



Computational
Economics

ISSN 2821-0433

Optimization of Renewable Energy Share in Iran's Electricity Generation Portfolio Using Genetic Algorithm: A 25-Year Forecast

Zahra pourkhaghan shahrezai¹, Ali Asghar Esmaeelinia Getabi^{2*}, Seyed Komail Tayebi³, Marjan Daman Keshideh⁴

¹ Ph. D. Student in oil and gas economics, Department of Economics, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: zahrapourkhaghan@gmail.com.

^{2*} Assistant Professor of Economics, Faculty of Economics and Accounting, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, Corresponding Author, Email: aeketabi@gmail.com.

³ Professor of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Isfahan University, Isfahan, Iran, Email: sk.tayebi@ase.ui.ac.ir.

⁴ Associate Professor of Economics, Faculty of Economics and Accounting, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: m.damankeshideh@yahoo.com.

Article Info

Received: 15/5/2025
Accepted: 8/9/2025

Pages: 53-75

Keywords:

Renewable Energy;
Iran Electricity
Portfolio; Energy
Optimization;
Genetic Algorithm

JEL Classification:
Q40; Q42; Q53

ABSTRACT

The accelerating growth of energy demand driven by population increase and global warming, along with environmental concerns and the scarcity of fossil and financial resources, has emphasized the need to expand renewable energy and prioritize investment in this sector. However, there is still no clear policy in Iran regarding the optimal share of renewables in the energy mix and the pace of transition toward it. This study employs data from Iran's national energy balance and applies a genetic algorithm in MATLAB to determine the optimal combination of fossil, nuclear, and renewable energy sources (solar, wind, biomass, hydro, and geothermal) for the period 2018–2039, in five-year intervals. Economic, technical, and environmental constraints are incorporated into the optimization framework. Findings reveal that the current electricity generation mix in Iran is not optimal. While fossil fuels currently account for 92% of electricity production, the optimal share is estimated at 55%. Conversely, the combined optimal share of nuclear and renewable energies is projected to reach approximately 45%. The results highlight the necessity of revising Iran's national energy investment policies and moving toward a more sustainable and diversified electricity generation mix.

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University, West Tehran Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Extended Abstract

Purpose

This paper addresses the strategic optimization of renewable energy integration into Iran's electricity generation portfolio over a 25-year period, leveraging the computational strength of genetic algorithms. With an energy sector heavily reliant on fossil fuels, Iran faces increasing pressure to diversify its energy sources in light of global environmental commitments and domestic sustainability challenges. The study introduces a multi-objective optimization model that minimizes environmental pollution and economic costs while considering technical and policy constraints. The model simulates and predicts optimal shares of various energy sources including fossil, nuclear, solar, wind, hydro, biomass, and geothermal, offering a forward-looking investment prioritization strategy for national energy planning. The primary objective of this study is to design an optimal mix of energy sources for electricity generation in Iran that reduces reliance on fossil fuels while maintaining economic feasibility and environmental responsibility. It seeks to answer two main policy questions: (1) What should be the optimal share of renewables in Iran's electricity generation mix? and (2) At what rate should the transition from fossil fuels to renewables be implemented over a 25-year horizon?

Methodology

Optimization in mathematics means finding the optimal values of a function. Energy consumption optimization can be performed locally or comprehensively for a system consisting of several processes. Comprehensive optimization is more complex than the local method due to the need to understand the energy dynamics of the equipment. Optimization methods are also divided into three categories based on cost: low-cost, medium-cost, and high-cost.

Classical optimization methods are suitable for those problems that have multiple and implicit objective functions of decision variables, and for solving large-scale problems and mixed-optimization problems, classical methods are difficult and sometimes impossible; for this class of problems, meta-heuristic and intelligent stochastic methods have been developed that use the principles of natural phenomena and enable them to explore large search spaces and identify optimal solutions effectively. Given that the research problem is a multi-objective, multi-variable, constrained, dynamic, stochastic, convex, nonlinear, and continuous problem; Metaheuristic evolutionary methods are the most appropriate method for solving it. Among these methods, the genetic algorithm has been introduced as one of the most well-known and widely used evolutionary algorithms. This algorithm gradually evolves the population of solutions by using biological concepts such as inheritance, selection, and mutation and guides it towards optimal values. Considering that the problem of the present research is multi-objective, constrained, dynamic, and nonlinear, the use of evolutionary methods, and especially the genetic algorithm, is considered the most appropriate approach to solve it. In order to optimize Iran's energy production portfolio, a combination of optimal production sources is considered that has lower pollution and cost. This goal can be evaluated in

two ways; one separately and the other combined. In other words, the optimization goals, which are to minimize pollution and energy production costs, can be modeled in two separate functions or considered in a combined function. By separately stating the goals, it is possible to find solutions in which even one of the criteria is optimal, and by applying the resulting weight, the optimal solution can be obtained under any conditions.

Findings

The optimized energy mix demonstrates a substantial shift from the current structure. The share of fossil fuels in electricity generation drops from 92.4% to about 55.4%, while renewable sources (especially solar and wind) and nuclear energy see significant growth. The forecasted production for 25 years ahead shows that renewable energy, particularly solar, becomes the dominant source of new energy capacity additions. The model predicts that investment in fossil fuel-based electricity should be minimized and existing capacities should only be maintained rather than expanded. This shift meets both environmental goals and supports Iran's energy security in the long term.

Conclusion

Iran's current electricity generation mix is suboptimal from both economic and environmental perspectives. This study provides a robust quantitative framework using genetic algorithms for forecasting and optimizing energy policy decisions. The results advocate for a strategic pivot toward renewables, especially solar and nuclear energy, over the next two and a half decades. Policymakers are urged to redirect capital investments accordingly and align energy planning with global sustainability targets. The methodology also allows for adaptability in future scenarios, supporting more resilient and responsive energy strategies.

بهینه‌سازی سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک (پیش‌بینی ۲۵ ساله)



زهرا پورخاقان شاهرزایی^۱، علی اصغر اسماعیل نیگتابی^۲، سید کمیل طیبی^۳، مرجان دامن کشیده^۴

^۱ دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، دانشکده اقتصاد و حسابداری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، پست الکترونیکی:

zahrapourkhaghan@gmail.com

^۲ استادیار اقتصاد، دانشکده اقتصاد و حسابداری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، نویسنده مسئول، پست الکترونیکی:

aeketabi@gmail.com

^۳ استاد اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، پست الکترونیکی: sk.tayebi@ase.ui.ac.ir

^۴ دانشیار اقتصاد، دانشکده اقتصاد و حسابداری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، پست الکترونیکی:

m.damankeshideh@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

صفحات ۷۵-۵۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

واژگان کلیدی:

بهینه‌سازی؛ انرژی‌های تجدیدپذیر؛ سبد انرژی تولید برق؛ الگوریتم ژنتیک

طبقه‌بندی JEL:

Q40; Q42; Q53

با رشد جمعیت و تشدید پدیده گرمایش جهانی، نیاز به انرژی به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است. در کنار این روند، نگرانی‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع فسیلی و بودجه‌ای، توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در این حوزه را ضروری ساخته است. با این حال، سیاست‌گذاری مشخصی در مورد سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر و سرعت حرکت به‌سوی این سهم بهینه وجود ندارد. از آنجا که سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی فرآیندی برگشت‌ناپذیر و زمان‌بر است، لازم است این اولویت‌بندی در چارچوبی بلندمدت انجام گیرد. در ایران به دلیل دسترسی آسان به منابع فسیلی، این منابع سهم عمده‌ای از سبد انرژی کشور را به خود اختصاص داده است. از آنجا که انرژی‌های تجدیدپذیر عمدتاً برای تولید برق استفاده می‌شوند، بهینه‌سازی سهم آن‌ها در سبد تولید برق می‌تواند راهکاری مناسب برای اصلاح ترکیب انرژی کشور باشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ترازنامه انرژی ایران پیرامون منابع انرژی و به کمک الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب، ترکیب بهینه منابع انرژی شامل فسیلی، هسته‌ای و تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، زیست‌توده، آبی، زمین‌گرمایی) در بازه ۱۳۹۷ تا ۱۴۱۸ برای دوره‌های ۵ ساله، با لحاظ محدودیت‌های اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد ترکیب فعلی تولید برق بهینه نیست؛ به‌طور مثال، سهم فعلی انرژی‌های فسیلی ۹۲ درصد است، در حالی که سهم بهینه ۵۵ درصد برآورد شده است. همچنین، سهم بهینه انرژی‌های هسته‌ای و تجدیدپذیر در مجموع به حدود ۴۵ درصد می‌رسد که بیانگر ضرورت بازنگری در سیاست‌های سرمایه‌گذاری انرژی کشور است.

