌گذاران و بازارها می‌پردازد. این اجتماعی ۵
معیار شامل زیرمعیارهای ترویج دسترسی به انرژی پاک، ایجاد شغل و پذیرش اجتماعی است.

این معیار نشان‌دهنده سبز بودن گزینه‌های انرژی پاک در نظر گرفته شده است. ارزیابی براساس انتشار گازهای محیطی ۶
گلخانه‌ای در طول چرخه عمر، دوست‌داری محیط زیست و اثربخشی اقدامات اقلیمی انجام می‌شود.

یافته‌ها

برای برآورد اثربخشی اقدامات اقلیمی فناوری‌های انرژی پاک مختلف، از روش‌های تحلیلی مبتنی بر داده‌های تجربی و مدل‌سازی استفاده شده است. این برآوردها براساس داده‌های موجود در ادبیات علمی و گزارش‌های معتبر مربوط به پتانسیل منابع انرژی، هزینه‌های تولید و تأثیرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها انجام شده است.

به‌ویژه، اطلاعات مربوط به پتانسیل منابع انرژی و هزینه سطح‌سازی انرژی (LCOE) از منابع معتبر مانند گزارش‌های بین‌المللی انرژی، مقالات علمی و آمارهای دولتی استخراج شده‌اند.

جدول (۳) به بررسی اثربخشی اقدامات اقلیمی فناوری‌های انرژی پاک مختلف می‌پردازد و اطلاعات مهمی را درباره پتانسیل منابع انرژی، هزینه‌های تولید و تأثیرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها ارائه می‌دهد. در این جدول، انرژی آبی با پتانسیل منابع انرژی ۶۰ ترابایت و هزینه سطح‌سازی انرژی ۰,۰۶۱ دلار در هر کیلووات‌ساعت، صرفه‌جویی در انتشار ۷۶۱,۱۱ گرم CO₂ معادل را نشان می‌دهد که اثربخشی آن ۰,۰۱۰ کیلوگرم CO₂ معادل به ازای هر دلار است. در مقابل، انرژی بادی با پتانسیل ۳۱۰۰ ترابایت و هزینه سطح‌سازی ۰,۰۳۳ دلار در هر کیلووات‌ساعت، با صرفه‌جویی در انتشار ۷۷۴,۱۱ گرم CO₂ معادل، اثربخشی بالاتری به میزان ۰,۹۶۸ کیلوگرم CO₂ معادل به ازای هر دلار دارد. انرژی خورشیدی با پتانسیل بسیار بالا ۷۱۷۰۰ ترابایت و هزینه سطح‌سازی ۰,۰۴۹ دلار در هر کیلووات‌ساعت، بالاترین اثربخشی را با ۱۴,۳۸۷ کیلوگرم CO₂ معادل به ازای هر دلار نشان می‌دهد. در نهایت، زیست‌توده با پتانسیل ۱۰۸ ترابایت و هزینه سطح‌سازی ۰,۰۶۱ دلار در هر کیلووات‌ساعت، با صرفه‌جویی در انتشار ۵۵۵,۱۱ گرم CO₂ معادل، اثربخشی کمتری معادل ۰,۰۱۳ کیلوگرم CO₂ معادل به ازای هر دلار دارد. این تحلیل نشان می‌دهد که فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، به ویژه انرژی خورشیدی و بادی، نه تنها پتانسیل بالایی برای تولید انرژی دارند بلکه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز مؤثر هستند، که به تحقق اهداف اقلیمی کمک می‌کند.

جدول ۳. برآورد اثربخشی اقدامات اقلیمی

پتانسیل منابع فناوری های انرژی پاک (تراپایت)	سطح سازی پتانسیل نرمال شده انرژی	عمرهزینه CO2 انرژی	چرخه CO2 (گرم معادل/کیلووات ساعت)	انتشار انتشار CO2 (گرم معادل/کیلووات ساعت)	اقدامات صرفه جویی در انتشار انتشار CO2 (گرم معادل/کیلووات ساعت)	اثربخشی اقلیمی CO2 معادل/دلار
انرژی آبی	۶۰	۰,۰۰۰۸	۰,۰۶۱	۲۴	۷۶۱,۱۱	۰,۰۱۰
انرژی بادی	۳۱۰۰	۰,۰۴۱۴	۰,۰۳۳	۱۱	۷۷۴,۱۱	۰,۰۹۸
انرژی خورشیدی	۷۱۷۰۰	۰,۰۹۵۶۴	۰,۰۴۹	۴۸	۷۳۷,۱۱	۱۴,۳۸۷
زیست توده	۱۰۸	۰,۰۰۱۴	۰,۰۶۱	۲۳۰	۵۵۵,۱۱	۰,۰۱۳

جدول ۴ به بررسی تبدیل اصطلاحات زبانی مرتبط با دسترسی به انرژی پاک، دوستداری محیط زیست و زیرمعیارهای پذیرش اجتماعی به نمرات کمی می پردازد. در این جدول، چهار نوع فناوری انرژی پاک شامل انرژی آبی، انرژی بادی، انرژی خورشیدی و زیست توده مورد ارزیابی قرار گرفته اند. از نظر دسترسی به انرژی پاک، انرژی خورشیدی با نمره ۰,۴۹۶۲ بالاترین امتیاز را کسب کرده و نشان دهنده قابلیت بالای این فناوری در فراهم کردن دسترسی به انرژی پاک است. در مقابل، انرژی آبی و زیست توده به ترتیب نمرات ۰,۰۷۶۶ و ۰,۱۴۳۵ را دارند که نشان دهنده محدودیت های این فناوری ها در این زمینه است.

