Economic Research and Perspectives

Original Research Article/ Vol.26, No.1, 2026, pp: 69-106

https://dx.doi.org/ 10.48311/ecor.2025.27938

Assessing the Impact of Residential Building Retrofit Subsidies on Energy Efficiency in Shiraz: An Agent-Based Modeling Approach

Zahra Mahzoon [1], Zahra Dehghan Shabani [2], Karim Eslamloueyan [3] Shekoofeh Farahmand [4]

1. Ph.D Candidate in Economics, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: zahramahzoon.zm@gmail.com
2. Associate Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. (Corresponding Author) Email: zdehghan@shirazu.ac.ir
3. Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: keslamlo@rose.shirazu.ac.ir
4. Associate Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: Sh.farahmand@ase.ui.ac.ir

Abstract

The residential sector in Iran accounts for approximately 30% of the country's total final energy consumption, making it the largest energy-consuming sector. This highlights the sector's low energy efficiency. To address this issue, the present study examines the impact of an incentive-based subsidy policy on improving energy efficiency in residential buildings in Shiraz, using an agent-based modeling (ABM) approach. The primary objective is to develop a strategy that encourages building owners to retrofit their properties through subsidies, balancing governmental interests and owner satisfaction while minimizing potential conflicts. In this research, the government, building owners, and residential buildings are modeled as key agents. The decision-making behaviors of the government and owners are simulated using principal-agent theory, and the subsidy policy is optimized accordingly. Simulation results for the period 2021–2031 indicate that the optimized subsidy policy reduces energy consumption by 22.2% and enhances energy efficiency by 22.8% in retrofitted residential buildings. Furthermore, assuming a 10% annual increase in energy prices and conducting sensitivity analyses on five key parameters—homeownership rate, retrofitting demand rate, owner cost coefficient, economic benefit coefficient, and environmental benefit coefficient—the study finds that energy efficiency improvements are inversely related to owner costs but positively correlated with energy prices, homeownership rates, retrofitting needs, and economic and environmental benefits. These findings can inform the design of more effective energy optimization policies for the residential sectorr.

Article information

Review History:
Received: jan. 24, 2025
Revised: feb. 02, 2025
Accepted: feb. 12, 2025
Published online: des.07, 2025

Keywords:
Agent-Based Modeling (ABM)
Subsidy Policy
Energy Efficiency
Shiraz

JEL Classification:
R20, H2, Q48

Corresponding Author:
zdehghan@shirazu.ac.ir

Copyright© 2025, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

Economic Research and Perspectives
Original Research Article/ Vol.26, No.1, 2026, pp: 69-106

Aim and Introduction:

Observations of energy consumption in both developed and developing countries reveal a gap between optimal and actual energy use, known as the energy efficiency gap. This issue has gained significant attention in recent years due to the growing global energy crisis. One of the main contributors to this gap is the presence of market barriers to energy efficiency, which can be divided into energy market barriers and market failures. Market barriers refer to factors that hinder improvements in energy efficiency, such as the low prioritization of energy issues, limited access to capital, and imperfect energy-efficiency markets. Market failures, including incentive misalignment, information asymmetry, externalities, and unpriced public goods, further restrict efficient energy use.

In the context of energy efficiency, market failures often involve incentive misalignment and information asymmetry—core aspects of the principal-agent problem. Incentive misalignment occurs when contracting parties pursue conflicting objectives, whereas information asymmetry arises when parties possess unequal levels of relevant information. Numerous studies have examined the relationship between principal-agent theory and energy efficiency, demonstrating that insufficient investment in energy efficiency can often be explained within this framework.

Market failures necessitate government intervention because they lead to inefficient resource allocation. According to neoclassical economics, addressing these failures can improve Pareto efficiency. In Iran, the residential sector accounts for approximately 30% of total final energy consumption, with natural gas and electricity serving as the dominant energy carriers. The residential and commercial sectors together contribute around 22% of total CO emissions, with natural gas being the primary source. Given these figures, enhancing energy efficiency in residential buildings is essential to reducing overall energy consumption and greenhouse gas emissions.

Globally, governments have implemented various measures to improve building energy efficiency, including financial incentives, regulatory frameworks, and assessment-based policies. However, a persistent challenge in policy implementation lies in the differing objectives and information levels between governments and building owners. While governments aim to maximize social welfare, building owners prioritize personal utility, creating potential conflicts of interest. To mitigate this issue, governments must design effective policies that incentivize building owners to adopt energy-efficiency improvements.

This study investigates the impact of retrofit subsidies for residential buildings on energy efficiency—specifically, natural gas and electricity consumption—within the principal-agent framework using an agent-based modeling approach.

Methodology:

This study develops an agent-based model to analyze the decision-making behaviors of various building owners and to optimize incentive policies for energy-efficiency retrofits, considering both building conditions and owner characteristics. Agent-based modeling has been identified as an effective method

for addressing agency problems because it allows for the analysis of motivations and behaviors of self-interested participants. This approach enables the identification of optimal solutions to agency problems by simulating dynamic negotiations, interactions, and conflicts among stakeholders.

Results and Discussion:
Simulation results for the period 2021–2031 indicate that providing optimal subsidies to building owners reduces energy consumption by 22.2% following retrofitting and increases energy efficiency by 22.8% in residential buildings. Assuming a 10% annual increase in energy prices and conducting sensitivity analyses on five parameters—homeownership rate, retrofitting demand rate, owner cost coefficient, economic benefit coefficient, and environmental benefit coefficient—show that energy efficiency improvement is inversely related to the owner cost coefficient and directly related to energy prices, homeownership rates, retrofitting demand rates, and economic and environmental benefit coefficients. These results can serve as a foundation for designing more effective policies aimed at optimizing energy consumption in the residential sector.

Conclusion:
This study investigates the impact of government subsidy incentive policies on improving energy efficiency in residential buildings in Shiraz using agent-based modeling. The primary goal is to develop a policy framework that encourages building owners to renovate their properties through subsidies in a manner that maximizes both government benefits and owners' utility. Specifically, the proposed model accounts for the diverse characteristics of buildings and their owners, providing policy recommendations tailored to different contexts based on these attributes.
The model employs a principal-agent theory-based approach to address agency problems in the renovation and energy-efficiency improvement process. Unlike previous studies that rely on empirical or econometric methods, which often fail to uncover the internal logic of these issues, this study models decision-making behavior within the principal-agent framework and simulates it on an agent-based platform.
The findings demonstrate that offering subsidies to building owners who accept government proposals for renovation results in substantial reductions in energy consumption and notable improvements in energy efficiency over the simulation period (2021–2031). Overall, this study confirms that agent-based modeling is a powerful tool for analyzing and designing optimal policies in the domain of building energy efficiency. Incentive-based policies are shown to play a pivotal role in achieving both environmental and economic objectives.

نشریه علمی پژوهش‌ها و چشم‌اندازهای اقتصادی
مقاله پژوهشی/ سال بیست و ششم، شماره اول، بهار۱۴۰۵، صفحات: ۶۹ تا ۱۰۶
https://dx.doi.org/ 10.48311/ecor.2025.27938

ارزیابی تأثیر سیاست یارانه‌ای بازسازی مسکن بر کارآیی انرژی در شهر شیراز: رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور

زهرا محزون[۱]، زهرا دهقان‌شبانی[۲]، کریم اسلاملوئیان[۳]، شکوفه فرهمند[۴]

۱. دانشجوی دکتری، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
zahramahzoon.zm@gmail.com

۲. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (نویسنده مسئول).
zdehghan@shirazu.ac.ir

۳. استاد، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
keslamlo@rose.shirazu.ac.ir

۴. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
Sh.farahmand@ase.ui.ac.ir

چکیده

بخش مسکونی در ایران، با سهم حدود ۳۰ درصدی از کل مصرف نهایی انرژی، بیشترین سهم مصرف انرژی را به‌خود اختصاص داده است. این امر، نشان‌دهندهٔ سطح پایین کارآیی انرژی در این بخش است. در این راستا، در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر سیاست تشویقی پرداخت یارانه بر بهبود کارآیی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر شیراز با استفاده از روش مدل‌سازی عامل‌محور می‌پردازیم. هدف اصلی از این مطالعه، ارائهٔ راهکاری مؤثر برای تشویق مالکان به بازسازی ساختمان‌ها از طریق پرداخت یارانه است، به‌گونه‌ای که همزمان، منافع دولت و مطلوبیت مالکان به حداکثر برسد و تعارض اهداف بین این دو طرف کاهش یابد. در این پژوهش، دولت، مالکان و ساختمان‌های مسکونی به‌عنوان عوامل اصلی در مدل‌سازی عامل‌محور تعریف شده‌اند. رفتارهای تصمیم‌گیری دولت و مالکان با استفاده از نظریه نمایندگی، مدل‌سازی و سیاست تشویقی پرداخت یارانه بهینه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در بازهٔ زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ نشان می‌دهد که اجرای سیاست تشویقی پرداخت یارانهٔ بهینه به مالکان، منجر به کاهش ۲۲/۲ درصدی مصرف انرژی و بهبود ۲۲/۸ درصدی کارآیی انرژی در ساختمان‌های مسکونی پس از بازسازی می‌شود. همچنین، با در نظر گرفتن افزایش سالانهٔ ۱۰ درصدی قیمت انرژی و انجام تحلیل حساسیت بر روی پنج پارامتر کلیدی (نرخ مالکیت مسکن، نرخ نیاز به بازسازی، ضریب هزینه مالک، ضریب منفعت اقتصادی و ضریب منفعت زیست‌محیطی)، نتایج نشان می‌دهند که بهبود کارآیی انرژی با ضریب هزینه مالک، رابطهٔ معکوس و با قیمت انرژی، نرخ مالکیت مسکن، نرخ نیاز به بازسازی و ضرایب منفعت اقتصادی و زیست‌محیطی، رابطهٔ مستقیم دارد. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی سیاست‌های مؤثرتر در حوزهٔ بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش مسکونی مورد استفاده قرار گیرند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴
انتشار آنلاین:۱۴۰۴/۹/۱۶

کلمات کلیدی:
مدل عامل‌محور
سیاست پرداخت یارانه
کارآیی انرژی
شیراز

طبقه‌بندی JEL:
Q48, H2, R20

نویسنده مسئول:
zdehghan@shirazu.ac.ir

کپی‌رایت ©۲۰۲۵، متعلق به نویسندگان. این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. براساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱. مقدمه

مشاهدات مصرف انرژی در کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه، حاکی از آن است که شکافی بین مصرف بهینه[1] و واقعی[2] انرژی وجود دارد. این موضوع که در مطالعات، از آن به شکاف کارآیی انرژی[3] یاد می‌شود، با جدی‌تر شدن بحران انرژی در سال‌های اخیر، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین علل این موضوع، موانع بازاری پیش روی کارآیی انرژی می‌باشد که به دو بخش موانع بازار[4] بخش انرژی و شکست بازار[5] تقسیم می‌شوند. در بازار انرژی، اصطلاح مانع بازار به هر عامل مرتبط با بازار اشاره دارد که از بهبود کارآیی انرژی[6] (EER) جلوگیری می‌کند (حسین‌زاده بحرینی و همکاران، ۱۳۹۲). در ادبیات کارآیی انرژی موانع بازاری مختلفی بر سر راه افزایش سطوح کارآیی انرژی معرفی می‌شود. این مطالعات وجود طیف وسیعی از موانع بازار را تجزیه و تحلیل کرده‌اند که مهم‌ترین این موارد شامل اولویت پایین مسئلهٔ انرژی، دسترسی به سرمایه و بازارهای ناقص برای کارآیی انرژی است.

در کنار موارد ذکر شده، معمولاً زیرمجموعه‌ای از موانع بازار به نام شکست‌های بازار نیز معرفی می‌شود. در زمینهٔ کارآیی انرژی، شکست بازار به این معنا است که به‌جای تخصیص کارآمد منابع، انرژی بیشتری برای سطح خدمات مرتبط مصرف می‌شود. این شکست‌های بازار شامل شکاف انگیزه‌ها، اطلاعات نادرست و ناکافی (عدم تقارن اطلاعات)، اثرات خارجی و کالاهای عمومی قیمت‌گذاری نشده است. یکی از مواردی که در بررسی شکست‌های بازار با توجه به شکاف کارآیی انرژی مورد توجه قرار می‌گیرد، شکاف انگیزه‌ها و عدم تقارن اطلاعات است که برای حل آن، مسئلهٔ کارگزار-کارفرما[7] مطرح می‌شود. شکاف انگیزه‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که دو طرف یک قرارداد، اهداف یا انگیزه‌های متفاوتی داشته باشند. در عدم تقارن اطلاعات نیز طرف‌های یک قرارداد، مانند خرید کالا یا خدمات، به سطوح مختلفی از اطلاعات مربوط به موضوع مورد نظر دسترسی دارند (آژانس بین‌المللی انرژی[8] ، ۲۰۰۷).

راهکار مقابله با این مشکلات، بررسی کارآیی انرژی در چهارچوب مسئلهٔ کارگزار-کارفرما است. بسیاری از پژوهشگران، تلاش کردند تا ارتباط بین نظریه کارگزار-کارفرما و کارآیی انرژی را به‌طور دقیق مشخص کنند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که مشکل سرمایه‌گذاری ناکافی برای افزایش کارآیی انرژی را اغلب اوقات در چهارچوب مساله کارگزار-کارفرما می‌توان مورد بررسی قرار داد (حسین‌زاده بحرینی و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به موارد ذکر شده، موانع کارآیی انرژی ناشی از

1. Optimal
2. Actual
3. Energy-Efficiency Gap
4. Market Barriers
5. Market Failures
6. Energy-Eiffciency retro. .
7. Principal-Agent problem
8. International Energy Agency (2007).

شکست بازار، به وضوح مستلزم مداخله سیاست عمومی است؛ زیرا طبق اقتصاد نئوکلاسیک، شکست‌های بازار منجر به تخصیص ناکارآمد منابع می‌شوند. بنابراین، طبق این نظریه، مداخله دولت، ضروری است که می‌تواند کارآیی پارتو را به‌دنبال داشته باشد. براساس اطلاعات آژانس بین‌المللی انرژی تا پایان سال ۲۰۲۲، بخش خانگی در ایران، حدود ۳۰ درصد از کل مصرف نهایی انرژی را به خود اختصاص داده است که بالاترین سهم را نسبت به سایر بخش‌ها دارد. براساس آخرین اطلاعات ترازنامه انرژی در سال ۱۴۰۰، گاز طبیعی و برق، به‌ترتیب، با سهم‌های ۸۲/۳ و ۱۲/۴ درصد در سال ۱۴۰۰، بیشترین سهم را نسبت به سایر حامل‌های انرژی[۱] در تأمین انرژی بخش خانگی دارند. همچنین بخش خانگی و تجاری، سهم حدود ۲۲ درصدی در انتشار گاز دی‌اکسید کربن را دارد و گاز طبیعی با سهم ۶۶ درصدی در انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن، سهم بسزایی در آلودگی محیط زیست دارد[۲].