۱. مقدمه

پس از نیروی انسانی، انرژی از مهمترین عوامل موثر بر اقتصاد جوامع است. استفاده از انرژی در تمام مراحل تولید لازم و ضروری است و بدون مصرف انرژی امکان تولید وجود ندارد؛ و با توجه به مفاهیم امنیت ملی، امنیت همه کشورهای جهان در گرو دسترسی مطمئن به انرژی است و بی جهت نیست که انرژی یک بخش استراتژیک و زیربنایی مهم در اقتصاد هر کشور به حساب می آید (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۳). تعاملات انرژی و اقتصاد تا آنجا پیشرفته است که در ادبیات اقتصادی امروزی میزان منابع انرژی در کشورها، میزان عرضه و مصرف سرانه انرژی اولیه و میزان سرانه یک کیلو وات ساعت برق مصرفی به صورت یکی از شاخص های مقایسه امکانات بالفعل، بالقوه و سطح توسعه کشورها در آمده است (لین و چن^۲، ۲۰۲۰).

استفاده بیش از اندازه انرژی های فسیلی اثرات جانبی منفی بر محیط زیست دارد که با بکارگیری انرژی های کمتر آلاینده می توان از آسیب بیشتر به محیط زیست جلوگیری کرد (گیتلن و همکاران^۳، ۲۰۲۳)؛ از این رو یافتن ترکیب بهینه سبد انرژی می تواند سهم بهینه انرژی های غیر فسیلی را مشخص کند و برنامه ریزی ها و سیاست گذاری ها را در این مسیر روشن تر کند (مجمع جهانی اقتصاد^۴، ۲۰۲۲). همچنین سرمایه گذاری در انواع منابع تولید انرژی، می تواند نوسانات قیمت انرژی های فسیلی بر صنعت و کل اقتصاد یک کشور را تا حدودی کنترل کند زیرا وابستگی کمتر به یک انرژی خاص می تواند صنعت و اقتصاد این کشورها را کمتر دچار نوسان و بحران کند (سلیمانخانی، ۱۴۰۰). قابل ذکر است که با توجه به محدود بودن منابع مالی کشورها، تعیین ترکیب بهینه منابع تولید انرژی موجب می شود که کشورها در سیاست گذاری های تولید و مصرف انرژی آینده نگرتر و حساب شده تر عمل کنند و سیاست گزاران را در ترکیب و رتبه بندی پروژه های که به منظور حفظ تعادل (در تولید و مصرف انرژی)، درآمدهای ارزی، سیاست های بین المللی و حتی وابستگی های بین المللی صورت می گیرد یاری می کند (دگر و همکاران^۵، ۲۰۲۴).

با توجه به پدیده گذار انرژی به سمت منابع کم کربن، برنامه ریزی سبد انرژی بهینه با در نظر گرفتن منابع متنوع، سازوکار مهمی برای تضمین امنیت، پایداری و کارایی ساختار انرژی محسوب می شود. به ویژه، با افزایش سهم انرژی های ناپایدار مانند خورشیدی و بادی، نیاز به ابزارهای پیشرفته تصمیم گیری برای هماهنگی میان تولید، پخش، ذخیره و انعطاف پذیری سیستم، به شدت احساس می شود (قائدی و باقری، ۱۳۹۹). از این رو سیاست گذاری های انرژی و برنامه ریزی پیرامون آن بسیار مهم است.

¹ Lee et al.,2023

² Lin, & Chen,2020

³ Gitelman et al.,2023

⁴ World Economic Forum,2022

⁵ Dagar,2024

برنامه‌ریزان، سیاست‌گذاران و حتی قانون‌گذاران با توجه به اطلاعات و آمار و ارقام منتشر شده از پژوهش‌های علمی و شواهد عینی برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و قانون وضع می‌کنند (آژانس بین‌المللی انرژی^۱، ۲۰۲۲). بنابراین می‌توان بیان کرد که هر چه پژوهش‌های علمی بیشتری در این زمینه صورت گیرد، می‌تواند راه سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان را روشن‌تر کند و سیاست‌های اتخاذ شده اثر مناسب‌تری داشته باشد (سوواکولو همکاران^۲، ۲۰۲۲). در پژوهش حاضر با ادغام روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته از جمله بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به جهت کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و تطابق با عدم قطعیت‌های محیطی به بهینه‌سازی سبد انرژی پرداخته شده است. به عبارتی، نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه چارچوبی ترکیبی و نوآورانه برای تعیین سبد بهینه تولید انرژی در مقیاس بلندمدت است که ضمن در نظر گرفتن زمان بر بودن سرمایه‌گذاری، پایداری منابع و اطمینان از تداوم عرضه تضمین شده است.

۲. ادبیات موضوع

سبد انرژی در دو مفهوم کلی کاربرد دارد: ۱- سبد تولید انرژی، ۲- سبد مصرف انرژی. سبد انرژی در واقع مجموعه‌ای از منابع انرژی با سهم‌های مشخص و البته تا حدودی متغیر را بیان میکند. سهم هر منبع انرژی در سبد تولید و مصرف انرژی به طور قابل توجهی تحت تأثیر فناوری منطقه‌ای، منابع طبیعی و منابع مالی است. این تنوع مستلزم استراتژی‌های مناسب برای بهینه‌سازی تولید و مصرف انرژی است (زدا^۳، ۲۰۱۹). در این پژوهش سعی بر بهینه‌سازی ترکیب انرژی‌های اولیه است؛ با توجه به اینکه درصد بالایی از انرژی‌های اولیه بلافاصله پس از تولید به انرژی دیگری تبدیل می‌شوند؛ سبد تولید یا عرضه انرژی اولیه و سبد مصرف آن تقریباً یکی خواهد بود از این رو در این پژوهش منظور از سبد انرژی، ترکیبی از انرژی‌های اولیه جهت تولید انرژی دیگر است.

طی سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۰ انرژی‌های نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی بیشترین سهم را در سبد تولید انرژی جهان دارند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۰). در صورتی که انرژی‌ها به دو گروه فسیلی و غیر فسیلی تقسیم شود؛ سهم انرژی‌های فسیلی در طی دوره‌ی ذکر شده همواره بالای ۸۰ درصد و سهم انرژی‌های غیر فسیلی حداکثر ۲۰ درصد بوده است. بررسی متوسط رشد سالانه عرضه انرژی به تفکیک انرژی‌های فسیلی و غیر فسیلی نشان می‌دهد که در طی دوره‌ی ذکر شده متوسط رشد سالانه انرژی‌های غیر فسیلی بیشتر از انرژی‌های فسیلی بوده است (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۰).

¹ IEA, 2023

² Sovacool, 2022

³ Zedda, 2019

سبد عرضه انرژی ایران در سال ۲۰۲۰ شامل ۶۷/۷ درصد گاز طبیعی، ۳۰/۶ درصد نفت، ۰/۶۸ درصد انرژی هسته‌ای، ۰/۳۶ درصد زغال سنگ، ۰/۵ انرژی آبی، ۰/۱۹ انرژی بیوماس و ۰/۰۳ درصد انرژی بادی و خورشیدی بوده است. میزان قابل توجه‌ای از انرژی عرضه شده مربوط به گاز طبیعی و نفت است؛ به گونه‌ای که سهم سایر انرژی‌ها بسیار ناچیز است. در ایران نیز طی دوره‌ی ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۰ سهم گاز طبیعی در عرضه انرژی افزایش و سهم انرژی نفت کاهش یافته است (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۰). در سال ۲۰۲۰، سبد عرضه انرژی عربستان، قطر و امارات نیز به انرژی نفت و گاز متکی بوده است؛ به گونه‌ای که در عربستان سهم انرژی نفت ۶۴/۲، گاز طبیعی ۳۵/۷ و تجدیدپذیرها تنها حدود ۰/۱ درصد بوده است. در قطر ساختار عرضه انرژی تقریباً بر گاز طبیعی مبتنی بوده است. در سبد تولید انرژی قطر سهم گاز طبیعی ۸۷/۳، نفت ۱۲/۶ و سایر منابع تجدیدپذیر در حدود ۰/۱ درصد بوده است. در امارات متحده عربی سهم گاز طبیعی، نفت، زغال سنگ، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد تولید انرژی به ترتیب ۶۳/۵، ۲۹/۷، ۰/۳، ۳/۱ و ۰/۷ است. تفاوت امارات با کشورهای ایران، عربستان و قطر در میزان بکارگیری انرژی‌های اولیه در تولید برق است. در این کشور حدود ۲۸ درصد از برق تولید شده از منابع کم کربن تامین شده است که عمدتاً انرژی هسته‌ای و خورشیدی است. در مجموع ترکیب مشابهی از نفت و گاز در ساختار عرضه انرژی در ایران و کشورهای مشابه وجود دارد و در مقایسه با این دو انرژی سایر انرژی‌ها سهم بسیار اندکی دارند که روند تغییرات آن‌ها عملاً محدود است؛ حتی با تجمع انرژی‌های غیر فسیلی نیز نمی‌توان سهم قابل توجه‌ای برای این گروه از انرژی در نظر گرفت. با توجه به آنچه بیان شد و کاربرد بیشتر انرژی‌های غیر فسیلی و تجدیدپذیر در تولید برق، به منظور تحلیل صحیح‌تر سبد انرژی‌های تجدیدپذیر بهتر است، سبد تولید انرژی برق بهینه شود تا سهم دقیق و قابل محاسبه این انرژی‌ها ارائه شود.