در بخش دوستداری محیط زیست، انرژی خورشیدی دوباره با نمره ۰,۵۲۳۲ پیشتاز است و نشان می دهد که این فناوری کمترین تأثیر منفی را بر محیط زیست دارد. انرژی بادی نیز با نمره ۰,۳۲۸۶ در رده دوم قرار دارد؛ در حالی که زیست توده با نمره ۰,۰۵۶۵ به عنوان کمترین دوستداری محیط زیست شناخته می شود.

در نهایت، در زمینه پذیرش اجتماعی، انرژی خورشیدی با نمره ۰,۴۸۴۸ و انرژی بادی با نمره ۰,۲۹۸۰ در رده های بالایی قرار دارند، نشان دهنده پذیرش بالای این فناوری ها در جامعه است. این در حالی است که انرژی آبی و زیست توده به ترتیب نمرات ۰,۰۸۹۴ و ۰,۱۲۷۹ را دارند که نشان دهنده چالش های موجود در پذیرش اجتماعی این فناوری ها است. به طور کلی، این جدول نشان می دهد که انرژی خورشیدی به عنوان یکی از گزینه های برتر در زمینه های مختلف از جمله دسترسی، دوستداری محیط زیست و پذیرش اجتماعی شناخته می شود، در حالی که سایر فناوری ها با چالش هایی مواجه هستند که نیاز به توجه و بهبود دارند.

جدول ۴. تبدیل اصطلاحات زبانی مرتبط با دسترسی به انرژی پاک، دوست‌داری محیط زیست و زیرمعیارهای پذیرش اجتماعی به نمره کمی

زیرمعیار	انرژی آبی	انرژی بادی	انرژی خورشیدی	زیست‌توده
اصطلاحات زبانی				
متوسط	پایین	بالا	بسیار بالا	بسیار پایین
دست‌رسی به انرژی پاک	پایین	بالا	بسیار بالا	بسیار پایین
دوست‌داری محیط زیست	پایین	بالا	بسیار بالا	بسیار پایین
پذیرش اجتماعی	پایین	بالا	بسیار بالا	بسیار پایین
نتایج AHP فازی	انرژی آبی	انرژی بادی	انرژی خورشیدی	زیست‌توده
دست‌رسی به انرژی پاک	۰,۰۷۶۶	۰,۲۸۳۷	۰,۴۹۶۲	۰,۱۴۳۵
دوست‌داری محیط زیست	۰,۰۹۱۷	۰,۳۲۸۶	۰,۵۲۳۲	۰,۰۵۶۵
پذیرش اجتماعی	۰,۰۸۹۴	۰,۲۹۸۰	۰,۴۸۴۸	۰,۱۲۷۹

جدول ۵ به خلاصه ماتریس تصمیم برای ارزیابی فناوری‌های مختلف انرژی پاک می‌پردازد و شامل معیارهای متنوعی است که هریک از جنبه‌های کلیدی این فناوری‌ها را بررسی می‌کند. در بخش معیارهای انتقال انرژی، سهم انرژی خورشیدی با ۲۶ درصد بالاترین سهم را دارد؛ درحالی‌که انرژی آبی با ۱۲ درصد در رده پایین‌تری قرار دارد. همچنین، رشد ظرفیت تخمینی در سال نشان می‌دهد که انرژی خورشیدی با ۵,۳۰۸ گیگاوات پیش‌تاز است؛ درحالی‌که انرژی بادی با ۲,۱۲۵ گیگاوات در رده دوم قرار دارد.

در بخش معیارهای جغرافیایی، انرژی خورشیدی با پتانسیل منابع انرژی ۷۱۷۰۰ ترابایت به‌طور قابل توجهی از سایر فناوری‌ها پیشی می‌گیرد؛ درحالی‌که انرژی آبی تنها ۶۰ ترابایت دارد. همچنین، چگالی قدرت نشان می‌دهد که انرژی خورشیدی با ۶,۶۳ وات بر متر مربع دارای بالاترین چگالی است که نشان‌دهنده کارایی بالای این فناوری است.

از نظر معیارهای اقتصادی، هزینه سطح‌سازی انرژی بادی با ۰,۰۳۳ دلار در هر کیلووات‌ساعت پایین‌ترین هزینه را دارد؛ درحالی‌که هزینه کل نصب انرژی خورشیدی با ۸۷۶ دلار در هر کیلووات، نشان‌دهنده هزینه‌های مناسب این فناوری است.

در بخش معیارهای سیاسی، درجه حمایت ارائه‌شده توسط سیاست‌ها برای انرژی خورشیدی با ۰,۳۳۶ بالاترین مقدار را دارد که نشان‌دهنده حمایت قوی از این فناوری در سیاست‌های دولتی است.

