

Research Paper

Strategic Assessment of Household Energy Imbalances Using a Cluster Bootstrap Approach and an Integrated Policy Model: A Case Study of Semnan Province



Mohammad Javad Kolivand¹, Esmail Saghhab Esfahani², Seifollah Saadodin³, Majid Gholhaki⁴, Omid Karimi⁵, Fatemeh Hosseini⁵, Farajollah Iliat⁶

1. Governor General of Semnan Province, Semnan Provincial Government, Semnan, Iran.
2. Vice President, Head of the Organization for Energy Optimization and Strategic Management, Tehran, Iran.
3. Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
4. Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
5. Associate Professor, Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran.
6. The Deputy Coordinator of Civil Affairs of Semnan Provincial Government, Semnan, Iran.

Use your device to scan and read the article online



Citation: Kolivand.M. J., Saghhab Esfahani.E, Sadodin.S, Gholhaki.M, Karimi.O, Hosseini.F, Eliat.F (2025).[Strategic Assessment of Household Energy Imbalances Using a Cluster Bootstrap Approach and an Integrated Policy Model: A Case Study of Semnan Province (Persian)]. *Journal Strategic Studies of Public Policy*, 15(56),24-56.<https://doi.org/10.22034/sspp.2026.2080852.3881>



<https://doi.org/10.22034/sspp.2026.2080852.3881>



Received: 14 Sep 2025
Accepted: 12 Oct 2025
Available Online: 21 Dec 2025

Keywords:

Energy consumption threshold; Energy imbalance; Consumption pattern; Cluster bootstrap sampling

ABSTRACT

Energy subsidies in Iran have long been used as a key instrument to ease household cost burdens and provide social support. However, deviations from prescribed consumption patterns and above-threshold use in the residential sector lead to resource waste and exacerbate energy imbalance and fiscal pressure on the government. Focusing on integrated urban–rural households in Semnan Province, this study first collected household and dwelling characteristics through a multi-stage cluster sampling field survey, and then matched these survey records to administrative utility data to obtain observed (actual) electricity and natural gas consumption for the Iranian year 1403 at the household level. Consumption was subsequently assessed against national per-capita energy thresholds. In addition to constructing an excess-from-threshold index, cluster bootstrap resampling was used to quantify uncertainty and to derive the empirical distribution of the success rate under three policy scenarios. Results indicate that, in the baseline situation, about 55% of households fall within the threshold. This share increases to about 66% under a hypothetical 20% consumption reduction, and to about 76% under a combined scenario of a 30% threshold increase alongside a 20% consumption reduction. Moreover, the final logistic model suggests that heterogeneity in success is primarily associated with building and climatic factors (e.g., floor area, building age, and climate zone) as well as household size. The policy implication is that sustained improvement in threshold compliance cannot be achieved through technical recommendations alone; it requires the joint design of financial and social incentives, scalable behavioral instruments, and a regulatory framework built around a single uniform threshold, so that households are autonomously motivated to adjust consumption behavior and invest in energy efficiency, with minimal supportive provisions for vulnerable groups.

* Corresponding Author:

Omid Karimi

Address: Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran.

E-mail: omid.karimi@semnan.ac.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی راهبردی ناترازی انرژی خانوارها با رویکرد نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای و ارائه مدل سیاستی تلفیقی: مطالعه موردی استان سمنان

محمدجواد کولیوند^۱، اسماعیل سقاب اصفهانی^۲، سیف‌اله سعدالدین^۳، مجید قلهکی^۴، امید کریمی^۵،
فاطمه حسینی^۶، فرج‌اله ایلیات^۶

۱. استانداری سمنان، استانداری سمنان، سمنان، ایران.
۲. معاون رئیس‌جمهور، رئیس سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی، تهران، ایران.
۳. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۴. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۵. دانشیار، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۶. معاون عمرانی، استانداری سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

تاریخ دریافت: ۲۳ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۰ مهر ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۳۰ آذر ۱۴۰۴

یارانه‌های انرژی در ایران همواره به‌عنوان ابزاری کلیدی برای کاهش فشار هزینه‌ای خانوارها و حمایت اجتماعی به‌کار گرفته شده‌اند. با این حال، انحراف از الگوهای تعیین‌شده و مصرف فراتر از آستانه‌ها در بخش خانگی، به اتلاف منابع و تشدید ناترازی و بار مالی دولت می‌انجامد. این پژوهش با تمرکز بر خانوارهای شهری، روستایی و ادغامی استان سمنان، ابتدا اطلاعات خانوار و ویژگی‌های ساختمان را در قالب یک طرح نمونه‌گیری چندمرحله‌ای خوشه‌ای و پیمایش میدانی گردآوری کرد و سپس با لینک‌کردن رکوردهای پیمایش به داده‌های شرکت توزیع برق و گاز و سامانه رفاهی، مصرف واقعی برق و گاز سال ۱۴۰۳ و دهک رفاهی را در سطح خانوار استخراج نمود، آن‌گاه میزان انطباق مصرف با آستانه‌های سرانه ملی ارزیابی شد. علاوه بر محاسبه شاخص انحراف از آستانه، برای سنجش پایداری و عدم قطعیت برآوردها، نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای به‌کار گرفته شد و توزیع تجربی نرخ موفقیت تحت سه سناریوی سیاستی استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد در وضعیت پایه حدود ۵۵ درصد خانوارها در محدوده آستانه قرار دارند. این مقدار با فرض کاهش ۲۰ درصدی مصرف به حدود ۶۶ درصد و در سناریوی ترکیبی افزایش ۳۰ درصدی آستانه همراه با کاهش ۲۰ درصدی مصرف به حدود ۷۶ درصد می‌رسد. همچنین، نتایج مدل لوجیت نشان می‌دهد ناهمگنی موفقیت بیش از همه با عوامل کالبدی و اقلیمی (مانند زیربنا، سن بنا و اقلیم) و نیز بعد خانوار مرتبط است. جمع‌بندی سیاستی پژوهش آن است که بهبود پایدار انطباق با آستانه، صرفاً با توصیه‌های فنی محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند طراحی هم‌زمان انگیزه‌های مالی و اجتماعی، ابزارهای رفتاری مقیاس‌پذیر و سازوکارهای تنظیمی مبتنی بر آستانه واحد است تا خانوارها به‌صورت خودانگیخته، البته با تمهیدات حمایتی حداقلی برای گروه‌های آسیب‌پذیر به اصلاح رفتار مصرف و سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی ترغیب شوند.

کلیدواژه‌ها:

آستانه مصرف انرژی،
ناترازی انرژی، الگوی
مصرف، نمونه‌گیری
خودگردان خوشه‌ای

* نویسنده مسئول:

امید کریمی

نشانی: دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

رایانامه: omid.karimi@semnan.ac.ir

مقدمه

موفقیت یا عدم موفقیت خانوارها در رعایت مرزهای تعیین‌شده مشخص گردد. استان سمنان به‌عنوان یک نمونه مناسب و قابل‌تعمیم برای مطالعه ناترازی و رفتار مصرف انرژی در سطح خانوار انتخاب شد، زیرا در عین برخورداری از تنوع اقلیمی (از نواحی سرد و کوهستانی تا پهنه‌های گرم و خشک و نیمه‌کوبیری) و تفاوت محسوس در نیازهای گرمایشی و سرمایشی، دارای ترکیب متوازن شهری-روستایی و سکونتگاه‌های ادغامی است که الگوهای مصرف را در مرز دو سبک زندگی نمایندگی می‌کند. همچنین استان از حیث سطوح متفاوت برخورداری اقتصادی-اجتماعی (کم‌برخوردار تا برخوردار) و تنوع کالبدی ساختمان‌ها و دسترسی به زیرساخت‌های انرژی، امکان مشاهده ناهمگنی رفتاری و سنجش عدالت آستانه‌های سرانه را فراهم می‌سازد. از منظر اجرایی نیز مقیاس جمعیتی و جغرافیایی قابل‌مدیریت استان، آن را به گزینه‌ای مناسب برای اجرای پایلوت پیمایش میدانی و طرح نمونه‌گیری چندمرحله‌ای خوشه‌ای تبدیل می‌کند، ضمن آن که همراهی نهادی دستگاه‌های اجرایی و شبکه‌های محلی و سطح مناسب اعتماد و همکاری اجتماعی، کیفیت گردآوری داده‌های واقعی مصرف را تقویت کرده و ریسک خطاهای میدانی را کاهش می‌دهد. بنابراین سمنان، به‌واسطه هم‌زمانی تنوع اقلیمی، ناهمگنی اقتصادی-اجتماعی، ترکیب شهری-روستایی و قابلیت اجرای میدانی، بستری مناسب برای ارزیابی داده‌محور آستانه‌های ملی و طراحی بسته‌های سیاستی تلفیقی در مدیریت تقاضای انرژی محسوب می‌شود. این مطالعه از محدود پژوهش‌هایی است که با داده‌های میدانی و واقعی و نه صرفاً مبتنی بر داده‌های تجمیعی یا فرضیات مدل‌سازی، مصرف برق و گاز خانوارها را در سطح خرد رصد و با آستانه‌های سرانه ملی مقایسه می‌کند.

موضوع ناترازی انرژی در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های بنیادین نظام اقتصادی و زیست‌محیطی کشور تبدیل شده است، (موسوی و شریفی، ۱۴۰۳). رشد مداوم مصرف در بخش خانگی، هم‌زمان با محدودیت منابع تولیدی و تلفات بالای زنجیره‌ی عرضه، منجر به افزایش شکاف میان عرضه و تقاضا شده است. بخش قابل‌توجهی از این ناترازی ناشی از الگوهای غیربهرینه‌ی مصرف در خانوارها و فاصله‌ی آن‌ها از مقادیر مرجع تعیین‌شده در سیاست‌های ملی انرژی است، (صابری و ظفریان ریگی، ۱۴۰۲). مطالعات اخیر سیاست‌گذاری انرژی درباره‌ی ایران نشان می‌دهد ناترازی انرژی ماهیت چندحاملی و فصلی دارد و به‌همین دلیل، مواجهه مؤثر با آن مستلزم رویکردهای سناریومحور و نیز بسته‌های سیاستی تلفیقی در سمت عرضه و تقاضا از سرمایه‌گذاری زیرساختی تا اصلاحات قیمتی و تنوع‌بخشی منابع است، (فریادرس^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). در این میان، تعیین آستانه‌های سرانه برای مصرف انرژی، ابزاری کلیدی جهت پیش، مقایسه و سیاست‌گذاری عادلانه تلقی می‌شود، (موسوی و همکاران، ۱۴۰۲). راعی^۲ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند اصلاح یارانه انرژی می‌تواند به کاهش شدت انرژی منجر شود، اما هم‌زمان با افزایش هزینه انرژی، فشار قیمتی کوتاه‌مدت ایجاد می‌کند. بنابراین سیاست‌گذاری موفق نیازمند اجرای مرحله‌ای و طراحی ابزارهای مکمل در سمت تقاضا است.

در چارچوب این پژوهش، هدف آن است که الگوی مصرف خانوارهای ادغامی شهری روستایی استان سمنان با آستانه‌های ملی مقایسه شود تا میزان

1. Faryadras
2. Raei

۲۰ درصدی مصرف به‌عنوان یک شوک رفتاری عملیاتی و (۲) سناریوی تلفیقی شامل افزایش ۳۰ درصدی آستانه همراه با کاهش ۲۰ درصدی مصرف. کاهش ۲۰ درصدی مصرف در این مطالعه به‌مثابه تقریب یک واکنش رفتاری به تغییر انگیزه‌های مالی یا مداخلات غیرقیمتی (آگاهی‌بخشی، بازخورد و مقایسه اجتماعی) در نظر گرفته شده است، شواهد ادبیات نیز نشان می‌دهد مداخلات غیرقیمتی می‌توانند اثری هم‌جهت با تغییرات قیمتی بر کاهش مصرف ایجاد کنند (مونداکا و همکاران، ۲۰۲۲). هدف اصلی مطالعه، ارائه یک ارزیابی تجربی از میزان انطباق مصرف با آستانه‌های ملی و استخراج پیامدهای قابل استفاده برای مدیریت تقاضا و کاهش ناترازی انرژی در سطح خانوار است. بر این اساس، سؤال محوری پژوهش آن است که در خانوارهای ادغامی استان سمنان، چه سهمی از مصرف سالانه برق و گاز در سال ۱۴۰۳ (به‌صورت تفکیکی و نیز در قالب مصرف ترکیبی معادل‌سازی‌شده) در محدوده آستانه‌های سرانه ملی قرار می‌گیرد و این نرخ موفقیت تحت سه وضعیت سیاستی (پایه، کاهش ۲۰ درصدی مصرف و سناریوی تلفیقی تعدیل آستانه به‌علاوه کاهش مصرف) چگونه تغییر می‌کند؟ برای پاسخ به این سؤال، علاوه بر گزارش نرخ‌های موفقیت، عدم‌قطعیت برآوردها با رهیافت بوت‌استرپ^۳ (نمونه‌گیری خودگردان) خوشه‌ای (سازگار با ساختار نمونه‌گیری) کمی‌سازی می‌شود و به‌منظور تبیین عوامل مرتبط با موفقیت و عدم‌موفقیت، از رگرسیون لجستیک^۴ با خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای و ارزیابی عملکرد خوشه‌محور استفاده خواهد شد.

آستانه‌ی سرانه‌ی سالانه هر فرد براساس مصرف سال ۱۴۰۳ کشوری (۷۰۰ مترمکعب گاز و ۱۲۰۰ کیلووات ساعت برق) در نظر گرفته شده است. برای مقایسه‌ی انرژی میان دو حامل، نرخ گاز سه برابر برق لحاظ شده است. بدین معنا که مصرف گاز در محاسبات معادل‌سازی، با ضریب سه نسبت به برق وزن‌دهی می‌شود تا انرژی حرارتی و برقی در یک مقیاس قابل قیاس تحلیل گردد. مطابق گزارش‌های رسمی وزارت نیرو، راندمان نیروگاه‌های حرارتی کشور در سال‌های اخیر حدود ۳۹ درصد برآورد شده است. به بیان دیگر، برای تولید هر ۱ کیلووات‌ساعت برق مفید، به‌طور متوسط حدود ۴/۱۳ کیلووات‌ساعت انرژی حرارتی ورودی نیاز است. با لحاظ تلفات انتقال و توزیع برق که در حدود ۲۰ درصد برآورد می‌شود، مقدار مؤثر این نسبت به حدود ۳/۳ کیلووات‌ساعت کاهش می‌یابد. از این‌رو، استفاده از ضریب سه در مقایسه‌ی گاز و برق، نشان‌دهنده‌ی نسبت تقریبی تبدیل گاز به برق در نیروگاه‌هاست و پایه‌ای فنی برای تحلیل ترکیبی انرژی به‌شمار می‌رود.