۲-۱. سبد تولید انرژی برق

امروزه تولید برق یکی از بزرگترین چالش‌های زیست محیطی پیش روی جوامع است. به طور کلی، برق را می‌توان از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تامین کرد اما در بسیاری از کشورها تولید انرژی برق عمدتاً مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای است. از ۲۵ سال پیش، دسترسی ساکنان کشورهای در حال توسعه به برق به ۱/۳ میلیارد نفر رسیده است، در حالی که رشد جمعیت بسیار بیشتر و حدود ۲ میلیارد است؛ بنابراین حدود ۷۰۰ میلیون نفر به انرژی برق دسترسی ندارند. تقاضای انرژی در جوامع دورافتاده را می‌توان به طور مقرون به صرفه از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر تامین کرد، زیرا می‌توانند به صورت نیروگاه‌های با ظرفیت محدود و به صورت پراکنده احداث شوند و نیاز به زیرساخت‌های انتقال انرژی و مسائل مرتبط به آن را برطرف می‌کنند (احمدی و همکاران، ۲۰۲۰).

در ایران، انتخاب فناوری‌های تولید برق به شدت تحت تأثیر هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه و در دسترس بودن منابع فسیلی است. با این حال، ارزیابی جامع معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و زیست محیطی برای توسعه انرژی پایدار ضروری است. این رویکرد چند وجهی می تواند به ترکیب انرژی متعادل تر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. تولید انرژی برق در ایران بیشتر از منابع نفت، گاز طبیعی و آبی است. همچنین از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ سهم انرژی نفت در تولید برق کاهش و سهم گاز طبیعی افزایش یافته است. در سبد تولید انرژی برق نیز سهم انرژی‌های غیر فسیلی تجدیدپذیر بسیار اندک است؛ با وجود این امکان بهینه‌سازی این سبد بیشتر از سبد عرضه انرژی است. این در حالی است که سهم انرژی‌های غیر فسیلی در تولید برق در جهان طی دوره ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۰ حداقل ۳۴ و حداکثر ۳۸ بوده است. نسبت بالای انرژی‌های فسیلی، به ویژه گاز طبیعی، به طور قابل توجهی بر قیمت برق و گرما تأثیر می گذارد. این رابطه در درجه اول به دلیل نقش گاز طبیعی در تولید برق و تأثیر آن بر پویایی بازار است (ذاکری و همکاران^۱، ۲۰۲۳)؛ از این رو باید متناسب با رشد جمعیت و افزایش تقاضای برق، منابع تولید برق به گونه‌ای انتخاب شود که از نظر اقتصادی و زیست محیطی مناسب باشد. پیش بینی می‌شود که کل مصرف برق جهان در سال ۲۰۳۵ به ۳۳۰۰۰ تراوات ساعت برسد که دو برابر بیشتر از سال ۲۰۰۸ است (احمدی و همکاران، ۲۰۲۰)؛ که نیاز به سرمایه‌گذاری در این بخش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه از منابع متفاوتی می‌توان برق تولید کرد؛ تفاوت در سهم انرژی‌های مختلف در سبد تولید انرژی برق به خودی خود نمی‌تواند دلیلی بر عدم بهینه بودن یا بهینه بودن آن سبد تولید انرژی باشد و ضروری است که عوامل زیست محیطی، اقتصادی و فنی در نظر گرفته شود. به طور مثال، مهم‌ترین مسئله تولید برق تناوب و پایداری جریان برق است، منابع تجدیدپذیر با وجود اینکه دارای ویژگی پایداری منبع تامین انرژی هستند چون به شرایط طبیعی و جوی وابسته هستند می‌توانند نوسانات قابل توجهی در تولید برق به صورت فصلی یا حتی روزانه داشته باشند (رینالدی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱)؛ از این رو ریسک تناوب و پایداری جریان برق را به همراه دارند.

۲-۲. سبد استانداردهای انرژی تجدیدپذیر

بر اساس قوانین وضع شده در پیمان کیوتو، درصدی از برق تحویلی به مشتریان که توسط خرده فروشان تأمین می‌شود می‌بایست از منابع انرژی تجدیدپذیر باشند. این درصدها در بسیاری از کشورها بر اساس سبد استاندارد انرژی تنظیم می‌شوند. سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر^۳ یکی از سیاست‌های دولت در جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق می‌باشد. این سبد استاندارد به تأمین کنندگان برق

¹ Zakeri, 2023

² Rinaldi, 2021

³ RPS: Renewable Portfolio Standard

الزام می کند که بخش مشخصی از انرژی خود را از منابع تجدیدپذیر تولید کنند. این مکانیسم سیاستی توسط بسیاری از ایالت های ایالات متحده اتخاذ شده است و برای ترویج رشد تولید برق بدون انتشار گازهای گلخانه ای طراحی شده است (باسچس^۱، ۲۰۲۴).

سبد استاندارد انرژی در واقع مدلی مشابه مالیات کربن است که تحت پیمان کیوتو ایجاد شده است. بر طبق این معاهده بازاری بین کشورهای امضاء کننده ایجاد شده که در آن کشورهایی که بیش از حد مجاز دی اکسید کربن تولید می کنند از کشورهایی که زیر حد مجاز آلاینده گی دارند مجوز آلاینده گی گازهای خانه ای را بخرند. (هر مجوز معادل یک تن کربن دی اکسید است) سبد استاندارد انرژی نیز شرکت های برق را مجبور می سازد تا درصدی از برق تحویلی به مشتریان خود را از منابع تجدیدپذیر تهیه نمایند. در واقع سبد انرژی استاندارد که در سطح بین المللی شناخته شده است، یک سیستم تعهد انرژی تجدیدپذیر است که در آن شرکت های تأمین کننده برق (یوتیلیتی) یا خرده فروشان برق، مقدار معینی از انواع انرژی تجدیدپذیر (معمولا خورشید، باد و بیوماس)، (خواه به صورت درصد، مگاوات ساعت یا مگاوات عنوان شود) را در تولید برق بکار می گیرند (جیانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۰).

از نام های رایج برای سبد استاندارد بین المللی می توان استاندارد برق تجدیدپذیر^۳ در سطح فدرال ایالات متحده و تعهد تجدیدپذیر^۴ در انگلستان را نام برد. تکنولوژی های واجد شرایط برای این سیاست می تواند در کشورهای مختلف، متفاوت باشد؛ اگر چه یک عنوان کلی تجدیدپذیر برای توصیف سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر بکار می رود، اما توافق گسترده ای در مورد منابع انرژی تجدیدپذیر واجد شرایط وجود ندارد. باد، خورشید، زمین گرمایی، زیست توده و اقیانوس منابع انرژی پایه ای واجد شرایطی می باشند که معمولا برای دستیابی به سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر مورد نیاز، مورد استفاده قرار می گیرد. سازماندهی و اداره سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر از یک الگوی عادی و معمولی پیروی می کند. الزامات سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر معمولا به خرده فروشان اعمال می شود.