معیارهای اجتماعی نیز نشان می‌دهند که انرژی خورشیدی با ۰,۴۹۶ در ترویج دسترسی به انرژی پاک و ۱,۲۰۰ در ایجاد شغل در هر گیگاوات ساعت تأمین، عملکرد بهتری نسبت به سایر فناوری‌ها دارد.

در نهایت، از نظر معیارهای محیطی، انرژی بادی با انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱۱ گرم CO₂ معادل در هر کیلووات ساعت، بهترین عملکرد را در کاهش تأثیرات زیست‌محیطی نشان می‌دهد. این جدول به‌طور کلی نشان‌دهنده برتری انرژی خورشیدی در جنبه‌های مختلف از جمله ظرفیت تولید، اقتصادی بودن و پذیرش اجتماعی است، در حالی که انرژی بادی نیز به‌عنوان یک گزینه پایدار با تأثیرات زیست‌محیطی کمتر شناخته می‌شود.

جدول ۵. خلاصه ماتریس تصمیم

معیارهای ارزیابی	زیرمعیار	انرژی نماد	فناوری‌های پاک	انرژی بادی	انرژی خورشیدی	زیست‌توده خورشیدی
معیارهای انتقال انرژی	سهم انرژی (%)	C11	۱۲	۱۹	۲۶	۴۳
	رشد ظرفیت تخمینی در سال (GW)	C12	۰,۳۹۲	۲,۱۲۵	۵,۳۰۸	۰,۰۱۷
	رشد تولید تخمینی در سال (TWh)	C13	۰,۵۶۷	۴,۷۰۰	۶,۱۳۳	۰,۱۰۰
معیارهای جغرافیایی	پتانسیل منابع انرژی (TWh در سال)	C21	۶۰	۳۱۰۰	۷۱۷۰۰	۱۰۸
	ضریب ظرفیت	C22	۴۶	۳۷	۱۶,۹	۷۲
	چگالی قدرت (W/m ²)	C23	۰,۱۴	۱,۸۴	۶,۶۳	۰,۰۸
انرژی‌معیارهای اقتصادی	هزینه سطح‌سازی (USD/kWh)	C31	۰,۰۶۱	۰,۰۳۳	۰,۰۴۹	۰,۰۶۱
	هزینه کل نصب (USD/kW)	C32	۲۸۸۱	۱۲۷۴	۸۷۶	۲۱۶۲
	نسبت انرژی خالص	C33	۱۰۰	۱۸	۶,۸	۴,۶
معیارهای سیاسی	درجه حمایت ارائه‌شده توسط معیارهای سیاست‌ها	C41	۰,۲۲۴	۰,۲۳۳	۰,۳۳۶	۰,۲۰۷
معیارهای اجتماعی	ترویج دسترسی به انرژی پاک	C51	۰,۰۷۷	۰,۲۸۴	۰,۴۹۶	۰,۱۴۳
	ایجاد شغل (شغل/GWh تأمین)	C52	۰,۱۹۲	۰,۱۸۳	۱,۲۰۰	۰,۴۵۱

۰,۱۲۷۹	۰,۴۸۴۸	۰,۲۹۸۰	۰,۰۸۹۴	C53 پذیرش اجتماعی
۲۳۰	۴۸	۱۱	۲۴	C61 انتشار گازهای گلخانه‌ای در چرخه معیارهای محیطی (gCO2eq./kWh) عمر
۰,۰۵۷	۰,۵۲۳	۰,۳۲۹	۰,۰۹۲	C62 دوست‌داری محیط زیست
۰,۰۱۳	۱۴,۳۸۷	۰,۹۶۸	۰,۰۱۰	C63 اثربخشی اقدامات اقلیمی

جدول (۶) به تعیین وزن‌ها به صورت مرحله‌ای با استفاده از روش آنتروپی شانون می‌پردازد و معیارهای مختلف فناوری‌های انرژی پاک را در قالب یک ماتریس تصمیم و ماتریس تصمیم نرمال شده ارائه می‌دهد. در این جدول، چهار نوع فناوری شامل انرژی آبی، انرژی بادی، انرژی خورشیدی و زیست‌توده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

در بخش ماتریس تصمیم، سهم انرژی هر فناوری به وضوح نشان داده شده است. به عنوان مثال، انرژی خورشیدی با سهم ۲۶ و انرژی بادی با سهم ۱۹ در رده‌های بالاتری قرار دارند، در حالی که انرژی آبی با سهم ۱۲ در پایین‌ترین رده قرار دارد. این نشان‌دهنده پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در تأمین نیازهای انرژی است.

در ماتریس تصمیم نرمال شده، مقادیر نرمال شده برای هر فناوری محاسبه شده که به درک بهتر از عملکرد هر یک کمک می‌کند. به عنوان مثال، در زیرمعیار C12 (رشد ظرفیت تخمینی در سال)، انرژی خورشیدی با نمره ۰,۶۷۷ بالاترین نمره را دارد؛ در حالی که انرژی بادی با نمره ۰,۲۷۱ در رده دوم قرار دارد.

وزن‌های محاسبه شده در ستون‌های ej و dj نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر زیرمعیار در ارزیابی کلی فناوری‌ها هستند. به عنوان مثال، در زیرمعیار C33 (نسبت انرژی خالص)، انرژی آبی با وزن ۰,۷۷۳ بالاترین وزن را دارد که نشان‌دهنده کارایی بالای این فناوری در تولید انرژی خالص است.

