

**Applied Economics Studies, Iran (AESI)**P. ISSN:2322-2530 & E. ISSN: 2322-472X - Journal Homepage: <https://aes.basu.ac.ir/>

Scientific Journal of Department of Economics, Faculty of Economic and Social Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. Owner & Publisher: Bu-Ali Sina University.

© Copyright © 2026 The Authors. Published by Bu-Ali Sina University.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

Impact of a Peer-to-Peer Electricity Trading Scheme on Increasing Renewable Energy Generation (A Practical Study on Decreasing Electricity Imbalances)

Hoda Zobeiri¹ , Mohammad Hasani² 

Type of Article: Research

 <https://dx.doi.org/10.22084/aes.2025.31262.3808>

Received: 2025/07/16; Revised: 2025/08/17; Accepted: 2025/08/18

Pp: 167-201

Abstract

Decentralized energy models such as Peer-to-Peer (P2P) electricity trading schemes can provide a new and effective solution to increase the use of clean and renewable energy source, in a situation where traditional electricity networks are confronting problems such as energy imbalance, increased consumption, and environmental constraints. In this framework, this study examines the effect of P2P electricity trading in the growth of solar electricity generation in selected countries during the period 2000 to 2023. The effects of variables such as the implementation of the P2P policy, electricity price, population, per capita income, annual temperature, solar panel price, and composite economic development index on photovoltaic electricity generation have been analyzed using the dynamic panel data method and the systemic generalized moment estimator (GMM). Results indicate that the P2P policy has a positive and significant effect on the growth of solar electricity generation and plays an important role in enabling consumers and increasing the motivation to invest in clean energy. Furthermore, economic and climatic factors including factors such as growing electricity prices and air temperature have been identified as key drivers in the incentive to install solar panels. Findings suggest specific policy solutions for countries facing an energy crisis, while providing valid empirical evidence including Iran. For Iran specifically, successful P2P implementation requires comprehensive legal, technical, and economic infrastructure development, including specific trading regulations, digital infrastructure enhancement, smart grid management, financial incentives for solar installations, public education programs, transparent electricity pricing reforms, and local energy market development to achieve sustainable decentralized energy transition.

Keywords: Peer-to-Peer Electricity Trading Scheme, Electricity Imbalances, Renewable Energy Electricity Generation, The Systemic Generalized Moment Estimator (GMM).

JEL Classification: C01, C23, O13, O16, O11.

1. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran (Corresponding Author). **Email:** h.zobeiri@umz.ac.ir

2. Ph.D. Student of Development Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

Citations: Zobeiri, H. & Hasani, M., (2026). "Impact of a Peer-to-Peer Electricity Trading Scheme on Increasing Renewable Energy Generation (A Practical Study on Decreasing Electricity Imbalances)". *Journal of Applied Economics Studies in Iran*, 14(56): 167-201. <https://dx.doi.org/10.22084/aes.2025.31262.3808>

Homepage of this Article: https://aes.basu.ac.ir/article_6197.html?lang=en

1. Introduction

The issue of imbalance in electricity generation has become one of the growing challenges in developing countries including Iran in recent decades. The Iranian electricity network to face instability in electricity supply emerged as a result of continuous surge in demand for electrical energy, the growth of household and industrial consumption, high dependence on fossil resources, and the lack of sufficient development in renewable energy infrastructure. This situation has not only had a negative impact on energy supply, but has also been accompanied by destructive consequences such as unplanned power outages, reduced economic productivity, exacerbated energy inequality, and increased greenhouse gas emissions.

In such situations, the need to reform the structure of electricity generation, distribution, and consumption has become an inevitable necessity. Incidentally, one of the new and innovative models is the Peer-to-Peer (P2P) electricity trading scheme. Consumers can become electricity producers themselves and sell their surplus electricity directly to other consumers in the local network, without local consumers being required to supply energy through the centralized electricity network in this model. This approach is founded on concepts such as decentralized electricity supply, the sharing economy, and digital technology which has been accompanied by the growth of home solar panel installations in various countries.

Implementation of this policy can encourage the development of solar electricity generation, increase the resilience of the electricity network, and improve the efficiency of the energy supply system in addition to reducing pressure on the central electricity network. However, empirically examining the effect of the P2P policy in different countries in terms of its impact on the actual growth of solar electricity generation is well-intentioned to do further research. Analyzing the potential effect of this policy can be very helpful for policymakers and macroeconomic decision-makers in resolving electricity imbalances.

The key aim of this paper is to empirically examine the effect of implementing the P2P electricity trading policy on solar electricity generation in the selected countries. For this reason, countries are divided into two groups with and without P2P policies, and its effects are modeled econometrically over the period 2000 to 2023. The main research questions include as follow:

1. Given that countries with and without P2P policies are measured simultaneously, does the implementation of this policy affect the growth rate of solar electricity generation in countries with P2P policies?

2. Does an increase in network electricity tariffs result in an increase in the use of solar panels for electricity generation?

3. What economic factors (such as population, per capita income, solar panel prices, and the economic development level index in line with the dependence on renewable energy) along with the share of renewable energies and geographical factors affect the growth of solar electricity generation?

2. Methodology

As an applied type, this study is done with a quantitative approach based on panel data analysis. In order to control the endogenous of variables and investigate the dynamics of the system, the GMM system method has been utilized since it is appropriate for dynamic models with a panel structure. The statistical population of the study includes the 10 selected countries in the period 2000 to 2023 including Australia, Germany, the Netherlands, the United Kingdom and the United States which have been selected as leading countries in implementing the P2P plan in this study, and New Zealand, France, Sweden, Italy and Chile as countries which have not experienced implementing this plan. The dependent variable of the model is the amount of electricity generated from solar sources. The independent variables include the implementation of the P2P policy (binary variable), electricity price, the share of renewable energies in total electricity generation, public energy research and development costs, population, average annual temperature, solar panel price and per capita income.

3. Research Findings

Results of the GMM system model estimation indicate that the implementation of the P2P policy has a positive and significant impact on solar power generation. Average higher growth in solar power generation in countries that have implemented this policy have been reached in comparison to countries without this policy. In addition, the increase in the price of network electricity as an incentive variable has led to a greater inclination to use solar panels. Results also confirm that reforming the energy tariff system can be used as a policy tool in order to expand renewable energies. Other findings include the positive effect of the clean energy development index and population on the growth of solar generation. Annual temperature also had a significant effect, indicating that warmer climates provide a better opportunity for the development of solar energy.

One interesting point to notice is that the price of solar panels also affects positively on solar generation, which at first glance seems contradictory; however, it can be interpreted

as an increase in demand during periods of rising prices, as well as the development of panel technology over time. On the contrary, the total share of renewable energy in total generation did not affect significantly on solar electricity generation. This finding could be due to the diversity of renewable sources (e.g. hydro, wind, and biomass) in different countries, which results in the total share to increase, but not necessarily the solar share.

4. Conclusion

It can be concluded based on the research findings that the implementation of the P2P electricity trading policy is an effective tool for developing solar power and reducing pressure on the central electricity network. This policy can result in increasing network resilience, active citizen participation in energy generation, and the creation of a participatory energy economy, in line with the strengthening environmental sustainability. Regarding the results of the empirical model, the effective implementation of the P2P electricity policy in Iran requires the creation of the necessary legal, technical, and economic infrastructure. This requires the development of specific rules for electricity trading between subscribers, strengthening digital infrastructure, smart network management, and providing financial incentives for installing solar systems at the household and commercial levels. Furthermore, public training and promoting energy literacy, especially in high-consumption areas, can pave the way for social acceptance of this policy. In addition, reviewing the electricity pricing system and creating transparency in tariffs, along with developing local energy markets, can provide an efficient platform for accelerating the transition of Iran's energy supply structure on the way to a sustainable and decentralized energy supply model.

Acknowledgments

The authors appreciate all the scientific consultants in this paper.

Author Contributions

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



فصلنامه علمی مطالعات اقتصادی کاربردی ایران
 شاپای چاپی: ۲۵۲۰-۲۳۲۲؛ شاپای الکترونیکی: ۴۷۲۸-۲۳۲۲ - وبسایت نشریه: <https://aes.basu.ac.ir>
 نشریه گروه اقتصاد، دانشکده علوم اقتصادی و علوم اجتماعی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
 حق انتشار این مستند، متعلق به نویسنده (گان) آن است. ۱۴۰۴ - ناشر این مقاله، دانشگاه بوعلی سینا است.
 این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
 آدرس زیر مجاز است.
 Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



نقش طرح تجارت برق نظیر به نظیر در افزایش تولید برق انرژی‌های تجدیدپذیر (مطالعه کاربردی در راستای کاهش ناترازی برق)

هدی زبیری^۱، محمد حسنی^۲

نوع مقاله: پژوهشی

شناسه دیجیتال: <https://dx.doi.org/10.22084/aes.2025.31262.3808>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

صص: ۲۰۱-۱۶۷

چکیده

در شرایطی که شبکه‌های برق سنتی با مشکلاتی مانند ناترازی انرژی، افزایش مصرف و محدودیت‌های محیط زیستی روبه‌رو هستند، مدل‌های غیرمتمرکز انرژی مانند طرح تجارت برق نظیر به نظیر (P2P) می‌توانند راه‌حلی نوین و مؤثر برای افزایش استفاده از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر ارائه دهند. در همین راستا این پژوهش به بررسی نقش تجارت برق P2P در رشد تولید برق خورشیدی در کشورهای منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ م. پرداخته است. تأثیر متغیرهای اجرای سیاست P2P، قیمت برق، جمعیت، درآمد سرانه، دمای سالانه، قیمت پنل‌های خورشیدی و شاخص ترکیبی توسعه اقتصادی بر تولید برق فتوولتائیک با استفاده از روش داده‌های پانلی پویا و تخمین‌زن گشتاور تعمیم یافته (GMM) سیستمی تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست P2P اثر مثبت و معناداری بر رشد تولید برق خورشیدی داشته و نقش مهمی در توانمندسازی مصرف‌کنندگان و افزایش انگیزه سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک ایفا می‌کند. هم‌چنین عوامل اقتصادی و اقلیمی مانند افزایش قیمت برق و دمای هوا نیز به عنوان محرک‌های کلیدی در گرایش به نصب پنل‌های خورشیدی شناسایی شده‌اند. یافته‌های این پژوهش ضمن ارائه شواهد تجربی معتبر، راهکارهای سیاستی مشخصی برای کشورهای درگیر با بحران انرژی، از جمله ایران، پیشنهاد می‌دهد.

کلیدواژگان: طرح تجارت برق نظیر به نظیر، ناترازی برق، تولید برق خورشیدی، تخمین‌زن گشتاور تعمیم یافته (GMM) سیستمی.

طبقه‌بندی JEL: C01, C23, O13, O16, O11

۱. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابل، ایران (نویسنده مسئول).

Email: h.zobeiri@umz.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابل، ایران.

Email: m.hasani601@umail.umz.ac.ir

ارجاع به مقاله: زبیری، هدی؛ و حسنی، محمد، (۱۴۰۴). «نقش طرح تجارت برق نظیر به نظیر در افزایش تولید برق انرژی‌های تجدیدپذیر (مطالعه کاربردی در راستای کاهش ناترازی برق)». مطالعات اقتصادی کاربردی ایران، ۱۴(۵۶): ۱۶۷-۲۰۱. <https://dx.doi.org/10.22084/aes.2025.31262.3808>

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه: https://aes.basu.ac.ir/article_6197.html?lang=fa

۱. مقدمه

بخش برق ایران با چالش‌های قابل توجهی از جمله عدم توازن بین عرضه و تقاضا، به‌ویژه در اوج مصرف تابستان روبرو است. طبق مطالعات «باستان» و «گنجوی» (۱۳۹۸)، مصرف برق به‌طور متوسط سالانه حدود ۵ درصد افزایش یافته است که از رشد ظرفیت تولید آن پیشی گرفته است. نیروگاه‌های حرارتی فرسوده با راندمان کاهشی، که به دلیل تحریم‌ها با مشکلات تعمیر و نگهداری نیز مواجه هستند، در تأمین تقاضای اوج مصرف با چالش روبرو هستند. کمبود آب نیز بر تولید برق نیروگاه‌های برق‌آبی تأثیر گذاشته است، به خصوص در تابستان‌های کم‌بارش که این مشکل نیز حادتر می‌شود. «رادسر» و همکاران (۱۴۰۰) اشاره می‌کنند که مصرف بالای انرژی در بخش صنعت و مصرف ناکارآمد در بخش خانگی، فشار مضاعفی بر شبکه برق وارد می‌کند و تعرفه‌های پایین برق و یارانه‌های انرژی، انگیزه‌ای برای صرفه‌جویی در بین خانوار نیز ایجاد نمی‌کنند. افزون بر این، بهای پرداخت‌شده مصرف برق صنایع انرژی‌بر نیز کمتر از ارزش اقتصادی کالایی است که به سبب استفاده از انرژی برق تولید می‌شود (نیکزادالحسینی و صادقی‌شاهدانی، ۱۴۰۲).

مؤید به ذکر است که قطعی برق منجر به زیان‌های اقتصادی قابل توجهی شده و ظرفیت تولید صنعتی را حدود ۳۰ درصد کاهش داده است. همچنین باعث آسیب به تجهیزات فنی کارخانجات صنعتی نیز شده است (امینی، ۱۳۹۹). از نظر اجتماعی، اختلال در خدمات مهم مانند بیمارستان‌ها و استفاده از سیستم‌های سرمایشی در دوره‌های گرمای شدید تابستان، کیفیت زندگی شهری را کاهش و نارضایتی عمومی را افزایش داده است (نوروز زاده و همکاران، ۱۴۰۰). از نظر زیست‌محیطی نیز، با آن که جوامع بین‌المللی به سمت محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای حرکت می‌کنند (مهرجو ایرانی و همکاران، ۱۴۰۴)، در ایران استفاده از ژنراتورهای اضطراری هزینه‌های تولید را افزایش داده و آلودگی هوا را تشدید کرده است (موسوی‌رینه و ساداتی‌نژاد، ۱۳۹۹). استفاده گسترده از ژنراتورهای دیزلی موجب تشدید آلودگی هوا شده و قطعی برق بر سیستم‌های تصفیه فاضلاب و مدیریت پسماند صنعتی تأثیر منفی گذاشته است (مهدی‌زاده رابینی و همکاران، ۱۳۹۹).