شرکت های توزیعی تنظیم کننده انتظار دارند که هر گونه هزینه های اضافی الزامات را از سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر از طریق افزایش قیمت یا نرخ استاندارد پوشش دهند (اوکوبا^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). در جایی که در آن رقابت خرده فروشان مجاز است، پوشش هزینه ها اطمینان کمتری دارد، اما هزینه های اضافی به احتمال زیاد به مصرف کنندگان انتقال داده می شود. در برخی کشورها، برخی نهادهای دولتی، بخشی یا همه این هزینه های اضافی را بر عهده می گیرند. تعدادی مکانسیم وجود دارد که جهت اجرای الزامات سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر استفاده می شود، برای مثال لغو مجوزهای برق یا جریمه های

¹ Basseches, 2024

² Jiang, 2020

³ Renewable Energy Standard (RES)

⁴ Renewables Obligation

⁵ Ukoba.and etc, 2020

داخلی را می‌توان نام برد. سیاست‌های سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر همچنین این اجازه را می‌دهد که بتوان بدون تولید واقعی انرژی تجدیدپذیر از طریق قوانینی از جمله قبول پرداخت‌های جایگزین، معافیت‌های قانونی و معافیت‌های اختیاری بتوان با تعهد سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر انطباق پیدا کرد. این انعطاف‌پذیری برای تشویق مشارکت در طرح‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و در عین حال سازگاری با قابلیت‌های مختلف دولت و شرایط بازار طراحی شده است (دیشنه^۱ و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۳. نمونه‌های از سبد استانداردهای انرژی تجدیدپذیر در کشورهای مختلف:

ژاپن در سال ۱۹۹۷، در قانون شماره ۳۷ توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، هدف دستیابی به ۱۱۸ میلیون کیلووات برق از منابع تجدیدپذیر را در سال ۲۰۱۲ مطرح کرد (قانون توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ژاپن، ۲۰۲۱). استرالیا در قانون انرژی تجدیدپذیر سال ۲۰۰۰، سیاست سبد استاندارد انرژی را اتخاذ کرد. هدف این قانون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با الزام ارائه دهندگان برق به تامین حداقل درصدی از انرژی خود از منابع تجدیدپذیر است که به طور موثر به عنوان یک استاندارد عمل می‌کند. (سیمشازر^۲، ۲۰۱۹).

چین نیز یک هدف انرژی تجدیدپذیر را در سال ۲۰۰۶ اتخاذ و آن را در سال ۲۰۰۹ به منظور دستیابی به ۱۵ درصد انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۰، حدود ۵۰۰ مگاوات برق تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۰ (۳۰۰ مگاوات از برق آبی، ۱۵۰ مگاوات از باد، ۳۰ مگاوات از بیوماس و ۲۰ مگاوات از برق خورشیدی) اصلاح کرد (هو^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

۳. روش تحقیق

بهینه‌سازی^۴ در ریاضیات به معنای یافتن مقادیر بهینه یک تابع تابع است. بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌تواند به صورت موضعی و یا بصورت جامع برای یک سیستم که متشکل از چندین فرایند است، انجام شود. بهینه‌سازی جامع به دلیل نیاز به شناخت دینامیک انرژی تجهیزات، پیچیده‌تر از روش موضعی است. همچنین روش‌های بهینه‌سازی بر اساس هزینه به سه دسته کم‌هزینه، متوسط و پرهزینه تقسیم می‌شوند (السورآگابی^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی برای آن دسته از مسائل که دارای تابع هدف چندگانه و غیرصریح از متغیرهای تصمیم‌گیری است مناسب است و برای حل مسائل با ابعاد بزرگ و مسائل بهینه - سازی

¹ Deschênes, 2023

² Simshauser, 2019

³ Hu, 2022

⁴ Optimization

⁵ Elsoragaby, 2020

ترکیبی، روش های کلاسیک دشوار و گاهی غیرممکن است؛ برای این دسته از مسائل روش های فرا ابتکاری و تصادفی هوشمند تدوین یافته است که از اصول پدیده های طبیعی بهره می برند و آنها را قادر می سازند تا فضاهای جستجوی وسیعی را کاوش کنند و راه حل های بهینه را به طور موثر شناسایی کنند. (تومارو همکاران^۱، ۲۰۲۳). با توجه به اینکه مسئله پژوهش یک مسئله چند هدفه، چند متغیر، مقید، پویا، تصادفی، محدب، غیرخطی و پیوسته است؛ روش های تکاملی فراابتکاری مناسب ترین روش حل آن است. در میان این روش ها، الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از شناخته شده ترین و پرکاربردترین الگوریتم های تکاملی معرفی شده است (عثمان و همکاران^۲، ۲۰۲۲؛ سایپراساد و همکاران^۳، ۲۰۱۹). این الگوریتم با استفاده از مفاهیم زیستی مانند وراثت، انتخاب و جهش، جمعیت راه حل ها را به تدریج تکامل داده و به سمت مقادیر بهینه هدایت می کند (گنجه کویری و همکاران^۴، ۲۰۱۷؛ پیلائی و همکاران^۵، ۲۰۱۸).

با توجه به اینکه مسئله پژوهش حاضر چندهدفه، مقید، پویا و غیرخطی است، استفاده از روش های تکاملی و به ویژه الگوریتم ژنتیک مناسب ترین رویکرد برای حل آن محسوب می شود. جهت بهینه سازی سبد تولید انرژی ایران، ترکیبی از منابع تولید بهینه در نظر گرفته می شود که میزان آلاینده و هزینه کمتری داشته باشد. این هدف به دو صورت می تواند مورد ارزیابی قرار گیرد؛ یکی به صورت مجزا و دیگری به صورت ترکیبی. به عبارتی می توان اهداف بهینه سازی که کمینه کردن میزان آلاینده و هزینه تولید انرژی است را در دو تابع مجزا مدل سازی کرد و یا به صورت ترکیبی در یک تابع در نظر گرفت. بیان مجزای اهداف، امکان قرارگیری جواب هایی که حتی یکی از معیارها در آن بهینه است وجود دارد و با اعمال وزن حاصل از آن با هر شرایطی می توان جواب بهینه را بدست آورد (بزرگ، ۱۳۹۶).

در پژوهش های بهینه سازی سبد انرژی از شاخص های مختلف اما الگوهای یکسانی استفاده می شود. برخی از پژوهشگران بهینه سازی تک هدفه را برگزیده اند و برخی بهینه سازی ترکیبی و چندهدفه را معتبرتر می دانند (لی^۶ و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهش های مقایسه ای، نتایج بهینه سازی چندهدفه معتبرتر و برای برنامه ریزی و سیاست گذاری ها مناسب تر دانسته شده است. از این رو در این پژوهش بهینه سازی با استفاده از الگوی چند هدفه (شامل دو مدل (مدل اول، حداقل سازی میزان آلودگی محیط زیست بر اثر تولید برق و مدل دوم، حداقل سازی میزان هزینه تولید برق)) در نظر گرفته شده است تا

¹ Tomar, 2023

² Othman, 2022

³ Saiprasad, 2019

⁴ Ganjeh kaviri, 2018

⁵ Pillai, 2018

⁶ Li et al, 2022

بهترین ترکیب انرژی بدست آید. الگوی ریاضی که در اکثر پژوهش‌ها استفاده شده است به شرح زیر است. (خانی و همکاران، ۱۳۹۵، لی و همکاران، ۲۰۲۲).

$$\min EEI = \sum EEI_i X_i \quad (1)$$

که در آن:

EEI_i = شاخص محیط زیستی منبع انرژی i

FI_i = شاخص اقتصادی منبع انرژی i

X_i = میزان برداشت از منبع انرژی i

i = منابع انرژی

شاخص اقتصادی، درواقع بیشینه سرمایه مورد نیاز برای تامین همه انرژی مورد نیاز کشور است. بیشینه سرمایه مورد نیاز تامین انرژی سالیانه کشور (از یک منبع خاص)، از ضرب هزینه‌ی تولید یک منبع خاص در میزان انرژی مورد نیاز سالیانه کشور بدست می‌آید؛ که جهت بی ابعاد کردن شاخص، بیشینه‌ی سرمایه مورد نیاز به تولید ناخالص داخلی سالیانه‌ی کشور تقسیم می‌شود.

$$\text{بیشینه‌ی سرمایه مورد نیاز} = \frac{\text{شاخص اقتصادی}}{GDP} \quad (2)$$

$$\text{میزان انرژی سالانه‌ی مورد نیاز کشور} \times \text{هزینه تولید} = \text{بیشینه‌ی سرمایه مورد نیاز} \quad (3)$$

شاخص زیست محیطی، نشان دهنده‌ی میزان آلاینده‌ی منبع است؛ که با توجه به اینکه آلاینده‌ی منابع مختلف بر حسب (گرم کربن/کیلووات ساعت) نشان داده می‌شود و نیاز است که شاخص مورد استفاده بدون واحد باشد، بنابراین حجم آلاینده‌ی کل انرژی مصرفی کشور که بر مبنای هر منبع بدست می‌آید بر وزن اتمسفر تقسیم می‌شود.