به طور کلی، این جدول نشان‌دهنده ارزیابی دقیق و جامع فناوری‌های انرژی پاک است و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با توجه به وزن‌های محاسبه شده و پتانسیل‌های مختلف، انتخاب‌های بهتری برای توسعه و سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر انجام دهند.

جدول ۶. تعیین وزن‌ها به صورت مرحله‌ای با استفاده از روش آنتروپی شانون

Wj	dj	ej	ماتریس تصمیم نرمال شده	ماتریس تصمیم	معیارها
	زیست‌توده	انرژی خورشیدی	انرژی بادی	انرژی آبی	
۰,۱۲۰	۴۳	۲۶	۱۹	۱۲	C11
۰,۰۵۰	۰,۰۱۷	۵,۳۰۸	۲,۱۲۵	۰,۳۹۲	C12

C13	۰,۵۶۷	۴,۷۰۰	۶,۱۳۳	۰,۱۰۰	۰,۰۴۹
C21	۶۰	۳۱۰۰	۷۱۷۰۰	۱۰۸	۰,۰۰۱
C22	۴۶	۳۷	۱۶,۹	۷۲	۰,۲۶۸
C23	۰,۱۴	۱,۸۴	۶,۶۳	۰,۰۸	۰,۰۱۶
C31	۰,۰۶۱	۰,۰۳۳	۰,۰۴۹	۰,۰۶۱	۰,۲۹۸
C32	۲۸۸۱	۱۲۷۴	۸۷۶	۲۱۶۲	۰,۴۰۱
C33	۱۰۰	۱۸	۶,۸	۴,۶	۰,۷۷۳
C41	۰,۲۲۴	۰,۲۳۳	۰,۳۳۶	۰,۲۰۷	۰,۲۲۴
C51	۰,۰۷۷	۰,۲۸۴	۰,۴۹۶	۰,۱۴۳	۰,۰۷۷
C52	۰,۱۹۲	۰,۱۸۳	۱,۲۰۰	۰,۴۵۱	۰,۰۹۵
C53	۰,۰۸۹۴	۰,۲۹۸۰	۰,۴۸۴۸	۰,۱۲۷۹	۰,۰۸۹
C61	۲۴	۱۱	۴۸	۲۳۰	۰,۰۷۷
C62	۰,۰۹۲	۰,۳۲۹	۰,۵۲۳	۰,۰۵۷	۰,۰۹۲
C63	۰,۰۱۰	۰,۹۶۸	۱۴,۳۸۷	۰,۰۱۳	۰,۰۰۱

ماتریس تصمیم نرمال شده مربوط به روش MOORA به بررسی و ارزیابی فناوری‌های مختلف انرژی پاک می‌پردازد و به‌ویژه بر روی دو نوع انرژی آبی و انرژی بادی تمرکز دارد. در این ماتریس، معیارهای مختلف به دو دسته تقسیم شده‌اند: معیارهای مفید (B) و هزینه ©.

از میان معیارهای مفید، انرژی آبی در زیرمعیارهای مختلف به‌طور کلی عملکرد خوبی دارد. به‌عنوان مثال، در زیرمعیار C33 (نسبت انرژی خالص)، انرژی آبی با نمره ۰,۹۸۱۰ بالاترین نمره را کسب کرده است که نشان‌دهنده کارایی بالای این فناوری در تولید انرژی خالص است. همچنین، در زیرمعیارهای C22 و C62 نیز انرژی آبی نمرات قابل قبولی به ترتیب ۰,۴۸۶۱ و ۰,۱۴۶۲ دارد.

در مقابل، در زیرمعیارهای هزینه، انرژی بادی در زیرمعیار C31 (هزینه سطح‌سازی انرژی) با نمره ۰,۵۸۱۶ و در زیرمعیار C32 (هزینه کل نصب) با نمره ۰,۷۳۵۰ عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. این موضوع بیان‌گر این است که انرژی بادی به لحاظ اقتصادی نیز گزینه‌ای جذاب است.

به‌طور کلی، این ماتریس نرمال‌شده به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با توجه به عملکرد و هزینه‌های مختلف فناوری‌های انرژی، انتخاب‌های بهتری برای توسعه و سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر انجام دهند. این تحلیل به‌وضوح نشان می‌دهد که انرژی آبی و انرژی بادی هر دو دارای مزایای قابل توجهی هستند و می‌توانند در برنامه‌ریزی‌های آینده برای تأمین انرژی پایدار نقش مهمی ایفا کنند.