بنابراین افزایش روزافزون مصرف برق در ایران، به خصوص در فصل تابستان، همراه با محدودیت‌های تولید و انتقال انرژی، ضرورت پژوهش در زمینه راهکارهای نوآورانه در تولید و توزیع برق را دوچندان کرده است. مطالعات نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی، تجاری و خانگی می‌تواند توسط منابع انرژی تجدیدپذیر انجام شود، اما کمبود زیرساخت ذخیره‌سازی برق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، قیمت یارانه‌ای شبکه برق سنتی و نبود چارچوب حقوقی مشخص برای تولیدکنندگان کوچک، مانع از اجرای موفق این طرح شده است (اونیمولا^۱، ۲۰۱۵؛ اوبرگون و همکاران^۲، ۲۰۱۹). از سوی دیگر، هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی ناشی از ناترازی برق، از جمله خسارت به تجهیزات صنعتی، کاهش تولید و نارضایتی عمومی، لزوم انجام پژوهش‌های علمی برای شناسایی و پیاده‌سازی راهکارهای نوآورانه را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

اهمیت حل معضل ناترازی برق از طریق راهکارهای نوآورانه در ایران را می‌توان در عوامل متعددی جست‌وجو کرد. ایران با شدت مصرف انرژی ۲.۵ برابر میانگین جهانی، یکی از بالاترین نرخ‌های اتلاف انرژی را دارد که

¹ Oniemola (2015)

² Obregon et al. (2019)

سالانه معادل ۲۰-۱۵ درصد تولید ناخالص داخلی کشور را هدر می دهد (نیک نقش و همکاران، ۱۳۹۸). از طرفی، با اجرای طرح های بهره وری انرژی و یا استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، می توان مصرف برق در بخش های صنعتی و ساختمانی را تا ۳۰ درصد کاهش داد که این میزان معادل ظرفیت چندین نیروگاه بزرگ است (رادسر و همکاران ۱۴۰۰). سرمایه گذاری در فناوری های تجدیدپذیر برای تولید برق مانند انرژی خورشیدی، بادی، آبی و زیست توده، انتشار گازهای گلخانه ای و آلودگی هوا را کاهش می دهند و منافع زیست محیطی و اقتصادی پایدارتری نیز به همراه دارند (ژنا و همکاران^۱، ۲۰۲۴). علاوه بر این موجب ایجاد شغل، ارتقای نوآوری در فناوری و بهبود امنیت انرژی با کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی نیز می شوند (کاردوری و آنانت^۲، ۲۰۲۳).

محققان برای مقابله با این مشکلات، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، اصلاح تعرفه های برق و سرمایه گذاری در زیرساخت های شبکه توزیع را پیشنهاد داده اند (امینی، ۱۳۹۹؛ پوردربانی، ۱۳۹۹). در همین راستا از تجارت برق نظیر به نظیر (P2P) به عنوان یک راه حل مناسب و نوآورانه برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه های برق سنتی می توان نام برد. تجارت برق P2P روشی نوین برای خرید و فروش برق است که به صورت مستقیم بین افراد انجام می شود. در این سیستم، خانه هایی که دارای پنل خورشیدی هستند و برق اضافی تولید می کنند، می توانند مازاد برق خود را بدون واسطه و مستقیماً به همسایگان یا سایر مصرف کنندگان محلی بفروشند (منگل کمپ و همکاران^۳، ۲۰۱۸). این طرح پذیرش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را افزایش می دهد و خودکفایی انرژی جامعه را بهبود می بخشد و مصرف کنندگان را توانمندتر می سازد (پنابلو و همکاران^۴، ۲۰۲۱؛ سیدقی و همکاران^۵، ۲۰۲۳). پژوهش های اخیر نیز به قابلیت های تحول آفرین تجارت برق نظیر به نظیر^۶ (P2P) در سیستم های مدرن برق اشاره دارند. تجارت P2P مزایای اقتصادی برای تولید-مصرف کنندگان^۷ به همراه دارد و در عین حال با کاهش اوج تقاضا، کاهش نیاز به ذخایر و کاهش تلفات شبکه، به پایداری شبکه برق نیز کمک می کند (توشار و همکاران^۸، ۲۰۲۰). این مکانیزم امکان استفاده بهینه تر از منابع انرژی توزیع شده محلی^۹ (DERS) را فراهم می کند و بازار برق غیرمتمرکز را ترویج می دهد (چاتورانگا و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۲). اجزای کلیدی تجارت P2P شامل پلتفرم های معاملاتی، طرح های بازار، الگوریتم های تسویه، سیاست های حمایتی، شبکه ها و زیرساخت های فناوری اطلاعات و ارتباطات است (بوکار و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۳). ایده های نوظهور در تجارت انرژی P2P شامل پلتفرم های مبتنی بر بلاکچین، قراردادهای هوشمند و بهینه سازی مبتنی بر هوش مصنوعی نیز است (شو و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۳).

بنابراین بسیاری از کشورها، در راستای ارتقای امنیت انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، به دنبال توسعه این منابع و ادغام آن ها در شبکه های ملی هستند. با این حال، میزان افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر

¹ Jena et al. (2024)

² Karduri & Ananth (2023)

³ Mengelkamp et al. (2018)

⁴ Pena-Bello et al. (2021)

⁵ Sidqi et al. (2023)

⁶ Peer to Peer

⁷ Prosumers

⁸ Tushar et al., 2020

⁹ Distributed energy resources

¹⁰ Chathuranga D.W. et al., 2022

¹¹ Bukar et al., 2023

¹² Shu et al., 2023

و کاهش وابستگی به شبکه برق سنتی، وابسته به عوامل زیرساختی، رفتاری و نهادی هر کشور است. در برخی موارد، به‌رغم رشد ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش ملموسی در مصرف برق شبکه مشاهده نمی‌شود. از این‌رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های تطبیقی و رویکرد اقتصادسنجی پنل پویا، به بررسی هم‌زمان تأثیر گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سیاست P2P و عوامل اقتصادی، نهادی و جغرافیایی بر رشد تولید برق خورشیدی می‌پردازد و می‌کوشد با ارائه شواهد تجربی، درکی واقع‌گرایانه از کارایی شبکه‌های غیرمتمرکز برق در مواجهه با ناترازی انرژی ارائه دهد.

سؤالات تحقیق عبارت است از: ۱. با توجه به این‌که کشورهای دارای سیاست P2P و کشورهای عدم سیاست P2P هم‌زمان مورد سنجش قرار می‌گیرند، آیا اجرای این سیاست بر میزان رشد تولید برق خورشیدی کشورهای دارای سیاست P2P تأثیر دارد؟ ۲. آیا افزایش تعرفه‌های برق شبکه، منجر به افزایش استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تولید برق می‌شود؟ و ۳. چه عوامل اقتصادی (مانند جمعیت، درآمد سرانه، قیمت پنل‌های خورشیدی و شاخص سطح توسعه اقتصادی همراه با وابستگی به انرژی تجدیدپذیر) در کنار سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و عوامل جغرافیایی، رشد تولید برق خورشیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ این تحقیق به دنبال پاسخ به پرسش‌های مطروحه است.

فرضیه پژوهش در این مطالعه عبارت است از ۱. اجرای سیاست P2P در کشورهای مجری این طرح، منجر به رشد تولید برق خورشیدی می‌شود. ۲. افزایش تعرفه‌های برق شبکه باعث رشد استفاده از پنل‌های خورشیدی می‌گردد. ۳. متغیرهایی مانند جمعیت، درآمد سرانه، قیمت پنل‌های خورشیدی و شاخص سطح توسعه اقتصادی همراه با وابستگی به انرژی تجدیدپذیر اثر معناداری بر رشد تولید برق خورشیدی دارند و باید مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرند.

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش ۲ ادبیات موجود در حوزه نوآوری‌های کاهش استفاده از شبکه سنتی برق و افزایش بهره‌وری انرژی ارائه شده است. بخش ۳ سازوکار این نوآوری‌ها را روشن می‌کند و نحوه طرح P2P پیاده‌سازی شده در کشورهای منتخب را شرح می‌دهد. بخش ۴ شامل روش‌شناسی تحقیق، تصریح مدل و تشریح داده‌های مدل پیشنهادی برای برآورد متغیرهایی است که بر افزایش تولید برق خورشیدی تأثیرگذار است. بخش ۵ تخمین مدل و تحلیل نتایج را شرح می‌دهد و در نهایت بخش آخر به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پژوهش اختصاص دارد.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات نشان می‌دهند که در سال‌های اخیر، راهکارهای متنوعی برای مدیریت چالش‌های مصرف انرژی و بهره‌وری آن مورد بررسی قرار گرفته است. محققان به‌طور ویژه‌ای بر روی مکانیزم‌های بازار انرژی هم‌چون گواهی‌های سفید^۱ (TWC) و سبز قابل مبادله^۲ (TGC)، مدل‌های نوین تجارت انرژی مانند تجارت نظیر به نظیر (P2P) و سیستم‌های خودمصرفی جمعی^۳ (CSC) در جامعه متمرکز شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد که این

^۱ Tradable White Certificates

^۲ Tradable Green Certificates

^۳ Collective Self-Consumption Systems

راه کارها می توانند از طریق ایجاد انگیزه های اقتصادی و زیست محیطی، به بهبود بهره وری انرژی کمک کنند. این پژوهش ها نشان داده اند که اعمال جریمه های اجباری در مقایسه با ارائه یارانه ها، تأثیر بیشتری در ترغیب تأمین کنندگان سنتی در حرکت به سمت تولید انرژی پایدار داشته است. همچنین، مطالعات اخیر بر اهمیت طراحی مکانیزم های مناسب برای تشویق همکاری بین تولید کنندگان و مصرف کنندگان و ایجاد تعادل بین منافع اقتصادی و اجتماعی تأکید کرده اند.

تجارت انرژی P2P به عنوان یکی از مدل های نوظهور در بازارهای انرژی، مسیری تکاملی را از ایده های ابتدایی تا مفاهیم پیچیده و چندبعدی طی کرده است. بررسی زمان مند ادبیات موجود، تحول تدریجی رویکردها، روش ها و فهم محققان از این حوزه را نمایان می سازد که هر مرحله از این تکامل، دستاوردها و محدودیت های خاص خود را داشته است.

در آغاز این مسیر، لانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۹) در یکی از نخستین تلاش های جدی برای مواجهه با چالش های بنیادین تجارت P2P، به بررسی تضاد منافع موجود میان تولید-مصرف کنندگان در شبکه های کوچک^۲ اجتماعی پرداختند. این پژوهش با معرفی مکانیزم نوین تجارت P2P مبتنی بر نظریه بازی و مقدار شاپلی، گامی مهم در مدل سازی فرآیند تصمیم گیری برداشته است. دستاورد برجسته این مطالعه، موفقیت در ایجاد تعادل میان بهینه سازی و عدالت در راه کارهای مدیریت انرژی توزیع شده، است که نتایج شبیه سازی ها برتری آن را نسبت به الگوریتم های متداول تقسیم صورت حساب، نرخ بازار میانی و نسبت عرضه و تقاضا نشان داد. با این حال، این مطالعه با محدودیت های قابل توجهی مواجه بود که تمرکز عمده بر جنبه های ریاضی و مدل سازی نظری، فاصله قابل توجهی با واقعیت های عملی ایجاد کرده است. همچنین، عدم بررسی پیامدهای اجتماعی و رفتاری پیاده سازی این مکانیزم ها، خلأ مهمی در درک جامع مسئله به وجود آورده است.

ادامه این مسیر تحقیقاتی در سال ۲۰۲۰ م. با نگاه جامع تر «توشار» و همکاران شکل گرفت که به صورت مرور سیستماتیک، موفق به شناسایی و دسته بندی منظم چالش های موجود در لایه های مجازی و فیزیکی شبکه شدند. دستاورد مهم این مطالعه، ارائه چارچوب سیستماتیک برای درک پیچیدگی های تجارت P2P است که مزایای این نوع تجارت برای شبکه برق شامل کاهش تقاضای اوج، کاهش نیاز به ذخایر و کاهش تلفات شبکه می شود. شناسایی رویکردهای فنی گسترده برای حل چالش های معاملات تجارت نظیر به نظیر نیز کمک شایانی به سازماندهی دانش موجود در این حوزه کرده است. اما این پژوهش نیز کاستی هایی داشته است، زیرا علی رغم دسته بندی دقیق چالش ها، مطالعه عمده تاً در سطح توصیفی باقی ماند و از ارائه راهکارهای عملی و قابل پیاده سازی فاصله داشته که موجب شده محدودیت شکاف میان تشخیص مسائل و حل آن ها را عمیق تر کرده است.

سال ۲۰۲۱ م. شاهد تحولی مهم در درک ابعاد مختلف تجارت P2P بود، به طوری که «آدامز» و همکاران^۳ (۲۰۲۱) با انجام نخستین مرور نظام مند جامع، مرزهای تحقیق را از جنبه های صرفاً فنی و اقتصادی به سمت ارزش های اجتماعی گسترش دادند. این پژوهش موفق به شناسایی طیف وسیعی از ارزش های اجتماعی شامل استقلال انرژی، منافع محلی، روابط اجتماعی، مسئولیت زیست محیطی و مشارکت شد و همچنین ارزش های

¹ Long et al. (2019)

² Microgrids

³ Adams et al. (2021)

اقتصادی از جمله خودمصرفی برق تجدیدپذیر، کاهش هزینه‌های واردات برق و بهبود قیمت صادرات برق را مستند کرد. شناسایی عوامل کلیدی موفقیت آن شامل تمایل به مشارکت، تعامل مؤثر با فناوری و مشارکت فعال خانواده‌ها و جوامع نیز از دستاوردهای مهم این مطالعه بود. اما علی‌رغم شناسایی جامع ارزش‌ها، این پژوهش در ارائه روش‌های کمی‌سازی و اندازه‌گیری این ارزش‌ها ناتوان ماند و تبدیل آن‌ها به شاخص‌های قابل سنجش هم‌چنان چالشی حل‌نشده باقی گذاشت.

در همان سال، «کرامپس» و «لوتیه»^۱ (۲۰۲۱) با تمرکز بر مکانیزم‌های نظارتی، بعد دیگری از پیچیدگی‌های این حوزه را آشکار ساختند. این پژوهش با تحلیل دقیق گواهی‌های قابل مبادله، مشکل «کالاهای اعتباری» را در گواهی‌های سفید شناسایی کرد و نشان داد که عدم امکان راستی‌آزمایی کیفیت واقعی، چگونه می‌تواند به رفتارهای فرصت‌طلبانه منجر شود. راه‌کار عملی آنان مبنی بر تمرکز بر نتایج عملی و قابل اندازه‌گیری و پیشنهاد تشویق تمرکزگرایی در صنعت، رویکرد نوآورانه‌ای برای تعادل میان منافع جمعی و کنترل ریسک‌های انحصاری ارائه داد. اما این مطالعه با چالش هزینه‌های بالای نظارت مواجه بود که عملیاتی‌شدن پیشنهاداتشان را دشوار می‌ساخت. هم‌چنین «گئورگاکیس» و همکاران^۲ (۲۰۲۱) با انجام نخستین آزمایش انتخاب گسسته در این حوزه، کشف مهمی را ارائه کردند. این پژوهش که بر محرک‌های مشارکت متمرکز بود، نشان داد که برخلاف انتظارات رایج، ابعاد زیست‌محیطی حتی از ابعاد اقتصادی نیز اهمیت بیشتری برای مشارکت‌کنندگان دارند. یافته جالب‌توجه دیگر، تمایل اکثر مصرف‌کنندگان به عرضه رایگان یا با جبران غیرمالی برق مازاد خود، به‌ویژه به خانوارهای دچار فقر انرژی بود که پتانسیل تجارت P2P را در پیش‌برد گذار انرژی عادلانه اجتماعی آشکار ساخت. این گرایش در میان اعضای تعاونی‌های انرژی، قوی‌تر مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت بافت اجتماعی در پذیرش این فناوری بود. با این وجود، حجم نمونه محدود این مطالعه (۷۴ نفر) و تمرکز بر یک کشور واحد، قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج را به شدت محدود کرده بود.