در این مطالعه، با تمرکز بر خانوارهای شهری، روستایی و ادغامی استان سمنان، ابتدا اطلاعات خانوار، ویژگی‌های ساختمان و اقلیم را در قالب یک طرح نمونه‌گیری چندمرحله‌ای خوشه‌ای و پیمایش میدانی گردآوری می‌گردد. سپس با لینک‌کردن رکوردهای پیمایش به داده‌های شرکت توزیع برق و گاز و سامانه رفاهی، مصرف واقعی برق و گاز سال ۱۴۰۳ و دهک رفاهی را در سطح خانوار استخراج می‌نماید و با آستانه محاسبه‌شده برای هر خانوار (بر مبنای بعد خانوار و آستانه سرانه ملی) مقایسه می‌شود. علاوه بر وضعیت پایه، دو سناریوی سیاستی و رفتاری نیز بررسی می‌گردد: (۱) کاهش

3. Bootstrap Sampling
4. Logistic Regression

مصرف انرژی اثری مشابه از تغییرات قیمتی داشته باشد، (کاروس^۶ و همکاران، ۲۰۲۱؛ آلکات و راجرز^۷، ۲۰۱۴؛ آبراهامسه^۸ و همکاران، ۲۰۰۵). این یافته‌ها مبنای طراحی سناریوهای اصلاح رفتاری در سیاست‌های انرژی است که در پژوهش حاضر نیز با فرض کاهش ۲۰ درصدی مصرف در نظر گرفته شده است. چنین سناریوهایی در واقع تقریب‌هایی از واکنش رفتاری مصرف‌کنندگان به تغییر در انگیزه‌های مالی و اجتماعی‌اند، که می‌توان آن را مشابه اثر کشش قیمتی تقاضا تفسیر کرد. شواهد اقتصادسنجی اخیر درباره ایران نشان می‌دهد تداوم و تعویق در اصلاح یارانه‌های برق، با تضعیف کشش قیمتی و نهادینه‌سازی اتکای مصرف‌کنندگان به انرژی ارزان، نه تنها بار مالی دولت را تشدید می‌کند، بلکه اثربخشی اصلاحات آتی را نیز کاهش می‌دهد. از این رو رویکردهای اصلاح تدریجی و مرحله‌ای همراه با حمایت هدفمند از خانوارهای آسیب‌پذیر توصیه شده است، (مامپور^۹ و همکاران، ۲۰۲۵). در نظام تعرفه‌گذاری برق خانگی، الگوی مصرف نسبت به آستانه به‌عنوان مبنای تفکیک رفتار مصرفی مشترکان و اعمال سیگنال‌های قیمتی به پرمصرف‌ها به کار گرفته می‌شود، از این رو سنجش انطباق مصرف خانوار با آستانه‌ها، برای سیاست‌گذاری اهمیت کلیدی دارد، (موسوی و همکاران، ۱۴۰۲). به عبارت دیگر اصلاحات یارانه‌ای، تعیین آستانه مصرف و بازطراحی سازوکارهای بازتوزیع، وقتی اثربخش است که با حکمرانی مناسب دو حامل و منطق تنظیم‌گری همراه شود (همایون و همکاران، ۱۴۰۳). مطالعه حاضر در سطح خرد و با داده‌های میدانی

در ادامه، بخش پیشینه چارچوب نظری و خلأها را جمع‌بندی می‌کند، بخش روش‌شناسی نحوه تعریف آستانه‌ها و شاخص‌ها و اجرای سناریوها را توضیح می‌دهد و سپس نتایج و دلالت‌های سیاستی ارائه می‌گردد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در ادبیات اقتصاد انرژی، بررسی الگوی مصرف خانوار و طراحی ابزارهای سیاستی برای کنترل ناترازی مصرف، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. گزارش‌های تحلیلی داخلی نشان می‌دهد ناترازی در تأمین و تقاضای برق، به‌ویژه در ایام اوج مصرف، به یکی از عارضه‌های اصلی صنعت برق کشور تبدیل شده و نیازمند مداخلات مؤثر در سمت تقاضاست، (موسوی و شریفی، ۱۴۰۳). در بخش گاز نیز گزارش‌های سیاستی بر این نکته تأکید دارند که راه‌حل‌های تک‌محور (صرفاً افزایش تولید یا اصلاح قیمت) کفایت ندارد و طراحی بسته‌های سیاستی ترکیبی ضروری است، (صابری و ظفریان، ۱۴۰۲).

نظریه‌های کلاسیک مصرف انرژی نشان می‌دهند که تصمیمات مصرفی خانوار نه تنها از سطح درآمد و قیمت نسبی حامل‌های انرژی تأثیر می‌پذیرد، بلکه متأثر از هنجارهای اجتماعی، آگاهی زیست‌محیطی و شرایط اقلیمی نیز هست، (گیلینگهام^۵ و همکاران، ۲۰۱۶؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در واقع بخش قابل‌توجهی از تغییرات مصرفی، ناشی از رفتار و نگرش مصرف‌کنندگان است نه صرفاً از تغییرات قیمتی. مطالعات جدیدتر در حوزه اقتصاد رفتاری انرژی نشان داده‌اند که مداخلات غیرقیمتی مانند اطلاع‌رسانی هدفمند، مقایسه‌ی اجتماعی مصرف و ارائه‌ی بازخوردهای مستمر می‌تواند در کاهش

6. Carrus

7. Allcott and Rogers

8. Abrahamse

9. Mamipour

5. Gillingham

فنی و تعرفه‌ای برای پایداری بلندمدت.

در حوزه آمار محاسباتی، روش نمونه‌گیری خودگردان به‌عنوان یک رهیافت ناپارامتری برای برآورد خطای معیار، توزیع نمونه‌گیری و فواصل اطمینان بدون اتکا به فروض تحلیلی پیچیده معرفی شده است. افرون^{۱۲} (۱۹۷۹) برای نخستین بار این روش را در قالب شبیه‌سازی با جایگزینی از داده‌های مشاهده‌شده مطرح کرد و نشان داد که در بسیاری از مسائل پیچیده، عملکرد آن مطلوب است. در ادامه، افرون و تی‌بشیرانی^{۱۳} (۱۹۹۴) با ارائه چارچوبی منسجم برای نمونه‌گیری خودگردان و انواع فواصل اطمینان، این روش را به یکی از ابزارهای استاندارد در ارزیابی عدم قطعیت آماری تبدیل کردند. با این حال، در حضور وابستگی درون‌خوشه‌ای، استفاده از نمونه‌گیری خودگردان ساده می‌تواند منجر به برآورد کمتر از واقع واریانس شود. به همین دلیل، روش‌هایی مانند نمونه‌گیری خودگردان بلوکی و نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای برای داده‌های وابسته و طرح‌های نمونه‌گیری خوشه‌ای توسعه یافته‌اند (داویسون^{۱۴} و هینکلی^{۱۵}، ۱۹۹۷ و لاهیری^{۱۶}، ۲۰۰۳، هانگ^{۱۷}، ۲۰۱۸، مینزل^{۱۸}، ۲۰۲۱). در این پژوهش نیز با توجه به ساختار خوشه‌ای داده‌ها (محلها و روستاها)، از نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای استفاده شده است تا همبستگی درون‌خوشه‌ای حفظ شود و فواصل اطمینان نرخ موفقیت به‌صورت مقاوم برآورد گردد. در مطالعات بین‌المللی انرژی، روش‌های شبیه‌سازی و نمونه‌گیری خودگردان

خانوارهای ادغامی استان سمنان، این بحث را در قالب انطباق با آستانه مصرف و سناریوهای رفتاری-ترکیبی، به‌صورت داده‌محور ارزیابی می‌کند.

در زمینه‌ی تحلیل آستانه‌های مصرف، مطالعات بین‌المللی بر توسعه‌ی شاخص‌های سرانه‌ی انرژی خانوار تأکید دارند تا با در نظر گرفتن اندازه‌ی خانوار، اقلیم و نوع سکونت، ارزیابی منصفانه‌ای از کارایی مصرف ارائه شود، (جیانگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲). در ایران نیز چند پژوهش ملی و استانی تلاش کرده‌اند با تعیین آستانه‌های سرانه‌ی برق و گاز و مقایسه‌ی آن با مصرف واقعی، الگوی ناترازی را شناسایی کنند (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۴).

با این حال، تمرکز بر خانوارهای ادغامی شهری-روستایی و تحلیل تلفیقی برق و گاز به‌صورت هم‌زمان در سطح خرد، در مطالعات پیشین کمتر دیده می‌شود و وجه تمایز پژوهش حاضر محسوب می‌گردد. از سوی دیگر، تحلیل‌های انجام‌شده توسط مونداکا و همکاران (۲۰۲۲) و آژانس بین‌المللی انرژی^{۱۱} (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که تلفیق سه نوع مداخله‌ی رفتاری، فناوریانه و تعرفه‌ای بیشترین اثربخشی را در بهینه‌سازی مصرف خانگی دارد. یافته‌های این مطالعات با نتایج این پژوهش هم‌راستا است. بدین معنا که حتی خانوارهایی که از زیرساخت‌های بهتر برخوردارند، در صورت فقدان انگیزه‌های رفتاری، همچنان در گروه پرمصرف‌ها قرار می‌گیرند. برآیند نظری این است که سیاست‌گذاری مؤثر در حوزه‌ی انرژی خانگی باید بر سه محور مکمل استوار باشد: تعریف آستانه‌های سرانه‌ی وزنی بر اساس بعد خانوار و اقلیم، مداخلات رفتاری برای تغییر نگرش و ایجاد خودتنظیمی مصرف؛ اصلاحات

12. Efron
13. Tibshirani
14. Davison
15. Hinkley
16. Lahiri
17. Huang
18. Menzel

10. Jiang
11. International Energy Agency (IEA)

● خلأ تحلیل هم‌زمان حامل‌ها: بسیاری از پژوهش‌ها برق و گاز را جداگانه بررسی کرده‌اند و کمتر چارچوبی ارائه شده که هم‌زمان، رفتار مصرف را در دو حامل و نیز در قالب مصرف ترکیبی هم‌مقیاس شده ارزیابی کند.

● خلأ تیپ سکونت ادغامی شهری-روستایی: خانوارهای ادغامی (شهری-روستایی) به‌عنوان یک تیپ کمتر مطالعه‌شده، به دلیل هم‌زمانی ویژگی‌های کالبدی و الگوهای رفتاری دو محیط، می‌توانند نتایجی متفاوت از الگوهای صرفاً شهری یا روستایی داشته باشند، اما در ادبیات داخلی کمتر به‌صورت مستقل و داده‌محور تحلیل شده‌اند.

● خلأ سنجش عدم قطعیت تحت طرح خوشه‌ای: معمولاً در مطالعاتی که نرخ‌ها گزارش می‌شوند، این نرخ غالباً به‌صورت نقطه‌ای ارائه شده و پایداری و عدم قطعیت آن به‌ویژه با لحاظ همبستگی درون‌خوشه‌ای کمتر به‌صورت مقاوم کمی‌سازی شده است.

● خلأ پیوند مستقیم نتایج با طراحی بسته سیاستی تلفیقی: ادبیات سیاستی بر ضرورت راه‌حل‌های چندمحوری تأکید می‌کند، اما کمتر پژوهشی اثر سناریوهای تلفیقی (ترکیب اصلاح رفتار با تعدیل آستانه و طراحی تعرفه‌ای) را در مقیاس خانوار و با خروجی‌های قابل سنجش برای تصمیم‌سازی اجرایی نشان داده است.

مطالعه حاضر برای پوشش خلأهای فوق، چهار نوآوری عملیاتی را دنبال می‌کند: (الف) استفاده از داده‌های واقعی مصرف خانوارها که در قالب طرح نمونه‌گیری چندمرحله‌ای خوشه‌ای گردآوری شده و امکان تعمیم درون‌استانی را فراهم می‌سازد، (ب) تعریف و محاسبه شاخص‌های انحراف از آستانه و نرخ موفقیت در رعایت آستانه برای برق، گاز و مصرف

به‌عنوان ابزارهایی برای تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی ریسک در سیاست‌گذاری انرژی رواج یافته‌اند. نمونه‌هایی از این رویکرد شامل تحلیل حساسیت تقاضای گاز و برق، مدل‌سازی فواصل اطمینان و پیش‌بینی تقاضای برق با شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری خودگردان (هاراشه^{۱۹}، ۲۰۱۶ و پلائیز^{۲۰} و همکاران، ۲۰۲۴) هستند. این مطالعات نشان داده‌اند که در حوزه انرژی، داده‌ها اغلب وابستگی مکانی، زمانی یا خوشه‌ای دارند و روش‌های کلاسیک آماری در برآورد خطای معیار ناکارآمد می‌شوند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد ناترازی انرژی در بخش خانگی پدیده‌ای تک‌علتی نیست و از برهم‌کنش سه مؤلفه شکل می‌گیرد: سیاست‌های اقتصادی-تعرفه‌ای و ساختار یارانه‌ها (سیگنال‌های قیمتی و انگیزه‌های مالی)، عوامل فنی-کالبدی (کیفیت ساختمان و بازده تجهیزات، به‌ویژه در گرمایش و سرمایش) و عوامل رفتاری-اطلاعاتی (آگاهی، هنجارها، بازخورد و خودتنظیمی مصرف). همچنین در مطالعات روش‌شناسی تأکید دارند در داده‌های خوشه‌ای و وابسته، سنجش عدم قطعیت با روش‌های کلاسیک می‌تواند ناکافی باشد و باید از رهیافت‌های بازنمونه‌گیری سازگار با ساختار طرح نمونه‌گیری بهره گرفت. با وجود این، جمع‌بندی مطالعات پیشین چند خلأ مشخص را برجسته می‌کند که در ادامه مبنای طراحی مقاله حاضر قرار می‌گیرد:

● خلأ سطح داده و مقیاس تحلیل: بخش قابل توجهی از شواهد داخلی بر داده‌های کلان یا تحلیل‌های غیر خرد متکی است و در نتیجه ارزیابی انطباق خانوار با آستانه‌های مصرف در سطح میکرو و با داده‌های واقعی کمتر انجام شده است.

19. Harasheh

20. Pelaez

روش‌شناسی تحقیق

طرح پژوهش، جامعه آماری و طراحی نمونه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی رفتار مصرف انرژی خانوارها و سنجش میزان انطباق آن با آستانه‌های ملی مصرف برق و گاز انجام شده است. طراحی تحقیق از نوع توصیفی و تحلیلی با رویکرد کاربردی است و داده‌های مورد استفاده شامل مصرف واقعی برق و گاز خانوارهای استان سمنان در سال ۱۴۰۳ می‌باشد. در این مطالعه، برای هر فرد آستانه‌ی سرانه‌ی سالانه‌ی کشوری مربوط به سال ۱۴۰۳ در نظر گرفته شد و برای مقایسه‌ی حامل‌ها، ضریب تبدیل گاز به برق برابر با عدد سه فرض گردید. آستانه‌ی خانوار متناسب با بعد خانوار محاسبه و سپس مصرف واقعی خانوار با آن مقایسه شد تا میزان موفقیت یا عدم موفقیت هر خانوار در رعایت آستانه تعیین شود. به‌منظور بررسی اثر اصلاح الگو، یک سناریوی شبیه‌سازی کاهش ۲۰ درصدی مصرف به‌عنوان مداخله‌ی رفتاری فرضی طراحی گردید و تغییرات وضعیت خانوارها نسبت به آستانه در این سناریو مورد ارزیابی قرار گرفت. این سناریو از منظر اقتصادی می‌تواند معادل واکنش رفتاری مصرف‌کننده به تغییر در انگیزه‌های مالی یا قیمتی تلقی شود. گردآوری داده‌های خرد خانوار و ویژگی‌های مسکن به‌صورت پیمایش میدانی و با همکاری تسهیل‌گران محلی انجام شد. بهره‌گیری از تسهیل‌گران به‌دلیل دسترسی اجتماعی، آشنایی با بافت فرهنگی و زبانی منطقه، به کاهش خطای پاسخ و افزایش همکاری خانوارها کمک می‌کند (کازمیان، ۱۴۰۱؛ باجووند، ۱۴۰۱). جامعه آماری این مطالعه شامل کلیه خانوارهای دارای اشتراک گاز و برق در مناطق شهری و روستایی استان سمنان است.