بنابراین، رویکرد بهبود کارآیی انرژی (که به‌طور خاص در این مطالعه، حامل‌های انرژی گاز طبیعی و برق بررسی شده است) برای ساختمان‌های مسکونی در ایران، امری ضروری بوده و تأثیر بسزایی بر کل مصرف انرژی کشور و نیز به واسطهٔ مصرف غالب انرژی‌های فسیلی، بر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا خواهد داشت. تاکنون سیاست‌های مختلفی از طرف دولت‌ها به منظور بهبود کارآیی انرژی ساختمان‌ها در سراسر جهان اجرا شده است. از جملهٔ این سیاست‌ها می‌توان به سیاست‌های حمایت مالی، سیاست‌های مبتنی بر مقررات، سیاست‌های مبتنی بر ارزیابی و ... اشاره کرد. مسئله‌ای که بر سر راه اجرای موفق سیاست‌های دولتی وجود دارد، این است که دولت و مالکان ساختمان، یعنی دو طرف درگیر در یک قرارداد، اهداف و سطوح اطلاعات متفاوتی دارند. هدف دولت، حداکثرسازی منفعت حاصل از اجرای سیاست‌ها است، در حالی که هدف مالکان ساختمان‌ها، حداکثرسازی مطلوبیت خودشان است. به بیان دیگر، منافع کارفرما و کارگزار یعنی دولت و مالکان ساختمان‌ها، متفاوت و حتی متناقض است. دولت اطلاعات کاملی از تصمیمات و تلاش‌های مالکان برای بهبود کارآیی انرژی ساختمان‌ها ندارد. بنابراین، دولت باید یک قرارداد کارآمد، یعنی سیاستی را اعمال کند تا مالکان ساختمان‌ها را ترغیب کند که تلاش بیشتری را در جهت بهبود کارآیی مصرف انرژی ساختمان‌ها انجام دهند.

در این راستا، هدف اصلی از این تحقیق، بررسی سیاست پرداخت یارانه به مالکان ساختمان‌ها برای بازسازی ساختمان‌های مسکونی و تأثیر آن بر بهبود کارآیی مصرف انرژی (به‌طور مشخص، گاز

---

۱. سهم فرآورده‌های نفتی، زغال سنگ و منابع تجدیدپذیر قابل احتراق در بخش خانگی، به‌ترتیب، ۵، ۰/۱ و ۰/۱ درصد است.

۲. در ترازنامه انرژی، تنها سهم سوخت‌های فسیلی در انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای آورده شده و سهم برق لحاظ نشده است.

طبیعی و برق) بخش خانگی در چهارچوب مسئلهٔ کارگزار-کارفرما با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور است.

ساختار این مقاله، بدین ترتیب است که ابتدا به بررسی پیشینه پژوهش مرتبط با موضوع مورد بررسی و مبانی نظری می‌پردازیم. در ادامه، مدل پژوهش معرفی می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و بخش پایانی به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. پیشینه پژوهش

در این بخش، به تعدادی از مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج از کشور درخصوص مصرف انرژی بخش ساختمان، مطالعات مبتنی بر الگوی عامل‌محور و مطالعات مرتبط با سیاست‌های دولت پرداخته شده است.

۲-۱. مطالعات داخلی

۲-۱-۱. مطالعات مرتبط با مصرف انرژی بخش ساختمان

رضایی‌نسب و همکاران (۱۴۰۲)، در مطالعه خود، امکان طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در جنوب دریای خزر را بررسی کردند. آن‌ها پیکربندی‌های مختلفی مانند دیوارها، پنجره‌ها، و سایبان‌ها را تحلیل کرده و دریافتند که با بهینه‌سازی این متغیرها، مصرف برق تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از پنل‌های خورشیدی بر روی نما و پشت بام، ۸۸/۲ درصد از نیاز برق ساختمان را تأمین می‌کند. با این حال، دستیابی به مصرف انرژی صفر برای یک ساختمان سه طبقه ممکن نبود، اما برای ساختمان یک طبقه با پانل‌های خورشیدی مناسب، این هدف قابل تحقق است.

رهنما (۱۳۹۸)، در پژوهش خود، اثر راهکارهای بهسازی بر مصرف انرژی یک مجتمع مسکونی ۱۳۸ واحدی در تبریز را بررسی کرده و وضعیت این ساختمان ۸ طبقه‌ای و ۹ ساله، از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار دیزاین بیلدر تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که عایق‌کاری دیوارها به‌عنوان مؤثرترین راهکار می‌تواند مصرف انرژی را بین ۲۷ تا ۳۴ درصد کاهش دهد، اما پرهزینه‌ترین گزینه است. ترکیب چندین راهکار بهینه‌سازی نیز توانست مصرف انرژی را تا ۵۶/۵ درصد کاهش دهد.

جان‌زاده و زندیه (۱۳۹۵)، به بررسی کاهش مصرف انرژی و جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر در واحدهای مسکونی صفر انرژی در قزوین پرداخته‌اند. روش پژوهش آن‌ها بر پایه ترکیبی از روش توصیفی-تحلیلی، روش پژوهشی علی و شبیه‌سازی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عایق‌های حرارتی، سایه‌بان مناسب و تهویه طبیعی می‌تواند به ترتیب ۳۳، ۲,۱ و ۱۲ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند.

۲-۲. مطالعات خارجی

۲-۲-۱. مطالعات مرتبط با مصرف انرژی بخش ساختمان

آگوستینو و همکاران[1] (۲۰۲۴)، تأثیر دستورالعمل "خانه‌های سبز" اروپا بر بهبود کلاس انرژی ساختمان‌های مسکونی در ایتالیا را بررسی کردند. این مطالعه، سه نوع ساختمان (مستقل، ردیفی و آپارتمانی) در مناطق مختلف آب‌وهوایی (پالرمو، ناپل و میلان) را تحلیل کرده و سه اقدام بازسازی شامل عایق‌کاری حرارتی، جایگزینی دیگ گاز با پمپ حرارتی و نصب سیستم فتوولتائیک را پیشنهاد می‌کنند تا ساختمان‌ها به کلاس انرژی D برسند. نتایج نشان داد که هزینه بازسازی در آپارتمان‌ها کمتر است و ساختمان‌های مناطق گرم‌تر به‌راحتی به کلاس‌های انرژی بالاتر می‌رسند. همچنین، بر اهمیت تنظیم مشوق‌های اقتصادی متناسب با نوع ساختمان و شرایط محلی تأکید شده است.

کادریک و همکاران[2] (۲۰۲۲)، در پژوهش خود، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌های مسکونی بوسنی و هرزگوین را ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد که بازسازی در خانه‌های تک‌خانواری صرفه‌جویی انرژی زیادی به‌همراه دارد، اما هزینه آن ۲/۸ برابر بیشتر از خانه‌های چندخانواری و آپارتمانی است و به‌دلیل توان مالی کمتر شهروندان بوسنی، حمایت‌های یارانه‌ای دولتی ضروری است. بازسازی در خانه‌های تک‌خانواری به‌دلیل قیمت پایین زغال‌سنگ و چوب مقرون‌به‌صرفه نیست، در حالی‌که ساختمان‌های بلندمرتبه با استفاده از گاز طبیعی سودآوری بیشتری دارند. این پژوهش به کشورهای با درآمد پایین و متوسط توصیه می‌کند، بازسازی انرژی را به سیاست ملی تبدیل کنند.

لیو و همکاران[3] (۲۰۱۵)، در مطالعه خود، تأثیر مشارکت عمومی در مراحل مختلف بازسازی بر صرفه‌جویی انرژی را در سه محله پکن بررسی و سه مدل بازسازی شامل رهبری دولت مرکزی، دولت محلی و مدل ترکیبی را ارزیابی کردند. داده‌ها از طریق مصاحبه جمع‌آوری شد و نشان داد که مشارکت ساکنان در مراحل پیش از بازسازی و انتخاب فناوری، نقش مهمی در موفقیت پروژه دارد. این مطالعه بر اهمیت توجه به نیازهای مختلف ساکنان و تقویت آموزش و ارتباطات در فرایند بازسازی تأکید می‌کند تا از سوءاستفاده از فناوری‌ها و کاهش حمایت‌های آینده جلوگیری شود.

۲-۲-۲. مطالعات مبتنی بر الگوی عامل‌محور

چن و همکاران [4](۲۰۲۳)، با استفاده از مدل‌سازی بازی تکاملی و عامل‌محور، تصمیم‌گیری مالکان خانه‌ها برای پذیرش بازسازی به‌منظور بهبود کارآیی انرژی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مشوق‌های دولتی، به پذیرش بازسازی کمک می‌کنند، اما به دوره طولانی‌مدت و تعاملات اجتماعی نیاز دارند. کاهش هزینه‌های بازسازی، مؤثرتر از مشوق‌های مالی است و در پروژه‌های با عدم قطعیت

1. Agostino et al. (2024).
2. Kadrić et al. (2022).
3. Liu et al. (2015).
4. Chen et al (2023)

بالا، نتایج بهتری دارد. همچنین، عدم قطعیت و ریسک می‌تواند تصمیمات مالکان را مختل کند و اندازه شبکه بر اثربخشی مشوق‌ها تأثیر دارد. مطالعه، بر اهمیت مدیریت ریسک و جمع‌آوری داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی مدل تأکید می‌کند.

ناگلی و همکاران [۱](۲۰۲۰)، با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور، توسعه بلندمدت ساختمان‌های مسکونی در سوئیس را از نظر ساخت‌وساز، بازسازی و جایگزینی سیستم‌های گرمایشی شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه، تأثیر سیاست‌های مختلف بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را ارزیابی شد. نتایج نشان داد که سیاست‌های اقلیمی فعلی سوئیس مؤثر بوده، اما برای دستیابی به اهداف کاهش انتشار تا سال ۲۰۵۰، حذف سیستم‌های گرمایشی فسیلی ضروری است. سیاست‌های مالی مانند مالیات کربن و یارانه‌ها در آغاز مفید هستند، اما برای حذف کامل سوخت‌های فسیلی، اقدامات نظارتی بیشتری در بلندمدت نیاز است. یادگیری فناوری و گسترش نظارت می‌تواند به کاهش تدریجی یارانه‌ها کمک کند.

کائو و همکاران [۲](۲۰۱۷)، با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور، به شبیه‌سازی به‌کارگیری محصولات روشنایی با بهره‌وری بالا در بخش مسکونی پرداختند. نتایج نشان داد که بدون هیچ سیاستی، کاهش ۳۰ درصدی در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۵ امکان‌پذیر است؛ اما با ممنوعیت استفاده از محصولات روشنایی رشته‌ای، می‌توان به کاهش ۶۵ درصدی مصرف انرژی و ۷۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای دست یافت.

کوالسکا پیزالسکا و همکاران [۳](۲۰۱۴)، با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور، پویایی نظرات مصرف‌کنندگان درباره تغییر به سمت تعرفه‌های برق پویا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که به دلیل سطح بالای بی‌تفاوتی در بازارهای خرده‌فروشی برق، نظرات مشتریان ناپایدار و متغیر است. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که کاهش بی‌تفاوتی و کاهش زمان تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان می‌تواند شکاف بین قصد و رفتار واقعی آن‌ها را کاهش دهد.

۳-۲-۲. مطالعات مرتبط با سیاست‌های دولت

هی و چن [۴](۲۰۲۱)، تأثیر سیاست‌های یارانه‌ای دولت برای ترویج ساختمان‌های سبز را بررسی کردند. آن‌ها چهار طرح یارانه‌ای شامل حمایت از توسعه‌دهندگان، مصرف‌کنندگان، هر دو گروه و عدم پرداخت یارانه را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که یارانه‌ها انگیزه قوی برای توسعه ساختمان‌های سبز ایجاد می‌کنند و بیشترین رفاه اجتماعی با تخصیص یارانه به هر دو گروه حاصل می‌شود.

---

1. Nageli et al. (2020).
2. Cao et al. (2017).
3. Kowalska-Pyzalska et al. (2014).
4. He & chen (2021).

همچنین، تأثیر یارانه‌ها بر مصرف‌کنندگان، بیشتر از تولیدکنندگان بوده و بر اهمیت رفتار مصرف‌کننده در بازار ساختمان‌های سبز تأکید دارد.

فنگ و همکاران[1] (۲۰۲۰)، با بررسی سه مرحله توسعه ساختمان‌های سبز در چین و استفاده از یک مدل بازی سه مرحله‌ای، مکانیزمی برای انتخاب واحدهای ساختمانی تحت کنترل دولت ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که یارانه‌های دولتی به توسعه ساختمان‌های سبز کمک می‌کند، اما یارانه به خریداران تأثیر زیادی ندارد، زیرا خریداران نسبت به این ساختمان‌ها، منفعل هستند.

لیانگ و همکاران[2] (۲۰۱۹)، در مطالعه خود، یک مدل عامل‌محور برای سیاست‌گذاری در بهبود کارآیی انرژی ساختمان‌ها ارائه می‌دهند. این مدل، دولت و مالکان ساختمان‌ها را به‌عنوان عامل تعریف کرده و رفتارهای تصمیم‌گیری آن‌ها با مسئلهٔ کارگزار-کارفرما مدل‌سازی و سیاست تشویقی تحت شرایط مختلف بهینه‌سازی شده است. برای بررسی کارآیی مدل پیشنهادی، سه سناریوی سیاستی شامل سیاست مدل پیشنهادی، سیاست تشویقی در شانگهای و شنزن چین، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که سیاست تشویقی براساس مدل پیشنهادی، بهترین عملکرد را در صرفه‌جویی انرژی و بازده سرمایه‌گذاری دارد. تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد که دولت باید به قیمت انرژی توجه بیشتری داشته باشد.