جدول ۷. ماتریس تصمیم نرمال‌شده مربوط به روش MOORA

ماتریس تصمیم نرمال‌شده	معیارهای مفید (B) / هزینه ©	معیارها
انرژی بادی	انرژی آبی	
۰,۲۱۸۰	B	C11
۰,۰۶۸۴	B	C12
۰,۰۷۳۱	B	C13
۰,۰۰۰۸	B	C21
۰,۴۸۶۱	B	C22
۰,۰۲۰۳	B	C23
۰,۵۸۱۶	C	C31
۰,۷۳۵۰	C	C32
۰,۹۸۱۰	B	C33
۰,۴۳۹۴	B	C41
۰,۱۲۸۸	B	C51
۰,۱۴۶۴	B	C52
۰,۱۵۱۴	B	C53
۰,۱۰۱۵	C	C61
۰,۱۴۶۲	B	C62
۰,۰۰۰۷	B	C63

جدول ۸ به ارزیابی تابع ترجیح و تابع ترجیح تجمعی برای چهار نوع فناوری انرژی شامل انرژی آبی (H)، انرژی بادی (W)، انرژی خورشیدی (S) و زیست توده (B) می پردازد. در این جدول، معیارهای مختلف به طور دقیق بررسی شده اند و نتایج به صورت مقادیر عددی نمایش داده شده است که نشان دهنده ترجیحات نسبی بین فناوری ها در زیرمعیارهای مختلف است.

به طور کلی، در زیرمعیار C33، انرژی خورشیدی با نمره ۱,۰۰۰۰ بالاترین امتیاز را دارد که نشان دهنده برتری این فناوری در مقایسه با سایر گزینه ها است. همچنین، در زیرمعیار C22، انرژی بادی نیز با نمره ۰,۵۲۸۱ عملکرد خوبی از خود نشان داده است. در مقابل، در زیرمعیار C12، انرژی آبی و زیست توده نمرات صفر را دریافت کرده اند که به معنای عدم ترجیح این گزینه ها در این معیار خاص است.

در بخش تابع ترجیح تجمعی، نتایج به دست آمده از سه روش مختلف شامل روش Fuzzy AHP و روش آنتروپی ارائه شده است. در اینجا، انرژی خورشیدی با نمره ۰,۶۸۵۱ بالاترین نمره را در روش Fuzzy AHP کسب کرده و نشان دهنده پتانسیل بالای این فناوری در تأمین نیازهای انرژی است. همچنین، در روش آنتروپی، انرژی آبی با نمره ۰,۰۸۴۷ و انرژی بادی با نمره ۰,۱۱۰۵ قرار دارند که این نیز نشان دهنده اهمیت نسبی این فناوری ها در ارزیابی کلی است.

به طور کلی، این جدول و تحلیل آن به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا با توجه به عملکرد و ترجیحات نسبی فناوری های مختلف انرژی، انتخاب های بهتری برای سرمایه گذاری و توسعه در حوزه انرژی های تجدید پذیر انجام دهند. نتایج نشان می دهد که انرژی خورشیدی و بادی به عنوان گزینه های برجسته در این ارزیابی شناخته می شوند و می توانند در برنامه ریزی های آینده برای تأمین انرژی پایدار نقش مؤثری ایفا کنند.

جدول ۸. ارزیابی تابع ترجیح و تابع ترجیح تجمعی (انرژی آبی - H؛ انرژی بادی - W؛ انرژی خورشیدی - S؛ زیست توده - B)

ارزیابی تابع ترجیح	معیارها	H-W	H-S	H-B	W-H	W-S	W-B	S-H	S-W	S-B	B-H	B-W	B-S
C11		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۲۲۵۸	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۴۵۱۶	۰,۲۲۵۸	۰,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۷۷۴۲	۰,۵۴۸۴
C12		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۷۰۹	۰,۳۲۷۵	۰,۰۰۰۰	۰,۳۹۸۴	۰,۹۲۹۱	۰,۶۰۱۶	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C13		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۷۷۳	۰,۶۸۵۱	۰,۰۰۰۰	۰,۷۶۲۴	۰,۹۲۲۷	۰,۲۳۷۶	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C21		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۴۲۴۰	۰,۰۰۰۰	۰,۴۱۸۱	۰,۰۰۰۰	۰,۹۵۷۶	۰,۹۹۹۳	۰,۰۰۷۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C22		۰,۱۶۳۳	۰,۵۲۸۱	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۳۶۴۸	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۴۷۱۹	۰,۶۳۵۲	۱,۰۰۰۰

ارزیابی تابع ترجیح	معیارها	H-W	H-S	H-B	W-H	W-S	W-B	S-H	S-W	S-B	B-H	B-W	B-S
C23		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۹۲۰	۰,۲۵۹۵	۰,۰۰۰۰	۰,۲۶۸۷	۰,۹۹۰۸	۰,۷۳۱۳	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C31		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۱۷۶	۰,۹۸۲۴	۰,۵۶۱۲	۱,۰۰۰۰	۰,۴۲۱۲	۰,۰۰۰۰	۰,۴۳۸۸	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C32		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۸۰۱۵	۰,۰۰۰۰	۰,۴۴۲۹	۱,۰۰۰۰	۰,۱۹۸۵	۰,۶۴۱۴	۰,۳۵۸۶	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C33		۰,۸۵۹۵	۰,۹۷۶۹	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۱۱۷۴	۰,۱۴۰۵	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۲۳۱	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C41		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۱۳۳۳	۰,۰۶۶۷	۰,۰۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۸۶۶۷	۰,۸۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C51		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۴۹۳۶	۰,۰۰۰۰	۰,۳۳۴۱	۱,۰۰۰۰	۰,۵۰۶۴	۰,۸۴۰۵	۰,۱۵۹۵	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C52		۰,۰۰۸۶	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۹۹۱۴	۱,۰۰۰۰	۰,۷۳۶۰	۰,۲۵۵۵	۰,۲۶۴۰	۰,۰۰۰۰
C53		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۵۲۷۶	۰,۰۰۰۰	۰,۴۳۰۳	۱,۰۰۰۰	۰,۴۷۲۴	۰,۹۰۲۶	۰,۰۹۷۴	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C61		۰,۰۰۰۰	۰,۱۰۹۶	۰,۹۴۰۶	۰,۰۵۹۴	۰,۱۶۸۹	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۸۳۱۱	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C62		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۷۵۴	۰,۵۰۷۷	۰,۰۰۰۰	۰,۵۸۳۱	۰,۹۲۴۶	۰,۴۱۶۹	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰
C63		۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۶۶۷	۰,۰۰۰۰	۰,۰۶۶۵	۱,۰۰۰۰	۰,۹۳۳۳	۰,۹۹۹۸	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰

جدول ۹. تابع ترجیح تجمعی

روش	H	W	S	B
تابع ترجیح تجمعی	۰,۰۵۴۵	۰,۰۷۷۵	۰,۱۵۲۴	۰,۴۴۰۱
Fuzzy AHP	۰,۱۳۸۵	۰,۵۰۱۶	۰,۶۸۵۱	۰,۳۶۰۴
Entropy	۰,۰۸۴۷	۰,۱۱۰۵	۰,۱۸۹۷	۰,۲۰۴۲

جدول (۱۰) به ارزیابی عملکرد پایداری انرژی تجمعی برای چهار نوع فناوری انرژی شامل انرژی آبی، انرژی بادی، انرژی خورشیدی و زیست توده در ۳۲ سناریو مختلف می پردازد. این سناریوها بر اساس جنبه های مختلف تسلط شامل تسلط اقتصادی، انرژی انتقال، جغرافیایی، سیاسی، اجتماعی و زیست محیطی دسته بندی شده اند. نتایج نشان می دهد که انرژی خورشیدی در تمامی سناریوها با نمرات بالای ۳۶,۸، به عنوان گزینه برتر شناخته می شود که این امر نشان دهنده پتانسیل بالای این فناوری در دستیابی به پایداری انرژی است. در مقابل، زیست توده در اکثر سناریوها، به ویژه در تسلط اقتصادی و اجتماعی، با نمرات پایین تری در مقایسه با سایر گزینه ها مواجه است. همچنین، انرژی بادی

به طور کلی عملکرد خوبی از خود نشان می دهد، به ویژه در سناریوهای تسلط جغرافیایی و سیاسی که نمرات ۲۷,۶ و ۲۸,۹ را کسب کرده است. انرژی آبی نیز در برخی از سناریوها، به ویژه در تسلط اقتصادی و بهترین-بدترین، نمرات معقولی دارد؛ اما به طور کلی در مقایسه با انرژی خورشیدی و بادی، در رتبه پایین تری قرار می گیرد. این تحلیل نشان می دهد که با توجه به نتایج به دست آمده، سرمایه گذاری و توسعه فناوری های انرژی خورشیدی و بادی می تواند به عنوان استراتژی های مؤثر برای دستیابی به پایداری انرژی در کشور مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱۰. امتیاز عملکرد پایداری انرژی تجمعی برای ۳۲ مورد از تحلیل حساسیت

سناریوهای وزنی	گزینه ها	روش های نرمال سازی
		نرمال سازی مین-مکس
تسلط اقتصادی	انرژی آبی	۲۳,۷
	انرژی بادی	۲۳,۷
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست توده	۱۵,۸
تسلط انرژی انتقال	انرژی آبی	۲۲,۴
	انرژی بادی	۲۳,۷
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست توده	۱۷,۱
تسلط جغرافیایی	انرژی آبی	۱۴,۵
	انرژی بادی	۲۷,۶
	انرژی خورشیدی	۳۵,۵
	زیست توده	۲۲,۴
تسلط سیاسی	انرژی آبی	۱۸,۴



سناریوهای وزنی	گزینه‌ها	روش‌های نرمال‌سازی
	نرمال‌سازی مین-مکس	
	انرژی بادی	۲۸,۹
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست‌توده	۱۵,۸
تسلط اجتماعی	انرژی آبی	۱۳,۲
	انرژی بادی	۲۸,۹
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست‌توده	۲۱,۱
	انرژی آبی	۱۹,۷
	انرژی بادی	۲۵,۰
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست‌توده	۱۸,۴
تسلط زیست‌محیطی	انرژی آبی	۲۳,۷
	انرژی بادی	۲۳,۷
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
	زیست‌توده	۱۵,۸
روش بهترین-بدترین	انرژی آبی	۲۱,۱
	انرژی بادی	۲۷,۶
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸
روش آنتروپی	انرژی آبی	۲۱,۱
	انرژی بادی	۲۷,۶
	انرژی خورشیدی	۳۶,۸