ترکیبی هم‌مقیاس شده، (پ) برآورد مقاوم عدم قطعیت با نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای و استخراج توزیع تجربی نرخ موفقیت و فواصل اطمینان ۹۵ درصد تحت ساختار واقعی داده‌ها و (ت) ارزیابی سناریو محور سه وضعیت سیاستی (پایه، کاهش ۲۰ درصد مصرف به‌عنوان مداخله رفتاری و سناریوی تلفیقی تعدیل آستانه همراه با کاهش مصرف) به‌منظور تبدیل خروجی‌های آماری به پیامدهای قابل استفاده در سیاست‌گذاری. گردآوری اطلاعات به‌صورت میدانی و با رهیافت تسهیل‌گری محلی انجام شد و ویژگی‌های خانوار، اقلیم و مسکن در سامانه موبایلی برخط ثبت گردید. در گام بعد، داده‌های پرسش‌نامه‌ای با مصرف واقعی برق و گاز (شرکت‌های توزیع) و اطلاعات دهک رفاهی (سامانه رفاهی) در سطح خرد لینک شد و یک پایگاه داده چندمنبعی شکل گرفت. تمامی مراحل پاک‌سازی، اعتبارسنجی، هم‌پیوندسازی رکوردها، محاسبه شاخص‌ها، اجرای سناریوها و نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای (۵۰۰۰ تکرار) و نیز برآوردهای اقتصادسنجی با استفاده از نرم‌افزار پایتون پیاده‌سازی شد. این معماری داده با کاهش اتکای تحلیل به خوداظهاری مصرف، قابلیت اتکای اندازه‌گیری را افزایش داده و امکان تحلیل سیاستی دقیق‌تر بر حسب رفاه، اقلیم و ویژگی‌های کالبدی را فراهم می‌سازد. بر این مبنا، بخش روش‌شناسی نشان می‌دهد آستانه‌ها و شاخص‌ها چگونه تعریف می‌شوند، سناریوها و نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای چگونه اجرا می‌گردد و در ادامه، بخش اقتصادسنجی با رگرسیون لوجستیک، عوامل مرتبط با موفقیت و عدم موفقیت را (با خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای و ارزیابی خوشه‌محور) تبیین می‌کند. سپس در بخش نتایج، اثر سناریوها بر نرخ موفقیت و عدم قطعیت آن گزارش و برای طراحی توصیه‌های سیاستی تلفیقی به‌کار گرفته می‌شود.

فرآیند گردآوری، لینک‌کردن و تحلیل داده‌ها

به‌منظور پاسخ به سوال پژوهش، یک زنجیره عملیاتی گردآوری تا تحلیل طراحی شد تا داده‌های خرد چندمنبعی به‌صورت قابل اتکا و قابل ردیابی تولید شود. این زنجیره شامل (۱) گردآوری میدانی داده‌های خانوار، (۲) استخراج داده‌های واقعی مصرف برق و گاز از شرکت‌های گاز و توزیع برق، (۳) دریافت شاخص دهک رفاهی از سامانه رفاهی، (۴) لینک‌کردن رکوردها و تشکیل پایگاه داده یکپارچه و (۵) تحلیل آماری و اقتصادسنجی در محیط پایتون است.

گام ۱: آماده‌سازی میدانی و سازمان‌دهی تیم تسهیل‌گری: پس از انتخاب خوشه‌ها (محل شهرداری و روستا) مطابق طرح نمونه‌گیری چندمرحله‌ای، تسهیل‌گران محلی برای هر خوشه تعیین شدند. برای کاهش خطای پاسخ و افزایش همکاری، آموزش استاندارد شامل: شیوه معرفی مطالعه، اخذ رضایت آگاهانه، نحوه تکمیل فرم‌ها، قواعد ثبت شناسه‌ها (کد اشتراک، کد ملی، شماره موبایل سرپرست، حسب مجوزهای اجرایی) و کنترل‌های اولیه کیفیت (کنترل سازگاری پاسخ‌ها و تکمیل فیلدهای کلیدی) اجرا گردید. نقش تسهیل‌گر صرفاً جمع‌آوری داده نبود، بلکه مسئولیت کنترل اولیه کیفیت داده در همان محل را نیز بر عهده داشت.

گام ۲: ابزار گردآوری و ثبت برخط داده‌های پرسش‌نامه‌ای: گردآوری میدانی اطلاعات خانوار و ویژگی‌های مسکن با استفاده از یک سامانه موبایلی برخط انجام شد. این سامانه به‌گونه‌ای طراحی شد که: (الف) فیلدهای کلیدی اجباری باشند، (ب) کنترل‌های دامنه و منطق اعمال شود (مثلاً حدود منطقی برای بعد خانوار، زیربنا و سن بنا)، (پ) زمان و شناسه تسهیل‌گر و خوشه برای هر رکورد

با توجه به این‌که استان سمنان از نظر اقلیم، ساختار سکونتگاهی و سطح برخورداری اقتصادی - اجتماعی ناهمگن است، طرح نمونه‌گیری به‌گونه‌ای طراحی شد که این ناهمگنی‌ها به‌صورت نظام‌مند پوشش داده شود. بر همین اساس، لایه‌بندی اولیه بر مبنای اقلیم (سردسیر، معتدل و خشک) انجام گرفت و سپس در هر لایه، تفکیک شهری-روستایی و در گام بعد، سطوح برخورداری (برخوردار، متوسط، کم‌برخوردار) در انتخاب خوشه‌ها لحاظ شد تا نمونه نهایی، نماینده‌ی تفاوت‌های واقعی استان در نیازهای گرمایشی و سرمایشی، زیرساخت‌ها و الگوهای مصرف انرژی باشد. در بخش روستایی، با لحاظ سه سطح برخورداری، ۲۰ روستا به‌عنوان خوشه‌های اولیه انتخاب شدند. در بخش شهری نیز سه شهر با اقلیم متفاوت (شهمیرزاد، مهدی‌شهر و سمنان) برگزیده شد و در مجموع ۲۳ محل شهری (در سه سطح برخورداری) به‌عنوان خوشه‌های شهری انتخاب گردید. در مرحله دوم، در هر روستا یا محله منتخب، خانوارها براساس مجموع مصرف سالانه برق (سال ۱۴۰۳) به چهار طبقه مصرفی تقسیم شدند. این طبقه‌بندی بر اساس چارک‌های آماری و به‌صورت جداگانه برای هر واحد جغرافیایی انجام شد (چارک اول: ۲۵ درصد کم‌مصرف، چارک دوم: ۲۵ تا ۵۰ درصد، چارک سوم: ۵۰ تا ۷۵ درصد، چارک چهارم: ۷۵ درصد پرمصرف). از هر طبقه مصرفی در هر خوشه، نمونه‌هایی به‌صورت تصادفی ساده انتخاب شدند و حجم نمونه هر طبقه با استفاده از فرمول کوکران محاسبه گردید. در شکل ۱ موقعیت نقاط نمونه‌برداری (شهرها و روستاها) و در شکل ۲ محله‌های شهری مورد مطالعه نمایش داده شده است. در نهایت، شاخص‌های انحراف از آستانه و نرخ موفقیت در رعایت آستانه برای برق، گاز و مصرف ترکیبی استخراج شد.

ترکیبی در یک ستون جدید ساخته شد. علاوه بر وضعیت پایه، دو سناریوی سیاستی تعریف و روی کل داده‌ها اعمال شد، کاهش ۲۰ درصدی مصرف (شوک رفتاری و عملیاتی صرفه‌جویی) و سناریوی تلفیقی (افزایش ۳۰ درصدی آستانه همراه با کاهش ۲۰ درصدی مصرف). تمام سناریوها دقیقاً روی همان خانوارها اعمال شد تا مقایسه بین سناریوها هم‌پایه و بدون سوگیری ترکیب نمونه باشد.

گام ۸: برآورد عدم قطعیت با نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای و گزارش فاصله اطمینان: به دلیل ساختار خوشه‌ای داده‌ها (محل شهری و روستا)، عدم قطعیت نرخ موفقیت تنها به صورت نقطه‌ای گزارش نشد. نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای با ۵۰۰۰ تکرار اجرا شد و در هر تکرار، نرخ موفقیت برای هر سناریو محاسبه گردید تا توزیع تجربی نرخ موفقیت، خطای معیار و فاصله اطمینان ۹۵ درصد به دست آید. این مرحله باعث شد نتایج سیاستی (بهبود نرخ موفقیت) همراه با سنج‌های پایداری و عدم قطعیت گزارش شود.

گام ۹: مدل‌سازی اقتصادسنجی و ارزیابی پیش‌بینی (لوجیت، خطای خوشه‌ای، ROC/AUC^{21}): پس از تحلیل‌های توصیفی و نمونه‌گیری خودگردان، برای تبیین عوامل مرتبط با موفقیت در رعایت آستانه، مدل لوجیت با خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای برآورد شد. انتخاب مدل با معیارهای اطلاع آکائیکه AIC^{22} ، بیزی BIC^{23} و ارزیابی توان تفکیک با منحنی ROC و شاخص AUC در قالب اعتبارسنجی متقابل خوشه‌محور انجام شد تا از نشت اطلاعات ناشی از همبستگی درون خوشه‌ای جلوگیری شود. به علاوه،

ثابت گردد. بدین ترتیب داده‌ها هم‌زمان با گردآوری، در یک مخزن داده مرکزی جمع و نسخه‌برداری شدند.

گام ۳: استخراج داده‌های واقعی مصرف برق و گاز و هم‌ترازسازی زمانی: مصرف برق و گاز خانوارها برای سال ۱۴۰۳ از داده‌های واقعی شرکت‌های توزیع برق و گاز استخراج شد.

گام ۴: دریافت اطلاعات رفاهی و تعریف دهک: اطلاعات دهک رفاهی خانوار (حسب دسترسی نهادی) از سامانه رفاهی دریافت و به‌عنوان شاخص اقتصادی خانوار به پایگاه داده افزوده شد.

گام ۵: لینک‌کردن چندمنبعی رکوردها و تشکیل پایگاه داده یکپارچه: پس از آماده‌سازی هر منبع، لینک‌کردن در سطح خانوار انجام شد. کلیدهای لینک (حسب امکان) شامل شناسه‌های اداری (مانند کد اشتراک برق و گاز) و شناسه‌های کمکی برای رفع ابهام بود. در نهایت، تنها رکوردهایی وارد تحلیل شدند که مصرف واقعی برق و گاز و حداقل متغیرهای اصلی پرسش‌نامه‌ای را داشتند.

گام ۶: پاک‌سازی، اعتبارسنجی و مدیریت داده‌های مفقود و نامعمول: پیش از تحلیل، مراحل کنترل کیفیت اجرا شد، حذف رکوردهای تکراری و ناسازگار، کنترل دامنه و منطق (مثلاً زیربناهای غیرواقعی، سن بنای خارج از دامنه، بعد خانوار نامعتبر)، شناسایی مقادیر پرت مصرف و بازبینی.

گام ۷: ساخت متغیرها و شاخص‌های تحلیلی (آستانه، موفقیت، سناریوها): پس از تشکیل مجموع داده نهایی، آستانه سرانه ملی سالانه برای برق و گاز و آستانه خانوار برحسب بعد خانوار محاسبه شد. سپس شاخص‌های انحراف از آستانه و متغیر دودویی موفقیت و عدم موفقیت برای برق، گاز و مصرف

21. Cross-Validation Area under the Receiver Operating Characteristic Curve

22. Akaike Information Criterion

23. Bayesian Information Criterion

اطمینان نرخ‌های گزارش‌شده، از نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای استفاده شد، (داویسون و هینکلی، ۱۹۹۷ و لاهیری، ۲۰۰۳، هانگ، ۲۰۱۸ و مینزل^{۲۴}، ۲۰۲۱). به‌کارگیری نمونه‌گیری خودگردان در مطالعات انرژی برای برآورد عدم قطعیت مانند بازه‌های اطمینان رایج است؛ برای نمونه پیلاتیز و همکاران (۲۰۲۴) از نمونه‌گیری خودگردان برای ساخت نواحی پیش‌بینی تقاضا و قیمت برق استفاده کرده‌اند. در این پژوهش نیز با توجه به خوشه‌ای بودن طرح نمونه‌گیری، از نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای استفاده شد تا همبستگی درون خوشه‌ای حفظ و خطای معیار و فاصله اطمینان نرخ موفقیت به‌صورت پایا برآورد شود. در این فرآیند، از داده‌های هر خوشه به‌صورت مستقل و با جایگزینی نمونه‌گیری خودگردان انجام شد و نرخ موفقیت در پنج هزار تکرار شبیه‌سازی محاسبه گردید. این روش با تولید توزیع تجربی پارامتر موفقیت، امکان برآورد خطای معیار و فاصله اطمینان دقیق را فراهم نمود و به‌عنوان مکمل تحلیل‌های آماری استفاده شد. در این رهیافت مشاهدات هر خوشه را به صورت

$$X_h = \{X_{h1}, X_{h2}, \dots, X_{hn_h}\}, \quad h = 1, 2, \dots, K,$$

نمایش می‌دهند، که در آن n_h تعداد خانوارهای نمونه‌گیری‌شده در خوشه h ام است. هدف، برآورد نسبت موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی است که با پارامتر $\theta = P(\text{success})$ نشان داده می‌شود. برآورد نمونه‌ای این پارامتر با استفاده از کل خانوارهای نمونه‌گیری‌شده به صورت

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^K \sum_{i=1}^{n_h} I(X_{hi} | \text{success}),$$

تعریف می‌شود، که در آن $N = \sum_{h=1}^K n_h$ کل حجم

24. Menzel

برای تفسیر سیاستی، احتمال‌های تعدیل‌شده با استانداردسازی حاشیه‌ای محاسبه و به‌صورت نمودارهای تعاملی گزارش شد.

تمام مراحل (پاک‌سازی، لینک‌کردن داده‌ها، ساخت شاخص‌ها، اجرای سناریوها، نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای، برآورد لجوجیت و ترسیم نمودارها) با استفاده از نرم‌افزار پایتون پیاده‌سازی شد. در این پژوهش دو سطح تحلیل مکمل به‌کار گرفته می‌شود، تحلیل توصیفی برای برآورد نرخ موفقیت در رعایت آستانه و عدم قطعیت آن تحت ساختار خوشه‌ای داده‌ها با نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای و تحلیل استنباطی برای توضیح این‌که کدام ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی، کالبدی و اقلیمی احتمال موفقیت را افزایش یا کاهش می‌دهند (با رگرسیون لجوجیت). به بیان دیگر، نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای سطح و عدم قطعیت نرخ‌ها را فراهم می‌کند، در حالی که مدل لجوجیت محرک‌ها و سازوکارهای تفاوت بین خانوارها را کمی‌سازی می‌نماید. این تفکیک، از یک‌سو گزارش سیاستی قابل اتکا از نرخ‌ها ارائه می‌دهد و از سوی دیگر، مسیرهای مداخله‌پذیر (کالبدی، اقلیمی و رفاهی) را روشن می‌سازد.