$$\text{شاخص زیست محیطی} = \frac{\text{حجم آلاینده‌ی منبع}}{\text{وزن اتمسفر}} \quad (4)$$

$$\text{حجم دی اکسید کربن تولیدی هرواحد منبع خاص} \times \text{کل انرژی مصرفی کشور} = \text{حجم آلاینده‌ی منبع} \quad (5)$$

قیود در نظر گرفته شده برای این مدل، شامل قید محدودیت پتانسیل تولید، محدودیت ماکزیم مصرف، محدودیت اطمینان، محدودیت ضمنی و محدودیت استواری است. قید اول (محدودیت پتانسیل تولید)، میزان برداشت از هر منبع انرژی است که باید از میزان شاخص فنی کمتر باشد.

$$X_i \leq R_i \quad (6) \quad \text{محدودیت پتانسیل تولید}$$

طبق گزارش معاونت پژوهش‌های زیربنایی کشور، اگر حداکثر انرژی قابل برداشت از یک منبع انرژی به

کل انرژی مورد نیاز یک سال کشور تقسیم شود یک شاخص فنی بدون ابعاد بدست می آید که برای مقایسه منابع مختلف مناسب است.

$$(۷) \quad \text{پتانسیل انرژی} = \frac{\text{حداکثر مصرف کشور از کل انرژی}}{\text{دوره زمانی}}$$

$$(۸) \quad \text{شاخص فنی} = \frac{\text{حداکثر مصرف انرژی}}{\text{کل تقاضای انرژی}}$$

R_i = شاخص فنی منبع انرژی i

R_k = حداکثر مصرف کشور از کل انرژی

قید دوم (محدودیت ماکزیمم مصرف)، مجموع میزان انرژی های مصرفی است که باید تقاضای کشور را تامین کنند که با توجه به رشد جمعیت و رشد مصرف انرژی باید بیشتر از حداکثر مصرف فعلی باشد.

$$(۹) \quad \text{محدودیت ماکزیمم مصرف} \quad \sum_{i=1}^5 X_i \geq R_k$$

برای اطمینان از تطابق ظرفیت تولید و انتقال با مصرف برق، مبحثی با عنوان برنامه ریزی ظرفیت نیروگاهی مطرح است که یکی از متغیرهای کلیدی مطرح در آن شناخت قابلیت اطمینان به تولید در نیروگاه ها است. با توجه به عدم قطعیت هایی که در نیروگاه های خورشیدی و بادی وجود دارد این موضوع در نیروگاه های تجدیدپذیر اهمیت بالاتری دارد تا در مواقع نیاز، شبکه برق دچار مشکل نشود. ظرفیت واقعی تولید یک نیروگاه با احتمال بالای ۹۹ درصد در مواقع ضروری، مفهومی است که اخیرا با عنوان ظرفیت مطمئن نیروگاهی^۱ از آن یاد می شود. بنابراین قید سوم (محدودیت ضریب اطمینان)، به منظور برآورد الگوی بهینه عرضه قابل اطمینان برق ناشی از انرژی های تجدیدپذیر است.

$$(۱۰) \quad \text{محدودیت ضریب اطمینان} \quad \beta_i X_i \leq R_i$$

قید چهارم (محدودیت ضمنی)، نامنفی بودن متغیرهای تصمیم مدل را در نظر می گیرد.

$$(۱۱) \quad \text{محدودیت ضمنی} \quad 0 \leq X_i$$

با توجه به اینکه در نیروگاه های فسیلی (سیکل ترکیبی، بخار و گاز)، منابع تامین انرژی اولیه مشترک است؛ امکان برآورد شاخص ها و قیود به صورت تفکیکی برای انواع نیروگاه های فسیلی وجود ندارد. از این رو نیروگاه های فسیلی به صورت گروهی و سهم انواع انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی به صورت خورشیدی، بادی، آبی، زیست توده، زمین گرمایی و هسته ای در نظر گرفته شده است.

¹ capacity credit (or Power Credit or Capacity Value)

محدودیت ضمنی (نامنفی بودن متغیرها) بکار گرفته شده در اکثر پژوهش‌ها، حداقل میزان تولید از هر انرژی را صفر در نظر می‌گیرد. این به این معناست که در سبد بهینه امکان صفر شدن میزان انرژی‌ها وجود دارد؛ اما باید توجه شود که سرمایه‌گذاری فرایندی بازگشت پذیر نیست یا بازگشت‌پذیری بسیار پایینی دارد و صفر در نظر گرفتن حداقل تولید به معنای عدم در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری‌های انجام شده است. از این رو محدودیت ضمنی بهتر است که صفر در نظر گرفته نشود. برای ساده‌تر شدن برآوردها فرض می‌شود که هیچ سرمایه‌گذاری جدید و بدون برنامه‌ای تا تعیین سبد بهینه تولید برق انجام نشود و درصدی از تولید فعلی مبنای محدودیت ضمنی قرار می‌گیرد که هم نامنفی است و هم سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ضمنی بر اساس توضیحات ذکر شده به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$X_{\text{خورشیدی}}^{\text{Min}} \leq X \quad (12)$$

$$X_{\text{بادی}}^{\text{Min}} \leq X$$

$$X_{\text{آبی}}^{\text{Min}} \leq X$$

$$X_{\text{بیوماس}}^{\text{Min}} \leq X$$

$$X_{\text{زمین گرمایی}}^{\text{Min}} \leq X$$

$$X_{\text{هسته ای}}^{\text{Min}} \leq X$$

$$X_{\text{فسیلی}}^{\text{Min}} \leq X$$

بر مبنای محاسبات انجام شده توسط کرونس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲، ضرایب اطمینان ۰/۱ در ۱۰,۰۰۰ ساعت برای انرژی خورشیدی و زمین گرمایی، ۰/۵ در ۱۰,۰۰۰ ساعت برای انرژی بادی و جزر و مد، ۰/۲ در ۱۰,۰۰۰ ساعت برای زیست توده و ۰/۶۷ در ۱۰,۰۰۰ ساعت برای انرژی برق آبی در نظر گرفته می‌شود که قیود مربوط به محدودیت ضریب اطمینان به شرح زیر برآورد شده است.

$$10X_{\text{خورشیدی}} \leq R_{\text{خورشیدی}}$$

$$5X_{\text{بادی}} \leq R_{\text{بادی}}$$

$$1.5X_{\text{آبی}} \leq R_{\text{آبی}}$$

$$5X_{\text{بیوماس}} \leq R_{\text{بیوماس}}$$

$$10X_{\text{زمین گرمایی}} \leq R_{\text{زمین گرمایی}}$$

(۱۳)

در مجموع مدل‌های پژوهش به همراه قیود آن به شرح زیر است:

¹ Koroneos, et al, 2012

$$\begin{aligned} \min EEI &= EEI_{\text{خورشیدی}} X_{\text{خورشیدی}} + EEI_{\text{بادی}} X_{\text{بادی}} + EEI_{\text{آبی}} X_{\text{آبی}} + EEI_{\text{بیوماس}} X_{\text{بیوماس}} \\ &\quad + EEI_{\text{زمین گرمایی}} X_{\text{زمین گرمایی}} + EEI_{\text{هسته ای}} X_{\text{هسته ای}} + EEI_{\text{فسیلی}} X_{\text{فسیلی}} \\ \min FI &= FI_{\text{خورشیدی}} X_{\text{خورشیدی}} + FI_{\text{بادی}} X_{\text{بادی}} + FI_{\text{آبی}} X_{\text{آبی}} + FI_{\text{بیوماس}} X_{\text{بیوماس}} \\ &\quad + FI_{\text{زمین گرمایی}} X_{\text{زمین گرمایی}} + FI_{\text{هسته ای}} X_{\text{هسته ای}} + FI_{\text{فسیلی}} X_{\text{فسیلی}} \end{aligned}$$

قیود

$$\begin{aligned} X_{\text{خورشیدی}} &\leq R_{\text{خورشیدی}} \\ X_{\text{بادی}} &\leq R_{\text{بادی}} \\ X_{\text{آبی}} &\leq R_{\text{آبی}} \\ X_{\text{بیوماس}} &\leq R_{\text{بیوماس}} \\ X_{\text{زمین گرمایی}} &\leq R_{\text{زمین گرمایی}} \\ X_{\text{هسته ای}} &\leq R_{\text{هسته ای}} \\ X_{\text{فسیلی}} &\leq R_{\text{فسیلی}} \end{aligned}$$

