--Iranian Energy Economics---------
Vol(issue), PP.
Jiee.atu.ac.ir
DOI:

ATU PRESS

Original Research
Received:
Accepted:
ISSN:2423-5954
eISSN:2476-6437

Analysis and Simulation of Household Energy Consumption Behavior in Semnan Province with a Sustainable Approach to Resolving the Energy Imbalance

Mohammad Javad Kolivand — Governor General of Semnan Province, Semnan Provincial Government, Semnan, Iran.

Esmail Saghab Esfahani — Energy Optimization and Strategic Management Organization, Tehran, Iran.

Seyfolah Saedodin — Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical, Semnan University, Semnan, Iran.

Majid Gholhaki — Professor of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Omid Karimi — Associate Professor of Statistics, Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran.

Fatemeh Hosseini* — Associate Professor of Statistics, Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran.

Farajolah Iliat — The Deputy Coordinator of Civil Affairs of Semnan Provincial Government, Semnan, Iran.

Abstract

Growing imbalances between energy supply and demand in Iran have underscored the need to understand household electricity and natural-gas consumption. This study examined associations of household welfare, dwelling characteristics, and climate with actual energy use in Semnan Province. We linked registered annual electricity and natural-gas consumption for the Iranian year 1403 to field-surveyed household and dwelling characteristics and welfare-decile records, obtaining a

*Corresponding Author: fatemeh.hoseini@semnan.ac.ir
How to Cite:

final sample of 2,686 households. Consumption distributions and group differences were assessed using analysis of variance, Kruskal–Wallis tests, and post-hoc comparisons. Random forest and benchmark linear regression models were fitted to assess factor importance, potential nonlinearities, and predictive performance. Households were also classified according to official national per-capita thresholds adjusted for household size, and logistic regression was used to assess the odds of remaining below the threshold in relation to welfare decile, floor area, building age, and climate zone. Energy use was right-skewed, with high-consuming households disproportionately raising average consumption. According to the composite index, approximately 55% of households remained below the threshold and 45% exceeded it. Higher welfare status, larger dwellings, and older buildings were associated with greater consumption and lower odds of remaining below the threshold, while climate zone remained relevant after adjustment. The findings identified consumption heterogeneity and groups at higher risk of exceeding thresholds, supporting targeted demand-side policy design. As the data were observational, the results did not establish causal effects of policy interventions

Introduction

The imbalance between energy supply and demand has increased the need for reliable evidence on residential consumption in Iran. Electricity and natural gas are consumed under different climatic conditions and within homes that vary in size, age, and equipment. Household economic circumstances may also shape consumption opportunities. Consequently, a single provincial mean can conceal substantial heterogeneity and provide an incomplete basis for designing demand-side measures. The present study integrated field observations with registered annual energy use and welfare information for Semnan Province. Its contribution was primarily empirical and operational: it described household-level variation, identified correlates of consumption, and linked an explicit, household-size-adjusted threshold rule to a policy-oriented classification. It further examined how an assumed uniform consumption reduction would change that classification, without representing the scenario as an observed intervention. The study addressed three questions: How were electricity, natural-gas, and composite consumption distributed across the analytical households? Which welfare, dwelling, and climatic

characteristics were associated with consumption and with the conditional odds of remaining below the national thresholds? How would the proportion of compliant households change if every recorded household consumption value were mechanically reduced by 20%?

Methods and Material

The research used a descriptive-analytical, observational design with household data from the Iranian calendar year 1403. The target population comprised urban and rural households with electricity and gas subscriptions in Semnan Province. A multistage cluster, stratified, and random sampling procedure selected areas by cold, temperate, and dry climate, settlement type, and relative welfare. The field design included 20 selected villages and 23 urban neighborhoods in Shahmirzad, Mahdishahr, and Semnan. Within selected locations, households were stratified by quartiles of annual electricity consumption and randomly sampled. Trained local facilitators collected demographic, dwelling, and household-equipment information through an online mobile questionnaire with basic validation checks. Survey records were matched at household level with registered annual electricity and natural-gas use and administrative welfare-decile data. Of 4,984 completed questionnaires, 2,686 records remained after cleaning, cross-source linkage, and exclusions, including records without natural-gas consumption. Electricity and gas were analyzed separately and by a scale-adjusted composite consumption index. Group differences were examined using analysis of variance, Kruskal-Wallis tests, and subsequent comparisons. Benchmark linear regressions were compared with a random forest; the latter was tuned and evaluated using five-fold cross-validation to explore nonlinear predictive patterns and variable importance.

For threshold assessment, the study used the stated national annual per-capita values of 1,200 kWh of electricity and 700 cubic metres of natural gas, multiplied by household size. The manuscript's policy-weighted composite threshold rule was applied consistently to observed consumption; the weighting was not treated as a physical energy-conversion factor. A binary indicator distinguished households below and above the combined threshold. Logistic regression related successful compliance to welfare group, dwelling floor area, building age, and climatic zone. Finally, the observed values for both energy

carriers were reduced uniformly by 20% and compliance was recomputed. No real policy intervention was implemented.