۳-۲. جمع‌بندی مطالعات و نوآوری پژوهش

با توجه به مطالعات صورت گرفته، ملاحظه می‌گردد که مطالعات انجام شده در ایران، عمدتاً به بررسی عوامل مؤثر بر مصرف انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی پرداخته‌اند؛ اما در هیچ‌یک از مطالعات، به سیاست‌های دولتی که در زمینه بهبود کارآیی مصرف انرژی در بخش ساختمان، می‌تواند صورت بگیرد، پرداخته نشده است. علاوه بر این، اکثر مطالعات قبلی صورت گرفته، از دیدگاه کلان انجام شده و عوامل خرد را نادیده گرفته‌اند؛ یعنی موضوع بهبود کارآیی انرژی را از دیدگاه مالکان ساختمان و رفتار تصمیم‌گیری آن‌ها بررسی نکرده‌اند. همچنین، شرایط ساختمان و تفاوت‌های فردی مالکان ساختمان در نظر گرفته نشده است. در واقع، شرایط ساختمان (به‌عنوان مثال، انواع کاربری ساختمان‌ها) و ویژگی‌های مالکان ساختمان‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر تصمیم‌گیری در مورد فرایند بازسازی ساختمان برای بهبود کارآیی انرژی تأثیر بگذارد. بنابراین، نادیده گرفتن نقش حیاتی مالکان ساختمان‌ها و تنوع آنها، منجر به نتایج نامنظم و اثربخشی پایین سیاست‌های دولت می‌شود.

نوآوری پژوهش حاضر در حوزه مدل‌سازی است. نوآوری نسبت به مطالعات داخلی، این است که تاکنون در ایران، سیاست‌های دولتی به‌منظور بهبود کارآیی مصرف انرژی ساختمان‌ها و همچنین

1. Feng et al. (2020)
2. Liang et al. (2019)

الگوی عامل‌محور و چهارچوب کارگزار-کارفرما که در آن امکان قرار گرفتن کارگزاران مختلف در کنار یکدیگر همراه با تضاد منافع وجود دارد، استفاده نشده است.

در حوزه مطالعات خارجی، مطالعه لیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، نزدیک‌ترین مطالعه به پژوهش حاضر است. وجه تمایز پژوهش حاضر، در این است که علاوه بر تحلیل کارآیی انرژی ساختمان‌های مسکونی پس از بازسازی، این کارآیی را با وضعیت عدم انجام بازسازی مقایسه کرده و برای دوره زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ پیش‌بینی می‌کند. همچنین، سیاست افزایش در قیمت انرژی برق و گاز طبیعی در طول دوره شبیه‌سازی، به‌صورت جداگانه بررسی می‌گردد و اثر آن بر بهبود کارآیی انرژی بیان می‌شود. در این پژوهش، مصرف انرژی ساختمان‌ها در دو حالت بازسازی و عدم بازسازی بررسی شده است و توزیع دقیق‌تری از مساحت ساختمان‌ها و کارآیی انرژی به ازای هر مترمربع ارائه می‌شود. همچنین، مالکان ساختمان‌ها با سطوح مختلف ترجیحات ریسکی در نظر گرفته شده‌اند و مدل براساس شرایط ایران، بومی‌سازی شده است.

۳. مبانی نظری

۳-۱. شکست بازار و کارآیی انرژی

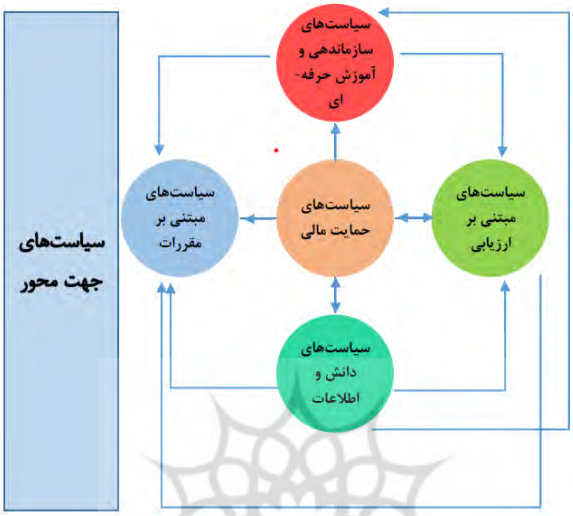
بررسی شکاف در حوزه‌ی کارآیی انرژی (شکاف بین مصرف واقعی و بهینهٔ انرژی)، نشان می‌دهد که شکست‌ها و موانع متعدد بازاری، منجر به شکاف کارآیی انرژی می‌شود. «شکست‌های بازار»، زمانی اتفاق می‌افتد که در نحوهٔ عملکرد بازارها نقصی وجود داشته باشد و یک یا چند فرض اقتصاد نئوکلاسیک را نقض کند. شکست بازار، می‌تواند ناشی از شکاف انگیزه‌ها، اطلاعات نادرست و ناکافی (عدم تقارن اطلاعات)، اثرات خارجی و کالاهای عمومی قیمت‌گذاری نشده باشد (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۰۷). اقتصاددانان نئوکلاسیک، استدلال می‌کنند که وجود شکست‌های بازار، پیش‌نیاز مداخله دولت در بازار است. بنابراین، سیاست‌های امکان‌پذیر و کم‌هزینه باید در دسترس باشد که بتواند این شکست های بازار را از بین ببرد یا جبران کند.

«موانع بازار»، به موانعی اشاره دارد که مبتنی بر شکست بازار نیستند، اما منجر به تضعیف انتشار و پذیرش نوآوری‌های انرژی کارآمد می‌شوند. شناخت موانع بر سر راه فناوری‌های انرژی پاک اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه استفادهٔ کارآمدتر از منابع انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، در راستای منافع جامعه است. این موانع عبارتند از: اولویت پایین مسئلهٔ انرژی، دسترسی به سرمایه و بازارهای ناقص برای کارآیی انرژی (براون[1]، ۲۰۰۱).

تاکنون سیاست‌های مختلفی در کشورهای جهان برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها به‌کار گرفته شده است که می‌توان آن‌ها را در ۶ گروه سیاست‌های جهت‌محور، سیاست‌های مبتنی بر مقررات، سیاست‌های مبتنی بر ارزیابی، سیاست‌های حمایت مالی، سیاست‌های سازماندهی و

1. Brown (2001)

آموزش حرفه‌ای و سیاست‌های دانش و اطلاعات طبقه‌بندی کرد (لیو و همکاران[1]، ۲۰۲۰). روابط بین شش سیاست در شکل ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱: ارتباط بین سیاست‌های بهینه‌سازی ساختمان

Figure 1: The relationship between building optimization policies

منبع: لیو و همکاران، ۲۰۲۰

سیاست‌های جهت‌محور، جهت‌ها و نقشه راه‌های آینده را برای ارتقاء ساختمان‌ها و مصرف بهینه انرژی ارائه می‌دهد. بر همین اساس، سیاست‌های جهت‌محور، پایه و اساس سیاست‌های مبتنی بر مقررات، سیاست‌های مبتنی بر ارزیابی، سیاست‌های حمایت مالی، سیاست‌های دانش و اطلاعات و سیاست‌های سازماندهی و آموزش حرفه‌ای است. سیاست‌های مبتنی بر مقررات، برای دستیابی به اهداف دولت از طریق قوانین، کدها، مقررات و استانداردها استفاده می‌شود. این سیاست‌ها الزامات مربوط به عملکرد انرژی ساختمان را تعیین می‌کند که محرک اصلی برای بهینه‌سازی ساختمان‌های موجود برای بهبود عملکرد آنها است. با این وجود، اجرای سیاست‌های مبتنی بر مقررات به‌دلیل موانع مختلف، مانند هزینه اولیه بالا، اثربخشی کمتری دارد. برای غلبه بر موانع اجرایی، سیاست‌های مالی مؤثر نشان داده شده است.

بائک و پارک[2] (۲۰۱۲)، تأکید کردند که یارانه‌ها یا مشوق‌های دیگر برای به حداقل رساندن مقاومت ساکنان در برابر اقدامات نظارتی، اثربخش است. علاوه بر این، اجرای مؤثر مقررات متکی به

1. Liu et al. (2020)
2. Baek & Park. (2012)

متخصصان آموزش دیده است که با بهینه‌سازی ساختمان‌ها آشنا هستند و در کنار آن، افزایش آگاهی عموم مردم با استفاده از کمپین‌های اطلاعاتی ضروری است. در همین راستا، دستیابی به اجرای مؤثر سیاست‌های مبتنی بر مقررات، نیازمند منابع مالی، ارزیابی، متخصصان و اطلاعات می‌باشد. انواع مختلفی از سیاست‌های مالی مانند یارانه، معافیت یا کسر مالیات، اجرای مالیات کربن و صندوق‌ها[1] وجود دارد. چنین سیاست‌هایی، انگیزه و تمایل ذی‌نفعان بهینه‌سازی (به‌عنوان مثال، مالکان، کاربران و پیمانکاران ساختمان) را برای اجرای بهینه‌سازی در ساختمان و حمایت از آن‌ها برای اتخاذ فناوری‌های پیشرفته فراهم می‌کند.

علاوه بر این، آموزش حرفه‌ای، بهبود آگاهی عمومی و انجام ممیزی انرژی نیز نیاز به حمایت مالی دارد. به عبارت دیگر، سیاست‌های مالی بر اجرای مؤثر سایر سیاست‌ها و همچنین کارآیی فرایند بهینه‌سازی تأثیر می‌گذارد. سیاست‌های مبتنی بر ارزیابی، مانند ارزیابی ساختمان و برچسب‌گذاری بهره‌وری انرژی، می‌تواند بر بهبود فرایند بهینه‌سازی ساختمان تأثیر بگذارد. ابزارهای ارزیابی بسیاری ایجاد شده است که می‌تواند به شناسایی پتانسیل‌های بهینه‌سازی ساختمان‌های موجود کمک کند و از اجرای ابزارهای مبتنی بر مقررات و ابزارهای مالی پشتیبانی کند. ارزیابی قبل از بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان می‌تواند به تصمیم‌گیری در مورد بهینه‌سازی ساختمان کمک کند. نتایج ارزیابی همچنین یک مرجع مفید برای توسعه استراتژی‌های بهینه‌سازی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، ارزیابی‌های قبلی می‌تواند به ارزیابی اثربخشی راهبردهای بهینه‌سازی و اعطای برچسب بهره‌وری انرژی کمک کند. سیاست‌های سازماندهی و آموزش حرفه‌ای مربوط به تأسیس انجمن‌های تخصصی مربوطه و ارائه متخصصان توانمند (به‌عنوان مثال، پیمانکاران، معماران و مشاوران) در بهینه‌سازی ساختمان است و به آن‌ها کمک می‌کند تا بتوانند خدمات حرفه‌ای با کیفیت بالا را به مالکان ساختمان‌ها ارائه دهند. بنابراین، از سیاست‌های سازماندهی و آموزش حرفه‌ای برای حمایت از سیاست‌های مبتنی بر مقررات و ارزیابی استفاده می‌شود. از سیاست‌های دانش و اطلاعات برای افزایش دانش و آگاهی ذی‌نفعان در زمینه بهینه‌سازی، به‌ویژه برای مالکان ساختمان استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، این سیاست‌ها می‌تواند به افزایش تمایل مالکان ساختمان‌ها برای دستیابی به بهینه‌سازی از طریق به اشتراک گذاشتن تجربه موفق و مزایای آن کمک کند. از همه مهم‌تر، چنین سیاست‌هایی می‌تواند برای پیوند دادن سیاست‌های مختلف بهینه‌سازی ساختمان‌های مختلف و انتشار سیاست‌های مربوط به عموم مردم مورد استفاده قرار گیرد. بسیاری از مطالعات قبلی، نشان می‌دهد که دسترسی آسان به اطلاعات بازسازی ساختمان در مورد اقدامات، یارانه‌ها، وام‌ها، کارشناسان توانمند و قابل اعتماد و گزینه‌های بهینه‌سازی بسیار مهم است (لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

1. Funds

۲-۳. راهکارهای بهسازی مصرف انرژی ساختمان

با بهره‌گیری از روش‌های بهسازی، می‌توان به‌طور قابل‌توجهی میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود را کاهش داد. بهسازی به معنای تقویت، ارتقا و بهبود وضعیت ساختمان موجود با افزودن تجهیزات جدید یا تغییرات جزئی در ساختار آن است، بدون آنکه تغییرات عمده‌ای در ظاهر و شکل کلی ساختمان ایجاد شود. این تغییرات کوچک می‌توانند به‌طور چشمگیری بر عملکرد ساختمان تأثیر گذاشته و بازدهی انرژی آن را افزایش دهند (پراساد و همکاران[1]، ۲۰۰۹).

فناوری‌های بهسازی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: مدیریت سمت عرضه، مدیریت سمت تقاضا و تغییر الگوهای مصرف انرژی، یعنی عوامل انسانی. بر همین اساس، ما و همکاران[2] (۲۰۱۲)، در مطالعهٔ خود، یک دسته‌بندی اصلی از فناوری‌های بهسازی ساختمان مطابق با جدول ۱ ارائه می‌دهند.

جدول ۱: دسته بندی فناوری‌های بهسازی ساختمان

Table 1: Building retrofit technology categories

کاهش تقاضای گرمایش و سرمایش ساختمان (مدیریت طرف تقاضا)	**عوامل انسانی (الگوهای مصرف انرژی)**
- عایق‌کاری پوسته ساختمان (دیوار، سقف و ...) - بهسازی پنجره‌ها (چند جداره شدن، سیستم سایبان‌ها و ...) - سقف سرد و پوشش‌های سرد - کاهش نشت و نفوذ هوا	- الزامات آسایش - الگوهای رفتاری ساکنان - مدیریت و نگهداری - فعالیت‌های ساکنان - دسترسی به کنترل‌ها
تجهیزات انرژی کارآمد و کم‌مصرف (مدیریت طرف تقاضا)	**فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و بهسازی سیستم‌های الکتریکی (مدیریت طرف عرضه)**
- ارتقاء سیستم‌های کنترلی و روشنایی - تهویه طبیعی - ارتقاء سیستم‌های روشنایی - ذخیره‌سازی حرارتی - تجهیزات کارآمد انرژی - بازیافت حرارت	- سیستم‌های حرارتی خورشیدی - سیستم‌های تولید برق بادی - سیستم‌های زیست‌توده و زمین‌گرمایی - سیستم برق زمین‌گرمایی - بهسازی سیستم‌های الکتریکی

منبع: ما و همکاران، ۲۰۱۲

۳-۳. نظریه نمایندگی و مسئله کارگزار-کارفرما

ادبیات کارگزار-کارفرما به تجزیه و تحلیل موقعیت‌هایی می‌پردازد که در آن، قرارداد بین کارگزار و کارفرما تحت اطلاعات نامتقارن منعقد می‌شود. به بیان دیگر، مشکلات مربوط به موقعیت‌هایی را که یکی از طرفین، اطلاعاتی در اختیار دارد که طرف دیگر از آن‌ها بی‌اطلاع است، شناسایی می‌کند و

1. Prasad, et al. (2009)
2. Ma et al. (2012)

بهترین قرارداد را در چنین محیط‌هایی پیدا می‌کند. در قرارداد بین کارگزار و کارفرما، کارگزار اقداماتی را از طرف کارفرما انجام می‌دهد و در ازای آن، پول دریافت می‌کند. کارگزار و کارفرما می‌توانند افراد، مؤسسات، سازمان‌ها یا مراکز تصمیم‌گیری باشند. راه‌حل‌های بهینه، سازوکارهایی را پیشنهاد می‌دهند تا منافع کارگزار را با منافع کارفرما هماهنگ کنند. این نظریه، با توجه به رفتار و اطلاعات طرفین قرارداد، ویژگی‌های قراردادهای بهینه و متغیرهای تأثیرگذار بر این ویژگی‌ها را تحلیل می‌کند. این رویکرد، رابطه نزدیکی با نظریه بازی و طراحی مکانیسم دارد، چراکه رفتار استراتژیک کارگزارانی که اطلاعات خاصی در اختیار دارند را تجزیه و تحلیل می‌کند و مکانیسم‌هایی را پیشنهاد می‌کند که ناکارآمدی ناشی از چنین رفتار استراتژیک را به حداقل می‌رساند (ماچو اشتادلر و پرز-کاستریلو[1]، ۲۰۱۲).