در ادامه این روند تکاملی، «صفرزاده» و همکاران^۳ (۲۰۲۲) با گسترش مطالعات به سمت هماهنگ‌سازی بازارهای مختلف، پیچیدگی‌های سیاست‌گذاری را عمیق‌تر بررسی کردند. این پژوهش با توسعه مدل چندعاملی جامع در زنجیره تأمین برق، گامی مهم در درک روابط پیچیده میان بازارهای گواهی سفید و سبز برداشت. دستاورد برجسته این مطالعه، مستندسازی تأثیر بیشتر جریمه‌های اجباری نسبت به یارانه‌های صرفه‌جویی انرژی در ترغیب تأمین‌کنندگان سنتی به حرکت به سمت تولید انرژی پایدار بود. تحلیل سه سناریوی مختلف شامل تولید برق سنتی، اجرای برنامه بهره‌وری انرژی و پیاده‌سازی استانداردهای پرتفوی تجدیدپذیر، عمق تحلیلی قابل‌توجهی به مطالعه بخشید. این یافته بینش مهمی برای سیاست‌گذاران در طراحی مکانیزم‌های پاداش-جریمه فراهم کرد و نشان داد که رویکردهای تنبیهی می‌توانند مؤثرتر از رویکردهای تشویقی باشند. اما این پژوهش نیز با محدودیت عمده‌ای مواجه بود، زیرا علی‌رغم پیچیدگی مدل‌سازی، فقدان اعتبارسنجی تجربی و اتکای صرف بر شبیه‌سازی، شکاف میان نظریه و عمل را هم‌چنان پابرجا نگه داشته بود.

¹ Crampes & Léautier (2021)

² Georgarakis et al. (2021)

³ Safarzadeh et al. (2022)

سرانجام، «گورباچو» و همکاران^۱ (۲۰۲۴) با انجام گسترده‌ترین مرور نظام‌مند در این حوزه، نشان‌دهنده بلوغ تدریجی حوزه تجارت P2P بودند. این پژوهش که ۱۳۳ مقاله را مورد بررسی قرار داد، موفق به ایجاد چارچوب مفهومی جامعی برای تمایز میان تجارت P2P، انرژی تراکنشی^۲ و خودمصرفی اجتماعی شد. دیدگاه نوآورانه این مطالعه در توصیف این مدل‌ها به‌عنوان زیربازارهای مکمل به‌جای رقیب بازارهای سنتی، تحولی مهم در درک ماهیت این سیستم‌ها محسوب می‌شود. شناسایی مکانیسم‌های مذاکره قیمت منعکس‌کننده مؤلفه‌های بازار و تأکید بر ترویج تولید و مصرف انرژی محلی، از دیگر دستاوردهای مهم این پژوهش است. هم‌چنین محققان به‌درستی به تفاوت الزامات نهادی، زیرساختی و رفتاری این مدل‌ها اشاره کردند که وابستگی آن‌ها به شرایط محلی و مشارکت اجتماعی را برجسته می‌سازد. با بهره‌گیری از دیدگاه‌های متخصصان دانشگاهی و صنعتی، این مطالعه چارچوب مناسبی برای تمایز میان مدل‌های مختلف ارائه داده است که می‌تواند مبنای نظری مناسبی برای بررسی اثرات سیاستی و ساختاری تجارت برق P2P باشد.

این مرور زمان‌مند ادبیات نشان می‌دهد که تحقیقات در حوزه تجارت انرژی P2P مسیری تکاملی از مدل‌سازی‌های ریاضی ساده به سمت درک جامع و چندبعدی از پیچیدگی‌های این سیستم‌ها طی کرده است. در حالی که دستاوردهای قابل توجهی از جمله توسعه مکانیزم‌های بهینه‌سازی، شناسایی ارزش‌های اجتماعی و اقتصادی و ایجاد چارچوب‌های مفهومی جامع حاصل شده است، محدودیت‌های مداومی نیز وجود دارد. فاصله میان تئوری و عمل، کمبود مطالعات تجربی، محدودیت در کمی‌سازی ارزش‌های اجتماعی و تمرکز بر زمینه‌های جغرافیایی محدود، هم‌چنان به‌عنوان چالش‌های اصلی باقی مانده‌اند.

۳. طرحی نوآور برای کاهش استفاده از شبکه سنتی برق در جهان

۳-۱. تولید انرژی تجدیدپذیر و غیرمتمرکز (Decentralized Renewable Energy)

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر غیرمتمرکز (DRE) یا سیستم‌های تولید پراکنده^۳ (DG) به عنوان راهکاری نوآورانه برای تأمین برق مناطق روستایی و دورافتاده با دسترسی محدود به شبکه برق مطرح شده‌اند. این سیستم‌ها با استفاده از منابع متنوع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد و زیست‌توده، به‌صورت مستقل یا ترکیبی عمل می‌کنند و مزایایی هم‌چون کاهش انتشار کربن و بهبود دسترسی به انرژی را به همراه دارند (دیشموک^۴، ۲۰۰۹؛ دیشوار و همکاران^۵، ۲۰۲۰). شبکه‌های کوچک^۶ و جوامع انرژی در قالب سیستم‌های DRE، نقش مهمی در توسعه سیستم‌های انرژی پایدار ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها با کاهش اتلاف در انتقال انرژی، افزایش پایداری شبکه برق و بهبود امنیت انرژی، می‌توانند هزینه‌های پیش‌بینی شده را تا ۷۵ درصد کاهش دهند (کیه بادرودی‌نژاد و همکاران^۷، ۲۰۲۳؛ لزما و همکاران^۸، ۲۰۱۸). فناوری‌های شبکه هوشمند امکان ادغام کارآمد سیستم‌های تولید برق غیرمتمرکز

¹ Gorbacheva et al. (2024)

² Transactive Energy

³ Distributed Generation

⁴ Deshmukh (2009)

⁵ Deshwar et al. (2020)

⁶ Microgrids

⁷ Kiehbardroudinezhad et al. (2023)

⁸ Lezama et al. (2018)

با منابع تجدیدپذیر را فراهم کرده و با کاهش هزینه‌های خدمات، انرژی پاک‌تری ارائه می‌دهند (بهادی و دانیلویچ^۱، ۲۰۱۸). هم‌چنین، سیستم‌های تولید پراکنده امکان طراحی هیبریدی متناسب با شرایط هر منطقه را فراهم می‌کنند که تلفات انتقال برق را به حداقل می‌رساند و بهبود تعادل بار را به دنبال دارد (مارسدن^۲، ۲۰۱۱).

مشارکت جامعه در پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر برای توسعه پایدار و توانمندسازی محلی بسیار حیاتی است. مطالعات نشان داده‌اند که ابتکارات انرژی تجدیدپذیر به رهبری جامعه می‌توانند با اشتغال‌زایی همراه باشند، درآمد را افزایش دهند و کیفیت زندگی را بهبود بخشند (براندونی و همکاران^۳، ۲۰۱۶؛ ون در وال^۴، ۲۰۲۰). بنیادهای اساسی توانمندسازی اجتماعی شامل ارتقای سطح دانش، تعمیق مهارت‌های فردی و جمعی و تقویت ظرفیت‌های مشارکتی است. این عوامل در کنار دگرگونی در روابط قدرت و ایجاد حکمرانی پشتیبان، زمینه‌ساز توسعه پایدار جامعه خواهند بود. (کوی و همکاران^۵، ۲۰۲۲). مشارکت مؤثر جامعه نیازمند پذیرش اجتماعی، طراحی پروژه‌های متناسب با نیازهای خاص و شناسایی پتانسیل اقتصادی است (اوزورکا و همکاران^۶، ۲۰۲۴). مالکیت جامعه بر فناوری‌های انرژی، اگرچه توانمندساز است، اما آسیب‌پذیری‌هایی نیز ایجاد می‌کند و نیازمند سیاست‌های پایدار انرژی و حمایت مداوم است (ون در وال، ۲۰۲۰). با وجود تأثیرات مثبت بر توسعه اقتصاد محلی، انسجام اجتماعی و توسعه مهارت‌ها، چالش‌هایی مانند نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و نحوه ادغام با شبکه برق، باید در تحلیل اثرات کلی اقتصادی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر مورد توجه قرار گیرند (براندونی و همکاران، ۲۰۱۶).

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر محلی، به‌ویژه سیستم‌های فتوولتائیک^۷ خورشیدی (PV) همراه با ذخیره‌سازی انرژی، می‌توانند هزینه‌های مصرف‌کنندگان را کاهش دهند. با کاهش قیمت‌های PV و ذخیره‌سازی، دستیابی به هم‌ترازی با شبکه^۸ در بسیاری از مناطق ممکن شده و خودتولیدی انرژی جذابیت بیشتری پیدا می‌کند (ورنر و همکاران^۹، ۲۰۱۲؛ سابادینی و مادلنر^{۱۰}، ۲۰۲۱). علاوه بر این استفاده از سیستم‌های PV-باتری با اندازه‌گذاری بهینه می‌تواند خرید برق از شبکه را به حداقل رسانده و هزینه‌های کلی را نیز کاهش دهند (سارایوا و متز^{۱۱}، ۲۰۱۶؛ سابادینی و مادلنر، ۲۰۲۱). با این حال، قطع کامل اتصال به شبکه برق ممکن است از نظر اقتصادی بهینه نباشد، زیرا حفظ اتصال به شبکه امکان فروش انرژی مازاد همراه با سودآوری را فراهم می‌کند (سابادینی و مادلنر، ۲۰۲۱). تخمین زده شده است که مزایای اقتصادی دستگاه‌های ذخیره‌سازی برق در سطح مصرف‌کننده، می‌تواند هزینه‌های کلی برق را از طریق مدیریت آریتر، ۹ تا ۱۵ درصد کاهش دهد (آهلرت و دینتر^{۱۲}، ۲۰۰۹). اگرچه پتانسیل اقتصادی این سیستم‌ها به عواملی مانند اقتصاد منطقه‌ای، پروفایل‌های مصرف و شرایط جغرافیایی بستگی

¹ Bhatti & Danilovic (2018)² Marsden (2011)³ Brandoni *et al.* (2016)⁴ Van Der Waal (2020)⁵ Coy *et al.* (2022)⁶ Uzorka *et al.* (2024)⁷ Photovoltaics⁸ Grid Parity⁹ Werner *et al.* (2012)¹⁰ Sabadini & Madlener (2021)¹¹ Saraiva & Metz (2016)¹² Ahlert & Dinther (2009)

دارد، اما یکپارچه سازی منابع انرژی تجدیدپذیر با سیستم های ذخیره سازی برای مصرف کنندگان مسکونی، عملی و مقرون به صرفه شده است (سارایو و متز، ۲۰۱۶).

تولید انرژی تجدیدپذیر محلی نقش مهمی نیز در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و آلودگی محیط زیست ایفا می کند. این سیستم ها با تکیه بر منابع پاک و تجدیدپذیر، جایگزین های مؤثری برای سوخت های فسیلی عمل کرده و به تلاش ها برای کاهش تغییرات اقلیمی کمک می کنند (عمر، ۲۰۱۲؛ مدودکینا و خودچنکو، ۲۰۲۰). با وجود مزایای متعدد سیستم های DRE، پیاده سازی آن با چالش هایی همچون مسائل مربوط به نگرش جامعه، موانع سیاست گذاری و نیاز به مدل های تجاری کارآمد روبرو است. برای غلبه بر این چالش ها، پژوهشگران از ابزارهای نرم افزاری پیشرفته مانند HOMER برای ارزیابی پارامترهای اقتصادی استفاده می کنند (دیشوار و همکاران، ۲۰۲۰). پیشرفت های اخیر در فناوری شبکه های کوچک پاک، اجرای گسترده این سیستم ها را به ویژه در مناطق دورافتاده و روستایی تسهیل کرده است که با اهداف جهانی پایداری و کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی همسو است (کیه بادرودی نژاد و همکاران، ۲۰۲۳).

۳-۳. طرح تجارت برق نظیر به نظیر

تجارت انرژی نظیر به نظیر (P2P) به عنوان یک رویکرد نوآورانه در بخش انرژی تجدیدپذیر، امکان تبادل مستقیم برق بین تولید کنندگان-مصرف کنندگان و مصرف کنندگان را فراهم می کند. با توجه به شکل ۱ این سیستم به افراد و خانوارهایی که دارای سیستم های تولید انرژی تجدیدپذیر مانند پنل های خورشیدی هستند، اجازه می دهد تا مازاد برق تولیدی خود را مستقیماً با همسایگان و سایر مصرف کنندگان محلی به اشتراک بگذارند (منگل کمپ و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات نشان می دهند که این مدل مزایای اقتصادی قابل توجهی به همراه دارد، به طوری که در سناریوهای بهینه می تواند صرفه جویی به میزان ۲۸ درصد برای مصرف کنندگان و ۵۵ درصد برای تولید کنندگان-مصرف کنندگان ایجاد کند (نوز و همکاران، ۲۰۲۰؛ سوتو و همکاران، ۲۰۲۱). این تجارت می تواند از طریق الگوهای مختلف بازار مانند تقسیم صورت حساب، نرخ بازار میانی و استراتژی های قیمت گذاری مبتنی بر حراج اجرا شود (لانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Omer (2012)

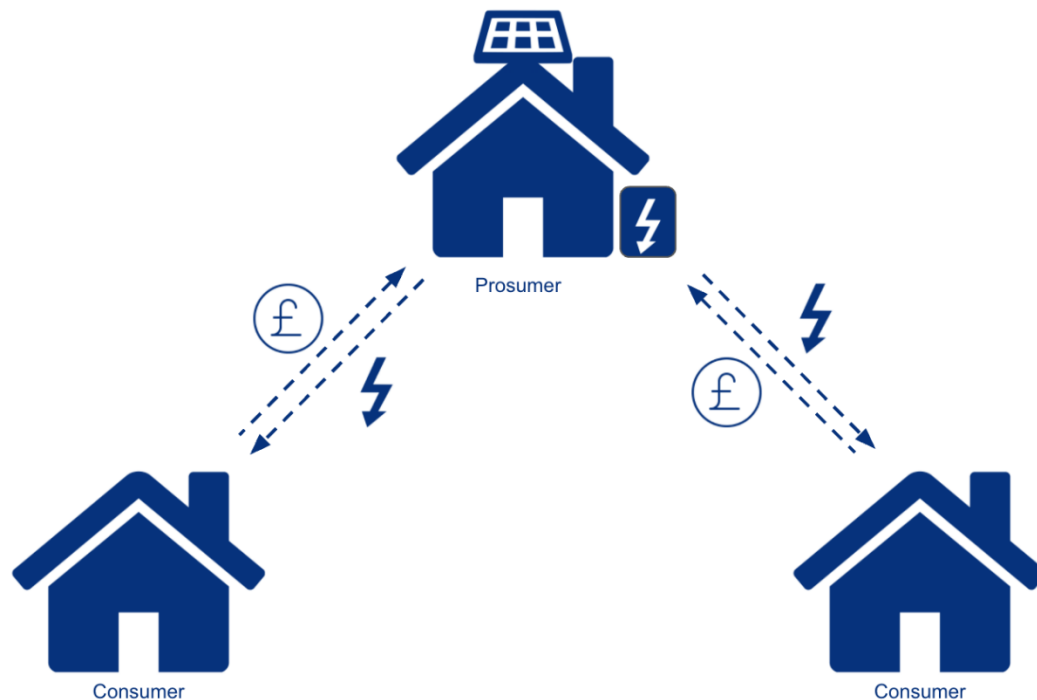
² Medvedkina & Khodochenko (2020)

³ Peer-to-Peer Electricity Trading

⁴ Neves et al. (2020)

⁵ Soto et al. (2021)

⁶ Long et al. (2017)



شکل ۱: تجارت برق نظیر به نظیر (منبع: www.edfenergy.com).