برآورد عدم قطعیت با نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای

از آنجا که داده‌های این پژوهش تحت یک طرح نمونه‌گیری خوشه‌ای گردآوری شده‌اند (خوشه‌ها شامل محله‌های شهری و روستاهای منتخب هستند)، مشاهدات درون هر خوشه می‌توانند همبستگی درون خوشه‌ای داشته باشند. در چنین شرایطی، اتکا به تقریب‌های کلاسیک خطای معیار (که فرض استقلال مشاهدات را به‌صورت ضمنی در خود دارد) می‌تواند به برآوردهای خوش‌بینانه از عدم قطعیت منجر شود. به همین دلیل، برای کمی‌سازی پایداری نتایج و ساخت فاصله‌های

برآورد می‌شود، که در آن $\bar{\theta}^* = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}^{*(b)}$. اگر $\hat{\theta}^{*(\alpha/2)}$ و $\hat{\theta}^{*(1-\alpha/2)}$ به ترتیب صدک‌های $\alpha/2$ و $1-\alpha/2$ توزیع تجربی مقادیر نمونه‌گیری خودگردان باشند، آنگاه فاصله اطمینان ۹۵ درصدی به صورت

$$CI_{95\%} = \left(\hat{\theta}^{*(\alpha/2)}, \hat{\theta}^{*(1-\alpha/2)} \right),$$

تعریف می‌شود. این فرآیند برای هر یک از سناریوهای سیاستی مطالعه (وضعیت پایه، کاهش ۲۰ درصدی مصرف، و سناریوی تلفیقی تعدیل آستانه همراه با کاهش مصرف) به‌طور مستقل اجرا شد تا توزیع تجربی نرخ موفقیت و فاصله‌های اطمینان متناظر، به‌صورت سازگار با ساختار خوشه‌ای داده‌ها به دست آید. نتایج نمونه‌گیری خودگردان (هیستوگرام، چگالی و بازه‌های اطمینان) در بخش یافته‌ها گزارش شده است.

مدل‌سازی اقتصادسنجی: رگرسیون لوژیستیک و راهبرد انتخاب مدل

برای هر خانوار i ، آستانه ملی سرانه سالانه برای برق و گاز به ترتیب برابر با ۱۲۰۰ کیلووات‌ساعت و ۷۰۰ مترمکعب برای هر نفر در سال در نظر گرفته شد. با توجه به معادل‌سازی حامل‌ها، مصرف گاز با ضریب ۳ وزندهی شده و به مقیاس قابل‌مقایسه با برق تبدیل گردید.

بنابراین

$$C_i = E_i + 3G_i, \quad T_i = (1200 + 3 \times 700)n_i = 3300n_i$$

که در آن E_i مصرف سالانه برق خانوار، G_i مصرف سالانه گاز و n_i بعد خانوار است. متغیر

نمونه و $I(\cdot)$ تابع نشانگر است. به دلیل وجود همبستگی درون خوشه‌ای (شباهت خانوارهای واقع در یک محله یا روستا)، استفاده از نمونه‌گیری خودگردان ساده‌ی بدون توجه به خوشه‌ها می‌تواند ساختار واقعی داده را تخریب کند. از این‌رو، در این پژوهش از نمونه‌گیری خودگردان خوشه‌ای استفاده شده است؛ به این معنا که نمونه‌گیری خودگردان با جایگزینی در داخل هر خوشه و مستقل از سایر خوشه‌ها انجام شده است. برای هر خوشه h ، توزیع تجربی داده‌ها به صورت

$$F_h(x) = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} I(X_{hi} \leq x),$$

تعریف می‌شود. در هر تکرار نمونه‌گیری خودگردان $(b = 1, 2, \dots, B)$. برای هر خوشه h یک نمونه‌ی جدید با جایگزینی به اندازه n_h از توزیع تجربی F_h تولید می‌شود:

$$X_h^{*(b)} = \{X_{h1}^{*(b)}, X_{h2}^{*(b)}, \dots, X_{hn_h}^{*(b)}\} \sim F_h.$$

بدین ترتیب ساختار خوشه‌ای داده‌ها در تمامی تکرارهای نمونه‌گیری خودگردان حفظ می‌شود. یعنی در هر تکرار، از هر خوشه دقیقاً به اندازه حجم نمونه اولیه همان خوشه، نمونه‌گیری خودگردان صورت می‌گیرد. برای هر نمونه نمونه‌گیری خودگردان، نسبت موفقیت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\theta}^{*(b)} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^K \sum_{i=1}^{n_h} I(X_{hi}^{*(b)} | \text{success}), \quad b = 1, 2, \dots, B.$$

خطای معیار تخمین گر $\hat{\theta}$ با استفاده از خروجی‌های نمونه‌گیری خودگردان به صورت

$$SE_{boot}(\hat{\theta}) = \left[\frac{1}{B-1} \sum_{b=1}^B (\hat{\theta}^{*(b)} - \bar{\theta}^*)^2 \right]^{1/2}.$$

با معیارهای اطلاعاتی AIC، BIC و نیز عملکرد پیش‌بینی مقایسه شدند که بر پایه تابع درست‌نمایی بیشینه تعریف می‌شوند. اگر \hat{L} مقدار درست‌نمایی در نقطه بیشینه، k تعداد پارامترها و n حجم نمونه باشد، آنگاه $AIC = -2\log(\hat{L}) + 2k$ و $BIC = -2\log(\hat{L}) + k\log(n)$ هر دو معیار بین بهبود برازش و جریمه پیچیدگی مدل توازن برقرار می‌کنند با این تفاوت که BIC به دلیل وجود جمله $k\log(n)$ برای نمونه‌های بزرگ‌تر، جریمه شدیدتری برای افزایش پارامترها اعمال می‌کند. بنابراین، در انتخاب مدل نهایی، مدلی که AIC و BIC کمتری دارد، انتخاب می‌شود. برای سنجش توان تفکیک، منحنی ROC و شاخص AUC با تقسیم خوشه‌محور (Group-K-fold CV) محاسبه شد. همچنین، برای تبدیل احتمال پیش‌بینی شده به برچسب دودویی، نقطه برش بهینه با شاخص یودن^{۲۵} تعیین گردید، (یودن، ۱۹۵۰ و فاوکت^{۲۶}، ۲۰۰۶). طبق روش یودن، نقطه برش بهینه نقطه‌ای است که مقدار شاخص یودن را بیشینه کند. شاخص یودن برای هر مقدار نقطه برش t به صورت

$$J(t) = Se(t) + Sp(t) - 1, t \in T.$$

تعریف می‌شود، که در آن $Se(t)$ و $Sp(t)$ به ترتیب حساسیت و ویژگی آزمون در نقطه برش t هستند و T مجموعه نقاط برش ممکن (معمولاً مقادیر مشاهده‌شده نشانگر در داده‌ها) را نشان می‌دهد. در نتیجه، نقطه برش بهینه t^* از طریق $t^* = \arg \max_{t \in T} J(t)$ به دست می‌آید. از دیدگاه هندسی، بیشینه‌سازی $J(t)$

وابسته دودویی به صورت $Y_i = I(C_i \leq T_i)$ تعریف می‌شود. به طوری که $Y_i = 1$ نشان‌دهنده موفقیت و $Y_i = 0$ نشان‌دهنده عدم موفقیت در رعایت آستانه است. برای مدل‌سازی احتمال موفقیت، از مدل لجوجیت به صورت

$$P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i) = \frac{\exp(\beta_0 + \mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\beta_0 + \mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})}$$

یا معادل آن $\log\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \beta_0 + \mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta}$ استفاده می‌شود. در این پژوهش براساس معیارهای مدل‌گزینی متغیرهای زیربنا، سن بنا، بعد خانوار، دهک رفاهی، اقلیم و تحت پوشش نهاد حمایتی وارد مدل شدند. در راستای افزایش قابلیت تفسیر و جلوگیری از پراکندگی بیش از حد، برخی متغیرها گروه‌بندی شدند. زیربنا به چهار گروه، سن بنا به چهار گروه، دهک به سه گروه و متغیرهای اقلیم، بعد خانوار و تحت پوشش بودن نیز وارد مدل شدند. به دلیل طرح نمونه‌گیری خوشه‌ای و احتمال هم‌بستگی درون خوشه‌ای (در سطح روستا و محله شهر)، استنباط پارامتری با خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای انجام شد تا عدم قطعیت‌ها دچار خوش‌بینی نشوند. به صورت کلی، برآوردگر واریانس مقاوم خوشه‌ای $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ به شکل

$$Var(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \mathbf{H}^{-1} \left(\sum_{g=1}^G s_g s_g' \right) \mathbf{H}^{-1}$$

محاسبه می‌شود. که در آن \mathbf{g} شاخص خوشه، s_g بردار امتیاز تجمیع‌شده در خوشه \mathbf{g} و \mathbf{H} ماتریس هسین درست‌نمایی است. برای انتخاب مدل مناسب ابتدا مدل کامل برآورد شد و سپس با رویکرد کاهش مرحله‌ای متغیرها، مدل‌های رقیب ساخته و

25. youden

26. Fawcett

مربوط به نرخ موفقیت و عدم موفقیت نسبت به آستانه مصرف انرژی ترکیبی (برق و گاز)، برق و گاز به تفکیک در خانوارهای شهری و روستایی استان سمنان نشان می‌دهد. نتایج اولیه بیان‌گر این مطلب است که در حالت پایه و فعلی، بخشی از خانوارهای ادغامی توانسته‌اند در مصرف برق در محدوده آستانه باقی بمانند، در حالی که در گاز نسبت بیشتری از خانوارها از حد مجاز عبور کرده‌اند، همچنین ۴۵ درصد خانوارها در مصرف ترکیبی برق و گاز در محدوده عدم موفقیت قرار گرفته‌اند و ۵۵ درصد توانسته‌اند مصرف خود را در محدوده آستانه حفظ کنند. این موضوع حاکی از آن است که تقریباً نیمی از خانوارها نتوانسته‌اند به الگوی بهینه مصرف پایبند بمانند و فشار قابل توجهی بر شبکه انرژی وارد می‌کنند.

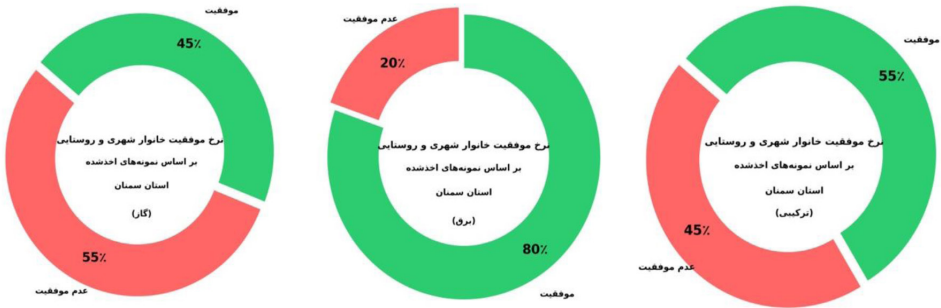
در تحلیل نتایج اگرچه مشخص شد که نرخ شکست در سطح خانوار برابر با ۴۵ درصد است. با این حال، این عدد در مقیاس جمعیتی معادل حدود ۳۵ درصد از کل افراد نمونه می‌باشد. علت این اختلاف آن است که در ترکیب نمونه، خانوارهای با بعد کم سهم بالایی دارند و همین موضوع باعث می‌شود تعداد خانوارهای با وضعیت عدم موفقیت زیاد به نظر برسد، در حالی که سهم آن‌ها از کل جمعیت کمتر است. به بیان دیگر، هرچند ۴۵ درصد از خانوارها نتوانسته‌اند آستانه مصرف را رعایت کنند، اما این خانوارها تنها ۳۵ درصد از کل جمعیت را شامل می‌شوند. این تمایز اهمیت تحلیل نتایج بر اساس وزن جمعیتی خانوارها را نشان می‌دهد؛ تمرکز صرف بر درصد عدم موفقیت خانوارها می‌تواند منجر به برداشت نادرست از شدت واقعی عدم موفقیت در سطح جمعیت شود. البته از منظر سیاست‌گذاری، توجه به بعد خانوار در تخصیص آستانه‌ها مزیت‌هایی

معادل انتخاب نقطه‌ای روی منحنی ROC است که بیشترین فاصله عمودی (یا اختلاف عمودی) را با خط مورب شانس (قطر مربع واحد) دارد. دامنه شاخص یودن بین صفر و یک است. مقدار $J = 1$ بیانگر جداسازی کامل توزیع مقادیر نشانگر در دو گروه (موفق و ناموفق) و در نتیجه یک آزمون کامل است، در مقابل، $J = 0$ نشان‌دهنده هم‌پوشانی کامل و آزمونی بی‌فایده است که هیچ قدرت تفکیکی فراتر از شانس ارائه نمی‌دهد، (فلاس، ۲۰۰۵). بنابراین اگر مقدار شاخص یودن برابر صفر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که طبقه‌بندی‌کننده در عمل بهتر از انتخاب تصادفی عمل نکرده است. در نهایت برای تفسیر سیاستی و مقایسه منصفانه اثر متغیرهای طبقه‌ای، از استانداردسازی حاشیه‌ای^{۲۷} استفاده شد، به این معنا که برای هر سناریوی مقایسه‌ای مثلاً دهک× زیربنا، سایر متغیرها روی مقادیر مشاهده‌شده خود نگه داشته شده و میانگین احتمال پیش‌بینی‌شده محاسبه می‌گردد. این احتمال‌های تعدیل‌شده سپس در قالب نمودار گزارش می‌شود.

مدل‌سازی، بررسی و تجزیه تحلیل داده‌ها

در این بخش، داده‌های مصرف برق و گاز خانوارهای ادغامی شهری و روستایی استان سمنان در سال ۱۴۰۳ با آستانه‌های سرانه ملی مورد مقایسه قرار گرفته است تا وضعیت انطباق یا انحراف خانوارها از حدود تعریف‌شده مشخص شود. همان‌گونه که در بخش روش‌شناسی بیان شد، با مقایسه‌ی داده‌های واقعی مصرف با آستانه‌های کشوری در نظر گرفته‌شده، شاخص‌های موفقیت (قرار گرفتن در محدوده آستانه) و عدم موفقیت (مصرف فراتر از آستانه) استخراج گردید. نمودارهای شکل ۳

27. Marginal Standardization



شکل ۳. موفقیت و عدم موفقیت آستانه مصرف انرژی: (راست) ترکیبی، (وسط) برق و (چپ) گاز خانوار شهری و روستایی (یافته‌های پژوهش)

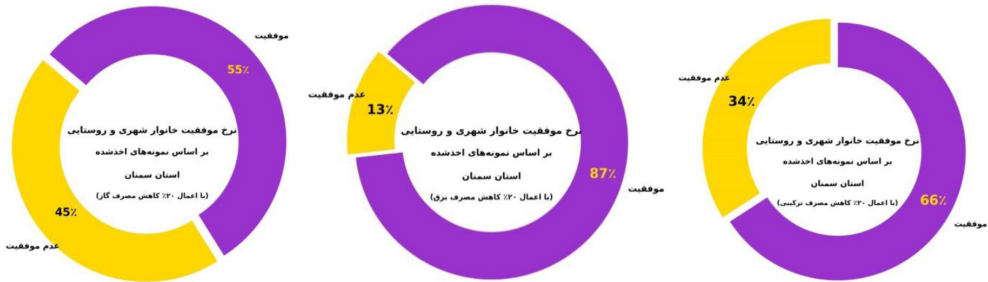
۳۴ درصد رسیده است، در حالی که سهم خانوارهای پایبند به الگوی مصرف از ۵۵ درصد به ۶۶ درصد افزایش یافته است. این تغییر نشان می‌دهد که حتی یک اصلاح نسبی در الگوی مصرف می‌تواند بخش قابل توجهی از خانوارهای شکست‌خورده را به سمت مصرف بهینه سوق دهد.