دو شرط مهم در نظریه نمایندگی در روابط بین کارفرما و کارگزار حاکم است. اول این‌که فرض می‌کند که «کارگزاران مستقل‌اند و به‌دنبال حداکثرسازی منافع خود به بهای هزینه‌های کارفرما هستند». به عبارت دیگر، یک فرض کلی مبتنی بر تعارض هدف بین کارگزار و کارفرما وجود دارد. ادبیات کارآیی انرژی، از این مشکل تعارض هدف به‌عنوان شکاف انگیزه‌ها یاد می‌کند. دومین شرط در روابط بین کارگزار و کارفرما، مشکل عدم تقارن اطلاعاتی بین دو طرف است. در علم اقتصاد، عدم تقارن اطلاعات، زمانی وجود دارد که یکی از طرفین معامله، اطلاعات مربوطه را در اختیار داشته باشد، اما نتواند یا تمایلی به انتقال این اطلاعات به طرف دیگر نداشته باشد. معمولاً فروشنده بیشتر از خریدار در مورد محصول اطلاعات دارد. در نتیجهٔ این دو شرط، دو مشکل انتخاب بد و مخاطرهٔ اخلاقی ایجاد می‌شود. مشکل انتخاب بد، زمانی رخ می‌دهد که یکی از طرفین قبل از انعقاد قرارداد، فرصت‌طلبانه عمل کند. از طرف دیگر، مشکل مخاطره اخلاقی زمانی رخ می‌دهد که یک طرف پس از امضای قرارداد، فرصت طلبانه عمل کند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۰۷).

برای بررسی مسئلهٔ کارگزار-کارفرما باید از چهارچوب نظری نظریه نمایندگی استفاده کرد. این نظریه تلاش می‌کند تا بتواند به داخل جعبه سیاه روابط بین بازیگران اقتصادی نگاهی داشته باشد. محققان بسیاری برای اعمال دیدگاه نظریه نمایندگی در کارآیی انرژی استفاده کرده‌اند. در این مطالعات به نظر می‌رسد، اجماعی وجود دارد که برخی از مشکلات سرمایه‌گذاری در کارآیی انرژی، ممکن است از طریق مسئله کارگزار-کارفرما فهمیده شود. در واقع، در زمینه کارآیی انرژی، ارتباط نظریه نمایندگی کاملاً واضح می‌باشد (حسین‌زاده بحرینی و همکاران، ۱۳۹۲).

در اقتصاد نئوکلاسیک، مسئله کارگزار-کارفرما بر اساس رابطهٔ بین کارگزار و کارفرما، به‌منظور افزایش کارآیی اقتصادی مطرح می‌شود. در زمینهٔ کارآیی انرژی، تعریف این مسئله با تمرکز بر رابطهٔ

1. Macho-Stadler & Pérez-Castrillo (2012).

بین کارگزار و کارفرما و درک چگونگی تأثیر کارآیی انرژی بر روی سیستم، توسعه پیدا می‌کند. رابطهٔ بین دولت و مالکان ساختمان‌ها در بهبود کارآیی انرژی، یک مسئلهٔ رایج نمایندگی است. در این پژوهش، دولت یک کارفرما است که بهبود کارآیی انرژی را به مالکان ساختمان‌ها واگذار، و سیاست تشویقی پرداخت یارانه را اعمال می‌کند. اهداف کارفرما و کارگزار، یعنی دولت و مالکان ساختمان‌ها متفاوت است. هدف دولت، حداکثرسازی منفعت حاصل از این سیاست‌ها است، در حالی که هدف مالکان ساختمان‌ها، حداکثر سازی مطلوبیت خودشان است. به‌علاوه منافع کارفرما و کارگزار می‌تواند متناقض باشد. پرداخت یارانه، به‌عنوان هزینه‌ای برای دولت است، اما منافع مالکین را به‌دنبال دارد. همچنین، عدم تقارن اطلاعات بین دولت و مالکان وجود دارد. اطلاعات دولت راجع به تصمیمات و تلاش‌های مالکان روی بهبود کارآیی انرژی کامل نیست.

بنابراین، دولت باید یک قرارداد کارآمد، یعنی سیاستی را ایجاد کند که مالکان ساختمان‌ها را به تلاش بیشتر جهت بهبود کارآیی انرژی تشویق کند. برای رسیدن به این هدف، تعادل بهینه بین دولت و مالکان باید مشخص شود. در سیاست تشویقی پرداخت یارانه، هدف دولت، به حداکثر رساندن کارآیی و اثربخشی سیاست‌های تشویقی خود است که به‌عنوان منافع حاصل از بازسازی (صرفه‌جویی در انرژی) منهای مشوق‌های پرداختی از طرف دولت تعریف می‌شود. هدف مالکان ساختمان‌ها، حداکثرسازی منافع خود است که به‌عنوان صرفه‌جویی در قبض انرژی حاصل از بازسازی به‌علاوهٔ مشوق دولتی منهای هزینهٔ بازسازی تعریف شده است.

در مسئلهٔ کارگزار-کارفرما، دو محدودیت وجود دارد (ماچو اشتادلر و پرز-کاستریلو، ۲۰۱۲):

۱) محدودیت عقلانیت فردی[1] (IR)، به این معنی که منفعت بازیکنان، باید بیش از حد آستانه باشد؛

۲) محدودیت سازگاری انگیزه[2] (IC)، به این معنی که انتخاب بهینه برای دولت، باید با تصمیمات مالکان سازگار باشد (لیانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

۴. روش شناسی پژوهش

۴-۱. مدل‌سازی عامل‌محور

مدل‌سازی عامل‌محور[3] (ABM)، یک رویکرد مدل‌سازی بوده که به‌دلیل پیچیدگی روزافزون دنیای امروز، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های عامل‌محور، ریشه در سیستم‌های پیچیده تطبیق‌پذیر[4] (CAS) دارند. این مدل‌ها بر این اصل استوارند که «سیستم‌ها از پایین به بالا ساخته می‌شوند». حوزه سیستم‌های پیچیده تطبیق‌پذیر، به مطالعه ظهور رفتارهای پیچیده،

1. Individual Rationality
2. Incentive Compatibility
3. Agent-Based Modelling
4. Complex Adaptive Systems

تطبیق‌پذیری و پیدایش سیستم‌های پیچیده می‌پردازد. مدل‌سازی عامل‌محور، یک روش محاسباتی و شبیه‌سازی است که می‌تواند برای بررسی عامل‌هایی که در یک محیط با هم تعامل دارند، استفاده شود. یک مدل عامل‌محور، دارای عناصر کلیدی شامل عامل‌ها، محیط، روابط و شیوه واکنش است (پرنگ و همکاران، ۱۴۰۳).

مدل‌های عامل‌محور، عملیات همزمان و تعاملات بین چندین عامل را برای بازسازی رفتار یک پدیده پیچیده، نشان می‌دهند. این مدل‌ها معمولاً با هدف دستیابی به درکی عمیق‌تر از برخی جنبه‌های خاص یک سیستم واقعی ساخته می‌شوند. برای آسان‌تر شدن فهم این فرایند، بخشی از پیچیدگی‌های سیستم هدف به‌طور عمدی در حین ساخت مدل حذف می‌گردد و فقط به جنبه‌های اساسی و مهم سیستم واقعی توجه می‌شود، درحالی‌که سایر جزئیات نادیده می‌ماند. این فرایند ساده‌سازی، که فقط ویژگی‌های مهم را حفظ کرده و فرضیاتی درباره جنبه‌های ناشناخته مطرح می‌کند، «انتزاع[1]» نامیده می‌شود.

با این حال، همان‌طور که گالان و همکاران[2] (۲۰۰۹)، بیان می‌کنند، اگر سطح انتزاع نتواند هدف اصلی مدل‌سازی را بازتاب دهد، نمی‌توان آن را به‌عنوان یک مدل معتبر در نظر گرفت. برخلاف سایر پارادایم‌های مدل‌سازی که در آن‌ها پیدا کردن ارتباط بین سیستم تحلیل شده و نمایش مدل شده آن همیشه آسان نیست که مدل‌سازی عامل‌محور، این فرایند را تسهیل می‌کند، زیرا یک ارتباط مستقیم بین موجودیت‌های مدل و موجودیت‌های سیستم واقعی وجود دارد و همچنین تعاملات در مدل با تعاملات در سیستم واقعی همخوانی دارد (گالان و همکاران، ۲۰۰۹).

۲-۴. مدل پژوهش

عامل‌ها معمولاً ذی‌نفعان و موضوعات کلیدی در مسائل تحقیق را نشان می‌دهند. اگرچه ذی‌نفعان متعددی در مسئلهٔ بهبود کارآیی انرژی ساختمان‌ها وجود دارد، اما مالکان ساختمان‌ها و دولت، مهم‌ترین نقش را در تصمیم‌گیری در مورد راه‌اندازی عملیات بازسازی، ایفا می‌کنند (مارچیوری و هان[3]، ۲۰۱۰). با توجه به اینکه ویژگی‌های ساختمان می‌تواند به شکل چشمگیری بر سیاست‌های بهبود کارآیی انرژی تأثیر بگذارد، ساختمان‌ها نیز به‌عنوان عوامل انتخاب می‌شوند. به‌طور خلاصه، این مدل سه نوع عامل را به‌صورت زیر در نظر می‌گیرد:

۱- عامل مالک ساختمان، نقش مهمی در مدل دارد. مالکان تصمیم می‌گیرند که آیا یک پروژهٔ بازسازی راه‌اندازی شود یا خیر. اگر به مالکان طرح‌هایی برای بازسازی پیشنهاد شود، آنها منافع خود را از انجام این کار ارزیابی خواهند کرد. اگر منافع مالکان بالاتر از حد آستانه‌ای باشد، مالکان

1. Abstraction
2. Galan-*et-al*. (2009)
3. Marchiori & Han (2010)

ساختمان‌ها بازسازی را انجام می‌دهند. از آنجایی که شرایط ساختمان‌ها و مالکان ساختمان‌ها متفاوت است، آن‌ها تصمیمات متفاوتی در مورد بازسازی خواهند گرفت تا مطلوبیت خود را به حداکثر برسانند.

۲- سیاست‌های مختلفی که توسط دولت اتخاذ می‌شود، می‌تواند بر منافع اقتصادی مالکان از بازسازی و تصمیم‌گیری آن‌ها در مورد شروع فرایند بازسازی تأثیر بگذارد. در مقابل، دولت می‌تواند منافع حاصل از صرفه‌جویی در انرژی را دریافت کند. هدف دولت بهینه‌سازی منافع حاصل از سیاست‌ها است.

۳- از آنجا که مصرف انرژی ساختمان، با توجه به بسیاری از شرایط محیط‌زیستی و بازسازی، در طول زمان تغییر می‌کند، بنابراین در این مطالعه، ساختمان یک نوع عامل محسوب می‌شود.

تصمیم‌گیری عامل‌ها

در این بخش، مدل پایه‌ای از مطالعه لیانگ و همکاران (۲۰۱۹) و براساس سیاست تشویقی پرداخت یارانه برگرفته شده است. مدل شامل پنج نوع متغیر، یعنی متغیرهای مالک، دولت، ساختمان، متغیر محیطی و متغیر واسطه‌ای است. متغیرهای محیطی، بستگی به وضعیت خارجی دارد که توسط عوامل موجود در فرایند بازسازی قابل تغییر نیست و متغیرهای واسطه‌ای برای تسهیل در محاسبات استفاده می‌شود. متغیرهای مدل در قالب جدول ۲ ارائه شده است.

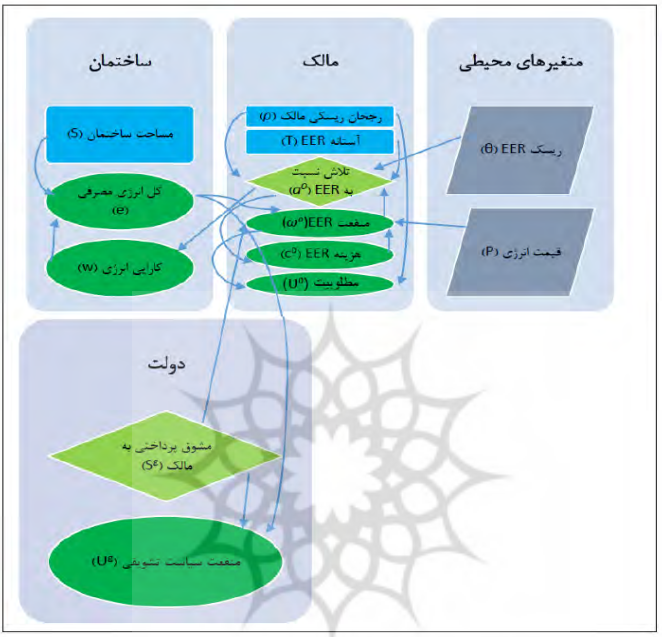
جدول ۲: تعریف متغیرها در مدل

Table 2: Defining variables in the model

نوع	متغیر	تعریف
مالک	a^o	تلاش مالک نسبت به بازسازی
	C^o	هزینه مالک از بازسازی
	ω^o	منفعت اقتصادی مالک از بازسازی
	U^o	مطلوبیت مالک
	ρ	رجحان ریسکی
	ω_0^o	آستانه مالک
دولت	U^g	منفعت دولت
متغیرهای محیطی	S^g	مشوق‌ها یا یارانه‌های دولتی به مالکان
	θ	توزیع احتمال عدم قطعیت برونزا
	p	قیمت انرژی
متغیرهای واسطه‌ای	β^o	ضریب مشوق
	b^0	ضریب هزینه مالک
	π_{ec}	منفعت اقتصادی حاصل از بازسازی
	π_{en}	منفعت زیست‌محیطی حاصل از بازسازی
	k_{ec}	ضریب منفعت اقتصادی حاصل از بازسازی
	k_{en}	ضریب منفعت زیست‌محیطی حاصل از بازسازی