Results and Discussion

Annual electricity and gas consumption were right-skewed, indicating substantial heterogeneity and an upward influence of relatively high-consuming households on mean values. The reported average annual electricity use was approximately 1,836 kWh in the rural sample and 2,122 kWh in the urban sample; corresponding natural-gas means were about 2,200 and 3,217 cubic metres. Comparisons across welfare groups and multivariate analyses consistently identified welfare decile as an important correlate of energy consumption. Floor area and building age were also influential dwelling characteristics, and climatic differences remained relevant. The random forest complemented the linear benchmarks by allowing nonlinear associations and variable interactions to enter the prediction model. Under the combined threshold rule, approximately 55% of analyzed households were below the limit and 45% exceeded it. In the final logistic model, the odds ratios for compliance were 0.726 for middle-welfare households and 0.663 for higher-welfare households relative to the lower-welfare group. These represented about 27% and 34% lower odds, respectively, conditional on included covariates; they were not percentage-point changes in probability. Larger dwellings and older buildings similarly had lower conditional odds of compliance, while the temperate and cold climatic groups had lower odds than the dry reference group. In the purely mechanical 20% reduction scenario, the compliant share increased from approximately 55% to 66%, and the noncompliant share decreased from 45% to 34%.

The evidence supported differentiated assessment rather than uniform treatment of all households. However, the estimated associations should not be read as effects of welfare or building changes, and the scenario did not predict actual responses to tariffs, subsidies, or awareness campaigns. The reported compliance percentages described the linked analytical sample; extrapolation to all households in the province would require careful assessment of sampling weights and linkage-related exclusions.

Conclusion

Integrating metered electricity and gas records with welfare and dwelling information enabled household-level identification of consumption risks. Approximately 55% of households met the combined threshold; a hypothetical uniform 20% reduction increased simulated compliance to 66%, without implying a causal intervention effect. Welfare status, dwelling size and age, and climatic conditions supported targeted, climate-sensitive demand management. The article further advocated participatory energy governance, household education, responsible consumption, and locally trained energy facilitators, alongside building improvements, small-scale renewable technologies, and repayable incentives. These proposals were policy implications, not empirically evaluated interventions. Because the data covered only 1403 and lacked observed price, subsidy, tariff, and policy-shock information, the estimated associations cannot establish causal policy effects.

Acknowledgments

The authors acknowledge the local facilitators who collected household survey information and the provincial and local administrative bodies, electricity and gas organizations, and other institutions that assisted field coordination and data provision.

Keywords: Energy consumption threshold, Energy imbalance, Consumption pattern, Energy policy.

JEL Classification: D12, Q41

--پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران---------
دوره ؟، شماره ؟، نام فصل، سال، ص ص
Jiee.atu.ac.ir
DOI:

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰
ISSN:5954- 2423
eISSN:۲۴۷۶-۶۴۳۷

تحلیل و شبیه‌سازی رفتار مصرف انرژی خانوارهای استان سمنان با رویکرد رفع پایدار ناترازی انرژی

نویسنده اول دکتر محمدجواد کولیوند، استانداری سمنان سمنان، ایران

نویسنده دوم اسماعیل سقاب اصفهانی، سازمان بهینه‌سازی و مدیریت راهبردی انرژی، تهران، ایران

نویسنده سوم استاد سیف‌اله سعدالدین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نویسنده چهارم استاد مجید قلهکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نویسنده پنجم دانشیار امید کریمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نویسنده ششم * دانشیار فاطمه حسینی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نویسنده هفتم فرج‌اله ایلیات، استانداری سمنان سمنان، ایران

چکیده

افزایش ناترازی میان عرضه و تقاضای انرژی در ایران، ضرورت شناخت الگوی مصرف برق و گاز طبیعی خانوارها را برجسته ساخته است. این پژوهش ارتباط میان وضعیت رفاهی خانوار، ویژگی‌های واحد مسکونی و شرایط اقلیمی را با مصرف واقعی انرژی در استان سمنان بررسی کرد. بدین منظور، اطلاعات ثبت‌شده مصرف سالانه برق و گاز طبیعی در سال ۱۴۰۳ با داده‌های حاصل از پیمایش میدانی ویژگی‌های خانوار و واحد مسکونی و اطلاعات دهک رفاهی پیوند داده شد و نمونه نهایی شامل ۲۶۸۶ خانوار تشکیل گردید. توزیع مصرف و تفاوت‌های میان گروه‌ها با استفاده از تحلیل واریانس، آزمون کروسکال–والیس و مقایسه‌های تعقیبی ارزیابی شد. همچنین مدل جنگل تصادفی و مدل‌های رگرسیون خطی مرجع برای ارزیابی اهمیت عوامل، روابط غیرخطی احتمالی و عملکرد پیش‌بینی برازش شدند. خانوارها بر اساس آستانه‌های رسمی سرانه ملی، متناسب‌سازی‌شده با بعد خانوار، طبقه‌بندی شدند و با استفاده از رگرسیون لجستیک، نسبت