Fig. 1: Peer-to-Peer Electricity Trading (Source: www.edfenergy.com)

شبکه‌های کوچک نقش حیاتی در تحقق این سیستم دارند. این شبکه‌ها به عنوان اجزای اصلی در سیستم‌های انرژی مدرن، امکان توزیع محلی برق و تجارت انرژی P2P را فراهم می‌کنند (سانسورینو و همکاران^۱، ۲۰۱۷؛ اونز و همکاران^۲، ۲۰۲۳). ادغام فناوری بلاکچین و ابزارهای پیش‌بینی (هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی جنبه‌های مختلف سیستم انرژی) می‌تواند سیستم‌های تجارت انرژی P2P را بهبود بخشیده، جوامع انرژی تجدیدپذیر را تقویت کند و مدل‌های کسب‌وکار جدیدی ایجاد نماید (گوتیز و همکاران^۳، ۲۰۲۱). فناوری بلاکچین نقش کلیدی در این سیستم ایفا می‌کند. این فناوری، معاملات انرژی را امن‌تر، شفاف‌تر و غیرمتمرکزتر می‌کند و به مصرف‌کنندگان سنتی امکان می‌دهد تا به تولیدکنندگان-مصرف‌کنندگان تبدیل شوند و از منابع تجدیدپذیر بهره ببرند. پیاده‌سازی بلاکچین در شبکه‌های کوچک می‌تواند چالش‌هایی نظیر هماهنگی اپراتورهای توزیع، مدیریت مازاد انرژی و توسعه پلتفرم‌های کاربرپسندتر را برطرف کند (بومایزا و سانفیلیپو^۴، ۲۰۲۳). «کارتیک» و «آناند»^۵ (۲۰۲۰) به نقش قراردادهای هوشمند در این سیستم اشاره می‌کنند که با استفاده از ابزارهایی مانند Solidity، امکان تجارت انرژی P2P خودکار را فراهم کرده و نیاز به دخالت شخص ثالث را حذف می‌کنند. استفاده از فناوری بلاکچین در شبکه‌های کوچک مزایای متعددی از جمله بهبود انعطاف‌پذیری، کارایی، پایداری و مقرون‌به‌صرفه بودن در توزیع و مدیریت انرژی به همراه دارد (اونز و همکاران، ۲۰۲۳).

¹ Sanseverino *et al.* (2017)

² Evens *et al.* (2023)

³ Gutiérrez *et al.* (2021)

⁴ Boumaiza & Sanfilippo (2023)

⁵ Karthik & Anand (2020)

علی‌رغم مزایای متعدد تجارت انرژی P2P، اجرای شبکه‌های هوشمند با چالش‌های متعددی از جمله مسائل مربوط به به‌روزرسانی قوانین انرژی، توسعه زیرساخت‌های هوشمند و آموزش مصرف‌کنندگان مواجه است (براون و همکاران^۱، ۲۰۱۸؛ براون و ژو^۲، ۲۰۱۹). نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی و امنیت از موانع مهم محسوب می‌شوند، زیرا مصرف‌کنندگان درباره حفاظت از داده‌ها در سیستم‌های کنتور هوشمند دغدغه دارند (یانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۹؛ بیگرن و همکاران^۴، ۲۰۱۶). جنبه‌های مالی نیز چالش‌های مهمی ایجاد می‌کنند، زیرا هزینه‌های گزاف آن مانع بزرگی برای تشویق مصرف‌کنندگان به استفاده کردن از این نوع تجارت است (بیگرن و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، مباحث فنی و تجاری در خصوص پیاده‌سازی زیرساخت‌های کنتور هوشمند نیز وجود دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

برای غلبه بر این چالش‌ها، بسیاری از دولت‌ها سیاست‌های متنوعی مانند تعیین اهداف قانونی، الزامات امنیت داده و ارائه مشوق‌های مالی مختلف را برگزیدند (براون و همکاران، ۲۰۱۸؛ براون و ژو، ۲۰۱۹). مشارکت مصرف‌کنندگان و تغییر رفتار آن‌ها برای به حداکثر رساندن مزایای شبکه‌های هوشمند ضروری است، اما این جنبه‌ها در مطالعات موجود اغلب نادیده گرفته می‌شوند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

بر اساس بررسی پروژه‌های اجرا شده در کشورهای مختلف، تعریف متفاوتی از فروشندگان وجود دارد. یکی از عواملی که باعث به‌وجود آمدن تجارت و بده بستان اقتصادی می‌گردد، قوانینی است که مجوز فروش برق به تأمین‌کنندگان محلی توسط فروشندگان را می‌دهد. هرچند که در هلند هیچ تعریفی از فروشندگان وجود ندارد اما فروشندگان یا خانوار تولیدکننده برق به مانند تأمین‌کنندگان منطقه‌ای، بعد از درخواست مجوز فروش برق قادر به انجام معامله هستند. به همین دلیل تجارت برق نظیر به نظیر، میزان تأمین‌کننده‌های انرژی بیشتری را در هلند باعث شده است. در آلمان خانوار تولید کننده برق که علاوه بر مصرف خود برق را جهت فروش به تأمین‌کنندگان تولید می‌کنند، مشمول معاف از مالیات قرار می‌گیرند. قوانین در بریتانیا، ایالات متحده و استرالیا نیز اجازه تجارت انرژی نظیر به نظیر را نمی‌دهد و بازارهای این سازوکار به‌صورت یک بازار تنظیم و کنترل شده وجود دارد. مالزی نیز دارای یک بازار کنترل شده است که در حال حاضر تجارت انرژی به‌صورت یک پروژه آزمایشی تحت برنامه سندباکس^۵ اجرا می‌گردد (جونلاکارن و همکاران^۶، ۲۰۲۲).

۳-۳. طرح‌های P2P اجرا شده در کشورهای مختلف

استرالیا: تجارت برق P2P در استرالیا یک رویکرد نوآورانه برای ادغام منابع انرژی توزیع‌شده است که از سال ۲۰۱۶ م. مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است (روی و همکاران^۷، ۲۰۱۶). این مدل به تولیدکنندگان - مصرف‌کنندگان امکان می‌دهد مازاد و کسری انرژی را مستقیماً معامله کنند (علی و همکاران^۸، ۲۰۲۲). استرالیا با

¹ Brown et al. (2018)

² Brown & Zhou (2019)

³ Yang et al. (2019)

⁴ Bigerna et al. (2016)

⁵ Sandbox

⁶ Junlakarn et al. (2022)

⁷ Roy et al., (2016)

⁸ Ali et al., (2022)

بیش از ۱/۶ میلیون سیستم خورشیدی، بالاترین نسبت تولیدکنندگان-مصرف کنندگان در جهان را دارد (لوپز گونزالس و گارسا رندون^۱، ۲۰۲۲). این پتانسیل باعث شده پروژه‌هایی مانند Power Ledger با استفاده از فناوری بلاک‌چین، زمینه تجارت مستقیم انرژی بین خانوارها و کسب‌وکارها را فراهم کنند (آژانس انرژی‌های تجدیدپذیر استرالیا^۲، ۲۰۱۷).

چالش‌های اصلی پیش روی تجارت P2P در استرالیا شامل موانع قانونی، نیاز به زیرساخت‌های فناوری مانند کنتورهای هوشمند و حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌ها هستند. با این حال، پیشرفت‌های مداوم و سیاست‌های حمایتی، راه را برای اجرای گسترده‌تر این مدل هموار کرده است. مزایای اصلی این رویکرد شامل کاهش هزینه‌های انرژی برای مصرف کنندگان، استفاده بهینه از منابع انرژی توزیع شده (DER) مانند سیستم‌های خورشیدی، اینورترهای هوشمند، ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای الکتریکی می‌باشند. هدف نهایی این طرح ایجاد یک سیستم انرژی مقاوم‌تر، کارآمدتر و پایدارتر است (آژانس انرژی‌های تجدیدپذیر استرالیا، ۲۰۱۷).

آلمان: طرح تجارت برق نظیر به نظیر در آلمان انقلابی در صنعت انرژی این کشور ایجاد کرده است. این مدل غیرمتمرکز به تولیدکنندگان-مصرف کنندگان اجازه می‌دهد تا مستقیماً به تولید برق و مبادله آن بپردازند، که این امر به تعادل انرژی محلی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر کمک می‌کند (بیسی و همکاران^۳، ۲۰۲۴). هزینه‌های بالای برق شبکه‌ای در آلمان، انگیزه‌ای برای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک و کاهش وابستگی به شبکه ایجاد کرده است (مهندس و همکاران^۴، ۲۰۲۴).

تجارت برق P2P در آلمان با حذف تدریجی خرید تضمینی برق^۵ گسترش یافته است و فرصت‌هایی برای ایجاد خدمات انرژی متمرکز بر جامعه فراهم کرده است (لوبه و همکاران^۶، ۲۰۲۰). تحقیقات نشان می‌دهد که صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش خودکفایی انرژی، انگیزه‌های اصلی خانوارهای آلمانی برای مشارکت در پلتفرم‌های P2P هستند (کرمی و مادلنر^۷، ۲۰۲۲).

هلند: تجارت برق نظیر به نظیر در هلند به عنوان رویکردی نوآورانه در جهت تحقق انتقال عادلانه انرژی ظهور یافته است. مصرف کنندگان، علاوه بر منافع اقتصادی، به پیامدهای زیست‌محیطی نیز توجه ویژه‌ای دارند؛ به گونه‌ای که بسیاری از آنان تمایل دارند مازاد برق تولیدی خود را با هدف حمایت از خانوارهای دچار فقر انرژی، به صورت رایگان یا با پرداخت غیرمالی در اختیار آنان قرار دهند (گتورگراکیس و همکاران^۸، ۲۰۲۱).

تحول در نظام انرژی هلند با هم‌گرایی فناوری‌های پیشرفته از جمله کنتورهای هوشمند، فناوری بلاک‌چین، پلتفرم‌های نظیر به نظیر و هوش مصنوعی محقق شده است. این دگرگونی در واکنش به محدودیت‌های سیستم متمرکز سنتی برق و ضرورت انعطاف‌پذیری بیشتر در شبکه توزیع برق صورت پذیرفته است. در ساختار فعلی، سه الگوی اصلی برای تجارت P2P در هلند تعریف شده است: تجارت مبتنی بر شبکه اصلی، ریزشبکه نیمه‌مستقل و

¹ López González & Garcia Rendon (2022)

² Australian Renewable Energy Agency (2017)

³ Bassey *et al.*, (2024)

⁴ Mohandes *et al.*, (2024)

⁵ Feed-in Tariffs

⁶ Löbbe *et al.*, (2020)

⁷ Karami & Madlener, (2022)

ریزشبکه مستقل. پروژه Schoonschip در آمستردام به عنوان نمونه‌ای موفق از ریزشبکه نیمه‌مستقل شناخته می‌شود که در آن ساکنان قادر به مبادله برق تولیدی خود هستند. در این میان، پلتفرم ENTRNCE که از سال ۲۰۱۷ م. فعالیت خود را آغاز کرده، به‌عنوان یکی از موفق‌ترین نمونه‌های عملیاتی شناخته می‌شود. این پلتفرم با پوشش روزانه بیش از ۱۰,۰۰۰ کاربر، بستری را برای معاملات مستقیم میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان فراهم آورده است. از منظر اقتصادی، این سیستم نوین توانسته است کاهش ۱۵ درصدی در هزینه‌های برق را محقق سازد. علاوه بر این، با بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، میزان صرفه‌جویی تا ۵۰ درصد نیز افزایش می‌یابد. در حوزه صنعتی نیز، کاهش قابل توجه هزینه از ۲۰ سنت به ۱۰ سنت در هر کیلووات ساعت مشاهده شده است. این نظام نوین، علاوه بر مزایای اقتصادی، دستاوردهای متعددی از جمله بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش بار شبکه اصلی و تسریع انتقال انرژی را به‌همراه داشته است. در همین راستا، دولت هلند در حال تدوین سازوکارهای تشویقی برای حمایت از توسعه ریزشبکه‌های نیمه‌مستقل است که می‌تواند به‌عنوان گامی مهم در مسیر توسعه شبکه‌های کاملاً مستقل در آینده محسوب شود (رافائل و بولورک^۱، ۲۰۲۳).

بریتانیا: طرح تجارت برق نظیر به نظیر در بریتانیا به‌عنوان یکی از مدل‌های نوآورانه در بازار انرژی آغاز شد تا به مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان خرد اجازه دهد برق تولیدی خود را مستقیماً در یک شبکه محلی معامله کنند. این طرح با هدف مردمی‌کردن بازار انرژی و ایجاد فرصت‌های بیشتر برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه یافت. در این مدل، هر فردی که انرژی مازادی تولید می‌کند می‌تواند آن را به سایر افراد بدون نیاز به واسطه‌هایی مانند شرکت‌های بزرگ تأمین‌کننده انرژی، بفروشد (مجیب و همکاران^۲، ۲۰۱۹).

یکی از اولین پروژه‌های موفق در این زمینه، پلتفرم Piclo بود که در سال ۲۰۱۵ م. به‌عنوان یک پروژه پایلوت آغاز شد. این پلتفرم که توسط شرکت Open Utility توسعه داده شده، از داده‌های کنتور هوشمند برای مطابقت دادن تقاضا و عرضه برق در بازه‌های نیم‌ساعتی استفاده می‌کند. هم‌چنین Piclo با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و مدل‌های قیمت‌گذاری شفاف، امکان تجارت محلی انرژی را برای مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان فراهم کرده است. در این پروژه، تأمین‌کنندگان انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی و بادی نقش کلیدی داشتند (مجیب و همکاران، ۲۰۱۹).

در طول دوره آزمایشی، این سیستم توانست ۸۵/۶ درصد از برق مصرف‌کنندگان را با کاهش قابل‌توجهی در هزینه‌های انتقال و توزیع، از منابع تجدیدپذیر تأمین کند. این نتایج، نشان‌دهنده جذابیت این مدل برای مصرف‌کنندگان و افزایش مشارکت آن‌ها در تولید انرژی‌های پاک است. هم‌چنین، فاصله متوسط بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در این شبکه به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته است که نشان‌دهنده کارایی مدل تجارت محلی است. این سیستم با تأکید بر استفاده از فناوری بلاکچین و مدل‌های محلی، بازار انرژی را غیرمتمرکز کرده و کنترل بیشتری را به مصرف‌کنندگان داده است. این مدل پتانسیل قابل توجهی برای ایجاد صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش کربن دارد، به‌طوری که پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک بتواند میلیون‌ها پوند درآمد اضافی ایجاد کند و به گسترش شبکه‌های انرژی پاک کمک کند (مجیب و همکاران، ۲۰۱۹).