ماخذ: طراحی شده برای این پژوهش

متغیرهای یک عامل، می‌تواند متغیرهای دیگر را تحت تأثیر قرار دهد و همچنین می‌تواند تحت تأثیر متغیرهای دیگر قرار گیرد. عوامل با اعمال خود و تغییرات متغیرها، با یکدیگر تعامل دارند. فعل و انفعالات بین عامل‌ها و متغیرها مطابق با شکل ۲ ارائه شده است. جعبه‌های بزرگ سه نوع عامل (یعنی ساختمان، مالک و دولت) و متغیرهای محیطی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: متغیرها و فعل و انفعالات عامل در مدل

Figure 2: Variables and agent interactions in the model

مأخذ: طراحی شده برای این پژوهش

تصمیمات بهینه

در یک ساختمان، مصرف انرژی (e) را می‌توان به‌صورت مساحت ساختمان (S) ضرب‌در کارآیی انرژی در هر متر مربع (w) تعریف کرد:

$$e = S*w \qquad (۱)$$

منفعت اقتصادی صرفه‌جویی در انرژی (π_{ec})، تفاوت مصرف انرژی پس از بازسازی (e_{after}) و مصرف انرژی پیش از بازسازی (e_{pre}) ضرب‌در قیمت انرژی (p) است:

$$\pi_{ec} = (e_{pre} - e_{after})*p \qquad (۲)$$

منافع اقتصادی بازسازی یعنی π_{ec} بستگی به تلاش مالکان ($k_{ec}\ a^o$) و عدم اطمینان برونزا (θ) دارد. k^o_{ec} ضریب منفعت اقتصادی است. π_{ec} را می‌توان با معادله (۳) محاسبه کرد:

$$\pi_{ec} = k_{ec}^{o}\, a^{o} + \qquad (۳)$$

به‌طور مشابه، منافع زیست‌محیطی بازسازی یعنی π_{en}، بستگی به تلاش مالکان ($a^{o}k_{en}^{o}$) و عدم اطمینان برونزای θ دارد. k_{en}^{o} ضریب منفعت زیست‌محیطی است. π_{en} را می‌توان طبق معادله (۴) محاسبه کرد:

$$\pi_{en} = k_{en}^{o}\, a^{o} + \theta \qquad (۴)$$

برای تشویق مالکان به تلاش بیشتر نسبت به بازسازی و دستیابی به آثار بهتر، مشوق‌ها باید با منافع زیست‌محیطی یعنی π_{en} همبستگی مثبت داشته باشند. β^{o} ضریب مشوق یارانه و α^{o} عرض از مبدا است که مقدار آن پس از حل مسئلهٔ بهینه‌یابی در معادله (۱۵)، به‌دست می‌آید. هرچه β^{o} بیشتر باشد، دولت یارانه بیشتری برای نتایج بازسازی مشابه خواهد داد. این قرارداد تشویقی خطی در معادله (۵) نشان داده شده است:

$$s^{g} = \alpha^{o} + \beta^{o}\pi_{en} \qquad (۵)$$

$$\alpha^{o}=\omega_{0}^{o} + \frac{1}{2}\rho\beta^{o2}\sigma^{2} - \frac{(k_{ec}^{o}+\beta^{o}k_{en}^{o})^{2}}{2b^{o}}$$

تصمیمات بهینه برای مالکان ساختمان‌ها

منافع اقتصادی مالک (ω^{o}) را می‌توان به‌عنوان سود اقتصادی ناشی از بازسازی (π_{ec}) به‌علاوه مشوق‌های دولتی (S^{g}) منهای هزینه‌های مالک در بازسازی (c^{o}) تعریف کرد:

$$\omega^{o} = \pi_{ec} + S^{g} - c^{o} \qquad (۶)$$

همچنین، تابع هزینه به‌صورت یک تابع درجه دوم تعریف شده است:

$$c^{o} = \frac{1}{2}b^{o}a^{o2} \qquad (۷)$$

جایی که b^{o} ضریب هزینه مالک است. تابع هزینه یک تابع محدب است، به این معنا که هزینه نهایی با تلاش افزایش می‌یابد و با افزایش تلاش، کارآیی نهایی کاهش می‌یابد.

با جایگزینی معادله (۳)، (۵) و (۷) در معادله (۶)، معادله (۶) را می‌توان به‌صورت معادله (۸) نوشت:

$$\omega^{o} = k_{ec}^{o}a^{o} + \theta + \alpha^{o} + \beta^{o}(k_{en}^{o}a^{o} + \theta) - \frac{1}{2}b^{o}a^{o2} \qquad (۸)$$

با فرض اینکه مالک ریسک‌گریز است و ریسک‌گریزی مطلق ثابت دارد، تابع مطلوبیت مالکان عبارت است از:

$$U^{o} = -e^{\rho\omega} \quad . \quad \rho = -\frac{U^{o\prime\prime}}{U^{o\prime}} \qquad (۹)$$

ρ ضریب ریسک‌گریزی مطلق است که درجه ثابتی از ریسک‌گریزی را نشان می‌دهد. هرچه مقدار ρ بیشتر باشد، ریسک‌گریزی مالکان بیشتر است. معادل اطمینان مالکان، منفعت انتظاری مالکان

منهای حق بیمه $\frac{1}{2}\rho\beta^{o2}\sigma^2$ بوده، که معادل با هزینه ریسک مالکان است. هرچه $\frac{1}{2}\rho\beta^{o2}\sigma^2$ بیشتر باشد، هزینه ریسک مالکان بیشتر است. مطلوبیت انتظاری مالکان در معادله (۱۰) ملاحظه می‌شود.

$$E(U^o) = E(\omega^o) - \frac{1}{2}\rho\beta^{o2}\sigma^2$$
$$= k_{ec}^o a^o + \alpha^o + \beta^o k_{en}^o a^o - \frac{1}{2}b^o a^{o2} - \frac{1}{2}\rho\beta^{o2}\sigma^2 \quad (۱۰)$$

هدف مالکان حداکثرسازی مطلوبیت خود است. بنابراین، با مشتق‌گیری از رابطهٔ (۱۰) نسبت به a^o، میزان تلاش بهینهٔ مالک به‌دست می‌آید:

$$a^o = \frac{k_{ec}^o + \beta^o k_{en}^o}{b^o} \quad (۱۱)$$

تصمیمات بهینه برای دولت

با فرض اینکه دولت ریسک‌خنثی باشد، تابع منفعت دولت (U^g)، منفعت زیست‌محیطی ناشی از بازسازی (π_{en})، منهای مشوق‌های مالکان (s^g) است:

$$U^g = \pi_{en} - s^g \quad (۱۲)$$
$$\pi_{en} = k_{en}^o\, a^o + \theta$$

دولت با ذخیرهٔ انرژی حاصل از بازسازی، می‌تواند منافع زیست‌محیطی به‌دست آورد. در واقع، منافع اصلی دولت، صرفه‌جویی در انرژی و درنتیجه، بهبود محیط‌زیست است. هرچه صرفه‌جویی در انرژی بیشتر باشد، دولت می‌تواند منافع بیشتری را به‌دست آورد. هدف دولت، حداکثرسازی کارآیی حاصل از سیاست تشویقی است که به‌عنوان منافع صرفه‌جویی انرژی حاصل از بازسازی منهای مشوق‌های پرداختی، تعریف می‌شود.

معادل اطمینان دولت، منفعت انتظاری دولت است که در معادله (۱۳) نشان داده شده است:

$$E(U^g) = E(\pi_{en} - s^g) \quad (۱۳)$$

با جایگزینی معادله (۴) و (۵) در معادله (۱۳)، معادله (۱۳) را می‌توان به فرم زیر تبدیل کرد:

$$E(U^g) = E\left(\pi_{en} - \alpha^o - \beta^o(k_{en}^o\, a^o + \theta)\right)$$
$$= -\alpha^o + (1-\beta^o)k_{en}^o\, a^o \quad (۱۴)$$

تحت اطلاعات ناقص، دولت با مشکل نحوه انتخاب کارآمدترین مشوق برای ایجاد انگیزه در مالکان برای بازسازی و بهینه‌سازی منفعت خود مواجه است. این مسئله کارگزار-کارفرما را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$max\ E(U^g) = max(-\alpha^o + (1-\beta^o)k_{en}^o\, a^o)$$
$$\alpha^o.\ \beta^o.\ a^o$$
St:
(IR): $E(U^o) \geq \omega_0^o$
(IC): $a^o = \frac{k_{ec}^o + \beta^o k_{en}^o}{b^o}$ (۱۵)

با حل مسئلهٔ بهینه‌سازی، می‌توان ضریب مشوق بهینه β^0 را محاسبه کرد. بنابراین، ضریب مشوق بهینه توسط معادله (۱۶) تعریف می‌شود که در مدل‌سازی عامل‌محور اعمال می‌گردد.

$$\beta^o = \frac{k_{en}^{o2}}{b^o \rho \sigma^2 + k_{en}^{o2}} \quad (۱۶)$$

در معادله (۱۶)، k_{en}^o نمایانگر ضریب منفعت زیست‌محیطی، b^o ضریب هزینه مالک، ρ ضریب ریسک‌گریزی مطلق (رجحان ریسکی مالک) و σ انحراف معیار عدم اطمینان برونزا است. مدل این پژوهش، برگرفته از مطالعه لیانگ و همکاران (۲۰۱۹) است که با استفاده از مدل عامل‌محور، اثر سیاست‌های تشویقی بهینه دولت (یارانه) بر کارآیی مصرف انرژی ساختمان‌ها را با سیاست‌های یارانه‌ای در دو شهر شانگهای و شنزن چین مقایسه می‌کند.

در پژوهش حاضر به‌دنبال آن بودیم که با پیشنهاد سیاست تشویقی پرداخت یارانه به مالکان ساختمان‌ها، آن‌ها را جهت بازسازی ساختمان‌های مسکونی خود ترغیب کند، به‌نحوی که هم منفعت دولت و هم مطلوبیت مالکان به حداکثر مقدار خود برسد. وجه تمایز پژوهش حاضر، این است که علاوه بر بررسی کارآیی انرژی ساختمان‌های مسکونی پس از بازسازی، کارآیی انرژی این ساختمان‌ها را با وضعیت عدم‌پذیرش بازسازی نیز مقایسه و برای بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ پیش‌بینی می‌کند. همچنین مصرف انرژی آن‌ها در دو حالت بازسازی و عدم‌پذیرش بازسازی مقایسه می‌شود. به‌علاوه، توزیع دقیق‌تری از مساحت ساختمان‌ها و کارآیی انرژی در هر مترمربع از ساختمان‌ها ارائه می‌دهد و مالکان ساختمان‌ها با رجحان ریسکی متفاوت درنظر گرفته می‌شوند.

۳-۴. پارامترها و متغیرهای مدل

در این مدل، فرض می‌شود ۱۰۰۰ خانه مسکونی در شهر شیراز وجود دارد که مالکیت هر خانه متعلق به یک فرد است. اطلاعات مربوط به توزیع مساحت ساختمان‌های مسکونی شهر شیراز (S) و نحوه تصرف افراد در ساختمان‌های مسکونی شهر شیراز براساس آخرین اطلاعات آماری مربوط به سرشماری سال ۱۳۹۵ از سایت مرکز آمار ایران و داده‌های مربوط به مصرف برق و گاز هر خانوار در شهر شیراز از سالنامه آماری شهرداری شیراز جمع‌آوری، و توزیع کارآیی انرژی یا مصرف انرژی در هر مترمربع از ساختمان‌های مسکونی شهر شیراز (w) با استفاده از داده‌های مربوط به مصرف برق و گاز هر خانوار در شهر شیراز و توزیع مساحت ساختمان‌های مسکونی مربوط به هر خانوار محاسبه

شده است[۱]. همچنین با توجه به مسئلهٔ بازسازی، ساختمان‌های مسکونی مربوط به سال ۱۳۹۵ شهر شیراز که احتمالاً نیاز به بازسازی دارند، در نظر گرفته شده است. با احتمال ۴۵ درصد، مالکان این ساختمان‌ها در خانه‌های خود ساکن هستند و احتمال اینکه این خانه‌ها نیاز به بازسازی داشته باشند، ۵۰ درصد است. ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^{o}) حاصل از عایق‌کاری دیواره‌های ساختمان به‌عنوان فرایند بازسازی براساس نظر نخبگان برابر با ۰/۲ و ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) براساس اطلاعات ترازنامه انرژی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰ برابر با ۰/۱ درنظر گرفته شده است[۲]. انحراف معیار عدم اطمینان (σ)، ضریب هزینه نهایی (b^{o})، حد آستانه‌ای مالکان برای پذیرش بازسازی (ω_0^{o}) و احتمال عدم قطعیت برونزا (θ)، براساس مطالعه لیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، به‌ترتیب برابر با ۳، ۰/۵ و ۰ و توزیع نرمال با میانگین ۰ و انحراف معیار σ درنظر گرفته شده است. رجحان ریسکی مالکان (ρ) دارای توزیع یکنواخت در بازه (۵ و ۰) است. پیش بینی قیمت انرژی (برق و گاز طبیعی بخش خانگی) برای سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ بر اساس داده‌های قیمت انرژی بخش خانگی گردآوری شده از ترازنامه انرژی در فاصله سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹ به‌وسیلهٔ کتابخانه پرافیت[۳] در پایتون انجام شده است. برای تسهیل محاسبات، قیمت انرژی در سال ۱۴۰۰ به ۱ ریال بر کیلووات ساعت نرمال شده و قیمت سال‌های بعد نیز به همین نسبت تغییر کرده است. سایر متغیرها با استفاده از روابط تعریف شده درون مدل مقداردهی می‌شوند. اجرای مدل در نسخه حرفه‌ای نرم‌افزار انی‌لاجیک[۴] انجام، و مقادیر این پارامترها و متغیرها در جدول ۳ ارائه شده است.

---

۱. اطلاعات مربوط به تعداد واحدهای مسکونی با جمعیت ۱ خانوار، ۲ خانوار، ۳ خانوار و ۴ خانوار به‌ازای مساحت‌های مختلف (حداقل مساحت ۵۰ متر و حداکثر مساحت ۵۰۰ متر) موجود است. با داشتن اطلاعات مصرف برق و گاز طبیعی به‌ازای هر خانوار، متوسط مصرف برق و گاز به‌ازای زیربناهای مختلف محاسبه شده است. به‌عنوان نمونه، متوسط مصرف در واحدهای مسکونی ۵۰ متری عبارت است از:

(متوسط تعداد خانوارهای ساکن در واحدهای ۵۰ متری) × (کل واحدهای مسکونی ۵۰ متری /(مصرف برق و گاز ۱ خانوار))

حال با تقسیم کردن متوسط مصرف در واحدهای مسکونی به‌ازای زیربناهای مختلف بر مساحت واحدهای مسکونی، کارآیی انرژی در هر مترمربع به‌دست می‌آید.