سناریوهای وزنی	گزینه‌ها	روش‌های نرمال‌سازی
	زیست‌توده	نرمال‌سازی مین-مکس
		۱۴,۵

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره فناوری‌های انرژی پاک پرداخت. تحقیقات انجام‌شده در این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که فناوری‌های انرژی پاک، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، دارای پتانسیل بالایی برای تحقق اهداف توسعه پایدار (SDG 7) در ایران هستند. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به انتقال به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر ضروری به نظر می‌رسد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که انرژی خورشیدی با بالاترین پتانسیل تولید و اثربخشی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان گزینه‌ای برتر در میان سایر فناوری‌ها شناخته می‌شود. این فناوری نه تنها در زمینه دسترسی به انرژی پاک و دوست‌داری محیط زیست عملکرد خوبی دارد، بلکه از نظر اقتصادی نیز جذابیت بالایی برای سرمایه‌گذاران دارد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که انرژی بادی نیز به‌عنوان یک گزینه پایدار با هزینه‌های پایین و تأثیرات زیست‌محیطی کمتر، می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده برای تأمین انرژی پایدار نقش مؤثری ایفا کند. در عین حال، انرژی آبی و زیست‌توده به‌عنوان گزینه‌های با پتانسیل محدودتر در مقایسه با انرژی خورشیدی و بادی شناسایی شدند. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات گذشته همخوانی دارند؛ به‌عنوان مثال، Pavlović et al (۲۰۲۱) نیز به این نتیجه رسیدند که انرژی خورشیدی به‌عنوان پایدارترین گزینه در شرایط خاصی مطرح می‌شود، در حالی که Ruiz et al (۲۰۲۰) بر توانمندی‌های بالای انرژی هیدرو و زیست‌توده تأکید کردند. به‌علاوه، Raza et al (۲۰۲۳) در پژوهش خود نشان دادند که انرژی بادی و خورشیدی در مناطق مختلف پاکستان دارای پتانسیل‌های مناسبی هستند. همچنین، پژوهش‌های Ismail et al (۲۰۲۳) و Yücel و Kocabaldır (۲۰۲۳) نیز بر اهمیت ارزیابی‌های دقیق و استفاده از روش‌های مختلف MCDM تأکید دارند تا اطمینان حاصل شود که بهترین گزینه‌ها شناسایی می‌شوند. در این راستا، مطالعه حاضر با شناسایی چالش‌های موجود در پذیرش اجتماعی و نیاز به بهبود سیاست‌ها و زیرساخت‌ها، شکاف‌های تحقیقاتی موجود در ادبیات را پر کرده و به تأکید بر ضرورت توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر در سیاست‌گذاری‌های انرژی کمک می‌کند. به‌طور کلی، در حالی که انرژی خورشیدی به‌عنوان گزینه‌ای برتر در این مطالعه شناسایی شده است، پژوهش‌های دیگر نیز بر پتانسیل‌های مختلف فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر تأکید دارند و بر لزوم به‌کارگیری تحلیل‌های چندمعیاره برای بهبود تصمیم‌گیری در این حوزه تأکید می‌کنند.

شکاف‌های تحقیقاتی شناسایی شده در این مطالعه، ازجمله استفاده از چندین روش MCDM و تحلیل‌های عمیق‌تر در زمینه وزن‌دهی و تأثیرات آن بر نتایج، به‌وضوح بیان‌گر این است که هنوز فرصت‌های زیادی برای بهبود روش‌ها و گسترش دامنه تحلیل‌ها وجود دارد. به‌ویژه، نیاز به بررسی تأثیرات بلندمدت فناوری‌های انرژی پاک بر اقتصاد و جامعه و همچنین تحلیل‌های حساسیت برای درک بهتر از نتایج به‌دست‌آمده، ازجمله مواردی است که باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر و تحلیل‌های انجام‌شده در زمینه فناوری‌های انرژی پاک، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، استراتژی‌های زیر برای توسعه و بهبود این فناوری‌ها در ایران پیشنهاد می‌شود:

تقویت زیرساخت‌های قانونی و سیاستی:

تدوین و اجرای سیاست‌های حمایتی قوی‌تر برای جذب سرمایه‌گذاران در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی.

ارائه مشوق‌های مالی، مانند تسهیلات و معافیت‌های مالیاتی برای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر.

تقویت قوانین و مقررات مربوط به حفاظت از محیط زیست به منظور تضمین توسعه پایدار و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی.

ارتقاء آگاهی و آموزش عمومی:

ایجاد برنامه‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی در خصوص مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر برای عموم مردم و صنایع، به‌ویژه در زمینه پذیرش اجتماعی فناوری‌های جدید.

همکاری با دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی برای توسعه دوره‌های آموزشی مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر.

تشویق تحقیق و توسعه (R&D):

افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر با هدف بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها. همکاری با مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها برای انجام پروژه‌های تحقیقاتی مشترک و تأسیس آزمایشگاه‌های تخصصی.

توسعه زیرساخت‌های فنی و فناوری:

سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های شبکه برق برای تسهیل اتصال و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر با شبکه‌های موجود. توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به منظور افزایش قابلیت اطمینان و پایداری منابع انرژی تجدیدپذیر.

تشویق مشارکت‌های عمومی و خصوصی:

ایجاد پلتفرم‌های همکاری بین بخش دولتی و خصوصی برای تسهیل سرمایه‌گذاری و اجرای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر.

حمایت از پروژه‌های اجتماعی و محلی که به توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کمک می‌کنند.