با شبیه‌سازی سناریوی کاهش مصرف، شکاف میان دهک‌ها کاهش یافت که بیانگر اثر تعدیل‌کننده مداخلات رفتاری بر نابرابری انرژی است. این نتیجه از منظر سیاست‌گذاری حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد حتی بدون ابزارهای قیمتی، سیاست‌های اطلاع‌رسانی و تشویقی می‌توانند موجب همگرایی رفتار مصرفی میان گروه‌های مختلف شوند.

از نظر مکانی، بررسی نتایج در سه اقلیم اصلی استان، سرد، معتدل و خشک نشان داد که در اقلیم‌های معتدل و خشک، نرخ بهبود مصرف در سناریوی اصلاحی بیشتر است. این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که در این مناطق، سهم تجهیزات گرمایشی از کل مصرف گاز کمتر بوده و رفتار مصرفی نقش پررنگ‌تری دارد. در مقابل، در اقلیم‌های سردسیر، حتی پس از اعمال اصلاح رفتاری، سهم بالایی از

دارد. از جمله توزیع منصفانه‌تر منابع انرژی، تطبیق بهتر با ساختار جمعیتی و حمایت هدفمند از خانوارهای پرجمعیت و دارای فرزندان که نقش مهمی در پویایی جمعیت و مدیریت مصرف دارند.

در گام بعد، سناریوی اصلاح الگو بر مبنای کاهش ۲۰ درصدی مصرف در هر دو حامل انرژی شبیه‌سازی شد، (شکل ۴). این سناریو، نوعی مداخله رفتاری فرضی محسوب می‌شود که از نظر اقتصادی معادل واکنش مصرف‌کننده به تغییر در انگیزه‌های مالی یا اطلاعاتی است. نتایج نشان داد که در برق، کاهش فرضی ۲۰ درصدی مصرف منجر به بهبود چشمگیر وضعیت خانوارها و افزایش نرخ موفقیت می‌شود. در مقابل، در گاز طبیعی تغییر کمتری حاصل شده و همچنان بخش قابل توجهی از خانوارها فراتر از آستانه باقی می‌مانند. این تفاوت اهمیت مداخلات فنی در کنار سیاست‌های رفتاری را برجسته می‌کند، به‌ویژه در بخش گرمایش که صرف اصلاح رفتار نمی‌تواند جایگزین بهسازی ساختمان یا نوسازی تجهیزات شود. نتایج حاصل از اعمال کاهش ۲۰ درصدی مصرف در انرژی ترکیبی، عدم موفقیت به میزان قابل توجهی کاهش یافته و از ۴۵ درصد به



شکل ۴. موفقیت و عدم موفقیت آستانه مصرف انرژی: (راست) ترکیبی (وسط) برق و (چپ) گاز خانوار شهری و روستایی با الگوی ۲۰٪ کاهش مصرف (یافته‌های پژوهش)

نرخ موفقیت بررسی شد. بر اساس یافته‌های تجربی، میزان عدم موفقیت خانوارها در رعایت آستانه‌های مصرف کنونی بالاتر از سطح مطلوب است. به‌منظور کاهش فشار مالی و ناراضی‌ت‌های خانوارها، پیشنهاد می‌شود آستانه پایه برای هر فرد به میزان ۳۰ درصد افزایش یابد. این اقدام نوعی دوره تنفس سیاستی ایجاد کرده و فرصت بازآرایی برای نظام یارانه‌ای فراهم می‌کند. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که ترکیب افزایش آستانه با کاهش داوطلبانه ۲۰ درصدی مصرف، می‌تواند نرخ موفقیت خانوارها را از حدود ۶۶ درصد به ۷۶ درصد افزایش دهد و فشار ناترازی را به‌طور معناداری کاهش دهد. در برق، این سیاست نرخ شکست را از ۲۰ درصد به ۷ درصد و در گاز از ۵۵ درصد به ۳۳ درصد کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب انعطاف در آستانه و اصلاح رفتار، مؤثرترین ابزار برای بازگرداندن تعادل مصرفی است.

همچنین با توجه به اطلاعات نمونه بیش از ۸۰ درصد خانوارهای سمنان از بخاری گازی و بیش از ۷۰ درصد از کولر آبی استفاده می‌نمایند یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعویض

خانوارها همچنان در وضعیت عدم موفقیت باقی‌ماندند. این یافته‌ها دلالت بر آن دارند که طراحی آستانه‌های انرژی باید با وزن‌دهی اقلیمی انجام گیرد تا عدالت در تخصیص انرژی و کارایی در سیاست‌های کاهش ناترازی هم‌زمان محقق شود. در تحلیل ترکیبی برق و گاز (بر حسب معادل‌سازی حرارتی)، الگوی مصرف خانوارهای ادغامی نشان داد که با وجود همبستگی بالای میان دو حامل، واکنش‌ها به اصلاح رفتار یکسان نیست. مصرف برق سریع‌تر و منعطف‌تر کاهش می‌یابد، در حالی که گاز از پایداری بالاتری برخوردار است. این تمایز نشان می‌دهد که برنامه‌های اصلاح الگو باید چندبعدی طراحی شوند: رفتاری در بخش برق، فنی در بخش گاز و ساختاری در سطح تعرفه‌ای. سناریوی کاهش ۲۰ درصدی مصرف، صرفاً به‌منزله‌ی یک اقدام نمادین، می‌تواند اثر چشمگیری در بهبود وضعیت برق و بخشی از مصرف گاز داشته باشد، اما برای تحقق پایداری در کاهش ناترازی، سیاست‌های تلفیقی شامل ارتقای آگاهی مصرفی، بهسازی فنی ساختمان‌ها و اصلاح تدریجی تعرفه‌ها ضروری است.

سناریوی افزایش آستانه مصرف به‌منظور افزایش

در مجموع ۴۳ خوشه تشکیل می‌دهند. روش نمونه‌گیری خودگردان با ۵۰۰۰ تکرار اجرا شده و در هر تکرار، نسبت موفقیت خانوارها در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی برآورد گردیده است. توزیع حاصل‌شده مبنای برآورد خطای معیار و فواصل اطمینان ۹۵ درصدی و همچنین تحلیل سناریوهای مختلف سیاستی بوده است.

سناریو اول در نظر گرفتن وضعیت فعلی خانوار، سناریو دوم بعد از اعمال تعرفه و گرایش به صرفه‌جویی ۲۰ درصد کاهش مصرف و سناریو سوم مصرف تا ۳۰ درصد بیشتر از آستانه در یک بازه تنفس به نرخ فعلی محاسبه شود تا خانواده مصرف خود را با تعرفه‌های جدید تنظیم نماید. نتایج نمونه‌گیری خودگردان بر اساس ۵۰۰۰ تکرار برای هر سه سناریو در جدول ۱ خلاصه شده است. این نتایج بیان‌گر آن است که با وجود پراکندگی مصرف در میان خانوارها، توزیع نمونه‌گیری خودگردان نسبتاً متمرکز و پایدار بوده است. شکل ۵، نمودار هیستوگرام و چگالی تجربی این توزیع‌ها را نمایش می‌دهد. استفاده از نمونه‌گیری خودگردان، امکان تحلیل دقیق و مقاوم نسبت موفقیت را فراهم کرده و تأثیر سناریوهای اصلاح الگو به‌صورت علمی قابل مشاهده است.

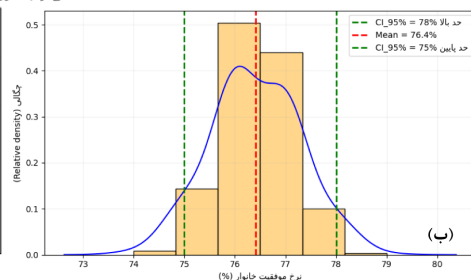
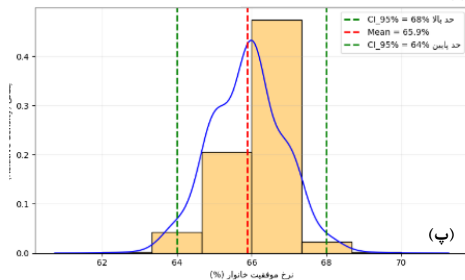
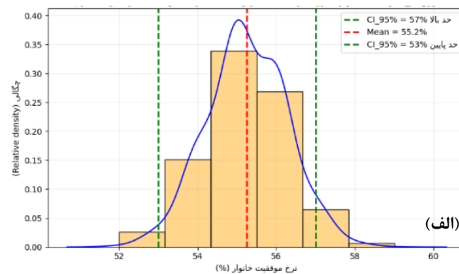
تمرکز توزیع‌های نمونه‌گیری خودگردان و باریک شدن فواصل اطمینان تأیید می‌کند که بهبود رفتار مصرفی به‌ویژه در کنار تعدیل آستانه دارای اثر پایدار و ساختاری بر کاهش ناترازی انرژی خانوارهاست. با اعمال کاهش ۲۰ درصدی مصرف برق و گاز، نرخ موفقیت به‌طور معناداری بهبود یافت. این نتایج نشان می‌دهد که حتی یک اصلاح رفتاری ساده می‌تواند سهم قابل توجهی از خانوارهای شکست‌خورده را به ناحیه موفقیت منتقل کند. تنگ‌تر شدن فاصله

بخاری‌های گازی قدیمی با مدل‌های کم‌مصرف (مطابق اصلاحیه مصوبه شماره ۵۰۹۲۵۸ مورخ ۱۳۹۹/۹/۲۶ شورای اقتصاد)، می‌تواند نرخ شکست مصرف‌گاز را از حدود ۵۵ درصد به ۵۰ درصد کاهش دهد، یعنی معادل ۵ درصد بهبود. همچنین در محاسبات ترکیبی نرخ شکست از ۴۵ درصد به ۴۱ درصد کاهش می‌یابد که معادل ۴ درصد بهبود است. در فرضیه کاهش داوطلبانه ۲۰ درصدی مصرف نیز، نرخ عدم موفقیت از ۳۴ درصد به ۳۱ درصد می‌رسد. همچنین یافته‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعویض کولرهای آبی قدیمی با مدل‌های کم‌مصرف می‌تواند نقش قابل توجهی در کاهش مصرف برق ایفا کند. برآوردها حاکی از آن است که هر خانوار به‌طور متوسط با تعویض کولر آبی حدود ۱۰۰۰ کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی طی سال در مصرف برق خواهد داشت. نرخ عدم موفقیت برق از ۲۰ درصد به حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در مصرف انرژی ترکیبی، نرخ عدم موفقیت کل از ۴۵ درصد به ۴۰ درصد تقلیل پیدا می‌کند. حتی در حالت کاهش داوطلبانه ۲۰ درصدی مصرف سالیانه نیز، نرخ عدم موفقیت ترکیبی از ۳۴ درصد به حدود ۲۹ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده اثرگذاری قابل ملاحظه این اقدام در کنار سیاست‌های تشویقی کاهش مصرف است. همچنین با افزایش آستانه مصرف انرژی ترکیبی به میزان ۳۰ درصد (از ۷۰۰ به ۹۱۰ مترمکعب و ۱۲۰۰ به ۱۵۶۰ کیلووات ساعت) و با فرض ۲۰ درصد صرفه‌جویی و تعویض تجهیزات نرخ موفقیت به ۸۱ درصد می‌رسد.

برای اجرای رهیافت نمونه‌گیری خودگردان، چون در این پژوهش، داده‌ها در قالب یک طرح نمونه‌گیری خوشه‌ای گردآوری شده‌اند و خوشه‌ها شامل ۲۳ محله شهری و ۲۰ روستا هستند، بنابراین

جدول ۱. برآورد نقطه‌ای و فاصله اطمینان ۹۵ درصد نمونه‌گیری خودگردان بر اساس صدک‌های توزیع تجربی برای هر سه سناریو (یافته‌های پژوهش)

برآورد نمونه‌گیری خودگردان	وضعیت فعلی	کاهش ۲۰٪	۱۳۰٪ آستانه و کاهش ۲۰٪
برآورد نقطه‌ای	۵۵/۲٪	۶۵/۹٪	۷۶/۴٪
برآورد فاصله‌ای	(۵۳٪، ۵۷٪)	(۶۴٪، ۶۸٪)	(۷۵٪، ۷۸٪)



شکل ۵. نمودار هیستوگرام و چگالی تجربی توزیع موفقیت خانوار با رهیافت بوت‌استرپ در حالت (الف) وضعیت فعلی، (ب) با فرض ۲۰ درصد کاهش مصرف انرژی، (ج) ۳۰ درصد بیش‌تر از آستانه مصرف و ۲۰ درصد کاهش مصرف انرژی (یافته‌های پژوهش)

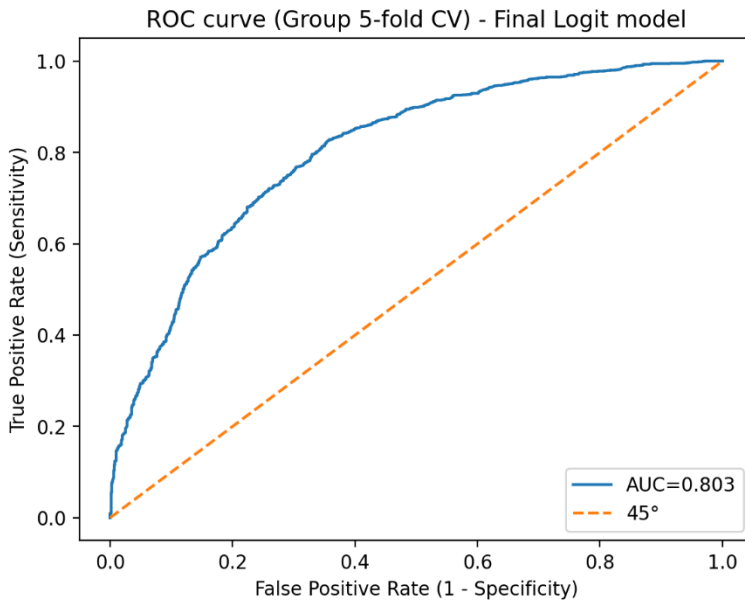
نتایج مدل لوجیت: عوامل تعیین‌کننده احتمال موفقیت

پس از گزارش نرخ‌های موفقیت و عدم قطعیت آن‌ها تحت سناریوهای سیاستی در این زیربخش عوامل تبیینی تفاوت بین خانوارها با مدل لوجیت بررسی می‌شود. در این مطالعه، به‌منظور افزایش قابلیت تفسیر و نیز جلوگیری از پراکندگی بیش از حد،

اطمینان نسبت به حالت پایه نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش همگنی نتایج در میان نمونه‌های خودگردان است. این حالت نشان می‌دهد که ترکیب تعدیل آستانه‌ها با اصلاح رفتاری، بیشترین اطمینان را برای بازگرداندن تعادل مصرفی ایجاد می‌کند. توزیع نمونه‌گیری خودگردان در این حالت بسیار متمرکز بوده و نشان‌دهنده‌ی پایداری بالای نتایج است.