۲. سهم گاز طبیعی در بخش خانگی در انتشار گاز دی‌اکسید کربن طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰، به عنوان ضریب منفعت زیست‌محیطی در نظر بوده، و این ضریب از طریق رابطه زیر محاسبه شده است:

سهم زیربخش خانگی و تجاری در انتشار دی اکسید کربن × سهم گاز طبیعی در انتشار دی‌اکسید کربن × سهم بخش خانگی نسبت به کل بخش خانگی و تجاری در مصرف نهایی گاز طبیعی = ۰/۲۴× ۰/۵۸× ۰/۸۷ = ۰/۱

3. prophet
4. Anylogic

جدول ۳: پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در پژوهش

Table 3: Research parameters and variables

پارامتر-متغیر	نماد	نوع/ توزیع	ارزش/ بازه	منبع
مساحت ساختمان‌های مسکونی	S	عدد صحیح/ توزیع تجربی[1]	[30, 700]	سرشماری سال 1395، مرکز آمار ایران
احتمال سکونت افراد در ساختمان‌های مسکونی متعلق به خود		عدد حقیقی	0.45	سرشماری سال 1395، مرکز آمار ایران
احتمال نیاز ساختمان‌های مسکونی به بازسازی		عدد حقیقی	0.50	به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات، این عدد با مشورت با نخبگان درنظر گرفته شده است.
کارآیی انرژی	w	عدد حقیقی/ توزیع یکنواخت[2]	(49, 500)	محاسبه با استفاده از داده‌های مربوط به مصرف برق و گاز هر خانوار در شهر شیراز و توزیع مساحت ساختمان‌های مسکونی مربوط به هر خانوار
ضریب منفعت اقتصادی	k_{ec}	عدد حقیقی	0.2	نظر نخبگان
ضریب منفعت زیست‌محیطی	k_{en}	عدد حقیقی	0.1	محاسبه شده با استفاده از اطلاعات ترازنامه انرژی سال‌های 1386 تا 1400
انحراف معیار عدم اطمینان	σ	عدد صحیح	3	مطالعه لیانگ و همکاران (2019)
ضریب هزینه نهایی	b^o	عدد حقیقی	0.5	مطالعه لیانگ و همکاران (2019)
حد آستانه‌ای مالکان برای پذیرش بازسازی	ω_0^o	عدد صحیح	0	مطالعه لیانگ و همکاران (2019)
احتمال عدم قطعیت برونزا	θ	عدد حقیقی/ توزیع نرمال	$(\sigma, 0)$	مطالعه لیانگ و همکاران (2019)
رجحان ریسکی مالکان	ρ	عدد حقیقی/ توزیع یکنواخت	(0, 5)	به‌طور تصادفی برای هر مالک عددی بین 0 و 5
قیمت انرژی	p	عدد حقیقی		داده‌های قیمت انرژی (برق و گاز) بخش خانگی ترازنامه انرژی در فاصله سال‌های 1387 تا 1399- پیش‌بینی قیمت انرژی به‌وسیلهٔ کتابخانه پرافیت در پایتون

مأخذ: طراحی شده برای این پژوهش

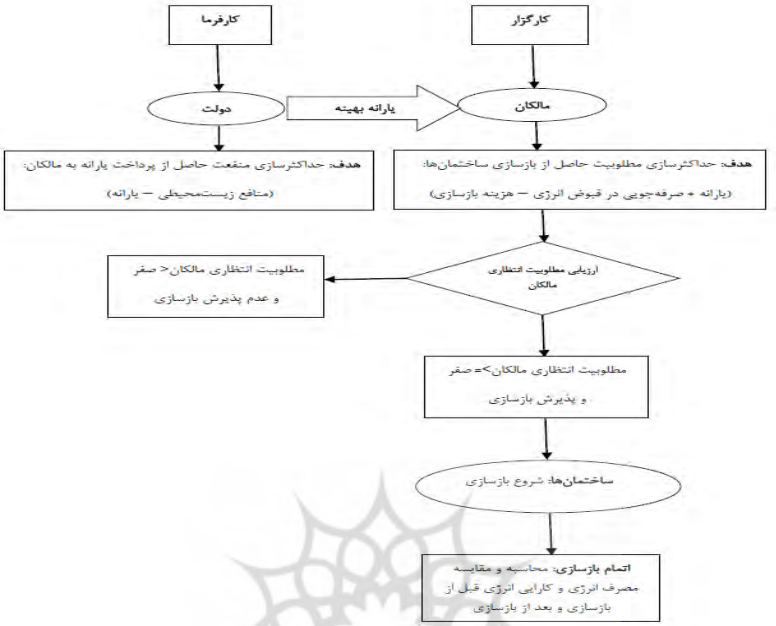
1. Empirical Distribution
2. Uniform Distribution

۵. نتایج

چهارچوب مدل پژوهش حاضر در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، عامل‌های مورد استفاده در این مدل شامل دولت، مالکان ساختمان‌ها و ساختمان‌های مسکونی متعلق به این مالکان می‌باشد. دولت به‌عنوان کارفرما فرایند بازسازی ساختمان‌های مسکونی را به مالکان ساختمان‌ها به‌عنوان کارگزار واگذار می‌کند. هدف دولت، حداکثرسازی منفعت حاصل از پیشنهاد سیاست یارانه به مالکان ساختمان‌ها است و هدف مالکان ساختمان‌ها، حداکثرسازی مطلوبیت خود از پذیرش فرایند بازسازی ساختمان‌ها است. بر همین اساس، دولت به مالکان ساختمان‌ها نرخ یارانه بهینه $\beta^o = \frac{k_{en}^{o2}}{b^o \rho \sigma^2 + k_{en}^{o2}}$ که در معادله (۱۶) به‌دست آمد را پیشنهاد می‌دهد. مالکان ساختمان-هایی که در خانه‌های متعلق به خود ساکن هستند و خانه‌هایشان نیازمند بازسازی است، پیشنهاد دولت را ارزیابی می‌کنند. چنان‌چه مطلوبیت انتظاری مالکان بزرگتر یا مساوی حد آستانه‌ای صفر باشد، پیشنهاد دولت را می‌پذیرند و پیغام شروع بازسازی از هر مالک به ساختمان متعلق به آن مالک ارسال می‌شود، درغیر این صورت، پیشنهاد دولت را رد می‌کنند و این مالکان از مدل حذف می‌شوند.

پس از ارسال پیغام شروع بازسازی از مالکان به ساختمان‌ها، فرایند بازسازی شروع و فرض می‌شود پس از حداکثر ۶ ماه بازسازی ساختمان‌ها اتمام می‌یابد و از این مرحله به بعد، محاسبات مربوط به مقایسه مصرف انرژی و کارآیی انرژی قبل از بازسازی و بعد از بازسازی، انجام می‌گردد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که از تعداد ۱۰۰۰ مالک اولیه، ۲۰۹ نفر از مالکانی که در خانه‌های خود ساکن هستند و خانه‌هایشان نیازمند بازسازی است، پیشنهاد دولت برای دریافت یارانه و بازسازی ساختمان را می‌پذیرند. نتایج حاکی از آن است که دولت با طراحی کارآمد سیاست پرداخت یارانه به مالکان ساختمان‌های نیازمند بازسازی، در اجرای این سیاست موفق عمل کرده است. به بیان دیگر، با وجود تعارض اهداف و منافع بین دولت و مالکان ساختمان‌ها، دولت با پرداخت یارانه بهینه به مالکان ساختمان‌ها علاوه بر اینکه آن‌ها را به اقدام برای بازسازی ساختمان‌ها ترغیب نموده، همزمان منافع خود و همچنین منافع مالکان ساختمان‌ها را تأمین کرده است.



شکل ۳: چارچوب الگوی عامل‌محور

Figure 3: Agent-based modeling framework

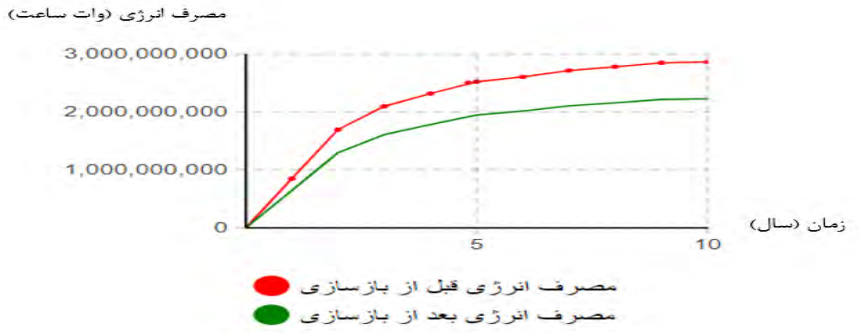
مأخذ: طراحی شده برای این پژوهش

شکل ۴، نمودار مقایسه مصرف انرژی برای سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۰ را قبل از بازسازی و بعد از بازسازی ساختمان‌ها نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، مالکان ساختمان‌هایی که بازسازی را انجام می‌دهند، چنان‌چه بازسازی را نمی‌پذیرفتند، چه تغییری در میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها به‌وجود می‌آورد. با توجه به اینکه بازسازی ساختمان‌ها در سال ۱۴۰۰ صورت می‌گیرد، محاسبات مربوط به مقایسه مصرف انرژی از ابتدای سال ۱۴۰۱ تا انتهای سال ۱۴۱۰ در نظر گرفته شده است.

محور افقی این نمودار، گام‌های زمانی به‌صورت سالانه و محور عمودی، مصرف انرژی را برحسب وات ساعت نشان می‌دهد. داده‌های مصرف انرژی در این نمودار، به‌صورت تجمعی بوده، یعنی مصرف انرژی در هر سال، مصرف انرژی همان سال به‌علاوهٔ مصرف انرژی در سال‌های قبل است.

ملاحظه می‌گردد که در طول دوره شبیه‌سازی، مصرف انرژی پس از بازسازی نسبت به مصرف انرژی قبل از بازسازی، کاهش یافته است. براساس اطلاعات جدول ۴، ملاحظه می‌گردد که در همهٔ سال‌ها در طول دوره شبیه‌سازی، مصرف انرژی بعد از بازسازی نسبت به مصرف انرژی قبل از بازسازی، کاهش یافته است. در پایان دوره ده سالهٔ شبیه‌سازی به میزان ۶۳۵ میلیون وات ساعت صرفه‌جویی

در مصرف انرژی صورت می‌گیرد. به بیان دیگر، یک کاهش ۲۲/۲ درصدی در مصرف انرژی پس از بازسازی خانه‌های مسکونی نسبت به حالت قبل از بازسازی، به وجود می‌آید.



شکل ۴: نمودار مصرف انرژی قبل از بازسازی و بعد از بازسازی

Figure 4: Pre-retrofit and post-retrofit energy consumption chart.

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۴: روند تغییرات مصرف انرژی، قبل از بازسازی و بعد از بازسازی

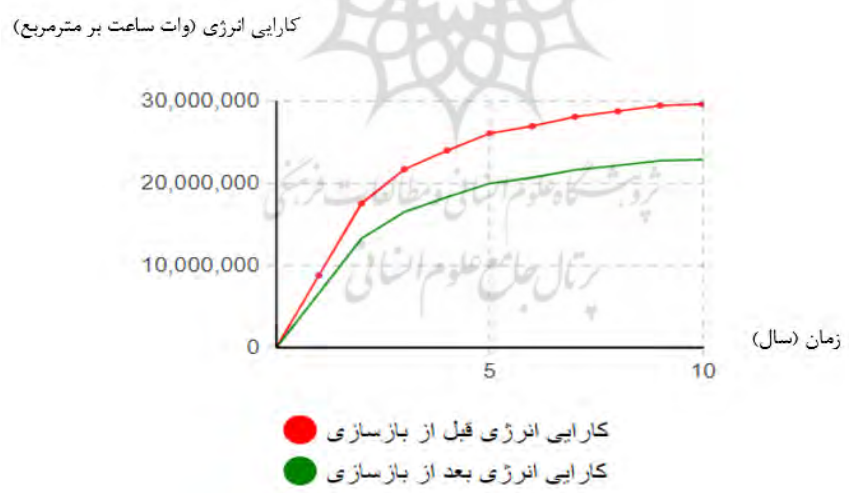
Table 4: Pre-retrofit and post-retrofit energy consumption trends.

سال	مصرف انرژی قبل از بازسازی (میلیون وات ساعت)	مصرف انرژی بعد از بازسازی (میلیون وات ساعت)	صرفه‌جویی مصرف انرژی (میلیون وات ساعت)	درصد تغییر در مصرف انرژی پس از بازسازی نسبت به قبل از بازسازی
1401	849	644	-205	-24.1
1402	847	652	-195	-23.0
1403	403	314	-89	-22.1
1404	220	174	-46	-20.9
1405	204	164	-40	-19.6
1406	83	68	-15	-18.1
1407	111	91	-20	-18.0
1408	65	53	-12	-18.5
1409	68	57	-11	-16.2
1410	14	12	-2	-14.3
دوره ده ساله	2864	2229	-635	-22.2

مأخذ: محاسبات پژوهش

شکل ۵، نمودار مقایسه کارآیی انرژی (مصرف انرژی در هر مترمربع از ساختمان‌ها) را برای سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۰ قبل از بازسازی و بعد از بازسازی ساختمان‌ها، نشان می‌دهد. داده‌های کارآیی انرژی به‌صورت تجمعی بوده، یعنی کارآیی انرژی در هر سال، کارآیی انرژی همان سال به‌علاوهٔ کارآیی انرژی در سال‌های قبل است. محور افقی این نمودار، گام‌های زمانی به‌صورت سالانه و محور عمودی، کارآیی انرژی یا مصرف انرژی در هر مترمربع از ساختمان‌ها را برحسب وات ساعت بر مترمربع نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که در طول دوره شبیه‌سازی، مصرف انرژی در هر مترمربع، پس از بازسازی نسبت به مصرف انرژی در هر مترمربع، قبل از بازسازی، کاهش یافته است که نشان‌دهندهٔ بهبود کارآیی انرژی در این ساختمان‌های مسکونی است.