تحلیل‌های اقتصادی و اجتماعی:

انجام مطالعات جامع اقتصادی و اجتماعی به منظور درک بهتر از تأثیرات بلندمدت فناوری‌های انرژی پاک بر جامعه و اقتصاد.

استفاده از روش‌های تحلیلی چندمعیاره (MCDM) برای ارزیابی و اولویت‌بندی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر در سطح ملی و محلی.

توسعه بازارهای جدید:

شناسایی و ایجاد بازارهای جدید برای انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله بازارهای ملی و بین‌المللی. بهره‌برداری از ظرفیت‌های صادراتی در زمینه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و تجهیزات مرتبط. با اجرای این استراتژی‌ها، می‌توان به بهبود و گسترش فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در ایران کمک کرد و به تحقق اهداف توسعه پایدار (SDG 7) و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی دست یافت. انرژی‌های خورشیدی و بادی با توجه به پتانسیل بالای تولید و مزایای زیست‌محیطی، باید در اولویت برنامه‌ریزی‌های انرژی کشور قرار گیرند.

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسؤول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

تضاد منافع

نویسنده (نویسندگان) اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع:

- Bączkiewicz, A., & Kizielewicz, B. (2021). Towards sustainable energy consumption evaluation in Europe for industrial sector based on MCDA methods. *Procedia Computer Science*, 192, 1334-1346. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.137>
- Barney, A., Petersen, U. R., & Polatidis, H. (2022). Energy scenarios for the Faroe Islands: A MCDA methodology including local social perspectives. *Sustainable Futures*, 4, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100092>.
- Behzadpour, M., & Zargar, A. (2020). Investigation and Identification of Clean Energy (Solar and Wind) in the Urban Environment. *Green Architecture*, 22(6), 31-38. (In Persian)
- Charmaz, K. (2006). *Constructing Grounded Theory: A Practical Guide through Qualitative Analysis*. Sage Publications.
- Caldeira, M. C., Baldez, R. M., Tais de Paula, A. P., & de Figueiredo, J. J. (2024). Maximizing geothermal prospects: Unveiling Paraná Basin's potential through advanced GIS and Multicriteria Decision Analysis (MCDA). *Geothermics*, 116, 102847. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102847>.
- Elavarasan, R. M., Pugazhendhi, R., Jamal, T., Dyduch, J., Arif, M. T., Kumar, N. M., ... & Nadarajah, M. (2021). Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world. *Applied Energy*, 292, 116665. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116665>.
- IRENA. (2020). *Renewable Energy and Jobs – Annual Review*. <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020>.
- Islam, M. R., Aziz, M. T., Alauddin, M., Kader, Z., & Islam, M. R. (2024). Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach. *Renewable Energy*, 220, 119595. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119595>.
- Khorasani, M., & Niazi, M. (2025). Environmental justice scenarios and sustainable development goals (case study: Kashan city). *Sociology of Culture and Art*. doi: 10.22034/scart.2025.139900.1383 (In Persian).
- Kocabaldir, C., & Yücel, M. A. (2023). GIS-based multicriteria decision analysis for spatial planning of solar photovoltaic power plants in Çanakkale province, Turkey. *Renewable Energy*, 212, 455-467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.075>.
- Mokhtar, A. S., et al. (2021). Factors Influencing the Acceptance of Renewable Energy Technologies: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110175.
- Pavlović, B., Ivezić, D., & Živković, M. (2021). A multi-criteria approach for assessing the potential of renewable energy sources for electricity generation: Case Serbia. *Energy Reports*, 7, 8624-8632. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.072>.
- Raza, M. A., Yousif, M., Hassan, M., Numan, M., & Kazmi, S. A. A. (2023). Site suitability for solar and wind energy in developing countries using combination of GIS-AHP; a case study of Pakistan. *Renewable Energy*, 206, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.010>.
- Ruiz, H. S., Sunarso, A., Ibrahim-Bathis, K., Murti, S. A., & Budiarto, I. (2020). GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia. *Energy Reports*, 6, 3249-3263. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.198>.
- Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of innovations* the free Press of Glencoe. NY, 32, 891-937.
- Rogers, E. M., Singhal, A., & Quinlan, M. M. (2014). *Diffusion of innovations*. In *An integrated approach to communication theory and research* (pp. 432-448). Routledge.
- Tekeli, F. N., Filiz, B. C., Yörüklü, H. C., & Figen, A. K. (2024). Multi-criteria decision framework for catalyst selection: Production of formic acid as a circular liquid organic hydrogen carrier in the

- hydrogen economy. *Journal of Cleaner Production*, 452, 142125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142125>.
- UN Environment Programme. (2021). Goal 7: Affordable and clean energy. <https://www.unep.org/explore-topics/sustainable-development-goals/why-do-sustainable-development-goals-matter/goal-7>. (accessed 1 May 2021).
- Zandi, M. E., Saghafi, F., Aslani, A., & Khayatian Yazdi, M.S. (2024). Analysis of the Place of Energy in Development Programs from the Perspective of Innovation Strategy and Sustainable Development. *Quarterly Journal of Strategic Management Studies*, 15(58), 23-42. (In Persian).
- Zhou, J., et al. (2020). A New Approach for Evaluating the Acceptance of Renewable Energy Technologies. *Energy Policy*, 140, 111412.