اطلاعاتی و عملکرد پیش‌بینی مقایسه گردید. هدف این فرایند، دستیابی به مدلی کم‌پارامتر اما پرتوان برای سیاست‌گذاری بود. برای مقایسه مدل‌ها از معیارهای اطلاع AIC و BIC استفاده شد. نتیجه مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل نهایی شامل متغیرهای دهک رفاهی (سه گروه)، اقلیم (سه سطح)، زیربنا (چهار گروه)، سن بنا (چهار گروه)، بعد خانوار، تحت پوشش نهاد حمایتی (دو سطح) است. برای ارزیابی قدرت تفکیک مدل، از معیار AUC روی منحنی ROC با اعتبارسنجی متقابل خوشه‌ای انجام شد به این معنا که تقسیم داده‌ها به صورت خوشه‌ای انجام شد تا از نشت اطلاعات ناشی از همبستگی درون خوشه‌ای جلوگیری شود و برآورد عملکرد، واقع‌بینانه‌تر باشد. منحنی ROC

برخی متغیرها گروه‌بندی شدند، دهک رفاهی به سه گروه (پایین: دهک یک تا سه، میانی: دهک چهار تا هفت و بالا: دهک هشت تا ده)، زیربنا به چهار گروه (کمتر از ۸۰، بین ۸۰ تا ۱۰۰، ۱۰۰ تا ۱۳۰ و بیشتر از ۱۳۰ مترمربع) و سن بنا به چهار گروه (کمتر از ۱۳، ۱۳ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و بیشتر از ۴۰ سال) تقسیم شد. همچنین، متغیرهای اقلیم، بعد خانوار و تحت پوشش بودن خانوار، تحصیلات، میانگین حضور، کسب و کار خانگی و ... در مدل لحاظ گردید و یک مدل سلسله‌مراتبی کامل با مجموعه‌ای گسترده از متغیرهای بالقوه مؤثر (شامل متغیرهای اقتصادی-اجتماعی و کالبدی) برآورد شد. سپس، با رویکرد کاهش مرحله‌ای متغیرها، مدل‌های رقیب ساخته شد و هر مدل با معیارهای

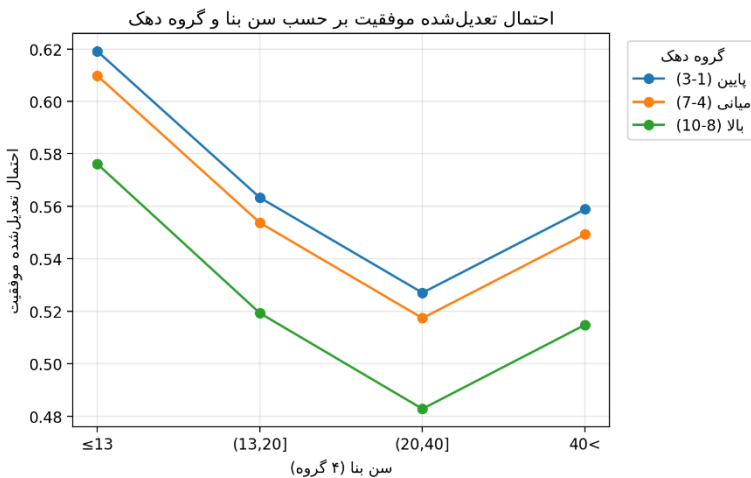


شکل ۶. منحنی ROC مدل لوجیت نهایی برای پیش‌بینی موفقیت در رعایت آستانه انرژی با اعتبارسنجی متقابل خوشه محور (خط چین ۴۵ درجه عملکرد تصادفی و AUC بیان‌گر توان تفکیک مدل) - (یافته‌های پژوهش)

همچنین از میان خانوارهای واقعاً ناموفق حدود ۶۴/۴ درصد درست ناموفق تشخیص داده شده و ۳۵/۶ درصد به اشتباه موفق برچسب خورده است. براین اساس شاخص یودن برابر با $1 - 0/468 = 0/532$ است که نشان دهنده قدرت تفکیک متوسط و بالاتر از شاناس است. در نهایت دقت کلی مدل در این نقطه حدود ۷۴/۳ درصد است یعنی از هر ۱۰۰ پیش بینی، حدود ۷۴ مورد درست بوده است. برای تفسیر سیاستی و مقایسه منصفانه اثر متغیرهای طبقه ای، از استانداردسازی حاشیه ای استفاده شد، به این معنا که برای هر ترکیب از سطوح متغیرها (مثلاً دهک و زیربنا)، سایر متغیرها روی مقادیر واقعی خودشان حفظ شده و تنها متغیرهای مورد بررسی ثابت می شوند، سپس میانگین احتمال پیش بینی شده محاسبه می گردد. این رویکرد، اثرات را به صورت احتمال های قابل مقایسه و قابل ارائه برای سیاست گذاری نمایش می دهد.

تغییرات حساسیت (نرخ کشف درست خانوارهای موفق) را در برابر نرخ مثبت کاذب در نقطه برش های مختلف احتمال نشان می دهد. همچنین، مساحت زیر منحنی AUC به عنوان یک شاخص خلاصه برای دقت تفکیک تفسیر می شود. مقادیر نزدیک به ۰/۵ عملکرد تصادفی و مقادیر نزدیک به ۱ تفکیک بسیار قوی را نشان می دهد. مطابق شکل ۶ مقدار $0/803 = AUC$ نشان می دهد مدل نهایی از توان تفکیک خوب برخوردار است.

برای تبدیل خروجی مدل (احتمال موفقیت) به تصمیم دودویی موفق و ناموفق، یک نقطه برش بهینه روی احتمال انتخاب شد. این نقطه برش با شاخص یودن تعیین گردید. در نقطه برش به دست آمده ۰/۴۶۶، مدل از میان خانوارهای واقعاً موفق حدود ۸۲/۴ درصد را درست موفق تشخیص داده و ۱۷/۶ درصد را به اشتباه ناموفق زده است.

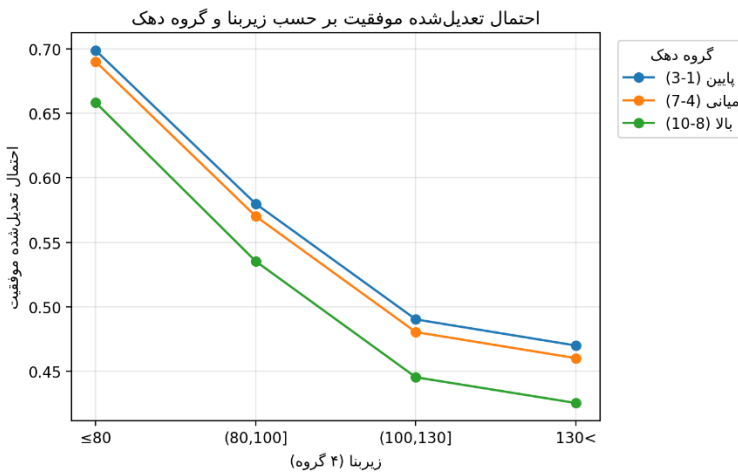


شکل ۷. احتمال تعدیل شده موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی بر حسب سن بنا (گروه ۴) و گروه دهک بر مبنای مدل لوجیت نهایی (یافته های پژوهش)

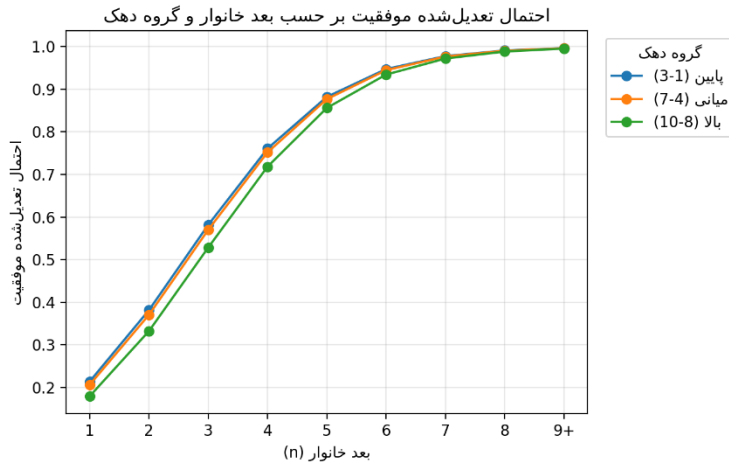
شکل ۷، نشان می‌دهد احتمال موفقیت با افزایش سن بنا تا بازه ۲۰ تا ۴۰ سال کاهش یافته و در بناهای بالای ۴۰ سال بهبود نسبی دارد، همچنین در تمام سنین بنا، دهک پایین بیشترین و دهک بالا کمترین احتمال موفقیت را دارد. لذا از منظر دهک رفاهی، در تمام گروه‌های سن بنا یک الگوی پایدار دیده می‌شود، دهک پایین (۱-۳) بیشترین و دهک بالا (۸-۱۰) کمترین احتمال موفقیت را دارد، دهک میانی (۴-۷) در میانه قرار می‌گیرد و دهک بالا (۸-۱۰) کمترین احتمال موفقیت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، الگوی غالب این است که با افزایش بعد خانوار، احتمال تعدیل‌شده موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی به صورت تند و یکنواخت افزایش می‌یابد و سپس در ابعاد بزرگ‌تر به سقف نزدیک می‌شود. از منظر دهک نیز، در ابعاد کوچک خانوار (به‌ویژه ۱ تا ۴) یک شکاف ملایم دیده می‌شود. دهک بالا (۱۰-)

شکل ۷، نشان می‌دهد احتمال موفقیت با افزایش سن بنا تا بازه ۲۰ تا ۴۰ سال کاهش یافته و در بناهای بالای ۴۰ سال بهبود نسبی دارد، همچنین در تمام سنین بنا، دهک پایین بیشترین و دهک بالا کمترین احتمال موفقیت را دارد. لذا از منظر دهک رفاهی، در تمام گروه‌های سن بنا یک الگوی پایدار دیده می‌شود، دهک پایین (۱-۳) بیشترین و دهک بالا (۸-۱۰) کمترین احتمال تعدیل‌شده موفقیت در رعایت آستانه انرژی ترکیبی را دارد و دهک میانی بین این دو قرار می‌گیرد. شدت این شکاف در همه سنین یکسان نیست، بیشترین فاصله دهکی در گروه سن بنای ۲۰ تا ۴۰ سال رخ می‌دهد، به طوری که احتمال موفقیت از حدود ۰/۵۳ در دهک پایین به حدود ۰/۴۸ در دهک بالا کاهش می‌یابد. در بناهای جدیدتر نیز شکاف وجود دارد اما کمی کمتر است (تقریباً ۰/۶۲ در دهک پایین در برابر ۰/۵۸ در دهک بالا). شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۸، احتمال تعدیل‌شده موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی بر حسب زیربنا و گروه دهک بر مبنای مدل لوجیت نهایی (یافته‌های پژوهش)



شکل ۹. احتمال تعدیل شده موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی بر حسب بعد خانوار و گروه دهک بر مبنای مدل لوجیت نهایی (یافته‌های پژوهش)

وابسته موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی، برای هر متغیر نسبت بخت و فاصله اطمینان ۹۵ درصد نیز با تبدیل نمایی کران‌ها محاسبه شد و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. گروه‌ها مرجع سن بنا کمتر از ۱۳، زیربنا کمتر از ۸۰، اقلیم خشک و دهک پایین (۱-۳) در نظر گرفته شده است.

پس از برازش مدل لوجیت نهایی به ازای اضافه شدن یک نفر به بعد خانوار، شانس موفقیت حدود ۲/۴۷ برابر با فاصله اطمینان (۱/۴۶۰/۱۵) می‌شود. این نتیجه با منطق تعریف آستانه سازگار است، زیرا آستانه خانوار متناسب با بعد خانوار افزایش می‌یابد، بنابراین احتمال قرار گرفتن مصرف در محدوده مجاز بیشتر می‌شود. خانوارهای تحت پوشش نسبت به سایر خانوارها دیگر حدود ۲/۵۸ برابر با فاصله اطمینان (۱/۴۶۰/۱۵) شانس بیشتری برای موفقیت دارند. به بیان دیگر، پس از کنترل سایر عوامل، وضعیت حمایتی همچنان با احتمال بالاتر

در همه این نقاط احتمال پایین‌تری از دهک پایین (۱-۳) دارد. برای بعد از ۶ به بعد منحنی‌های سه دهک تقریباً همگرا شده و احتمال موفقیت برای همه دهک‌ها بسیار بالا و نزدیک به ۱ است. این همگرایی نشان می‌دهد در این بخش از نتایج، اثر بعد خانوار بر موفقیت به واسطه افزایش آستانه خانوار با بر تفاوت‌های دهکی غالب است و تفاوت دهکی عمدتاً در خانوارهای کوچک‌تر معنا پیدا می‌کند.