¹ Raffaele & Bolwerk, (2023)

² Mujeeb et al., (2019)

در مجموع، اجرای این طرح در بریتانیا با استقبال روبرو شده است و می‌تواند الگویی برای سایر کشورها باشد. با وجود چالش‌هایی مانند نیاز به زیرساخت‌های هوشمند و قوانین شفاف‌تر، موفقیت پلتفرم‌هایی مانند Piclo نشان می‌دهد که تجارت برق P2P آینده‌ای روشن برای بازار انرژی ارائه می‌دهد، به‌ویژه در راستای کاهش آلودگی و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر.

ایالات متحده آمریکا: طرح بروکلین مایکروگرید^۱ که توسط شرکت LO3 Energy توسعه داده شده، به‌عنوان یکی از اولین نمونه‌های موفق تجارت برق نظیر به نظیر در آمریکا شناخته می‌شود. هدف این طرح ایجاد بازاری برای مبادله انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح محلی است که به ساکنان بروکلین اجازه می‌دهد مازاد برق تولیدی از منابعی مانند پنل‌های خورشیدی را مستقیماً به همسایگان خود بفروشند. این پروژه از فناوری بلاکچین و قراردادهای هوشمند برای ثبت و مدیریت شفاف معاملات انرژی استفاده می‌کند (منگل کمپ و همکاران، ۲۰۱۸). پلتفرم این پروژه از یک شبکه بلاکچین خصوصی بر پایه پروتکل Tendermint استفاده می‌کند که امکان انجام معاملات در زمان واقعی را فراهم می‌سازد. در این بازار، قیمت‌ها بر اساس عرضه و تقاضای محلی تعیین می‌شود و شرکت‌کنندگان می‌توانند انرژی تجدیدپذیر را با هزینه کمتر و پایداری بیشتر خریداری کنند. این بازار مجازی همچنین به جامعه اجازه می‌دهد تا امنیت تأمین انرژی خود را افزایش داده و نقش فعال‌تری در مدیریت انرژی ایفا کنند. این پروژه باعث کاهش قابل توجه وابستگی به شبکه‌های انرژی سنتی برق شده و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد مصرف محلی را افزایش داده است. یکی از اهداف کلیدی این طرح، کاهش تلفات انتقال انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی از طریق توزیع محلی است. همچنین، این مدل مشوق‌های اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در تولید انرژی‌های پاک را فراهم می‌کند (منگل کمپ و همکاران، ۲۰۱۸).

با وجود موفقیت‌های اولیه، اجرای کامل این طرح نیازمند تغییراتی در مقررات موجود است. به‌طور خاص، معاملات مستقیم بین کاربران بدون دخالت واسطه‌های سنتی هنوز در بسیاری از مناطق آمریکا مجاز نیست. با این حال، همکاری LO3 Energy با شرکت Con Edison برای ایجاد زیرساخت‌های قانونی و فنی لازم ادامه دارد (منگل کمپ و همکاران، ۲۰۱۸).

۴. روش‌شناسی تحقیق، تصریح مدل و تشریح داده‌ها

۴-۱. روش تحقیق

هدف این مطالعه، تحلیل تجربی تأثیر اجرای سیاست تجارت برق نظیر به نظیر در رشد تولید برق خورشیدی برای کشورهای منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ م. است. داده از نوع داده‌های تابلویی پویا^۲ هستند که شامل مشاهدات چندین کشور (مقطع) در طول چندین سال (زمان) می‌شود. کشورهای استرالیا، آلمان، هلند، بریتانیا و ایالات متحده به‌عنوان کشورهای پیشران در اجرای طرح P2P و کشورهای نیوزلند، فرانسه، سوئد، ایتالیا و شیلی به‌عنوان کشورهایی که تجربه اجرای این طرح را نداشته‌اند، برای این پژوهش انتخاب شده‌اند. برای بررسی اثر متغیرها و پایداری یا اثر وقفه دار رشد تولید برق خورشیدی در طول زمان، از مدل داده‌های تابلویی پویا به کمک تخمین‌زن

^۱ Brooklyn Microgrid

^۲ Dynamic Panel Data

گشتاورهای تعمیم یافته^۱ (GMM) به سبک «آرلانو» و «باند»^۲ (۱۹۹۱) که به صورت زیر تعریف می شود استفاده شده است:

$$Y_{it} = \alpha Y_{it-1} + \beta X_{it} + u_{it} \quad (۱)$$

به طور کلی Y_{it} متغیر وابسته، Y_{it-1} متغیر وابسته با یک دوره وقفه، X_{it} متغیر مستقل کنترلی و u_{it} جزء اخلاص این مدل است. در مدل های پانل دیتای پویا، به دلیل وجود متغیر وابسته با وقفه (Y_{it-1}) در سمت راست معادله (که با جزء اخلاص همبستگی دارد)، روش های تخمین سنتی مانند حداقل مربعات معمولی^۳، اثرات ثابت^۴ و اثرات تصادفی^۵ منجر به تورش در برآورد پارامترها می شود. به همین دلیل این روش برای مدل هایی که در آنها احتمال وجود پویایی زمانی و درون زایی در متغیرهای توضیحی وجود دارد، مناسب است. از آن جا که متغیر وابسته در این مدل تحت تأثیر مقادیر گذشته خود قرار دارد و ممکن است برخی متغیرها مانند P2P یا قیمت برق با جمله اخلاص مدل همبسته باشند، استفاده از GMM به کمک ابزارهای درونی، امکان برآورد بدون تورش را فراهم می کند.

روش گشتاورهای تعمیم یافته تفاضل مرتبه اول^۶ که توسط آرلانو و باند در سال ۱۹۹۱ م. ارائه شد، مشکل همبستگی را از طریق تفاضل گیری متغیرها حل می کند. در برخی موارد، ابزارهای مورد استفاده در روش GMM تفاضل مرتبه اول (که همان سطوح باوقفه متغیرها هستند) ممکن است ضعیف باشند، به خصوص زمانی که سری زمانی کوتاه است یا متغیرها نزدیک به ریشه واحد هستند. این ضعف ابزارها می تواند منجر به نتایج ناسازگار شود. روش گشتاورهای تعمیم یافته سیستمی (SYS-GMM) که توسط «بلاندل» و «باند»^۷ (۱۹۹۸) توسعه یافته است، با ترکیب معادله در تفاضل و معادله در سطح (با استفاده از ابزارهای مناسب برای هر کدام)، مشکل ضعف ابزارها را برطرف کرده و کارایی بیشتری نسبت به GMM تفاضلی دارد. این روش مزایای متعددی همچون توانایی در کنترل تورش ابزارها، همبستگی سریالی و ناهمسانی واریانس دارد که آن را برای داده های دارای محدودیت زمانی و گستردگی مقطعی، مناسب می سازد. با وجود آن که روش GMM عمدتاً برای داده هایی با تعداد مقاطع زیاد (N بزرگ) و دوره های زمانی کم (T کوچک) توصیه می شود (بالتاگی^۸، ۲۰۰۸)، در این پژوهش با کنترل دقیق بر تعداد ابزارها و انتخاب lag های محدود، با تعداد ۱۰ کشور و دوره زمانی ۲۳ سال انجام شده است. این رویکرد پیش تر نیز در مطالعاتی با کشورهای محدود اما سری زمانی بلند مورد استفاده قرار گرفته است (رودمن^۹، ۲۰۰۹). خاطرنشان می شود که تخمین گر GMM سیستمی می تواند به راحتی ابزارهای متعددی ایجاد کنند که منجر به بیش برآزشی متغیرهای درونزا و تضعیف آزمون اعتبار ابزار هانسن شود. بر همین اساس باید نسبت به تکثیر ابزارها محتاط بود، زیرا ممکن است نتایج از طریق درون زایی های نامشهود، کنترل و هدایت شود (همان: ۲۰۰۹).

^۱ Generalized Method of Moments

^۲ Arellano & Bond (1991)

^۳ OLS

^۴ Fixed Effects

^۵ Random Effects

^۶ Differenced GMM

^۷ Blundell & Bond (1998)

^۸ Baltagi (2008)

^۹ Roodman (2009)

نتایج حاصل از روش GMM برای داده‌های تابلویی، تنها در صورت برقراری فروض اساسی این روش، قابل اعتماد هستند. به‌منظور بررسی صحت این فروض از آزمون «والد»^۱ برای معناداری کلی مدل، آزمون آرلانو و باند برای تشخیص خودهم‌بستگی باقی‌مانده‌های درجه دوم و آزمون «سارگان»^۲ به‌منظور سنجش اعتبار ابزارهای مورد نظر، استفاده شده است.

۲-۴. مدل‌سازی و داده‌یابی

به‌منظور تحلیل تجربی تأثیر سیاست‌های تجارت برق P2P و متغیرهای کلان اقتصادی و اقلیمی بر تولید برق خورشیدی فتوولتائیک، ابتدا یک مرور نظام‌مند بر ادبیات نظری و تجربی صورت گرفت. هدف از این مرور، شناسایی مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر توسعه انرژی خورشیدی در کشورهای مختلف است. سپس بر اساس فراوانی استنادها، اعتبار علمی منابع و سازگاری با داده‌های در دسترس، مجموعه‌ای از متغیرها انتخاب و در قالب یک مدل اقتصادسنجی پویا تصریح شده است.

متغیر وابسته در این مدل، میزان تولید برق خورشیدی فتوولتائیک (SPVEG) است که در مطالعات آژانس بین‌المللی انرژی^۳ (۲۰۲۲) به‌عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی ظرفیت عملیاتی فناوری خورشیدی معرفی شده است. برای لحاظ کردن پویایی سیستم و وابستگی تولید انرژی به وضعیت سال‌های گذشته، وقفه این متغیر نیز در مدل لحاظ شد (بلاندل و باند، ۱۹۹۸). مهم‌ترین متغیر مستقل، متغیر ساختگی P2P است که معرف اجرای سیاست تجارت برق کاربر به کاربر در برخی کشورهاست. اهمیت این سیاست در متون اخیر به‌ویژه از منظر افزایش تاب‌آوری شبکه برق و مشارکت مستقیم مصرف‌کنندگان-فروشنده‌گان مورد توجه قرار گرفته است (توشار و همکاران، ۲۰۲۰؛ چاتورانگا و همکاران، ۲۰۲۲).

در کنار آن، سهم برق تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر (REO) به‌عنوان شاخص ظرفیت نهادی انرژی پاک وارد مدل شده است (مرداک و همکاران، ۲۰۲۱). قیمت برق (Eprice) و قیمت واحد پل خورشیدی (SPP) نیز به‌عنوان متغیرهای اقتصادی مؤثر بر رفتار مصرف‌کننده و سرمایه‌گذاران در مدل گنجانده شده است (اسپی و اسپي، ۲۰۰۴؛ آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، ۲۰۲۲). برای در نظر گرفتن عوامل جمعیتی و توسعه‌ای، از جمعیت کل کشور (Population) و درآمد سرانه تعدیل‌شده (ANNIPC) استفاده شده است (سادورسکی، ۲۰۰۹؛ اوزتورک، ۲۰۱۰). افزون بر این، دمای متوسط سالانه (AAT) به‌عنوان عاملی اقلیمی که می‌تواند بر بازدهی سیستم‌های خورشیدی تأثیرگذار باشد، در مدل لحاظ شد (مخرجی و ناطقی، ۲۰۱۷).

در نهایت، برای لحاظ ظرفیت فناوری و سیاست‌گذاری ملی، یک شاخص ترکیبی به نام PC به کمک تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) از حاصل ضرب لگاریتم تولید ناخالص داخلی (GDP) و مخارج عمومی تحقیق و توسعه

¹ Wald test

² Sargan test

³ International Energy Agency (IEA) (2022)

⁴ Murdock *et al.* (2021)

⁵ Espey & Espey (2004)

⁶ Irena (2022)

⁷ Sadorsky (2009)

⁸ Ozturk (2010)

⁹ Mukherjee & Nateghi (2017)

در حوزه انرژی (Public RD&D) محاسبه و وارد مدل شده است (جان استون و همکاران^۱، ۲۰۱۰). این متغیر تلفیقی، نمایانگر توانمندی فناوریانه و حمایتی دولت در تسهیل توسعه انرژی های پاک است. در مجموع، تمامی متغیرهای وارد شده در مدل نهایی از منابع معتبر بین المللی انتخاب شده اند و پشتوانه نظری و تجربی آن ها در ادبیات انرژی اثبات شده است. مدل نهایی در قالب یک ساختار پانل پویای لگاریتمی تنظیم و با استفاده از روش GMM سیستمی تخمین زده می شود. در نهایت مدل پیشنهادی برای این تحقیق به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \ln(SPVEG_{it}) = & \alpha_1 \ln(SPVEG_{i,t-1}) + \alpha_2 P2P_{it} + \alpha_3 \ln(EPrice_{it}) \\ & + \alpha_4 \ln(REO_{it}) + \alpha_5 PC_{i,t} + \alpha_6 \ln(Population_{it}) \\ & + \alpha_7 \ln(AAT_{it}) + \alpha_8 \ln(SPP_{it}) + \alpha_9 \ln(ANNIPC_{it}) + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن i و t به ترتیب کشور مورد مطالعه و زمان، $SPVEG_{it}$ تولید برق خورشیدی در کشور i در سال t ، $SPVEG_{i,t-1}$ تولید برق خورشیدی با یک دوره وقفه، $P2P_{it}$ متغیر باینری نشان دهنده اجرای سیاست برق نظیر به نظیر، $EPrice_{it}$ متوسط قیمت سالانه برق برای مصرف کنندگان، REO_{it} سهم برق تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر از کل برق تولیدی، $Population_{it}$ جمعیت، AAT_{it} میانگین سالانه دما، SPP_{it} قیمت پنل خورشیدی، $ANNIPC_{it}$ درآمد سرانه، $PC_{i,t}$ متغیر ترکیبی تولید ناخالص داخلی (GDP) و هزینه های عمومی تحقیق و توسعه انرژی (PERDDE) استاندارد شده است که به عنوان یک شاخص کلی از سطح توسعه اقتصادی همراه با وابستگی به انرژی تجدیدپذیر می باشد و ε_{it} نیز جمله خطا لحاظ شده است. برای تفهیم بهتر از متغیرهای در نظر گرفته شده، منابع اخذ آن در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱: منابع متغیرهای مورد استفاده در پژوهش

Tab. 1: Source of Variables

منابع	متغیر
اژانس بین المللی انرژی (IEA)	$SPVEG$: تولید برق خورشیدی فتوولتائیک (گیگاوات ساعت)
مقالات بین المللی	$P2P$: طرح تجارت برق نظیر به نظیر (متغیر باینری) کشورهای دارای سیاست $P2P$ در سال های اجرا: ۱ کشورهای دارای سیاست $P2P$ در سال های عدم اجرا و کشورهای بدون سیاست $P2P$: ۰
ec.europa.eu eia.gov figure.nz statista.com globalpetrolprices.com	$EPrice$: متوسط قیمت سالانه برق (دلار به گیگاوات ساعت)
بانک جهانی ourworldindata.org	REO : سهم برق تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر (درصد)
بانک جهانی	PC : شاخص سطح توسعه اقتصادی همراه با وابستگی به انرژی تجدیدپذیر (استاندارد شده)
بانک جهانی	$Population$: جمعیت (نفر)
berkeleyearth.org	AAT : میانگین سالانه دما (سانتی گراد)
ourworldindata.org	SPP : قیمت مازول فتوولتائیک خورشیدی (دلار به گیگاوات)

¹ Johnstone et al., (2010)

بانک جهانی	ANNIPC: درآمد سرانه (دلار)
------------	----------------------------

منبع: یافته‌های پژوهش

باید خاطرنشان کرد در حالی که کشورهای بدون سیاست P2P به عنوان گروه کنترل برای مقایسه تطبیقی در نظر گرفته شده‌اند، کشورهای با سیاست P2P به دلیل اجرای موفق پروژه‌های تجارت برق نظیر به نظیر و دسترسی به داده‌های کافی انتخاب شده‌اند.