محدودیت پتانسیل تولید

$$\sum_1^3 X_i \geq R_k \quad i=1, \dots, 7$$

محدودیت ماکسیمم مصرف

$$\begin{aligned} 10X_{\text{خورشیدی}} &\leq R_{\text{خورشیدی}} \\ 5X_{\text{بادی}} &\leq R_{\text{بادی}} \\ 1.5X_{\text{آبی}} &\leq R_{\text{آبی}} \\ 5X_{\text{بیوماس}} &\leq R_{\text{بیوماس}} \\ 10X_{\text{زمین گرمایی}} &\leq R_{\text{زمین گرمایی}} \end{aligned}$$

محدودیت ضریب اطمینان

$$\begin{aligned} X_{\text{فسیلی}}^{Min} &\leq X_{\text{فسیلی}} \\ X_{\text{خورشیدی}}^{Min} &\leq X_{\text{خورشیدی}} \\ X_{\text{بادی}}^{Min} &\leq X_{\text{بادی}} \\ X_{\text{آبی}}^{Min} &\leq X_{\text{آبی}} \\ X_{\text{بیوماس}}^{Min} &\leq X_{\text{بیوماس}} \\ X_{\text{زمین گرمایی}}^{Min} &\leq X_{\text{زمین گرمایی}} \\ X_{\text{هسته ای}}^{Min} &\leq X_{\text{هسته ای}} \end{aligned}$$

محدودیت ضمنی

۴. یافته ها

بهینه سازی سید تولید برق به صورت تفکیکی اطلاعات کامل تری در مورد وضعیت هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر در اختیار قرار می دهد که با توجه به تنوع ساختاری و محیطی که انرژی های تجدیدپذیر دارند این موضوع برای برنامه ریزی و سیاست گذاری و حمایت از سرمایه گذاران بسیار مهم خواهد بود. بهینه سازی سید انرژی با توجه به پتانسیل منابع، شاخص فنی هر انرژی و ضریب اطمینان آن انرژی انجام شده است که می تواند نتایج متفاوت با شرایط فعلی و حتی انتظارات ارائه دهد. الگوهای ذکر شده برای حجم فعلی نیاز کشور ایران به برق (۳۰۸۴۵۲ گیگاوات ساعت)، ۹ مرتبه و هر مرتبه ۷۰۰ بار در دسته های ۲۰۰ تایی بررسی شده است که نتایج آن به شرح زیر است.

جدول (۱): نتایج برآورد الگوی پژوهش (گیگاوات ساعت)

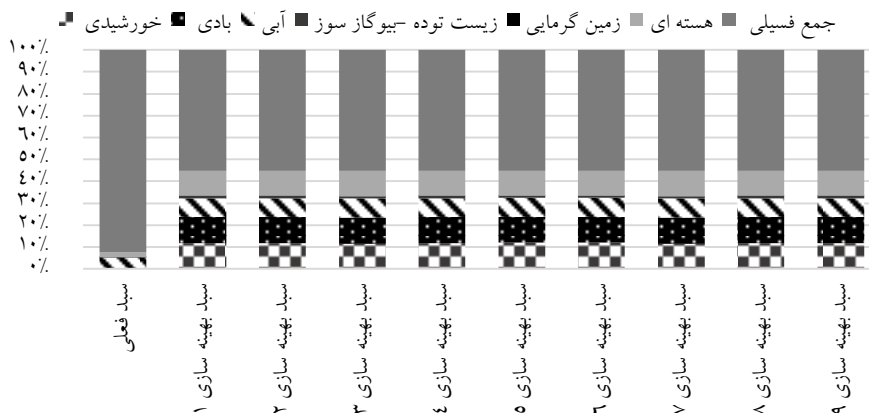
گیگاوات ساعت	خورشیدی	بادی	آبی	زیست توده	زمین گرمایی	هسته ای	جمع فسیلی
سید فعلی	۸۶	۳۰۷	۱۵۳۹۶	۳۸	۱۸۷	۷۴۵۰	۲۸۴۹۸۸
سید بهینه سازی ۱	۳۶۱۲۶	۳۶۵۹۳	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۳۴۸	۳۵۰۷۹	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۲	۳۶۰۷۳	۳۶۷۲۲	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۲۴۵	۳۵۱۰۶	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۳	۳۴۸۲۲	۳۷۴۰۰	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۴۰۷	۳۵۵۱۸	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۴	۳۶۰۷۳	۳۶۷۰۴	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۲۶۷	۳۵۱۰۲	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۵	۳۶۳۳۷	۳۶۶۵۲	۲۶۶۶۷	۲۸۴۴	۱۳۴	۳۵۰۷۸	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۶	۳۶۳۴۲	۳۶۵۳۴	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۲۸۳	۳۴۹۶۴	۱۷۰۹۹۵
سید بهینه سازی ۷	۳۴۸۲۲	۳۷۴۰۰	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۴۰۷	۳۵۵۱۸	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۸	۳۶۱۲۶	۳۶۵۹۳	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۳۴۸	۳۵۰۷۹	۱۷۰۹۹۳
سید بهینه سازی ۹	۳۶۰۷۳	۳۶۷۲۲	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۲۴۵	۳۵۱۰۶	۱۷۰۹۹۳

منبع: محاسبات محقق

طبق برآوردها، هیچ یک از انواع انرژی (چه تجدیدپذیر و چه فسیلی) در سطح بهینه خود نیستند و تفاوت معناداری با این سطح دارند. نمودار زیر سهم هر یک از انواع انرژی را در سبدهای بهینه سازی شده به همراه سید فعلی تولید برق نشان می دهد. همان طور که مشخص است در تمام سبدهای بهینه سازی شده سهم انواع انرژی مشابه است.

جهت بررسی سید بهینه انرژی تا ۲۵ سال آینده، نیاز کشور برای برق در این دوره با توجه به نرخ رشد سالانه مصرف برق در ایران، پیش بینی و بر مبنای حداکثر نیاز پیش بینی شده برای دوره های ۵ ساله، سید تولید انرژی برق برآورد شده است. میزان تولید برق از هر منبع و روند آن طی ۲۵ سال در نمودار و جدول زیر نشان داده شده است.

بهینه سازی سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک (پیش بینی ۲۵ ساله)



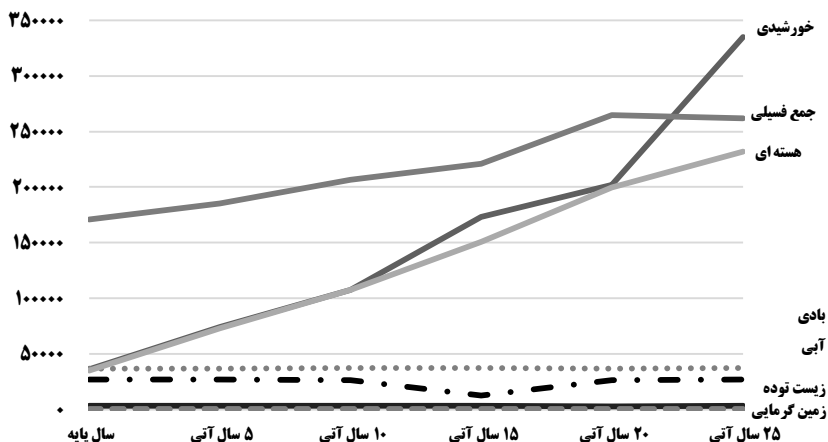
نمودار (۱): سهم انواع انرژی در سبدهای بهینه سازی شده تولید برق به ظرفیت (۳۰۸۴۵۲ گیگاوات ساعت)

منبع: محاسبات محقق

جدول (۲): سهم انواع انرژی در سبد بهینه سازی شده سال پایه (۳۰۸۴۵۲ گیگاوات ساعت) (درصد)

سبد انرژی	خورشیدی	بادی	آبی	زیست توده	زمین گرمایی	هسته ای	جمع فسیلی
سبد فعلی	۰/۰۳	۰/۱	۴/۹۹	۰/۰۱	۰/۰۶	۲/۴	۹۲/۴
سبد بهینه سازی ۱	۱۱/۷	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۱۱	۱۱/۴	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۲	۱۱/۷	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۰۸	۱۱/۴	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۳	۱۱/۳	۱۲/۱	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۱۳	۱۱/۵	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۴	۱۱/۷	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۰۹	۱۱/۴	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۵	۱۱/۸	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۲	۰/۰۴	۱۱/۴	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۶	۱۱/۸	۱۱/۸	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۰۹	۱۱/۳	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۷	۱۱/۳	۱۲/۱	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۱۳	۱۱/۵	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۸	۱۱/۷	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۱۱	۱۱/۴	۵۵/۴
سبد بهینه سازی ۹	۱۱/۷	۱۱/۹	۸/۶۴	۰/۹۴	۰/۰۸	۱۱/۴	۵۵/۴