براساس اطلاعات جدول ۵، ملاحظه می‌گردد که در همهٔ سال‌ها در طول دوره شبیه‌سازی، مصرف انرژی در هر مترمربع از ساختمان‌های مسکونی، بعد از بازسازی نسبت به مصرف انرژی در هر مترمربع قبل از بازسازی، کاهش یافته است. در پایان دوره ده سالهٔ شبیه‌سازی به میزان ۶/۷۵ میلیون وات ساعت بر مترمربع بهبود کارآیی انرژی صورت گرفته است. به بیان دیگر، یک بهبود ۲۲/۸ درصدی در کارآیی انرژی پس از بازسازی خانه‌های مسکونی نسبت به حالت قبل از بازسازی، به وجود می‌آید.



شکل ۵: نمودار کارآیی انرژی، قبل از بازسازی و بعد از بازسازی

Figure 5: Pre-retrofit and post-retrofit energy efficiency chart.

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۵: روند تغییرات کارآیی انرژی، قبل از بازسازی و بعد از بازسازی

Table 5: Pre-retrofit and post-retrofit energy efficiency trends.

سال	کارآیی انرژی قبل از بازسازی (میلیون وات ساعت بر مترمربع)	کارآیی انرژی بعد از بازسازی (میلیون وات ساعت بر مترمربع)	بهبود کارآیی انرژی (میلیون وات ساعت بر مترمربع)	درصد تغییر در کارآیی انرژی پس از بازسازی نسبت به قبل از بازسازی
1401	8.79	6.61	-2.18	-24.8
1402	8.76	6.69	-2.07	-23.6
1403	4.16	3.22	-0.94	-22.6
1404	2.28	1.80	-0.48	-21.1
1405	2.11	1.68	-0.43	-20.4
1406	0.85	0.69	-0.16	-18.8
1407	1.15	0.94	-0.21	-18.3
1408	0.67	0.55	-0.12	-17.9
1409	0.71	0.58	-0.13	-18.3
1410	0.15	0.12	-0.03	-20.0
دوره ده‌ساله	29.6	22.9	-6.75	-22.8

مأخذ: محاسبات پژوهش

۱-۵. اعتبارسنجی نتایج

به منظور تأیید پایداری مدل و شناسایی عوامل حساس بر بهبود کارآیی انرژی، در این بخش، ابتدا اثر افزایش سالیانه ۱۰ درصدی در قیمت انرژی و سپس تحلیل حساسیت بر روی پنج پارامتر نرخ مالکیت مسکن، نرخ نیاز به بازسازی، ضریب هزینه مالک (b^o)، ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o) و ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^o) که در نتیجهٔ بازسازی ساختمان‌ها نصیب مالکان و دولت می‌شود، صورت می‌گیرد. با توجه به رابطهٔ (۱۱) یعنی $a^o = \frac{k_{ec}^o + \beta^o k_{en}^o}{b^o}$ که در آن، a^o تلاش بهینهٔ مالک در فرایند بازسازی را نشان می‌دهد، تغییر هر یک از ضرایب b^o، k_{ec}^o و k_{en}^o می‌تواند به‌طور مستقیم بر تلاش بهینه مالک در فرایند بازسازی و درنتیجه، بهبود کارآیی انرژی تأثیرگذار باشد.

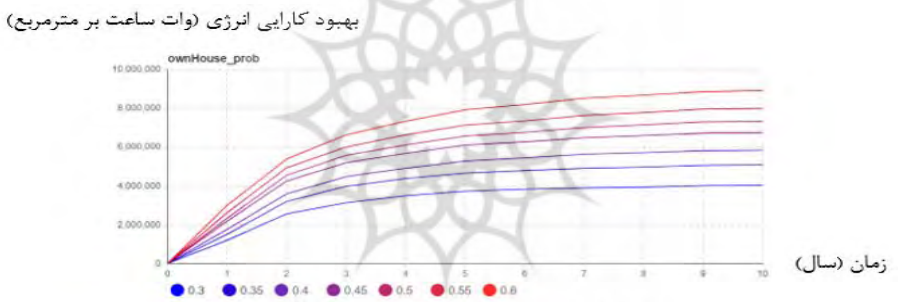
جدول ۶: مقایسه بهبود کارآیی انرژی در سناریوی پایه و سناریوی افزایش ۱۰ درصدی قیمت انرژی

Table 6: Energy efficiency improvement: Baseline vs. 10% energy price increase scenario

	سناریو پایه	سناریوی افزایش 10 درصدی قیمت انرژی	تغییرات
بهبود کارآیی انرژی در پایان دوره ده ساله شبیه‌سازی (میلیون وات ساعت بر مترمربع)	-6.75	-7.88	-1.13
درصد تغییر کارآیی انرژی پس از بازسازی نسبت به قبل از بازسازی	-22.8	-26.6	-3.8

مأخذ: محاسبات پژوهش

با توجه به نتایج شبیه‌سازی سناریوی پایه در جدول ۵، ملاحظه شد که در پایان دوره ده سالهٔ شبیه‌سازی به‌میزان ۶/۷۵ میلیون وات ساعت بر مترمربع بهبود کارآیی انرژی صورت گرفته است و یک بهبود ۲۲/۸ درصدی در کارآیی انرژی پس از بازسازی خانه‌های مسکونی نسبت به حالت قبل از بازسازی به وجود می‌آید. حال چنان‌چه یک افزایش ۱۰ درصدی در قیمت انرژی در طول دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ لحاظ شود، در پایان دوره ده سالهٔ شبیه‌سازی به میزان ۷/۸۸ میلیون وات ساعت بر مترمربع بهبود کارآیی انرژی صورت می‌گیرد و یک بهبود ۲۶/۶ درصدی در کارآیی انرژی پس از بازسازی خانه‌های مسکونی نسبت به حالت قبل از بازسازی به‌وجود می‌آید. به بیان دیگر، با افزایش قیمت انرژی، بهبود کارآیی انرژی به میزان ۳/۸ درصد معادل با ۱/۱۳ میلیون وات ساعت بر مترمربع افزایش می‌یابد. این نتایج حاکی از آن است که با افزایش قیمت انرژی و به‌دنبال آن، افزایش هزینه‌های خانوارها در پرداخت قبوض انرژی، انگیزهٔ بازسازی ساختمان‌های مسکونی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی قوی‌تر شده و بهبود کارآیی انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۶: تحلیل حساسیت نرخ مالکیت مسکن بر بهبود کارآیی انرژی

Figure 6: Sensitivity analysis of homeownership rate on energy efficiency improvement

مأخذ: یافته‌های پژوهش

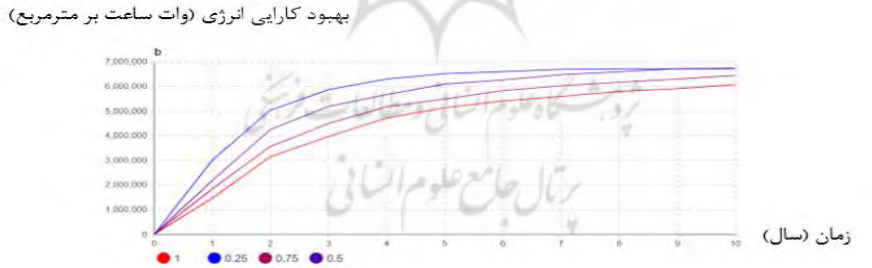
شکل ۶، نتایج تحلیل حساسیت نرخ مالکیت مسکن بر بهبود کارآیی انرژی را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ ده سالهٔ شبیه‌سازی و محور عمودی، بهبود کارآیی انرژی است. نرخ مالکیت مسکن با گام‌های ۰/۰۵ در فاصله ۰/۳ تا ۰/۶ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهبود کارآیی انرژی با نرخ مالکیت مسکن، رابطه مستقیم دارد و به عبارت دیگر، با افزایش تعداد مالکانی که در خانه‌های متعلق به خود ساکن هستند، خانه‌های بیشتری بازسازی می‌شوند و به دنبال آن، نمودار بهبود کارآیی انرژی در سطح بالاتری قرار می‌گیرد.

شکل ۷: تحلیل حساسیت نرخ نیاز به بازسازی بر بهبود کارآیی انرژی

Figure 7: Sensitivity analysis of renovation rate on energy efficiency improvement

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۷، نتایج تحلیل حساسیت نرخ نیاز به بازسازی بر بهبود کارآیی انرژی را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ ده سالهٔ شبیه‌سازی و محور عمودی، بهبود کارآیی انرژی است. برای نرخ نیاز به بازسازی، ۵ حالت ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش نرخ نیاز به بازسازی، مالکان بیشتری برای بازسازی خانه‌های مسکونی خود اقدام می‌کنند و در نتیجهٔ آن، نمودار بهبود کارآیی انرژی در سطح بالاتری قرار می‌گیرد. به بیان دیگر، بهبود کارآیی انرژی با نرخ نیاز به بازسازی مسکن، رابطه مستقیم دارد.



شکل ۸: تحلیل حساسیت ضریب هزینه مالک (b^o) بر بهبود کارآیی انرژی

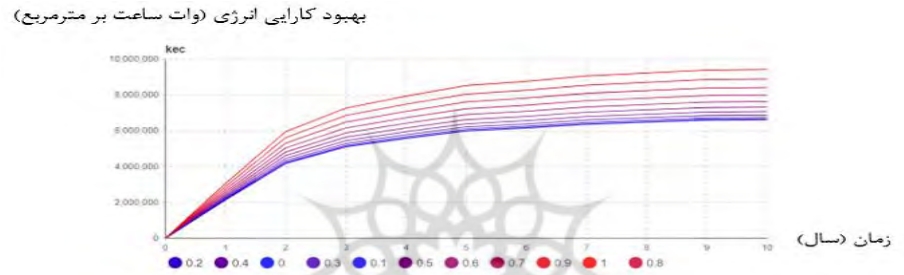
Figure 8: Sensitivity analysis of the owner's cost coefficient (b^o) on energy efficiency improvement

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۸، نتایج تحلیل حساسیت ضریب هزینه مالک (b^o) بر بهبود کارآیی انرژی را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ ده سالهٔ شبیه‌سازی و محور عمودی، بهبود کارآیی انرژی است. ۴ حالت یعنی (b^o) برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با

افزایش ضریب b^o، نمودار بهبود کارآیی انرژی در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، بهبود کارآیی انرژی با ضریب هزینه مالک، رابطه معکوس دارد، زیرا با افزایش ضریب هزینه مالک (b^o)، طبق رابطهٔ $a^o = \frac{k_{ec}^o + \beta^o k_{en}^o}{b^o}$ تلاش مالکان (a^o) برای اجرای فرایند بازسازی کاهش می‌یابد.

همچنین افزایش ضریب b^o، هزینه‌های بالاتر فرایند بازسازی را به‌همراه دارد که مانعی برای صرفه‌جویی در انرژی ایجاد می‌کند. برای کنترل عامل حساس هزینه، دولت باید تلاش کند تا هزینه‌های مالکان برای اجرای بازسازی را کاهش دهد. بنابراین، با افزایش هزینه‌ها و کاهش تلاش مالکان در اقدام به بازسازی، بهبود کارآیی انرژی کاهش می‌یابد.

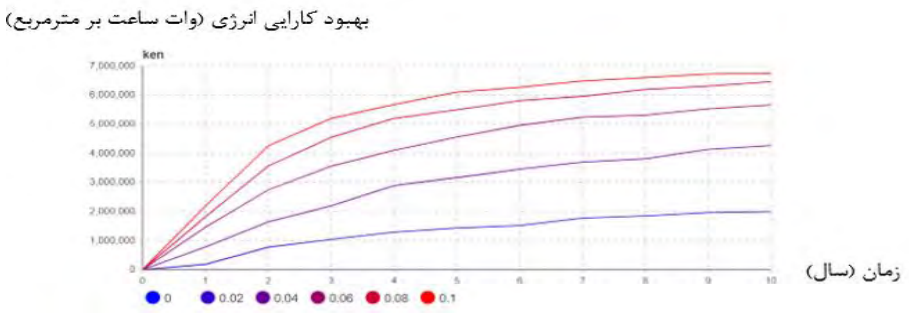


شکل ۹: تحلیل حساسیت ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o) بر بهبود کارآیی انرژی

Figure 9: Sensitivity analysis of the economic benefit coefficient (k_{ec}^o) on energy efficiency improvement

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۹، نتایج تحلیل حساسیت ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o) بر بهبود کارآیی انرژی را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ ده سالهٔ شبیه‌سازی و محور عمودی، بهبود کارآیی انرژی است. ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o) با گام‌های ۰/۱ در فاصله ۰ تا ۱ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهبود کارآیی انرژی با ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o)، رابطه مستقیم دارد. با افزایش k_{ec}^o، طبق رابطهٔ $a^o = \frac{k_{ec}^o + \beta^o k_{en}^o}{b^o}$، تلاش مالکان برای اجرای فرایند بازسازی افزایش می‌یابد، چرا که با افزایش این ضریب، منفعت اقتصادی بیشتری با اجرای بازسازی ساختمان‌ها نصیب مالکان می‌شود. بنابراین، با افزایش تلاش مالکان برای اجرای بازسازی ساختمان، بهبود کارآیی انرژی نیز بیشتر می‌گردد.



شکل ۱۰: تحلیل حساسیت ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) بر بهبود کارآیی انرژی

Figure 10: Sensitivity analysis of the environmental benefit coefficient (k_{en}^{o}) on energy efficiency improvement

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۱۰، نتایج تحلیل حساسیت ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) بر بهبود کارآیی انرژی را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ ده سالهٔ شبیه‌سازی و محور عمودی، بهبود کارآیی انرژی است. ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) با گام‌های ۰/۰۲ در فاصله ۰ تا ۰/۱ در نظر گرفته شده است. نتایج نمودار، حاکی از آن است که رابطه مستقیم بین بهبود کارآیی انرژی و ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) وجود دارد. بهبود کارآیی انرژی نسبت به تغییرات k_{en}^{o} بسیار حساس است. به‌عنوان نمونه با افزایش ضریب k_{en}^{o} از ۰/۰۲ به ۰/۰۴، بهبود کارآیی انرژی در انتهای دوره شبیه‌سازی حدود ۲ برابر شده است. علت این حساسیت بالا، آن است که ضریب k_{en}^{o} از یک طرف در رابطه $a^{o} = \frac{k_{ec}^{o} + \beta^{o} k_{en}^{o}}{b^{o}}$ با افزایش تلاش مالکان، منجر به بهبود کارآیی انرژی می‌شود. از طرف دیگر، ضریب k_{en}^{o} در رابطه مربوط به ضریب یارانه بهینه دولت یعنی $\beta^{o} = \frac{k_{en}^{o2}}{b^{o}\rho\sigma^{2} + k_{en}^{o2}}$ نیز حضور دارد. در این رابطه، با افزایش ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o})، منفعت بیشتری در نتیجهٔ بازسازی ساختمان‌ها نصیب دولت می‌شود،

در نتیجه دولت ترغیب می‌شود که یارانه بیشتری را به مالکان ساختمان‌ها پیشنهاد دهد و مجدداً تلاش مالکان را جهت اجرای بازسازی ساختمان‌ها تقویت می‌کند. بنابراین، با افزایش تلاش مالکان برای اجرای بازسازی ساختمان، بهبود کارآیی انرژی نیز افزایش می‌یابد. به‌طورکلی، ملاحظه می‌گردد که ضرایب منفعت اقتصادی (k_{ec}^{o}) و منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^{o}) که عمدتاً مرتبط با توسعه فناوری و وضعیت ساختمان‌ها است، می‌توانند نقش بسزایی در بهبود کارآیی انرژی ایفا کنند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر سیاست تشویقی یارانه دولت بر بهبود کارآیی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر شیراز با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور بررسی شده است. هدف اصلی از این پژوهش، ارائه راهکاری برای ترغیب مالکان ساختمان‌ها به بازسازی با بهره‌گیری از سیاست یارانه‌ای است، به‌طوری‌که هم منافع دولت و هم مطلوبیت مالکان به حداکثر برسد. به‌طور خاص، مدل پیشنهادی می‌تواند ویژگی‌های مختلف ساختمان‌ها و مالکان ساختمان‌ها را در نظر بگیرد و پیشنهادات سیاستی را برای ساختمان‌ها و مالکان ساختمان‌های مختلف با توجه به ویژگی‌های مختلف آن‌ها ارائه دهد.