۵. تخمین مدل و تحلیل نتایج

۵-۱. برآورد مدل پژوهش

در جدول ۲، با استفاده از آماره‌های توصیفی، ویژگی‌های مهم متغیرهای مدل تحقیق ارائه شده است تا درک جامعی از ساختار داده‌ها و رفتار متغیرها پیش از تحلیل‌های پیشرفته‌تر فراهم شود. این اطلاعات به عنوان پایه‌ای برای تفسیر نتایج مدل‌سازی و ارزیابی صحت فرضیات تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲: آماره‌های توصیفی متغیرهای پژوهش

Tab. 2: Descriptive Statistics

متغیرها	تعداد مشاهدات	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	بیشینه
<i>SPVEG</i>	۲۴۰	۸/۹۰۴۷۴۶	۰/۴۰۴۷۴۴۸	۷/۸۱۳۳۰۵	۹/۶۸۱۶۵۴
<i>P2P</i>	۲۴۰	۰/۱۷۹۱۶۶۷	۰/۳۸۴۲۹۳۳	۰	۱
<i>REO</i>	۲۴۰	۳/۱۲۳۳۲۸	۰/۸۲۹۰۱۴۴	۱/۱۳۴۹۶۲	۴/۴۳۷۵۳۵
<i>EPrice</i>	۲۴۰	۱۲/۰۰۵۹۴	۰/۴۱۰۹۳۸۹	۱۰/۹۵۰۸۱	۱۲/۹۰۴۲۱
<i>PC</i>	۲۴۰	-۶/۲۹۹۹۹	۱/۳۷۵۵۹۲	-۳/۱۶۱۸۳۴	۲/۷۶۵۶۹۷
<i>Population</i>	۲۴۰	۳۷/۷۵۹۹۵	۱/۵۸۵۰۲۷	۱۵/۱۶۵۵۸	۳۱/۰۶۸۵۳
<i>AAT</i>	۲۴۰	۲/۳۸۶۵۶۲	۰/۴۳۹۸۲۷۳	۰/۷۸۳۹۰۱۵	۳/۱۴۰۶۹۸
<i>SPP</i>	۲۴۰	۲۱/۱۲۶۷۵	۱/۱۲۵۱۶۴	۱۹/۵۳۸۱	۲۲/۵۸۱۷۳
<i>ANNIPC</i>	۲۴۰	۱۰/۲۹۱۱۴	۰/۵۳۹۴۳۳	۸/۱۹۴۳۰۲	۱۱/۰۱۵۴۸

منبع: یافته‌های پژوهش

در تحلیل داده‌های سری زمانی و تابلویی، قبل از برآورد مدل، بررسی ویژگی‌های آماری متغیرها ضروری است. یکی از مهم‌ترین بررسی‌ها، آزمون ایستایی یا مانایی متغیرها با استفاده از آزمون ریشه واحد می‌باشد. این آزمون‌ها به منظور تشخیص وجود یا عدم وجود ریشه واحد در متغیرهای مورد مطالعه انجام می‌شوند تا از بروز مشکل رگرسیون کاذب در نتایج تخمین جلوگیری شود. برای بررسی ایستایی متغیرها از روش «ایم، پسران و شین» استفاده شده است. جدول ۳ نتایج این آزمون را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمون ریشه واحد

Tab. 3: Unit Root Test Results

متغیرها	مرتبه تفاضل	آماره آزمون IPS
<i>SPVEG</i>	۰	* ۳/۷۸۱۳

(۰/۹۹۹۹)		
-۱۲/۳۹۷۹ (۰/۰۰۰۰)	۱	$D(SPVEG)$
(۰/۰۰۰۰)	۰	$P2P$
۳/۳۵۴۳ (۰/۹۹۹۶)	۰	REO
-۱۴/۴۲۸۲ (۰/۰۰۰۰)	۱	$D(REO)$
۰/۰۴۷۶ (۰/۵۱۹۰)	۰	$EPrice$
-۹/۵۶۷۹ (۰/۰۰۰۰)	۱	$D(EPrice)$
-۲/۷۴۶۱ (۰/۰۰۰۳۰)	۰	PC
۱/۳۶۳۶ (۰/۹۱۳۷)	۰	$Population$
-۲/۲۱۱۷ (۰/۰۱۳۵)	۱	$D(Population)$
-۳/۴۵۰۵ (۰/۰۰۰۳)	۰	AAT
۳/۵۲۷۲ (۰/۹۹۹۸)	۰	SPP
-۵/۶۴۴۳ (۰/۰۰۰۰)	۱	$D(SPP)$
-۲/۷۵۰۶ (۰/۰۰۰۳۰)	۰	$ANNIPC$

* اعداد بالا ضرایب آماره آزمون مربوط به متغیرها و اعداد داخل پرانتز احتمال آن‌ها می‌باشد.

منبع: یافته‌های پژوهش

با در نظر گرفتن این‌که فرضیه صفر آزمون ایم، پسران و شین نشان‌دهنده نامانایی متغیرها است، احتمال پذیرش آماره این آزمون طبق جدول ۳ حاکی از آن است که فرضیه صفر مبنی بر نامانایی متغیرهای طرح تجارت نظیر به نظیر، شاخص سطح توسعه اقتصادی مربوط به انرژی تجدیدپذیر، میانگین سالانه دما و درآمد سرانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود و میانگین، واریانس و خودکوواریانس آن‌ها ثابت است. سایر متغیرها نیز با یک‌بار تفاضل‌گیری در سطح مانا می‌شوند.

از آن‌جا که نتایج حاصل از آزمون ریشه واحد در مورد ایستایی متغیرهای مدل یکسان نیستند، برای جلوگیری از بروز رگرسیون کاذب در تخمین‌ها، بررسی وجود رابطه هم‌انباشتگی میان متغیرها ضرورت دارد. به همین منظور، از آزمون هم‌انباشتگی «کائو»، که مبتنی بر روش انگل-گرنجر در چارچوب داده‌های پانلی است، استفاده می‌شود. فرضیه صفر این آزمون بر نبود رابطه تعادلی بلندمدت میان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل دلالت دارد. جدول ۴ نتایج آزمون هم‌انباشتگی را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج هم‌انباشتگی کائو

Tab. 4: Kao Cointegration Test Results

آماره آزمون	مدل پژوهش
Modified Dickey-Fuller t	-۱/۵۴۳۸ (۰/۰۶۱۳)
Dickey-Fuller t	-۱/۷۱۰۹ (۰/۰۴۳۵)
Augmented Dickey-Fuller t	-۶/۴۷۰۳ (۰/۰۰۰)
Unadjusted Modified Dickey-Fuller t	-۱/۷۸۸۸ (۰/۰۳۶۸)
Unadjusted Dickey-Fuller t	-۱/۸۲۸۳ (۰/۰۳۳۸)

منبع: یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۴، فرضیه صفر مبنی بر عدم وجود هم‌انباشتگی بین متغیرهای مدل رد می‌شود. این امر بیانگر وجود رابطه بلندمدت تعادلی میان متغیرهای الگو است. بنابراین، می‌توان اطمینان یافت که تخمین‌های ارائه‌شده با مشکل رگرسیون کاذب مواجه نبوده و روابط میان متغیرها از اعتبار آماری مناسبی برخوردارند.

در ادامه، معادله ۲ بر اساس مدل پنل دیتا برای ۱۰ کشور منتخب در ۲۴ دوره زمانی (۲۰۰۰ الی ۲۰۲۳) و با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته سیستمی مورد برآورد قرار گرفته است. نتایج حاصل از این برآورد، در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج حاصل از تخمین مدل پژوهش

Tab. 5: Estimation Results

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره z	سطح احتمال
$Ln(SPVEG_{i,t-1})$	۲/۰۷۱۲۴۶	۰/۴۰۱۸۱۲۳	۵/۱۵	۰/۰۰۰۰
$P2P_{it}$	۰/۰۸۴۱۸۲۸	۰/۰۲۶۸۶۹۳	۳/۱۳	۰/۰۰۲
$Ln(EPrice_{it})$	۰/۵۲۲۹۱۴۸	۰/۲۰۶۲۱۵۱	۲/۵۴	۰/۰۱۱
$Ln(REO_{it})$	-۰/۰۳۶۲۸۰۳	۰/۰۵۷۷۷۹۱	-۲/۲۳	۰/۰۲۶
$PC_{i,t}$	-۰/۱۱۰۳۹۸۵	۰/۰۴۰۴۸۲۶	-۲/۷۳	۰/۰۰۶
$Ln(Population_{it})$	۰/۰۹۷۷۳۹۹	۰/۰۴۲۰۷۲۲	۲/۳۲	۰/۰۲۰
$Ln(AAT_{it})$	۰/۲۵۴۰۸۶۴	۰/۱۰۵۰۶۵۵	۲/۴۲	۰/۰۱۶
$Ln(SPP_{it})$	۰/۰۵۳۰۴۱۳	۰/۰۲۹۱۴۹۳	۱/۸۲	۰/۰۶۹
$Ln(ANNIPC_{it})$	-۰/۳۳۰۳۳۹	۰/۰۹۸۶۲۶۹	-۳/۳۵	۰/۰۰۱

منبع: یافته‌های پژوهش

پس از برآورد مدل، انجام آزمون‌های تشخیصی برای تأیید صحت نتایج به‌دست آمده ضروری است. با توجه به استفاده از GMM، اعتبار شرایط گشتاوری مستلزم عدم وجود خودهم‌بستگی سریالی در جملات خطا می‌باشد. برای بررسی این موضوع، از آزمون خودهم‌بستگی آرلانو-باند استفاده می‌شود که شامل آزمون مرتبه اول (AR1) و مرتبه دوم (AR2) است. طبق این آزمون، برای تأیید صحت مدل، باید آماره خودهم‌بستگی مرتبه اول معنی‌دار

باشد (که نشان دهنده وجود خودهمبستگی طبیعی در سطوح متغیر وابسته است)، در حالی که آماره خودهمبستگی مرتبه دوم نباید معنی دار باشد (که عدم وجود خودهمبستگی در تفاضل ها را تأیید می کند). همچنین پیش از تخمین مدل لازم است که اعتبار متغیرهای ابزاری استفاده شده در مدل مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور از آزمون سارگان استفاده شده است. جدول ۶ نتایج آزمون های مذکور را نشان می دهد.

جدول ۶: آزمون های تشخیص اعتبار مدل

Tab. 6: Model Validation Tests

آزمون سارگان		آزمون خودهمبستگی آرلانو-باند			
		مرتبه اول (AR1)		مرتبه دوم (AR2)	
سطح احتمال	آماره کای-دو	سطح احتمال	آماره Z	سطح احتمال	آماره Z
۰/۱۵۱	۳/۷۷	۰/۴۱۷	-۰/۸۱	۰/۱۰	-۲/۵۶

منبع: یافته های پژوهش

نتایج جدول ۶ نشان می دهد که آماره $AR(1)$ برابر با $-۲/۵۶$ و مقدار احتمال آن $۰/۱$ است که معنادار بوده و مطابق انتظار، وجود خودهمبستگی مرتبه اول در تفاضلات اول را تأیید می کند. در مقابل، آماره $AR(2)$ برابر با $-۰/۸۱$ و مقدار احتمال آن $۰/۴۱۷$ است که غیرمعنادار بوده و نشان می دهد باقیمانده ها از خودهمبستگی مرتبه دوم رنج نمی برند. این نتیجه نشانه ای از صحت ساختار پویای مدل است. افزون بر این نتیجه آزمون سارگان، فرضیه صفر مبنی بر عدم همبستگی بین باقی مانده های مدل و متغیرهای ابزاری با سطح معنی داری $۰/۱۵۱$ می پذیرد. این نتیجه نشان می دهد که متغیرهای ابزاری مورد استفاده در برآورد مدل از شرایط اعتبار و درونزایی لازم برخوردار بوده و می توان به صحت نتایج حاصل از تخمین اطمینان داشت. به عبارت دیگر، عدم رد فرضیه صفر در این آزمون، مؤید این است که ابزارهای انتخابی با جمله خطای مدل همبستگی ندارند. بنابراین تخمین های به دست آمده قابل اعتماد هستند.

۲-۵. بحث و تحلیل

نتایج برآورد در جدول ۵ نشان می دهد که وقفه اول متغیر وابسته تولید برق فتوولتائیک در دوره گذشته، تأثیر مثبت و معناداری بر تولید برق خورشیدی در دوره جاری دارد. این یافته گواهی بر وجود پویایی در ساختار تولید انرژی خورشیدی است و نشان می دهد که رفتار گذشته تولید برق فتوولتائیک تا حد زیادی مسیر تولید در حال حاضر را تعیین می کند. این نتیجه از منظر سیاست گذاری، تأکیدی بر اهمیت تداوم و ثبات در برنامه های حمایتی و سرمایه گذاری های بلندمدت در حوزه انرژی های تجدیدپذیر است، چرا که آثار این اقدامات به مرور زمان انباشته شده و در دوره های آتی نیز تأثیرگذار باقی می ماند. همچنین این پویایی با ویژگی های تکنولوژی خورشیدی، از جمله هزینه های اولیه بالا، طول عمر سیستم ها و بازدهی افزایشی در گذر زمان، کاملاً سازگار است. متغیر باینری P2P که نشانگر اجرای سیاست تجارت برق کاربر به کاربر است، نیز تأثیر مثبت و معناداری بر تولید برق فتوولتائیک خورشیدی داشته است. این نتیجه حاکی از اثبات فرضیه اول پژوهش حاضر است. اجرای سیاست مزبور در کشورهایی که آن را به کار بسته اند، توانسته انگیزه های اقتصادی، اجتماعی و فناورانه لازم برای گسترش تولید

محلی انرژی خورشیدی را فراهم آورد. در واقع، تجارت برق نظیر به نظیر با فراهم‌سازی امکان فروش مازاد انرژی خورشیدی به دیگر مصرف‌کنندگان و دریافت قیمت توافقی یا رقابتی، موجب افزایش جذابیت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های خورشیدی در سطح خانوار و جامعه شده است. از منظر نظری، این یافته با مبانی اقتصاد رفتاری و تئوری نوآوری‌پذیری سازگار است، چراکه پاداش مالی مستقیم برای تولید انرژی پاک می‌تواند کنش‌گران خرد را به مشارکت در شبکه‌های انرژی تجدیدپذیر تشویق کند. افزون بر این، P2P با کاهش وابستگی به شبکه برق مرکزی و توزیع بار مصرف، به پایداری سیستم برق نیز کمک می‌کند و همین پایداری به نوبه خود، زمینه‌ای برای افزایش مقیاس تولید برق خورشیدی در سطح محلی را فراهم می‌آورد.