منبع: محاسبات محقق



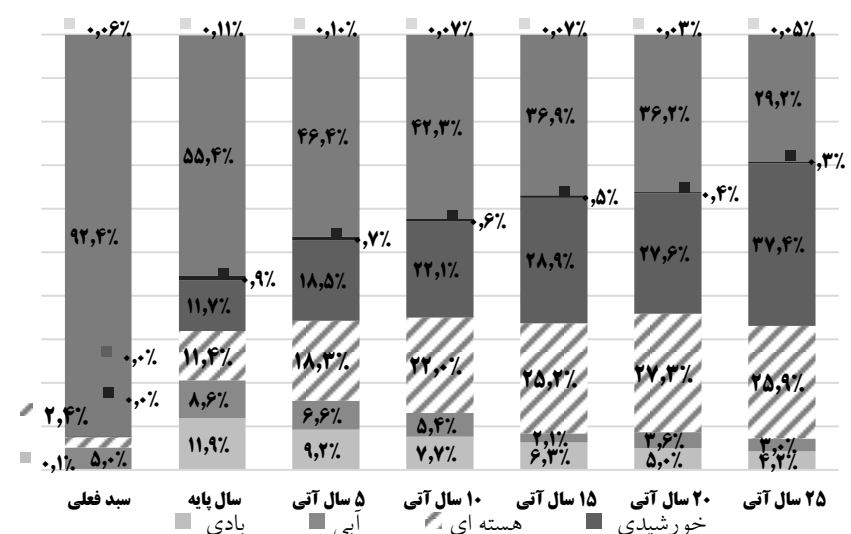
نمودار (۲): روند میزان بهینه تولید برق از هر منبع انرژی طی ۲۵ سال آتی (گیگاوات ساعت).
منبع: محاسبات محقق

جدول (۳): میزان بهینه تولید برق از هر منبع انرژی طبق نیاز کشور (پیش بینی ۲۵ ساله)

گیگاوات ساعت	خورشیدی	بادی	آبی	زیست توده	زمین گرمایی	هسته ای	جمع فسیلی	تولید کل
سبد فعلی	۸۶	۳۰۷	۱۵۳۹۶	۳۸	۱۸۷	۷۴۵۰	۲۸۴۹۸۸	۳۰۸۴۵۲
سال پایه	۳۶۱۲۶	۳۶۵۹۳	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۳۴۸	۳۵۰۷۹	۱۷۰۹۹۳	۳۰۸۷۰۶
۵ سال آتی	۷۳۹۸۲	۳۶۷۶۱	۲۶۵۲۸	۲۹۰۰	۳۹۹	۷۳۱۶۳	۱۸۵۲۰۷	۳۹۸۹۴۰
۱۰ سال آتی	۱۰۷۷۴۳	۳۷۴۰۰	۲۶۲۳۳	۲۹۰۰	۳۶۴	۱۰۷۲۲۶	۲۰۶۵۹۱	۴۸۸۴۴۷
۱۵ سال آتی	۱۷۳۰۳۳	۳۷۴۰۰	۱۲۵۳۸	۲۹۰۰	۴۰۷	۱۵۰۹۵۸	۲۲۰۷۹۹	۵۹۸۰۳۵
۲۰ سال آتی	۲۰۱۷۹۳	۳۶۷۷۳	۲۶۱۶۸	۲۶۶۹	۱۸۷	۱۹۹۷۲۵	۲۶۴۸۹۶	۷۳۲۲۱۱
۲۵ سال آتی	۳۳۵۰۵۵	۳۷۴۰۰	۲۶۶۶۷	۲۹۰۰	۴۰۷	۲۳۳۰۶۱	۲۶۲۰۰۱	۸۹۶۴۹۰

منبع: محاسبات محقق

طبق برآوردهای صورت گرفته، تغییرات سهم منابع انرژی در سبد تولید برق طی ۲۵ سال آتی به سمت افزایش بکارگیری انرژی‌های خورشیدی و هسته‌ای است. میزان بکارگیری انرژی‌های فسیلی طی ۲۵ سال تقریباً ثابت مانده است که با توجه به افزایش نیاز مصرفی به برق مازاد نیاز از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تامین می‌شود. به عبارت دیگر طبق بهینه‌سازی انجام شده، سرمایه‌گذاری جدیدی بر روی نیروگاه‌های فسیلی نباید صورت گیرد و سرمایه‌گذاری به منظور حفظ راندمان نیروگاه‌های موجود باید باشد. از طرف دیگر نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص خورشیدی و هسته‌ای است.



نمودار (۳): روند تغییر سهم منابع تولید انرژی طی ۲۵ سال آتی

منبع: محاسبات محقق

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

محدودیت منابع انرژی، ملاحظات زیست محیطی و ضرورت تداوم دستیابی پایدار به انرژی (به ویژه برق)، ضرورت بهینه سازی سبد انرژی ایران را بیش از پیش آشکار می سازد. بهینه سازی باید با در نظر گرفتن عواملی همچون محدودیت های منابع، سطح آلاینده گی، پایداری منابع، شرایط اقتصادی و منطقه ای و همچنین سرمایه گذاری های پیشین انجام گیرد. در پژوهش حاضر، سبد انرژی کشور بر اساس یک الگوی چندهدفه با تمرکز بر شاخص های فنی، اقتصادی و زیست محیطی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب بهینه سازی شد. این الگوریتم با ۷۰۰ تکرار و در قالب رشته های ۲۰۰ تایی اجرا گردید و ترکیب بهینه منابع تولید برق برای افق ۲۵ ساله برآورد شد.

نتایج نشان داد که ترکیب کنونی سبد انرژی ایران بهینه نبوده و سهم هیچ یک از منابع (فسیلی، هسته ای و تجدیدپذیر) با سطح بهینه مطابقت ندارد. برآورد الگو نشان داد که در ۲۵ سال آینده سهم انرژی های تجدیدپذیر و هسته ای در سبد تولید برق باید به طور معناداری افزایش یابد، در حالی که مصرف منابع فسیلی تقریباً در سطح فعلی باقی خواهد ماند. این امر دلالت بر آن دارد که برای پاسخگویی به رشد فزاینده تقاضای برق، سرمایه گذاری های جدید باید عمده تاً در حوزه تجدیدپذیرها و هسته ای متمرکز شود و از گسترش نیروگاه های فسیلی اجتناب گردد.

تحلیل یافته ها در چارچوب ساختار اقتصاد ایران چند پیام کلیدی دارد: نخست، اقتصاد ایران به شدت متکی به صادرات نفت و گاز و مصرف داخلی یارانه ای این منابع است که حتی در گزارش سال ۲۰۲۳

آژانس بین المللی انرژی نیز مطرح شده است که شدت مصرف انرژی در ایران بالاتر از میانگین جهانی است. تداوم این الگو علاوه بر ناکارآمدی اقتصادی، به دلیل فشارهای زیست محیطی و بین المللی، پایداری رشد اقتصادی را تهدید می کند. دوم، محدودیت منابع مالی و تحریم ها توان سرمایه گذاری دولت در بخش انرژی را کاهش داده و ضرورت تخصیص بهینه منابع محدود را برجسته کرده است. بر این اساس، هدایت سرمایه ها به سمت انرژی های خورشیدی و بادی که با مزیت نسبی ایران هم خوانی دارد، می تواند ریسک های ناشی از نوسانات قیمت نفت و وابستگی به درآمدهای ارزی را کاهش دهد. سوم، سیاست های حمایتی موجود عمدتاً معطوف به یارانه های سوخت های فسیلی است که انگیزه بهینه سازی مصرف و سرمایه گذاری در تجدیدپذیرها را تضعیف کرده است. بدون اصلاح تدریجی این سیاست ها و طراحی مشوق های کارآمد، تحقق سهم بهینه انرژی های نوین امکان پذیر نخواهد بود.

در نهایت، روندهای جهانی و تجربه کشورهای نفتی منطقه نظیر عربستان و امارات که طبق گزارش آژانس انرژی های تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۳، با سرعت به سمت تنوع بخشی به سبد انرژی خود حرکت کرده اند، نشان می دهد که ایران نیز ناگزیر به اتخاذ چنین مسیری است. گذار انرژی در ایران صرفاً یک الزام زیست محیطی نیست، بلکه ضرورتی اقتصادی برای کاهش شدت انرژی، ارتقای بهره وری و افزایش تاب آوری اقتصاد ملی در برابر شوک های خارجی محسوب می شود. بر این اساس، بر مبنای نتایج پژوهش پیشنهادت زیر ارائه می شود تا چشم اندازی عملی برای سیاست گذاری در مسیر گذار تدریجی ایران به سمت یک اقتصاد کم کربن فراهم شود.