برآورد مدل با خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای انجام شد تا هم‌بستگی درون خوشه‌ای لحاظ شود. نسبت بخت هر متغیر از رابطه $OR_j = \exp(\beta_j)$ محاسبه شد که بیان می‌کند با یک واحد افزایش در متغیر (یا تغییر از گروه مرجع به گروه دیگر)،

نسبت شانس موفقیت به چه میزان ضرب می‌شود. OR_j های مدل منتخب همراه با فاصله اطمینان ۹۵ درصد (بر مبنای خطاهای معیار مقاوم خوشه‌ای) ارائه و تفسیر می‌شود. در مدل لوجیت نهایی متغیر

جدول ۲. برآورد نسبت بخت و فاصله اطمینان بر اساس مدل لوجیت نهایی (یافته‌های پژوهش)

متغیر (نسبت به مرجع)	(نسبت بخت) OR	کران پایین اطمینان CI_low	کران بالای اطمینان CI_high
بعد خانوار	۲,۴۷	۲,۱۵۷	۲,۸۲۹
زیربنا (۱۰۰,۱۳۰)	۰,۳۱۵	۰,۲۳۴	۰,۴۲۵
زیربنا < ۱۳۰	۰,۲۸۳	۰,۱۹۳	۰,۴۱۴
زیربنا (۸۰,۱۰۰)	۰,۵۰۹	۰,۳۶۹	۰,۷۰۱
تحت پوشش حمایتی	۲,۵۷۸	۱,۶۰۳	۴,۱۴۷
سن بنا (۲۰,۴۰)	۰,۶۰۳	۰,۴۵۴	۰,۷۹۹
اقلیم معتدل	۰,۴۴۲	۰,۲۶۴	۰,۷۳۸
سن بنا (۱۳,۲۰)	۰,۷۳۴	۰,۵۶۱	۰,۹۶۱
سن بنا < ۴۰	۰,۷۱۶	۰,۵۰۹	۱,۰۰۸
اقلیم سردسیر	۰,۶۰۲	۰,۳۵۳	۱,۰۲۹
دهک میانی (۴-۷)	۰,۷۸۷	۰,۵۶۶	۱,۰۹۵
دهک بالا (۸-۱۰)	۰,۹۴۹	۰,۷۷۶	۱,۱۶۱

اقلیمی در سیاست‌گذاری آستانه‌ها و مداخلات کاهش مصرف را برجسته می‌کند. اثر زیربنا بسیار قوی و یکنواخت است، نسبت به زیربنای کمتر از ۸۰ مترمربع (مرجع)، با افزایش زیربنا شانس موفقیت به ترتیب کاهش می‌یابد. بنابراین، واحدهای بزرگ‌تر (پس از کنترل سایر عوامل) احتمال بیشتری برای عبور از آستانه مصرف دارند. نسبت به ساختمان‌های جدیدتر کمتر از ۱۳ سال (مرجع)، ساختمان‌های ۱۳ تا ۲۰ سال حدود ۲۷ درصد و ساختمان‌های ۲۰ تا ۴۰ سال حدود ۴۰ درصد شانس کمتری برای موفقیت دارند. گروه بیش از ۴۰ سال نیز کاهش به میزان کمتری نسبت به بقیه گروه‌ها دارد، به‌طور کلی با کاهش کارایی انرژی ساختمان‌های قدیمی‌تر همخوانی دارد. خروجی‌های مدل نشان می‌دهد

رعایت آستانه همراه است. نسبت بخت موفقیت دهک‌های میانی نسبت به دهک‌های پایین ۰/۹۵ و دهک بالا نسبت به پایین ۰/۷۹ است. این الگو نشان می‌دهد بخش مهمی از تفاوت‌های مشاهده‌شده بین دهک‌ها عمدتاً از مسیر ویژگی‌های ساختمانی و مکانی (مانند زیربنا، سن بنا و اقلیم) و همچنین بعد خانوار توضیح داده می‌شود. در اقلیم معتدل، شانس موفقیت به‌طور معناداری کمتر از اقلیم خشک است. نسبت بخت اقلیم معتدل نسبت به خشک ۰/۴۴ است که نشان دهنده حدود ۵۶ درصد کاهش در شانس موفقیت است و به‌همین ترتیب نسبت بخت موفقیت اقلیم سردسیر نسبت به خشک ۰/۶ به‌دست آمد که حدود ۴۰ درصد کاهش در موفقیت را نشان می‌دهد. این یافته اهمیت ملاحظه تفاوت‌های

سرد و معتدل در استانی با نفوذ بالای گازرسانی ۱۰۰، درصد جمعیت شهری و بیش از ۹۰ درصد جمعیت روستایی)، مصرف گاز در ماهیت خود گرمایشی‌تر و وابسته‌تر به بازده ساختمان و تجهیزات است. به نیازهای گرمایشی و محدودیت‌های کارایی ساختمان و تجهیزات وابسته است و بنابراین چسبندگی بیشتری دارد، در حالی که بخش مهمی از مصرف برق در مصارف خانگی قابلیت تعدیل رفتاری و مدیریتی بیشتری نشان می‌دهد. بنابراین، جمع‌بندی نظری مطالعه این است که کاهش ناترازی در سطح خانوار، صرفاً با توصیه‌های فنی یا با اقدامات فرهنگی محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند ترکیبی از انگیزه‌های مالی (سیگنال قیمتی، پاداش و جریمه) و انگیزه‌های اجتماعی (بازخورد، مقایسه اجتماعی، هنجارسازی، پاداش بهبود) است، تا هم رفتار کوتاه‌مدت اصلاح شود و هم سرمایه‌گذاری خانوار در بهبود کارایی (بهسازی بنا و ارتقای تجهیزات) از مسیر انتخاب و تمایل خود خانوار فعال گردد. این نتایج با مطالعات اخیر درباره اصلاح یارانه‌ها و ضرورت بازطراحی سازوکارهای بازتوزیع و نیز اهمیت معماری تنظیم‌گری در حکمرانی انرژی هم‌راستا است. (همایون و همکاران، ۱۴۰۳ و عظیم‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). به عبارتی دیگر بسته‌های مداخله باید دویایه باشند، برای برق اولویت با ابزارهای مالی و رفتاری مقیاس‌پذیر و برای گاز محور اصلی باید ایجاد انگیزه‌های مالی و بهسازی پوسته و ارتقای تجهیزات گرمایشی باشد، ترجیحاً با سازوکارهای کم‌رانت و مبتنی بر عملکرد پرداخت پس از اثبات کاهش مصرف. نهایتاً از نظر سیاست‌گذاری عمومی، یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی سه‌سطحی پیرامون آستانه حمایتی تا ۱۰۰ درصد، تنفس تا ۱۳۰ درصد، بازدارنده بالای ۱۳۰ درصد، زمانی قابل دفاع است که پیام آستانه در

ناموفق بودن در رعایت آستانه بیش از هر چیز با ویژگی‌های کالبدی ساختمان و شرایط اقلیمی پیوند دارد و نه صرفاً شاخص‌های اقتصادی. به‌طور مشخص واحدهای با زیربنای بالا در معرض ریسک بالاتر ناموفق بودن هستند، زیرا افزایش زیربنا معمولاً به معنی بار بیشتر گرمایش، سرمایه‌ش و مصرف انرژی بالاتر است. ساختمان‌های میانسال و قدیمی‌تر ریسک ناموفق بودن بیشتری دارند، که می‌تواند ناشی از ضعف عایق کاری، پنجره‌ها و فرسودگی تجهیزات گرمایشی و سرمایه‌ش باشد. خانوارهای کم‌جمعیت‌تر (بعد خانوار پایین) از نظر آماری در ریسک بالاتری برای ناموفق بودن قرار می‌گیرند، زیرا آستانه خانوار با بعد خانوار افزایش می‌یابد و خانوارهای کوچک‌تر حاشیه ایمنی کمتری نسبت به آستانه دارند. بهسازی ساختمان (عایق، پنجره، تجهیزات پربازده) در واحدهای بزرگ و ساختمان‌های قدیمی‌تر و نیز تنظیم آستانه‌ها همراه با وزن‌دهی اقلیمی، می‌تواند اثرگذاری بالاتری نسبت به سیاست‌های کلی و یکنواخت داشته باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد موفقیت در رعایت آستانه مصرف انرژی ترکیبی در استان سمنان پدیده‌ای چندعاملی است که از برهم‌کنش ویژگی‌های کالبدی ساختمان، شرایط اقلیمی و مؤلفه‌های رفتاری مصرف‌شکل می‌گیرد. مقایسه وضعیت پایه با سناریوی کاهش ۲۰ درصدی مصرف نشان داد که حتی یک اصلاح رفتاری نسبتاً ساده می‌تواند نرخ موفقیت را به‌طور معنادار بهبود دهد. با این حال، اثر سیاست رفتاری در دو حامل یکسان نیست و انعطاف‌پذیری برق از گاز بیشتر است. این ناهمسانی از منظر سازوکار قابل تبیین است. بخش معناداری از مصرف گاز خانگی (خصوصاً در اقلیم‌های

قبض یا در یک پنل مشترک دو حامل به صورت شفاف و قابل فهم نمایش داده شود، برای اقلیم‌های سرد و ساختمان‌های پریسک، مسیرهای فنی قابل تأمین مالی تعریف گردد و تنظیم‌گری و پایش اجرای سیاست به‌گونه‌ای باشد که هم اثر توزیعی کنترل شود و هم انگیزه‌ها مخدوش نشود، موضوعی که در مطالعات پیرامون حکمرانی گاز و تنظیم‌گری انرژی نیز مورد تأکید قرار گرفته است، (عظیم‌زاده و طهماسبی، ۱۴۰۳).

نتایج مدل لوجیت نیز نشان داد پس از کنترل زیربنا، سن بنا، اقلیم و بعد خانوار، سهم اصلی تبیین احتمال موفقیت به عوامل کالبدی بازمی‌گردد و به‌ویژه زیربنا و سن بنا اثر منفی و نسبتاً یکنواختی بر شانس موفقیت دارند. در مقابل، اختلاف‌های مشاهده‌شده بین دهک‌ها عمدتاً از مسیر همین متغیرهای میانجی توضیح داده می‌شود و اثر مستقل دهک تضعیف می‌گردد. این نکته برای سیاست‌گذاری دو پیام روشن دارد نخست آن‌که آستانه به‌عنوان معیار عمومی عدالت‌محور و ابزار پایش باید واحد و یکسان تعریف شود تا معیار واحدی برای سنجش انطباق و ارسال سیگنال سیاستی به کل جامعه فراهم گردد. دوم آن‌که سیاست اثربخش باید به جای مدیریت دولتی تعویض تجهیزات که می‌تواند مستعد رانت و خطای هدف‌گیری باشد، بر طراحی چارچوب انگیزشی شفاف و قابل راستی‌آزمایی تکیه کند تا خانوارها خودشان به سمت اصلاحات رفتاری و سپس سرمایه‌گذاری در بهره‌وری حرکت کنند. در چنین چارچوبی، حمایت از دهک‌های پایین نیز به‌جای مداخله مستقیم دولت در خرید و توزیع تجهیزات، بهتر است به‌صورت کاهش ریسک مالی خانوار کم‌درآمد (مثل تسهیلات، تضمین، اعتبار قبوض یا یارانه سود) طراحی شود تا هم انگیزه حفظ

شود و هم زمینه رانت کاهش یابد.

در نهایت این مطالعه نشان می‌دهد، آستانه واحد زمانی به ابزار واقعی مدیریت تقاضا تبدیل می‌شود که به یک بسته سیاستی مبتنی بر مشوق‌های مالی و اجتماعی متصل گردد. از یک سو، پاداش و هزینه نهایی مصرف باید طوری تنظیم شود که عبور از آستانه برای خانوار معنادار شود، از سوی دیگر ابزارهای اجتماعی و اطلاعاتی باید امکان خودتنظیمی مصرف را تقویت کنند. سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در مقاله دقیقاً نقش همین سازوکار را نشان می‌دهند. تغییر رفتار (حتی در حد ۲۰ درصد) می‌تواند بخشی از خانوارهای ناموفق را به محدوده موفقیت منتقل کند، اما برای پایداری اثر به‌خصوص در گاز لازم است انگیزه‌های مالی و اجتماعی به‌گونه‌ای طراحی شوند که خانوارها به سمت ارتقای بهره‌وری و اصلاح کالبد بنا، به انتخاب خود و بدون مداخله مستقیم دولت در خرید و توزیع تجهیزات، سوق پیدا کنند.

پیشنهادها

با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهادهای سیاستی زیر ارائه می‌شود.

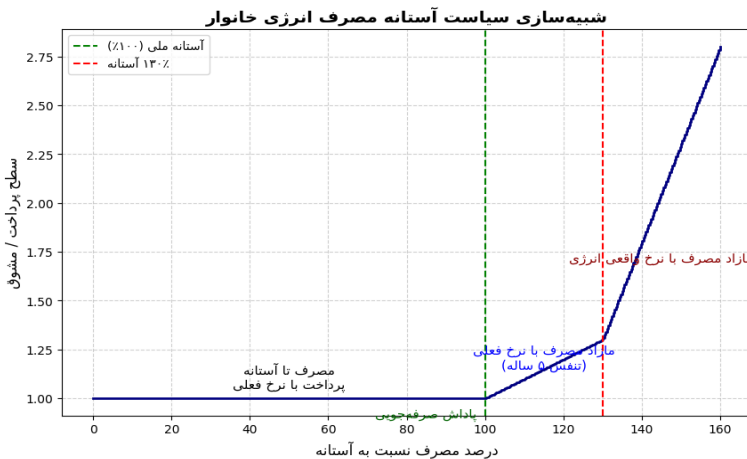
پیشنهاد ۱: تثبیت آستانه واحد سرانه و استانداردسازی نمایش آن در قبض و طراحی پنل مشترک به‌عنوان ابزار انگیزش اجتماعی. با توجه به این‌که کل تحلیل پژوهش بر مبنای آستانه سرانه واحد و مقایسه منصفانه خانوارها انجام شده است، توصیه می‌شود آستانه به‌عنوان یک معیار واحد ملی حفظ شود و در قبض برق و گاز (ابجد پنل دیجیتال مشترک)، سه جزء آستانه خانوار (برحسب بعد خانوار)، مصرف واقعی و فاصله تا آستانه به‌صورت ساده و قابل فهم نمایش داده شود تا اثر هنجاری و اجتماعی آستانه

سیاستی) و بالاتر از ۱۳۰ درصد با نرخ بازدارنده تر برای پرمصرفها (شکل ۱۱). سیاست‌گذار: مصوبات مورد نیاز از هیئت دولت، مجلس شورای اسلامی و شورای اقتصاد با تنظیم‌گری وزارت نیرو و نفت. طراحی معماری انگیزشی، یکپارچه‌سازی دو حامل و پایش اثرات توزیعی توسط سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی. مجری: توانیر، شرکت‌های توزیع برق و شرکت ملی گاز (صورتحساب و پلکان‌ها). ارزیاب: سازمان برنامه‌وبودجه، مرکز پژوهش‌های مجلس و دیوان محاسبات با شاخص‌هایی مثل جابه‌جایی توزیع مصرف نسبت به آستانه، کاهش سهم پرمصرف‌های بالای ۱۳۰ درصد تغییر یارانه ضمنی و تغییر معوقات.

پیشنهاد ۳: طراحی پاداش زیر آستانه و پاداش بهبود برای فعال‌سازی هم‌زمان انگیزه مالی و انگیزه اجتماعی بدون دخالت دولت در تعویض تجهیزات. از آن‌جا که صرف یک کاهش ۲۰ درصد مصرف می‌تواند نرخ موفقیت را از حدود ۵۵ درصد به ۶۶ درصد بهبود دهد (جدول ۱)، تعریف پاداش برای

تقویت گردد. سیاست‌گذار: وزارت نفت، وزارت نیرو و توانیر با راهبری و استانداردگذاری محتوای مداخله توسط سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی برای تعیین آستانه واحد. مجری: شرکت‌های توزیع برق و شرکت ملی گاز (هدف‌گیری مشترکان نزدیک آستانه و پریسک). ارزیاب: پژوهشگاه نیرو و دانشگاه‌ها با ارزیابی قبل و بعد و ترجیحاً طرح شبه‌آزمایشی (پایداری اثر، کاهش مصرف، افزایش نرخ موفقیت).