در راستای تأیید فرضیه دوم، متغیر قیمت برق (EPrice) نیز رابطه مثبت و معناداری با تولید برق فتوولتائیک دارد. افزایش قیمت برق شبکه باعث می‌شود مصرف‌کنندگان، به‌ویژه در بخش خانگی و تجاری، برای کاهش هزینه‌های انرژی خود به سرمایه‌گذاری در سیستم‌های خورشیدی غیرمتمرکز ترغیب شوند. این نتیجه با نظریه رفتار عقلایی مصرف‌کننده سازگار است؛ به‌گونه‌ای که مصرف‌کنندگان در مواجهه با قیمت بالاتر، به سمت جایگزین‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر و پایدارتر در بلندمدت مانند پنل‌های خورشیدی حرکت می‌کنند. افزون بر این، در بسیاری از کشورهایی که سیاست P2P نیز اجرا می‌شود، قیمت بالای برق شبکه می‌تواند بازگشت سرمایه سیستم‌های خورشیدی را تسریع کند و انگیزه‌های اقتصادی برای تولید برق محلی را تقویت نماید. این یافته هم‌راستا با مطالعاتی مانند «چان» و «کیسو»^۱ (۲۰۱۷) و «آرنولد» و همکاران^۲ (۲۰۲۲) است که نشان داده‌اند افزایش تعرفه‌های برق خانگی یکی از محرک‌های اصلی در گسترش بازار پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در کشورهای با تقاضای و بار پیک فصلی بالا به‌شمار می‌رود.

علاوه بر این یافته‌های مدل نشان می‌دهد که متغیر سهم برق تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر از کل برق تولیدی (REO) تأثیر آماری معناداری بر تولید برق خورشیدی فتوولتائیک (SPVEG) ندارد. این عدم معناداری از نظر علمی قابل توجیه است، زیرا تولید برق تجدیدپذیر در بسیاری از کشورها عمدتاً متکی بر منابعی مانند نیروگاه‌های برقی یا توربین‌های بادی است که زیرساخت‌های بزرگ‌مقیاس و متمرکز دارند، در حالی که برق خورشیدی فتوولتائیک معمولاً به‌صورت غیرمتمرکز در سطح خانوار و نهادهای کوچک تولید می‌شود. از این‌رو، افزایش تولید کلی برق تجدیدپذیر لزوماً به معنای افزایش سهم تولید برق خورشیدی نیست و حتی در برخی موارد ممکن است به دلیل سیاست‌های اولویت‌دار برای سایر منابع، موجب رانده‌شدن منابع سرمایه‌ای از فتوولتائیک به سمت بادی یا آبی شود. به بیان دیگر، اثر REO بر SPVEG تنها در صورتی مثبت و معنادار خواهد بود که سهم فتوولتائیک در ترکیب تجدیدپذیرها بالا باشد یا حمایت‌های سیاستی به‌طور خاص معطوف به انرژی خورشیدی باشد. این نتیجه با مطالعات آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۲) نیز هم‌راستا است که نشان می‌دهد ساختار درون‌بخشی منابع تجدیدپذیر در تحلیل‌های تجربی بسیار اهمیت دارد و باید تمایز بین انواع آن‌ها لحاظ شود.

شاخص ترکیبی PC (ترکیب GDP و هزینه‌های عمومی R&D انرژی) با ضریب ۰/۱۱ و معناداری ۰/۰۰۶ حاکی از آن است که کشورهایی با ظرفیت اقتصادی بالا و سیاست‌های پژوهش‌محور، توان توسعه بیشتری در

¹ Chan & Kiso (2017)

² Arnold et al. (2022)

تولید خورشیدی دارند. همچنین، متغیرهای جمعیت (Population) و میانگین دما (AAT) نیز معنادار بوده و تأثیر مثبت آن‌ها نشان می‌دهد که جمعیت بیشتر و شرایط آب‌وهوایی گرم‌تر، محرک‌های مهمی برای نصب پنل خورشیدی هستند. ضریب متغیر قیمت پنل خورشیدی (SPP) نیز برابر با ۰/۰۵ است که در سطح ۱۰٪ معنادار است. با این حال، بررسی روند واقعی داده‌ها نشان می‌دهد که رابطه معکوسی بین قیمت پنل‌ها و تولید برق خورشیدی وجود دارد. از این‌رو، نمی‌توان به علامت و معنی‌داری این ضریب در مدل اطمینان کامل داشت و احتمال تحلیل نادرست از رابطه بین دو متغیر نیز وجود خواهد داشت. در نهایت درآمد سرانه (ANNIPC) با ضریب منفی و معنادار می‌تواند بیانگر این باشد که در میان کشورهای مورد بررسی، رشد سریع‌تر درآمد سرانه لزوماً منجر به رشد متناسب تولید برق خورشیدی فتوولتائیک نشده است. بر این اساس، در برخی از کشورهای دارای رشد اقتصادی بالا، توسعه سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر یا تفاوت در ساختار بازار برق احتمالاً منجر به محدود ماندن سهم تولید برق فتوولتائیک گردیده است. این نتایج نشان‌دهنده آن است که افزایش درآمد به‌تنهایی شرط کافی برای توسعه انرژی خورشیدی محسوب نمی‌شود و عوامل نهادی از قبیل سیاست‌های حمایتی، مشوق‌های مالی و زیرساخت‌های نهادی نقش تعیین‌کننده‌ای در این فرآیند ایفا می‌نمایند. لازم به ذکر است که این رابطه صرفاً بر اساس الگوی مشاهده‌شده در داده‌های دوره مورد مطالعه استنتاج شده و بیانگر وجود رابطه علی قطعی نمی‌باشد. به‌صورت کلی این یافته‌ها به‌خوبی اهمیت عوامل نهادی، اقتصادی و سیاستی را در گسترش انرژی خورشیدی فتوولتائیک بازتاب می‌دهند و با فرضیه سوم تحقیق مبنی بر اهمیت این متغیرها در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تولید انرژی برق، هم‌راستا است.

۶. نتیجه‌گیری

تجارت برق نظیر به نظیر (P2P) سازوکاری نوآورانه در بازارهای انرژی است که به مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهد تا مازاد برق تولیدی خود -معمولاً از منابع تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی- را مستقیماً به سایر مصرف‌کنندگان بدون واسطه سنتی مانند شرکت‌های توزیع برق، بفروشند. این طرح که بر پایه فناوری‌های دیجیتال مانند بلاک‌چین، قراردادهای هوشمند و زیرساخت‌های اینترنت اشیاء (IoT) است، بستری ایجاد می‌کند تا تولید و مصرف برق در سطح محلی، شفاف، سریع و بر مبنای توافق مستقیم میان طرفین انجام گیرد. سازوکار P2P نه تنها به توزیع درآمد در میان تولیدکنندگان خرد کمک می‌کند، بلکه موجب کاهش فشار بر شبکه برق سراسری، افزایش کارایی انرژی و تقویت تاب‌آوری شبکه برق در شرایط پیک مصرف یا بحران‌های زیست‌محیطی می‌شود. در این الگو، مصرف‌کننده به تولیدکننده-مصرف‌کننده تبدیل می‌شود و نقش فعالی در ساختار جدید بازار انرژی ایفا می‌کند. بر همین اساس در این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های تابلویی ۱۰ کشور منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ م. و به‌کارگیری روش GMM سیستمی، تأثیر اجرای سیاست تجارت برق P2P بر رشد تولید برق خورشیدی فتوولتائیک مورد تحلیل تجربی قرار گرفت. یافته‌های تحقیق نشان داد که اجرای این سیاست، به‌طور معناداری موجب افزایش تولید برق خورشیدی در کشورهای مجری این طرح شده است. این موضوع حاکی از آن است که توسعه مدل‌های غیرمتمرکز تولید انرژی برق و مشارکت فعال مصرف‌کنندگان-تولیدکنندگان، می‌تواند یکی از ابزارهای کلیدی برای مقابله با ناترازی برق و ارتقای تاب‌آوری شبکه‌های انرژی باشد.

افزون بر این، نتایج نشان داد که افزایش قیمت برق، جمعیت بالا و شرایط اقلیمی (دمای بالاتر) از جمله عوامل مؤثر بر گرایش به نصب سیستم‌های خورشیدی هستند. این امر بر نقش مهم سازوکارهای انگیزشی اقتصادی و فاکتورهای جغرافیایی در انتخاب مسیرهای پایداری انرژی تأکید دارد. همچنین ضریب مثبت متغیر ترکیبی توسعه فناوری (PC) حاکی از آن است که توان فناوریانه و تمرکز بر R&D در حوزه انرژی، پیش‌ران مهمی برای موفقیت سیاست‌های انرژی‌های پاک است. در عین حال، رابطه مثبت بین قیمت پنل خورشیدی و تولید برق خورشیدی نیز نشان‌دهنده بالغ‌شدن بازار و حرکت آن از «قیمت‌محوری» به سمت «ارزش‌محوری» است؛ به گونه‌ای که حتی با افزایش هزینه، مصرف‌کنندگان با اعتماد به تکنولوژی، به سرمایه‌گذاری ادامه می‌دهند.

بنابراین سیاست تجارت برق P2P نه تنها در سطح نظری، بلکه در عمل نیز توانسته به‌طور معناداری در افزایش تولید برق خورشیدی و تقویت زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر نقش آفرینی کند. کشورهایی که این سیاست را اجرا کرده‌اند، با فعال‌سازی مشارکت مصرف‌کنندگان در تولید انرژی، نوعی تحول در مدل‌های سنتی عرضه و تقاضا برق ایجاد کرده‌اند که به کاهش وابستگی به شبکه برق متمرکز و ارتقای تاب‌آوری سیستم کمک کرده است. از این‌رو، چنین سیاستی می‌تواند به عنوان یک تجربه موفق بین‌المللی، مبنایی برای اصلاح ساختار عرضه انرژی در کشورهایی مانند ایران باشد که با چالش ناترازی برق، به‌ویژه در فصل تابستان، مواجه‌اند.

با توجه به نتایج مدل تجربی، اجرای مؤثر سیاست برق P2P در ایران مستلزم ایجاد زیرساخت‌های حقوقی، فنی و اقتصادی لازم است. این امر نیازمند تدوین قوانین روشن برای تجارت برق بین مشترکین، تقویت زیرساخت‌های دیجیتال، مدیریت هوشمند شبکه و فراهم‌سازی مشوق‌های مالی برای نصب سامانه‌های خورشیدی در سطوح خانگی و تجاری است. همچنین آموزش عمومی و ارتقای سواد انرژی، به‌ویژه در مناطق پرمصرف، می‌تواند زمینه‌ساز پذیرش اجتماعی این سیاست باشد. در کنار آن، بازنگری در نظام قیمت‌گذاری برق و ایجاد شفافیت در تعرفه‌ها، به همراه توسعه بازارهای محلی انرژی، می‌تواند بستری کارآمد برای تسریع گذار ساختار تأمین انرژی ایران به سمت الگوی پایدار و غیرمتمرکز تأمین انرژی فراهم آورد.

سیاسگزاری

نویسندگان از تمام مشاوران علمی این مقاله قدردانی می‌کنند.

درصد مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در تدوین و نگارش این اثر مشارکت داشتند. همه نویسندگان محتوای مقاله را تأیید کرده‌اند و در مورد تمام جنبه‌های کار توافق داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان با رعایت اصول اخلاقی انتشار در ارجاع‌دهی، نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

کتابنامه

- امینی، ملیحه، (۱۳۹۹). «اثر خطوط انتقال برق بر محیط زیست شهری و انسان». *انسان و محیط زیست*، ۱۸(۱): ۴۹-۵۶. <https://sanad.iau.ir/fa/Article/847685>
- باستان، مهدی؛ و شکوری گنجوی، حامد، (۱۳۹۸). «ارزیابی مبتنی بر مدل سیاست های کاهش وابستگی به انرژی: مدلی بر اساس رویکرد پویایی شناسی سیستم». *چشم/انداز مدیریت صنعتی*، ۹(۲): ۸۱-۱۰۶. <https://doi.org/10.52547/jimp.9.2.81>
- پوردربانی، راضیه، (۱۳۹۹). «بررسی وضعیت فعلی و تقاضاهای آینده انرژی تجدیدپذیر در ایران و بازیابی آن». *نشریه انرژی های تجدیدپذیر و نو*، ۷(۱): ۱۱۸-۱۲۴. https://www.jrenew.ir/article_93859.html
- رادسر، مصطفی؛ کاظمی، عالییه؛ مهرگان، محمدرضا؛ و رضوی حاجی آقا، سیدحسین، (۱۴۰۰). «طراحی یک الگوریتم بر پایه تحلیل پوششی داده های شبکه ای با شاخص های خوب و بد به منظور ارزیابی صنعت برق ایران». *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۱): ۲۶-۱. <https://sid.ir/paper/964607/fa>
- مهدی زاده راینی، محمدجواد؛ ضیایی، سامان؛ و احمدپوربرازجانی، محمود، (۱۳۹۹). «بررسی رابطه بین تولید ناخالص داخلی واقعی، مصرف انرژی، توسعه مالی، درجه باز بودن اقتصاد و شهرنشینی با تخریب محیط زیست در ایران». *مطالعات علوم محیط زیست*، ۵(۱): ۲۲۲۰-۲۲۳۱. https://www.jess.ir/article_102504.html
- مهرجواپیرانی، مهتاب؛ فلاحی، محمدعلی؛ و صالح نیا، نرگس، (۱۴۰۴). «نقش نرخ کاربری سرمایه در ارزیابی عملکرد سیاست های زیست محیطی در ایران». *فصلنامه مطالعات اقتصادی کاربردی ایران*، ۱۴(۵۳): ۴۳-۷۷. <https://doi.org/10.22084/aes.2024.29742.3715>
- موسوی رینه، سیده مهسا؛ و ساداتی نژاد، سید جواد، (۱۳۹۹). «محاسبه هزینه های محیط زیستی تولید برق (مطالعه موردی نیروگاه های حرارتی شهر تهران)». *اقتصاد و برنامه ریزی شهری*، ۱(۴): ۱۹۸-۲۰۵. <https://doi.org/10.22034/UE.2020.09.04.01>
- نوروززاده، عباس؛ موغلی، مرضیه؛ و خرم بخت، احمدعلی، (۱۴۰۰). «بررسی تاثیر زیست محیطی و اجتماعی توسعه صنعتی (مطالعه موردی: شهر تهران)». *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۳(۵): ۱۱۲-۱۲۳. <https://doi.org/10.30495/jest.2021.50804.4991>
- نیک نقش، ابراهیم؛ شجاع نقی، غلام؛ ابری، امیر؛ و موحدی، محمد مهدی، (۱۳۹۸). «بهره وری کل انرژی و عوامل موثر بر آن (صنایع تولیدی ایران)». *مدلسازی اقتصادی*، ۱۳(۴۸): ۴۵-۶۸. <https://sanad.iau.ir/fa/Article/995467?FullText=FullText>
- نیکزادالحسینی، سیدمهدی؛ و صادقی شاهدانی، مهدی، (۱۴۰۲). «برآورد ارزش اقتصادی نهاده انرژی برق در صنایع انرژی بر ایران». *مطالعات اقتصادی کاربردی ایران*، ۴۸(۱۲): ۱۳۷-۱۶۰. <https://doi.org/10.22084/aes.2023.28204.3622>