– تمرکز سرمایه گذاری بر انرژی های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی): با توجه به سهم بالای بهینه این منابع در مدل، دولت باید مشوق های مالی و اعتباری برای توسعه نیروگاه های خورشیدی و بادی فراهم کند. این اقدام علاوه بر کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی، با مزیت نسبی جغرافیایی ایران هم خوانی دارد.

– توسعه تدریجی انرژی هسته ای: نتایج نشان می دهد که انرژی هسته ای در کنار تجدیدپذیرها جایگاه مهمی در سبد بهینه دارد. بنابراین سرمایه گذاری در فناوری های ایمن و مدرن هسته ای باید بخشی از استراتژی بلندمدت کشور باشد.

– اصلاح تدریجی نظام یارانه های انرژی: یارانه های سنگین سوخت های فسیلی مانعی جدی در مسیر گذار انرژی است. کاهش تدریجی این یارانه ها و انتقال بخشی از منابع آن به حمایت از تجدیدپذیرها می تواند انگیزه لازم برای تغییر الگوی مصرف و سرمایه گذاری ایجاد کند.

– ایجاد نهادهای تنظیم گر برای تنوع بخشی به سبد انرژی: پیشنهاد می شود یک «نهاد ملی گذار انرژی» با مأموریت هماهنگ سازی سیاست های زیست محیطی، اقتصادی و سرمایه گذاری تأسیس شود تا از اجرای هماهنگ و پایدار سیاست ها اطمینان حاصل گردد.

- توسعه همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی: با توجه به محدودیت‌های مالی و تکنولوژیک ناشی از تحریم‌ها، همکاری با نهادهای بین‌المللی نظیر آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از تجربیات کشورهای مشابه (مانند عربستان، امارات و ترکیه) می‌تواند مسیر توسعه انرژی‌های نو در ایران را تسهیل کند.
- سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و شبکه هوشمند بر: یکی از چالش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر ناپایداری تولید است. توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی (باتری‌های بزرگ مقیاس) و شبکه‌های هوشمند می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم برق کشور را افزایش دهد.

۶. تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

References

- Ahmadi, S. A., Mirlohi, S. M., Ahmadi, M. H. and Ameri, M. (2020). Portfolio optimization of power plants by using renewable energy in Iran. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 463–475. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa079/>
- Basseches, J. A. (2024). Renewable portfolio/clean energy standards. *Political Science and Public Policy*, 356–360. Retrieved from <https://doi.org/10.4337/9781802209204.ch68/>
- Bozorg, M. (2017). Simultaneous investigation of the effects of water footprint and the current power plant capacity in order to long-term optimization of the electricity generation mix. Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Master's thesis. (In Persian).
- Dagar, V., Dagher, L., Rao, A., Doytch, N. and Kagzi, M. (2024). Economic policy uncertainty: Global energy security with diversification. *Economic Analysis and Policy*, 82(c), 248–263.
- Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.03.008/>
- Deschênes, O., Malloy, C. J. and McDonald, G. (2023). Causal effects of renewable portfolio standards on renewable investments and generation: The role of heterogeneity and dynamics. NBER Working Paper No. 31568. Retrieved from <https://doi.org/10.3386/w31568/>
- Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Nawî, N. M., Mairghany, M., Elhassan, S. M. M. and Kheiralla, A. F. (2020). Applying multi-objective genetic algorithm (MOGA) to optimize the energy inputs and greenhouse gas emissions (GHG) in wetland rice production. *Energy Reports*, 6, 2988–2998. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.010/>
- Ganjehkaviri, A., Mohd Jaafar, M.N., Hosseini, S.E. and Barzegaravval, H. (2017). Genetic algorithm for optimization of energy systems: Solution

- uniqueness, accuracy, Pareto convergence, and dimension reduction. *Energy*, 119, 167–177. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.034/>
- Ghaedi, A. and Bagheri, S. A. (2020). Optimal generation planning of a microgrid with renewable energy sources. 7th National Congress of New Findings of Iranian Electrical Engineering. (In Persian).
 - Gitelman, L., Kohevnikov, M. and Visotskaya, Y. (2023). Diversification as a method of ensuring the sustainability of energy supply within the energy transition. *Resources*, 12(2), 1-19. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/resources12020019/>
 - Hu, Y., Chi, Y., Zhao, H. and Zhou, W. (2022). The development of renewable energy industry under renewable portfolio standards: From the perspective of provincial resource differences. *Energy Policy*, 170(17), 113212. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113212/>
 - IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency.
 - Jiang, Y., Liu, S., Yang, L., Lin, Z., Ding, Y., He, C., Li, J. and Wang, K. (2020). Bi-layer portfolio selection model for electricity retailers based on behavioural portfolio theory under quota obligation of RP. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(14), 2857–2868. Retrieved from <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1574/>
 - Khani, M. S., Falahi, E. and Banshi, M. (2016). Energy supply management model in Iran based on technical, economic, and environmental criteria, *Iranian Energy Economics*, 5(18), 29–60. Retrieved from <https://doi.org/10.22054/jiee.2016.7192/> (In Persian).
 - Koroneos, C. J., Nanaki, E. A. and Xydis, G. A. (2012). Sustainability indicators for the use of resources—The exergy approach. *Sustainability*, 4(8), 1867–1878. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su408186/>
 - Lee, C.-C., Xing, W. and Wang, C.-S. (2023). Impacts of energy security on economic development: Evidence from China. *Energy Research Letters*, 4(3), 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.46557/001c.33897/>
 - Li, K., Ding, Y.-Z., Ai, C., Sun, H., et al. (2022). Multi-objective optimization and multi-aspect analysis of an innovative geothermal-based multi-generation energy system for power, cooling, hydrogen, and freshwater production. *Energy*, 245, 123198. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123198/>
 - Lin, B. and Chen, Y. (2020). Transportation infrastructure and efficient energy services: A perspective of China's manufacturing industry, *Energy Economics* 89(2):104809. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104809/>
 - Othman, P. S., Ihsan, R. R. and Abdulhakeem, R. M. (2022). The genetic algorithm (GA) in relation to natural evolution. *Academic Journal of Nawroz University*, 11(3), 243–250. Retrieved from <https://doi.org/10.25007/ajnu.v11n3a1414/>
 - Pillai, A., Singh, K., Saravanan, V., Anpalagan, A., Woungang, I. and Barolli, L. (2018). A genetic algorithm-based method for optimizing the energy consumption and performance of multiprocessor systems. *Soft Computing*, 22(5), 3271–3285. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2789-y/>

- Rinaldi, F., Moghaddampoor, F., Najafi, B. and Marchesi, R. (2021). Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 731–748. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01906-y/>
- Saiprasad, N., Kalam, A. and Zayagh, A (2019). Triple bottom line analysis and optimum sizing of renewable energy using improved hybrid optimization employing the genetic algorithm: A case study from India. *Energies*, 12(2), 349. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en12030349/>
- Simshauser, P. (2019). On the stability of energy-only markets with government-initiated contracts-for-differences. *Energies*, 12(13), 2566. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en12132566/>
- Soleimankhani, A. (2021). Identification of policy instruments for renewable energy development in iran. *The Art of Green Management*, 1(1), 73–86. Retrieved from <https://doi.org/10.30480/agm.2021.3048.1008> / (In Persian).
- Sovacool, B. K., Ryan, S. E., Stern, P. C., Janda, K., Rochlin, G., Spreng, D and et al. (2022). Integrating social science in energy research. *Energy Research & Social Science*, 6, 95-99. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.12.005/>
- Tomar, V., Bansal, M. and Singh, P. (2023). Metaheuristic algorithms for optimization: A brief review. *Engineering Proceedings*, 59(1), 238. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/engproc2023059238/>
- Ukoba, M., Diemuodeke, O., Alghassab, M., Njoku, H., Imran, M. and Khan, Z. (2020). Composite multi-criteria decision analysis for optimization of hybrid renewable energy systems for geopolitical zones in Nigeria. *Sustainability*, 12(14), 5732. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su12145732/>
- Zakeri, B., Staffell, I., Dodds, P. E., Grubb, M., Ekins, P., Jämskeläinen, J., Cross, S., Helin, K. and Castagneto Gisse, G. (2023). The role of natural gas in setting electricity prices in Europe. *Energy Reports*, 10, 2778–2792. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.069/>
- Zedda, S. (2019). Portfolio strategies for renewable energy share maximization. *Environmental Science*, 1st International Conference on Energy.