پیشنهاد ۲: اجرای سیاست سه‌سطحی (تشویق، تنفس و بازدارندگی) تعرفه حول آستانه واحد با دوره تنفس تا ۱۳۰ درصد و نرخ بازدارنده بالای ۱۳۰ درصد. نتایج نیز نشان داد که ترکیب انگیزش برای کاهش مصرف با بازه تنفس افزایش نرخ موفقیت را ایجاد می‌کند (جدول ۱، افزایش موفقیت تا حدود ۷۶ درصد). بنابراین پیشنهاد می‌شود تعرفه به سه سطح متصل به آستانه واحد طراحی شود. مصرف تا سقف آستانه با نرخ فعلی و حمایتی، بازه ۱۰۰ تا ۱۳۰ درصد با شیب ملایم و زمان سازگاری (تنفس)



شکل ۱۱. اجرای سیاست سه سطحی مصرف (یافته‌های پژوهش)

موفقیت‌اند (جدول ۲ و نیز شکل ۸ و ۷). توصیه این است که دولت وارد خرید و تعویض تجهیزات و بهینه‌سازی ساختمان‌ها نشود، بلکه تسهیلات به‌ویژه برای دهک‌های یک تا سه طوری طراحی کند که پرداخت فقط پس از اثبات کاهش مصرف انجام شود (پرداخت مبتنی بر عملکرد) و بازپرداخت نیز می‌تواند روی قبض انجام گیرد تا انگیزه و امکان مالی برای مردم ایجاد شود. سیاست‌گذار: وزارت اقتصاد، سازمان برنامه و بودجه و وزارت نیرو (چارچوب تامین مالی و قواعد عملکرد) با راهبری سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی. مجری: شبکه بانکی، شرکت‌های توزیع (اجرای تسهیلات و اتصال به قبض) و بخش خصوصی خدمات انرژی. ارزیاب: ممیز مستقل، دانشگاه‌ها، سازمان ملی استاندارد (شاخص‌ها: راستی‌آزمایی قبل و بعد مصرف، نرخ تقلب و انحراف و صرفه‌جویی به ازای هر واحد حمایت).

پیشنهاد ۶: حمایت از دهک‌های پایین بدون تغییر آستانه. با توجه به این که آستانه باید واحد باشد و اثر دهک پس از کنترل عوامل کالبدی و اقلیمی تضعیف می‌شود (جدول ۲)، حمایت اجتماعی بهتر است از مسیر کاهش ریسک مالی انجام شود. تقسیط محدود و هدفمند برای جلوگیری از شوک، یارانه سود تسهیلات بهسازی برای خانوارهای آسیب‌پذیر یا اعتبار قبض در دوره‌های اوج مصرف به‌گونه‌ای که پیام انگیزشی آستانه حفظ شود و انگیزه صرفه‌جویی تضعیف نگردد. وزارت تعاون (اطلاعات رفاهی)، سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی (طراحی قواعد ضدرانت و شفافیت)، وزارت اقتصاد و بانک مرکزی. مجری: بانک‌ها و شرکت‌های توزیع برق و گاز (سازوکار اقساط قبض). ارزیاب: مرکز پژوهش‌های مجلس و دیوان محاسبات با سنجش‌های

زیر آستانه ماندن و نیز بهبود نسبت به دوره مشابه سال قبل می‌تواند یک اهرم کم‌هزینه و مقیاس‌پذیر برای ایجاد انگیزه مالی باشد و در عین حال اثر هنجاری آستانه را تقویت کند (هم‌راستا با منطق شکل ۴). سیاست‌گذار: وزارت نیرو با سازمان برنامه و بودجه (تعریف قواعد پاداش و منابع) با راهبری و استانداردها: وزارت نیرو با سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی. مجری: شرکت‌های توزیع برق و شرکت ملی گاز (اعمال پاداش و اعتبار در قبض). ارزیاب: پژوهشگاه نیرو و دانشگاه‌ها (شاخص‌ها: مقدار کاهش مصرف، پایداری اثر در دوره‌های بعد، و هزینه اثربخشی پاداش).

پیشنهاد ۴: اجرای بسته مداخله رفتاری (بازخورد، هشدار نزدیک‌شدن به آستانه، مقایسه اجتماعی) به‌ویژه برای برق. چون یافته‌ها نشان می‌دهد برق نسبت به گاز انعطاف‌پذیری رفتاری بیشتری دارد (مقایسه شکل ۳ و ۴)، یک برنامه رفتاری آستانه‌محور می‌تواند سریع‌ترین مسیر کاهش مصرف باشد. پیامک و اپلیکیشن با هشدار نزدیک‌شدن به آستانه، مقایسه مصرف با خانوارهای مشابه و توصیه‌های بسیار عملی برای ده تا بیست درصد کاهش. سیاست‌گذار: وزارت نیرو و توانیر با راهبری و استانداردها: وزارت نیرو و مدیریت مداخله توسط سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی. مجری: شرکت‌های توزیع برق (هدف‌گیری مشترکان نزدیک آستانه و پر مصرف‌ها). ارزیاب: دانشگاه‌ها و پژوهشگاه نیرو (شاخص‌ها: کاهش مصرف، تغییر نرخ موفقیت در گروه هدف و پایداری اثر).

پیشنهاد ۵: سازوکار کم‌رانت برای بهسازی خانوار محور در ساختمان‌های پرریسک از طریق تسهیلات مبتنی بر عملکرد. نتایج لوچیت نشان می‌دهد زیربنا و سن بنا و اقلیم مسیرهای اصلی ریسک عدم

از طریق شبکه‌ی ائمه جمعه، شوراهای اسلامی، رسانه‌های محلی و تسهیلگران آموزش انرژی تغییر رفتار اجتماعی تقویت گردد. آموزش باید از توصیه‌های کلی فاصله بگیرد و هر خانوار بداند آستانه‌اش چیست، فاصله‌اش چقدر است و با چه اقدامات رفتاری مشخص (لیست کوتاه) می‌تواند زیر آستانه بماند. سیاست‌گذار: سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی (تدوین پیام واحد ملی و استانداردهای ارتباطی) با همکاری وزارت نیرو و نفت. مجری: شرکت‌های توزیع و گاز (روی قبض و پیامک)، رسانه ملی و رسانه‌های محلی، آموزش و پرورش (واحدهای آموزشی کوتاه).

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمامی اصول اخلاقی در پژوهش این مقاله رعایت شده‌اند.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی ندارد.

مشارکت‌نویسندگان

نویسندگان به یک اندازه در نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از تمامی افرادی که در اجرای این طرح پژوهشی همکاری و همراهی صادقانه داشته‌اند، ابراز می‌داریم. تسهیل‌گران محترم که با تلاش میدانی، صبر و دقت

خطای شمول حذف، شفافیت و اثر واقعی بر نرخ موفقیت.

پیشنهاد ۷: تقویت تجدیدپذیر خانگی به صورت انگیزه‌ساز و مردمی برای کاهش فشار برق و پیک. توسعه پنل‌های خورشیدی پشت‌بامی می‌تواند فشار برق را کاهش دهد. سازوکارهای انگیزشی اقتصادی فعال شود. خرید تضمینی و نت‌ترینگ (یعنی کنترل‌تسویه‌ای که برق تولیدی خانوار مثلاً خورشیدی پشت‌بامی را با برق مصرفی‌شان تهاتر می‌کند، در دوره‌هایی که بیشتر تولید می‌کنید، اعتبار می‌گیرند و در دوره‌هایی که کمتر تولید می‌کنند، از آن اعتبار مصرف می‌شود)، تسهیلات اقساطی با بازپرداخت از محل درآمد فروش برق و کاهش هزینه اتصال و مجوز. این سیاست مکمل بسته سه‌سطحی و یاداش است و مسیر سرمایه‌گذاری مردم را فعال می‌کند. سیاست‌گذار: وزارت نیرو و سازمان تنظیم‌گر با نقش محوری ساتبا و راهبری سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی برای هم‌راستا کردن آن با سیاست آستانه. مجری: شرکت‌های توزیع برق (اتصال، کنترل، تسویه)، بخش خصوصی و بانک‌ها (تسهیلات). ارزیاب: سازمان برنامه و پژوهشگاه نیرو با شاخص‌هایی مثل کاهش اوج بار، کاهش قبض خانوار، نرخ نفوذ و پایداری تولید.

پیشنهاد ۸: آموزش و فرهنگ‌سازی. اصلاح رفتار مصرفی بدون ارتقای آگاهی عمومی پایدار نخواهد بود. آموزش و اطلاع‌رسانی شفاف درباره‌ی مفهوم آستانه مصرف، مزایای صرفه‌جویی و آثار اقتصادی و زیست‌محیطی آن باید از طریق رسانه‌های جمعی، مدارس، دانشگاه‌ها و نهادهای محلی دنبال شود. پیشنهاد می‌شود مسئولیت هماهنگی برنامه‌های آموزشی و فرهنگی در زمینه‌ی کاهش مصرف انرژی به شورای فرهنگ عمومی استان‌ها واگذار شود تا

فراوان در جمع‌آوری داده‌های خانوار نقش اساسی ایفا کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین از فرمانداران، بخشداران، دهیاران و اعضای محترم شوراهای اسلامی شهر و روستا که با حمایت‌های مدیریتی و هماهنگی‌های محلی، زمینه اجرای دقیق و منظم مراحل میدانی را فراهم نمودند، نهایت تشکر و امتنان را داریم. تقدیر ویژه از همکاری ارزشمند سازمان‌های اجرایی، معاونت هماهنگی امور عمرانی و اداره کل مدیریت بحران استانداری، شرکت‌های برق و گاز، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان و سایر دستگاه‌هایی که به هر نحوی در تأمین اطلاعات، تسهیل ارتباطات یا همکاری اجرایی نقش داشتند، به عمل می‌آید که با در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات پایه، نقش مؤثری در تکمیل و صحت‌سنجی داده‌ها ایفا کردند. بی‌تردید، اجرای موفق این طرح بدون همراهی این مجموعه‌ها و همکاری دلسوزانه آنان میسر نمی‌گردید.

منابع

منابع فارسی

باجووند، بهزاد، ۱۴۰۱، فنون تسهیلمگری و جلب مشارکت مردمی در پروژه‌های ملی، انتشارات ارسطو. شورای اقتصاد، اصلاحیه مصوبه شماره ۵۰۹۲۵۸ مورخ ۱۳۹۹/۹/۲۶.

صابری، علی و ظفریان ریگکی، حبیب‌الله. (۱۴۰۲). ناترازی گاز طبیعی در کشور: چارچوب راهکارهای پیشنهادی، گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱ (۱۰)، ۱۹۵۲۹.

عظیم‌زاده آرانی، محمد، طهماسبی بلوک آباد، رضا، (۱۴۰۳)، بررسی نقش ساختار حکمرانی بخش گاز در حل چالش ناترازی، (مطالعه موردی: کشورهای منتخب)، مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی، ۵۲، ۱۲۹-۱۵۵.

عظیم‌زاده آرانی، محمد، طهماسبی بلوک آباد، رضا، ریزوندی، محمدمامیر، (۱۴۰۳)، جایگاه تنظیم‌گری در ساختار حکمرانی بخش انرژی ایران، مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی، ۵۳، ۸۰-۵۵.

کاظمیان، فرزانه، (۱۴۰۱)، راهنمای تسهیلمگری ویژه تسهیلمگران توسعه روستایی، نشر آموزش کشاورزی.

مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد برنامه هفتم پیشرفت تا پایان شهریور ۱۴۰۴، فصل ۹-انرژی.

موسوی، سیده مریم و شریفی، رضا. (۱۴۰۳). پایش شاخص‌های کلان بخش برق: سال ۱۴۰۲، گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۲ (۶)، ۳۱۰۲۰۰۱۶.

موسوی، سیده مریم، رضانی، ایمان و شریفی، رضا. (۱۴۰۲). بررسی وضعیت مصرف و نظام تعرفه گذاری برق در بخش خانگی، گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱ (۱۲)، ۱۹۶۸۹.

همایون، محمدباقر، سقاب اصفهانی، اسماعیل، حیدری، حمید، سوهانکار، امیرحسین، میری لاریمی، سید مجید، اکبری، محمدرضا. (۱۴۰۳). اصلاح نظام پارانته‌های انرژی ایران با معرفی رویکرد جدید بازتوزیع پارانته‌های انرژی؛ مطالعه موردی حامل‌های برق و گاز طبیعی، مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی، ۵۲، ۴۵-۱۵.

References

- Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., and Rothengatter, J. A. (2005). Encouraging sustainable household energy use: A review of intervention studies*. *Journal of Environmental Psychology*, 25, 291-273.
- Allcott, H., & Rogers, T. (2014). The short-run and long-run effects of behavioral interventions: Experimental evidence from energy conservation. *American Economic Review*, 104(10), 3003-3037.
- Carrus G, Tiberio L, Mastrandrea S, Chokrai P, Fritsche I, Klöckner CA, Masson T, Vesely S, Panno A. Psychological Predictors of Energy Saving Behavior: A Meta-Analytic Approach. *Front Psychol*. 2021 Jun 24;12:648221. doi: 10.3389/fpsyg.2021.648221. PMID: 34248747; PMCID: PMC8265205.
- Davison A. C., Hinkley D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application* (Vol. 1). New York, NY: Cambridge University Press.
- Efron B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Efron B., Tibshirani R. J. (1994). *An introduction to the bootstrap*. Boca Raton, FL: CRC press.
- Faryadras, A., Tahmasebiashtiani, S., Kasiri, M., & Mirnezami, S. R. (2025). Transforming energy landscape: A scenario-based robust planning strategy for addressing energy imbalance in Iran by 2035, *Energy Strategy Reviews*, 61, 101817, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101817>.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874.
- Gillingham, K., Rapson, D., and Wagner, G. (2016). The rebound effect and energy efficiency policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1), 68-88.
- Harasheh, M. (2016). Forecasting The Italian Day-Ahead Electricity Price Using Bootstrap Aggregation Method. *EUROPEAN SCIENTIFIC JOURNAL*, 12(28), 51-76.
- Huang, F. L. (2018). Using cluster bootstrapping to analyze nested data with a few clusters. *Educ Psychol Meas*, 78(2), 297-318.
- International Energy Agency. (2022). *Energy efficiency 2022*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>.
- Jiang L, Ding B, Shi X, Li C, Chen Y., (2022), Household Energy Consumption Patterns and Carbon Emissions for the Megacities—Evidence from Guangzhou, China. *Energies*. 15(8):2731.
- Lahiri, S. N. (2003). *Resampling Methods for Dependent Data*. Springer.
- Mamipour, S., Ghahremani, M., Malfuzi, A., & Motahar, S. A., (2025). Analyzing the consequences of postponing electricity subsidy reforms in Iran: A retrospective study, *Energy Strategy Reviews*, 62, 101889. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101889>.
- Menzel, K. (2021). Bootstrap with cluster-dependence in two or more dimensions. *Econometrica*, 89(5), 2143-2188.
- Mundaca, L., Zhu, X., Hackenfort, M., (2022), Behavioural insights for sustainable energy use. *Energy Policy*, 171, 113292.
- Pelaez, R., Aneiros, G., and Vilar, J. M., (2024). Bootstrap prediction regions for daily curves of electricity demand and price using functional data, *International Journal Electrical Power and Energy*

Systems, 162, 110244.

- Raei, H., Maleki, A., and Farajzadeh, Z. (2024). Analysis of energy policy reform in Iran: Energy and emission intensity changes. *Economic Analysis and Policy*, 81, 1535–1557.
- Youden, W. J. (1950). Index for rating diagnostic tests. *Cancer*, 3(1), 32–35.
- Fluss, R., Faraggi, D., and Reiser, B. (2005). Estimation Of The Youden Index And Its Associated Cutoff Point. *Biometrical Journal*, 47(4), 458–472. Doi:10.1002/Bimj.200410135.