این مدل، رویکردی مبتنی بر نظریه کارگزار-کارفرما را برای رسیدگی به مسئله نمایندگی در فرایند بازسازی و بهبود کارآیی انرژی در ساختمان‌ها ارائه می‌دهد. اکثر مطالعات قبلی، مسئله نمایندگی را از طریق مطالعات تجربی و روش‌های اقتصادسنجی تحلیل می‌کنند که نمی‌تواند منطق درونی این مسئله را آشکار کند. در این مطالعه، رفتار تصمیم‌گیری بر اساس نظریه کارگزار-کارفرما مدل‌سازی، و با روش عامل‌محور، شبیه‌سازی شده است.

در مدل پژوهش، سه عامل دولت، مالکان ساختمان‌های مسکونی و ساختمان‌های مسکونی درنظر گرفته شده است. آمار و اطلاعات مورد نیاز مربوط به توزیع مساحت ساختمان‌ها، توزیع کارآیی انرژی و نحوه تصرف افراد در خانه‌های مسکونی از سایت مرکز آمار ایران و سایت شهرداری شیراز گردآوری شده است. دولت به‌عنوان کارفرما، فرایند بازسازی ساختمان‌های مسکونی را به مالکان ساختمان‌ها به‌عنوان کارگزار واگذار می‌کند. هدف اصلی دولت، حداکثرسازی منافع ناشی از ارائه سیاست یارانه به مالکان ساختمان‌ها بوده، در حالی که هدف مالکان ساختمان‌ها، حداکثرسازی مطلوبیت خود از مشارکت در فرایند بازسازی ساختمان‌ها است. بر این اساس، دولت نرخ یارانه بهینه‌ای را به مالکان ساختمان‌ها پیشنهاد می‌دهد.

مالکان ساختمان‌هایی که در منازل خود سکونت دارند و خانه‌هایشان به بازسازی نیاز دارند، پیشنهاد دولت را بررسی می‌کنند. درصورتی‌که مطلوبیت انتظاری مالکان برابر یا بیشتر از یک حد آستانه‌ای صفر باشد، پیشنهاد دولت را می‌پذیرند و اقدام به بازسازی می‌کنند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای بازه ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰، نشان می‌دهد که دولت با طراحی سیاست کارآمد پرداخت یارانه به مالکان ساختمان‌های نیازمند بازسازی، توانسته در اجرای این سیاست، عملکرد موفقی داشته باشد و به‌رغم تضاد منافع میان دولت و مالکان ساختمان‌ها، دولت با ارائه یارانه بهینه، نه‌تنها مالکان

را به بازسازی ساختمان‌ها ترغیب کرده، بلکه منافع خود و مالکان را نیز به‌طور همزمان تأمین کرده است.

همچنین در پایان دوره ده سالهٔ شبیه‌سازی یک کاهش ۲۲/۲ درصدی در مصرف انرژی و بهبود ۲۲/۸ درصدی در کارآیی انرژی پس از بازسازی خانه‌های مسکونی نسبت به حالت قبل از بازسازی به وجود می‌آید. افزایش سالیانه ۱۰ درصدی در قیمت انرژی و سپس تحلیل حساسیت بر روی پنج پارامتر نرخ مالکیت مسکن، نرخ نیاز به بازسازی، ضریب هزینه مالک (b^o)، ضریب منفعت اقتصادی (k_{ec}^o) و ضریب منفعت زیست‌محیطی (k_{en}^o) بر روی بهبود کارآیی انرژی، نشان می‌دهد که بهبود کارآیی انرژی، با ضریب هزینه مالک، رابطه معکوس و با قیمت انرژی، نرخ مالکیت مسکن، نرخ نیاز به بازسازی و ضرایب منفعت اقتصادی و منفعت زیست‌محیطی، رابطه مستقیم دارد.

اگرچه نتایج نشان می‌دهد که سیاست ارائه شده توسط مدل پیشنهادی، موفق عمل کرده است، اما موانع عملی در اجرای این سیاست نیز باید مورد توجه قرار گیرد. از جملهٔ این موانع، آن است که اطلاعات مربوط به مساحت، سال ساخت، نحوه تصرف مالکان و مصرف انرژی تک‌تک خانه‌های مسکونی به صورت مستقل در دسترس نیست. چنان‌چه این اطلاعات مربوط به خانه‌های مسکونی در پایگاه‌های داده‌ای مجزا و دقیق ثبت شوند، نتایج بهتری حاصل می‌شود.

در مورد محدودیت‌های تحقیق، مشابه مدل‌های مبتنی بر نظریه کلاسیک نمایندگی، در این مطالعه فرض می‌شود که تمام ذی‌نفعان در تصمیم‌گیری‌های خود، به‌صورت عقلانی عمل می‌کنند. با این حال، در دنیای واقعی، تصمیم‌گیری ذی‌نفعان ممکن است تحت تأثیر عوامل غیرعقلانی مانند احساسات شخصی قرار گیرد.

در مطالعات آینده، باید رفتارهای غیرعقلانی ذی‌نفعان به‌طور عمیق‌تری تحلیل شود. همچنین، ضروری است که عوامل اجتماعی و روان‌شناختی مؤثر بر رفتار مالکان نیز در نظر گرفته شود. در نهایت، ویژگی‌های ذی‌نفعان که در این مدل تعریف شده‌اند، ممکن است به‌طور کامل تمام ویژگی‌های رفتار ذی‌نفعان را در برخی از موارد پیچیده نمایندگی نکنند. در مطالعات آینده، ویژگی‌ها و عملکردهای بیشتری از رفتار ذی‌نفعان می‌تواند اضافه شود تا دقت نتایج بهبود یابد.

در انتها با توجه به تأثیر سیاست پرداخت یارانه بر بازسازی، با پیاده‌سازی این پیشنهادات، می‌توان به بهبود کارآیی انرژی در مسکن‌های شهر شیراز و تسهیل فرایند بازسازی کمک کرد:

تدوین برنامه جامع یارانه‌های بازسازی مسکن: با توجه به نتایج پژوهش، پیشنهاد می‌شود که یک برنامه جامع و مدون برای ارائه یارانه‌های بازسازی مسکن در شهر شیراز تدوین شود. این برنامه، باید شامل جزئیاتی مانند میزان یارانه، نحوه پرداخت، شرایط دریافت و معیارهای ارزیابی باشد.

هدفمند کردن یارانه‌ها: برای افزایش اثربخشی یارانه‌ها، پیشنهاد می‌شود که این یارانه‌ها به‌صورت هدفمند و با توجه به نوع ساختمان، میزان مصرف انرژی و سایر عوامل مرتبط پرداخت شوند. به‌عنوان مثال، ساختمان‌های قدیمی‌تر و با مصرف انرژی بالاتر، می‌توانند از یارانه‌های بیشتری برخوردار شوند. پیشنهاد دیگر، این است که یارانه‌های نقدی با تسهیلات کم‌بهره برای نوسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی ترکیب شوند.

ارائه مشاوره‌های فنی و آموزشی: علاوه بر پرداخت یارانه، پیشنهاد می‌شود که مالکان ساختمان‌ها از مشاوره‌های فنی و آموزشی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی بهره‌مند شوند. این مشاوره‌ها، می‌توانند شامل راهنمایی در مورد انتخاب تجهیزات مناسب، نحوه اجرای صحیح عملیات بازسازی و سایر موارد مرتبط باشند.

ارزیابی و پایش مستمر: برای اطمینان از اثربخشی برنامه یارانه‌های بازسازی مسکن، پیشنهاد می‌شود که عملکرد این برنامه به‌صورت مستمر ارزیابی و پایش شود. این ارزیابی می‌تواند شامل بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی، رضایت مالکان و سایر شاخص‌های مرتبط باشد.

آگاهی‌بخشی و فرهنگ‌سازی: برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای مالکان درباره مزایای بهینه‌سازی انرژی و توسعه کمپین‌های اطلاع‌رسانی در رسانه‌ها برای استفاده از فناوری‌های کارآمد انرژی، می‌تواند مشوق افراد برای اقدام به بازسازی ساختمان‌های مسکونی باشد.

سپاسگزاری: موردی وجود ندارد.

تأییدیه‌های اخلاقی: موردی وجود ندارد.

تعارض منافع: موردی وجود ندارد.

سهم نویسندگان در مقاله: نویسنده اول (۰,۷)، نویسنده دوم (۰,۴)، نویسنده سوم (۰,۴) و نویسنده چهارم (۰,۴)

منابع مالی / حمایت‌ها: موردی وجود ندارد.

References

Baek, C., & Park, S. (2012). Policy measures to overcome barriers to energy renovation of existing buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3939-3947. doi:10.1016/j.rser.2012.03.046

Brown, M. A. (2001). Market failures and barriers as a basis for clean energy policies. *Energy policy*, *29*(14), 1197-1207. doi:10.1016/S0301-4215(01)00067-2

Chen, R., Fan, R., Yao, Q., & Qian, R. (2023). Evolutionary dynamics of homeowners' energy-efficiency retrofit decision-making in complex network. *Journal of Environmental Management*, *326*, 116849. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116849

D'Agostino, D., Minelli, F., Minichiello, F., & Russo, N. (2024). The impact of the new EPBD "Green Houses" in the Italian building context: Technical-economic analysis on improving the energy class of existing buildings. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 523, p. 04005). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202452304005

Feng, Q., Chen, H., Shi, X., & Wei, J. (2020). Stakeholder games in the evolution and development of green buildings in China: Government-led perspective. *Journal of Cleaner Production*, *275*, 122895. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122895

Galán, J. M., Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Santos, J. I., Del Olmo, R., López-Paredes, A., & Edmonds, B. M. (2009). Errors and artefacts in agent-based modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *12*(1), 1-1. doi: No DOI available

He, L., & Chen, L. (2021). The incentive effects of different government subsidy policies on green buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110123. doi: 10.1016/j.rser.2020.110123

Hosein Zade Bahreini, M. H., Naji, A. A., & Khadivy Rofougar, S. (2013). Examining the principal-agent problem as one of the market barriers to reduce energy consumption between traveler cars in Mashhad city. *Journal of Energy Planning And Policy Research*, (1), 29-56. doi: No DOI available [In Persian]

IEA. (2007). Mind the Gap: Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Eiffcienc□ doi:10.1787/9789264038950-en

Janzadeh, Amir Hossein, & Zandie, Mehdi. (2016). Feasibility study of a zero energy neighborhood in Qazvin. *Journal of Energy Planning and Policy Research*, *2*(3), 103-132. doi: No DOI available [In Persian]

Kadrić, D., Aganovic, A., Martinović, S., Delalić, N., & Delalić-Gurda, B. (2022). Cost-related analysis of implementing energy-efficient retrofit measures in the residential building sector of a middle-income country-A case study of Bosnia and Herzegovina. *Energy and Buildings*, *257*, 111765. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111765

Kowalska-Pyzalska, A., Maciejowska, K., Suszczyński, K., Sznajd-Weron, K., & Weron, R. (2014). Turning green: Agent-based modeling of the adoption of dynamic electricity tariffs. *Energy Policy*, *72*, 164-174. doi: 10.1016/j.enpol.2014.04.021

Liang, X., Yu, T., Hong, J., & Shen, G. Q. (2019). Making incentive policies more effective: An agent-based model for energy-efficiency retrofit in China. *Energy Policy*, *126*, 177-189. doi:10.1016/j.enpol.2018.11.029

Liu, G., Li, X., Tan, Y., & Zhang, G. (2020). Building green retrofit in China: Policies, barriers and recommendations. *Energy Policy*, *139*, 111356. doi: 10.1016/j.enpol.2020.111356

Liu, W., Zhang, J., Bluemling, B., Mol, A. P., & Wang, C. (2015). Public participation in energy saving retrofitting of residential buildings in China. *Applied energy*, *147*, 287-296. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.090

Ma, Z.J., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy Build*. *55*, 889-902. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018

Macho-Stadler, I., & Pérez-Castrillo, D. (2012). *Principal-Agent Models*. Springer, New York. doi:10.1007/978-0-387-30440-3_416

Marchiori, A., & Han, Q. (2010). Distributed wireless control for building energy management?. In: *Proceedings of the 2nd. ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building*. ACM, Zurich, Switzerland, 37-42. doi:10.1145/1878431.1878441

Nägeli, C., Jakob, M., Catenazzi, G., & Ostermeyer, Y. (2020a). Policies to decarbonize the Swiss residential building stock: An agent-based building stock modeling assessment. *Energy Policy*, *146*, 111814. doi: 10.1016/j.enpol.2020.111814

Parang, S., dehghan shabani, Z., Hadian, E., & Asgary, A. (2024). Tax on vacant houses and housing price bubble in Shiraz. *The Economic Research*, *24*(4), 271-300. doi: 10.22034/24.4.271 [In Persian]

Prasad, D., Teo, M., & Dave, M. (2009). Retrofitting Residential Housing and Precincts: Current Practice, New Strategies and Training Responses. doi: No DOI available

Rezaeinasab, S., Tayefi Nasrabadi, A., Asadi, S., & Haj Seiyed Taghia, S. A. (2023). Investigating the potential of designing net-zero energy buildings using photovoltaic installation with considering urban development plans requirements. *Ferdowsi Civil Engineering*, *36*(1), 51-68. doi: 10.22067/jfcei.2023.79510.1190 [In Persian]