References

- Adams, S., Brown, D., Cárdenas Álvarez, J. P., Chitchyan, R., Fell, M. J., Hahnel, U. J., ... & Watson, N., (2021). "Social and economic value in emerging decentralized energy business models: A critical review". *Energies*, 14(23): 7864. <https://doi.org/10.3390/en14237864>
- Ahlert, K. H. & Dinther, C. V., (2009). *Estimating economic benefits of electricity storage at the end consumer level*. <https://aisel.aisnet.org/wi2009/143>
- Ali, L., Azim, M. I., Peters, J., Bhandari, V., Menon, A., Tiwari, V., ... & Muyeen, S. M. (2022). "Blockchain-based local energy market enabling P2P trading: An Australian collated case study on energy users, retailers and utilities". *IEEE Access*, 10: 124429-124447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3224936>
- Arellano, M. & Bond, A. S., (1991). "Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations". *The Review of Economic Studies*, 58: 277 -297. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Arnold, F., Jeddi, S. & Sitzmann, A., (2022). "How prices guide investment decisions under net purchasing—an empirical analysis on the impact of network tariffs on residential PV". *Energy Economics*, 112: 106177. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106177>
- Australian Renewable Energy Agency (2017). *Peer-to-peer distributed ledger technology assessment*. Available at: ARENA Website. <https://arena.gov.au/>
- Baltagi, B. H., (2008). *Econometric analysis of panel data*. Rohn Wiley. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53953-5>
- Bassey, K. E., Rajput, S. A. & Oyewale, K., (2024). "Peer-to-peer energy trading: Innovations, regulatory challenges, and the future of decentralized energy systems". *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24: 172-186. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3324>
- Bhatti, H. J. & Danilovic, M., (2018). "Making the world more sustainable: enabling localized energy generation and distribution on decentralized smart grid systems". *World Journal of Engineering and Technology*, 6(2): 350-382. <https://10.4236/wjet.2018.62022>
- Bigerna, S., Bollino, C. A. & Micheli, S., (2016). "Smart grids and consumer attitude toward sustainable development". *Journal of Promotion Management*, 22(4): 573-587. <https://doi.org/10.1080/10496491.2016.1190551>
- Blundell, R. & Bond, S., (1998). "Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models". *Journal of econometrics*, 87(1): 115-143. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(98\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(98)00009-8)
- Boumaiza, A. & Sanfilippo, A., (2023). "Revolutionizing Energy Markets with Distributed Energy Generation and Blockchain Technology: A Case Study of Agent-Based Modeling and GIS in Education City Community Housing, Qatar". In: *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-4)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON51785.2023.10311655>
- Brandoni, C., Marchetti, B., Ciriachi, G., Polonara, F. & Leporini, M., (2016). "The impact of renewable energy systems on local sustainability". *International Journal of Productivity and Quality Management*, 18(2-3): 385-402. <https://doi.org/10.1504/IJPM.2016.076716>
- Brown, M. A. & Zhou, S., (2019). "Smart-grid policies: an international review". *Advances in Energy Systems: The Large-scale renewable energy integration challenge*, 127-147. <https://doi.org/10.1002/wene.53>

- Brown, M. A., Zhou, S. & Ahmadi, M., (2018). "Smart grid governance: An international review of evolving policy issues and innovations". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(5): e290. <https://doi.org/10.1002/wene.290>
- Bakar, A. L., Hamza, M. F., Ayub, S., Abobaker, A. K., Modu, B., Mohseni, S., ... & Idakwo, H. O., (2023). "Peer-to-peer electricity trading: A systematic review on current developments and perspectives". *Renewable Energy Focus*, 44: 317-333. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.008>
- Chan, H. R. & Kiso, T., (2017). "The effect of electricity prices on residential solar photovoltaic panel adoption: Fukushima as a natural experiment". *Available at SSRN* 2918807. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2918807>
- Chathuranga, D. W., Mudiyanse, W. & Hasan, K. N., (2022). "Peer-to-peer energy trading: Existing algorithms, applications, platforms, challenges and opportunities". In: *2022 IEEE PES 14th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* (pp. 1-6). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/APPEEC53445.2022.10072151>
- Coy, D., Malekpour, S. & Saeri, A. K., (2022). "From little things, big things grow: Facilitating community empowerment in the energy transformation". *Energy Research & Social Science*, 84: 102353. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102353>
- Crampes, C. & Léautier, T. O., (2021). "White certificates and competition". *Competition Law Review*, (1-2021): 66-74. <https://hal.science/hal-03164801>
- Deshmukh, A. (2009). "The Role of Decentralized Renewable Energy for Rural Electrification". Maharashtra case study, India. <https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/1511114>
- Deshwar, C. S., Sharma, R., Gupta, A. K. & Singh, M. S., (2020). "Assessment and Scope of Decentralised Power Generation Using Renewable Energy Resources". In: *Proceedings of the 4th International Conference: Innovative Advancement in Engineering & Technology (IAET)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3554854>
- Espey, J. A. & Espey, M., (2004). "Turning on the lights: A meta-analysis of residential electricity demand elasticities". *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 36(1): 65-81. <https://doi.org/10.1017/S1074070800021866>
- Evens, M., Ercoli, P. & Arteconi, A., (2023). "Blockchain-Enabled Microgrids: Toward Peer-to-Peer Energy Trading and Flexible Demand Management". *Energies*, 16(18): 6741. <https://doi.org/10.3390/en16186741>
- Georgarakis, E., Bauwens, T., Pronk, A. M. & AlSkaif, T., (2021). "Keep it green, simple and socially fair: A choice experiment on prosumers' preferences for peer-to-peer electricity trading in the Netherlands". *Energy policy*, 159: 112615. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112615>
- Gorbacheva, A., Watson, N., Schneiders, A., Shipworth, D. & Fell, M. J., (2024). "Defining characteristics of peer-to-peer energy trading, transactive energy, and community self-consumption: A review of literature and expert perspectives". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202: 114672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114672>
- Gutiérrez, S. M., Hernández, J. L., Navarro, A. & Viruega, R., (2021). "Energy Trading Between Prosumers Based on Blockchain Technology". In: *International Congress on Blockchain and Applications* (pp. 24-33). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86162-9_3
- International Energy Agency (IEA), (2022), Renewables (2022), IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, Licence: CC BY 4.0

- International Energy Agency (IEA), (2022). Trends in PV Applications. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/PVPS_Trend_Report_2022.pdf.
- Irena, (2022), Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
- Jena, M. C., Mishra, S. K. & Moharana, H. S., (2024). “Environmental impact of conventional manufacturing, green manufacturing initiatives to mitigate the impact and enhancing sustainability”. *Environmental Claims Journal*, 36(4): 485-504. <https://doi.org/10.1080/10406026.2024.2437478>
- Johnstone, N., Haščič, I. & Popp, D. (2010). “Renewable energy policies and technological innovation: evidence based on patent counts”. *Environmental and resource economics*, 45, 133-155. <http://dx.doi.org/10.1007/s10640-017-0176-x>.
- Junlakarn, S., Kokchang, P. & Audomvongseree, K., (2022). “Drivers and Challenges of Peer-to-Peer Energy Trading Development in Thailand”. *Energies*, 15(3): 1229. <https://doi.org/10.3390/en15031229>
- Karami, M. & Madlener, R., (2022). “Business models for peer-to-peer energy trading in Germany based on households’ beliefs and preferences”. *Applied Energy*, 306: 118053. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118053>
- Karduri, R. K. R. & Ananth, C., (2023). “The Economics of Transitioning to Renewable Energy Sources”. *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST)*, 6(2): 2456-5717. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4637803>.
- Karthik, P. K. & Anand, R., (2020). “Energy trading in microgrids using blockchain technology”. In: *2020 4th international conference on intelligent computing and control systems (ICICCS)* (pp. 884-888). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICICCS48265.2020.9121050>
- Kiehbaddroudzehad, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Rosen, M. A., Gupta, V. K., Peng, W., Tabatabaei, M. & Aghbashlo, M., (2023). “The role of energy security and resilience in the sustainability of green microgrids: Paving the way to sustainable and clean generation”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60: 103485. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103485>
- Lezama, F., Soares, J., Hernandez-Leal, P., Kaisers, M., Pinto, T. & Vale, Z., (2018). “Local energy markets: Paving the path toward fully transactive energy systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(5): 4081-4088. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>
- Löbbe, S., Hackbarth, A., Stillahn, T., Pfeiffer, L. & Rohbogner, G., (2020). “Customer participation in P2P trading: a German energy community case study”. In: *Behind and beyond the Meter* (pp. 83-104). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819951-0.00004-9>
- Long, C., Wu, J., Zhang, C., Thomas, L., Cheng, M. & Jenkins, N., (2017). “Peer-to-peer energy trading in a community microgrid”. In: *2017 IEEE power & energy society general meeting* (pp. 1-5). *IEEE*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.010>
- Long, C., Zhou, Y. & Wu, J., (2019). “A game theoretic approach for peer-to-peer energy trading”. *Energy Procedia*, 159: 454-459. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.075>

- López González, D. M. & Garcia Rendon, J., (2022). "Opportunities and challenges of mainstreaming distributed energy resources towards the transition to more efficient and resilient energy markets". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157: 112018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112018>
- Marsden, J., (2011). "Distributed generation systems: A new paradigm for sustainable energy". In: *2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)* (pp. 1-4). IEEE. <http://doi.org/10.1109/GREEN.2011.5754858>
- Medvedkina, Y. A. & Khodochenko, A. V., (2020). "Renewable energy and their impact on environmental pollution in the context of globalization". In: *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271508>
- Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L. & Weinhardt, C., (2018). "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid". *Applied energy*, 210: 870-880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>
- Mohandes, N., Bayhan, S. & Sanfilippo, A., (2024). "Assessing the Reliability of a Peer-to-Peer Trading Market Model Across Diverse Datasets". In: *2024 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SGRE59715.2024.10428913>
- Mujeeb, A., Hong, X. & Wang, P., (2019). "Analysis of peer-to-peer (P2P) electricity market and piclo's local matching trading platform in UK". In: *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 619-624). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EI247390.2019.9061733>
- Mukherjee, S. & Nateghi, R., (2017). "Climate sensitivity of end-use electricity consumption in the built environment: an application to the state of Florida, United States". *Energy*, 128: 688-700. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.034>
- Murdock, H. E., Gibb, D., Andre, T., Sawin, J. L., Brown, A., Ranalder, L., ... & Brumer, L., (2021). "Renewables 2021-global status report". <https://www.earthisland.org/journal/index.php/articles/entry/global-renewable-energy>
- Neves, D., Scott, I. & Silva, C. A., (2020). "Peer-to-peer energy trading potential: An assessment for the residential sector under different technology and tariff availabilities". *Energy*, 205: 118023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118023>
- Obregon, L., Valencia, G. & Duarte, J., (2019). "Study on the applicability of sustainable development policies in electricity generation systems in Colombia". *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(6): 492-502. <http://orcid.org/0000-0001-7345-9590>
- Omer, A. M., (2012). "Built environment: Relating the benefits of renewable energy technologies". *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 5: 561-575. <http://doi.org/10.15282/ijame.5.2012.3.0044>
- Oniemola, P. K. (2015). "Powering Nigeria through renewable electricity investments: legal framework for progressive realization". *Journal of Sustainable Development Law and Policy (The)*, 6(1): 83-108. <http://doi.org/10.4314/jsdlp.v6i1.4>
- Ozturk, I., (2010). "A literature survey on energy-growth nexus". *Energy policy*, 38(1): 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.024>
- Pena-Bello, A., Parra, D., Herberz, M., Tiefenbeck, V., Patel, M. & Hahnel, U., (2021). "Empowering prosumers to trade renewable energy can benefit the individual, the community, and the grid". <http://doi.org/10.21203/rs.3.rs-234650/v1>

- Raffaele D. & Bolwerk V., (2023). "Peer to peer energy trading". <https://www.deloitte.com>
- Roodman, D., (2009). "A note on the theme of too many instruments". *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, 71(1): 135-158. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00542.x>
- Roy, A., Bruce, A. & MacGill, I., (2016). "The potential value of peer-to-peer energy trading in the Australian national electricity market". In: *Asia-pacific solar research conference*. <https://www.ceem.unsw.edu.au/sites/default/files/documents/Potential-Value-Peer-To-Peer.pdf>
- Sabadini, F. & Madlener, R., (2021). "The economic potential of grid defection of energy prosumer households in Germany". *Advances in Applied Energy*, 4: 100075. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100075>
- Sadowsky, P., (2009). "Renewable energy consumption and income in emerging economies". *Energy policy*, 37(10): 4021-4028. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.003>
- Safarzadeh, S., Hafezalkotob, A. & Jafari, H., (2022). "Energy supply chain empowerment through tradable green and white certificates: A pathway to sustainable energy generation". *Applied Energy*, 323: 119601. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119601>
- Sanseverino, E. R., Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Zizzo, G. & Ippolito, M., (2017). "The blockchain in microgrids for transacting energy and attributing losses". In: *2017 IEEE international conference on Internet of Things (iThings) and IEEE green computing and communications (GreenCom) and IEEE cyber, physical and social computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) (pp. 925-930)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2017.142>
- Saraiva, J. T. & Metz, D., (2016). "Economics of energy storage in a residential consumer context". In: *13th International Conference on the European Energy Market*. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521204>
- Shu, S., Wang, Z., Jiang, T., Zhang, Z. & Chen, Y., (2023). "Research on the Peer-to-Peer Market Transaction Mechanism of the Future Energy Systems". In: *2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC) (pp. 375-381)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PSGEC58411.2023.10255982>
- Sidqi, Y., Hermann, M., Egli, A. & Hegner, L., (2023). "Peer-to-Peer Trading in Local Energy Communities for RES Uptake: A Socio-Economic Study". In: *2023 IEEE PES/IAS PowerAfrica (pp. 1-5)*. IEEE. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113442>
- Soto, E. A., Bosman, L. B., Wollega, E. & Leon-Salas, W. D., (2021). "Peer-to-peer energy trading: A review of the literature". *Applied Energy*, 283: 116268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268>
- Tushar, W., Saha, T. K., Yuen, C., Smith, D. & Poor, H. V., (2020). "Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview". *IEEE transactions on smart grid*, 11(4): 3185-3200. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657>
- Uzorka, A., Olatide Olaniyan, A. & Olubusayo, V.F., (2024). "Engaging Communities in Renewable Energy Projects for Sustainable Development". *Journal of Applied Science, Information and Computing*. <https://doi.org/10.59568/JASIC-2023-4-2-06>

- Van Der Waal, E. C., (2020). "Local impact of community renewable energy: A case study of an Orcadian community-led wind scheme". *Energy Policy*, 138: 111193. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111193>
- Werner, C., Breyer, C., Gerlach, A. & Beckel, O., (2012). "Photovoltaic with energy storage: An overview on economics, system design and politics". In: *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Frankfurt*. <https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-6CV.3.32>
- Yang, B., Liu, S., Gaterell, M. & Wang, Y., (2019). "Smart metering and systems for low-energy households: challenges, issues and benefits". *Advances in Building Energy Research*, 13(1): 80-100. <https://doi.org/10.1080/17512549.2017.1354782>