*نویسنده مسئول: fatemeh.hoseini@semnan.ac.ir

بخت قرارگرفتن زیر آستانه در ارتباط با دهک رفاهی، زیربنا، سن بنا و منطقه اقلیمی بررسی شد. نتایج نشان داد توزیع مصرف انرژی دارای چولگی به راست است و خانوارهای پرمصرف سهم نامتناسبی در افزایش میانگین مصرف دارند. بر اساس شاخص ترکیبی، حدود ۵۵ درصد خانوارها زیر آستانه مصرف قرار گرفتند و ۴۵ درصد از آن عبور کردند. دهک رفاهی بالاتر، زیربنای بیشتر و سن بالاتر ساختمان با افزایش مصرف و کاهش بخت قرارگرفتن زیر آستانه همراه بودند؛ درحالی‌که ارتباط منطقه اقلیمی پس از تعدیل سایر متغیرها نیز باقی ماند. یافته‌ها ناهمگنی مصرف و گروه‌های در معرض خطر بیشتر عبور از آستانه را شناسایی کردند و مبنایی برای طراحی سیاست‌های هدفمند مدیریت تقاضای انرژی فراهم ساختند. با توجه به ماهیت مشاهده‌ای داده‌ها، نتایج پژوهش اثرات علّی مداخلات سیاستی را اثبات نمی‌کنند.

کلیدواژه‌ها: آستانه مصرف انرژی، ناترازی انرژی، الگوی مصرف، سیاست‌گذاری انرژی

طبقه‌بندی JEL: D12, Q41

۱. مقدمه

موضوع ناترازی انرژی در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های بنیادین نظام اقتصادی و زیست‌محیطی کشور تبدیل شده است. رشد مستمر مصرف در بخش خانگی، هم‌زمان با محدودیت ظرفیت تولید و تلفات در زنجیره عرضه، شکاف میان عرضه و تقاضا را تشدید کرده و بخش قابل‌توجهی از این شکاف به الگوهای غیربهینه مصرف خانوارها و فاصله آن‌ها از مقادیر مرجع تعیین‌شده در سیاست‌های انرژی بازمی‌گردد. در چنین شرایطی، پایش و تحلیل رفتار مصرفی خانوار در مقیاس استانی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از ناهمگنی مصرف، گروه‌های پرریسک و دامنه اثربخشی مداخلات اصلاحی ارائه کند، به‌ویژه هنگامی که تحلیل بر داده‌های واقعی مصرف تکیه داشته باشد و به شاخص‌ها و معیارهایی منجر شود که برای سیاست‌گذاری قابل استفاده‌اند.

هدف این پژوهش، تحلیل داده‌محور الگوی مصرف انرژی خانوارهای استان سمنان در سال ۱۴۰۳ و ارزیابی انطباق آن با آستانه‌های سرانه ملی است. بدین منظور، داده‌های واقعی مصرف برق و گاز خانوارها گردآوری و همراه با اطلاعات جمعیت‌شناختی و کالبدی (مثل بعد خانوار، دهک رفاهی، زیربنا، سن بنا، اقلیم و ویژگی‌های سرپرست خانوار) تحلیل می‌شود. تمرکز بر سال ۱۴۰۳ به این دلیل است که نمونه پژوهش به خانوارهایی محدود شده است که کل دوره ۱۲ماهه همان سال را در واحد مسکونی مورد مشاهده ساکن بوده‌اند. استفاده از سال‌های قبل می‌توانست به دلیل تغییر سکونت مالک، خالی‌بودن واحد یا نوساز بودن بنا، سیگنال رفتاری خانوار را با ناهمگنی‌های غیرقابل کنترل مخدوش کند. از آنجا که برق و گاز دارای واحدهای متفاوت‌اند، برای جلوگیری از سوگیری مقیاس در تحلیل‌های تبیینی، یک شاخص ترکیبی هم‌مقیاس ساخته می‌شود تا مقایسه شدت مصرف و رتبه‌بندی عوامل تعیین‌کننده آن به‌صورت منصفانه انجام گیرد. در مقابل، در بخش سیاستی آستانه و یارانه، معیار موفقیت و عدم‌موفقیت دقیقاً بر مبنای قاعده اجرایی آستانه تعریف می‌شود. به این معنا که آستانه سرانه سالانه برق و گاز برای سال ۱۴۰۳ مبنا قرار می‌گیرد، سپس آستانه خانوار متناسب با بعد خانوار محاسبه می‌شود و برای تجمیع دو حامل در معیار سیاستی، از وزن‌دهی گاز نسبت به برق با ضریب۳ که بر پایه‌ی راندمان نیروگاه‌های حرارتی و تلفات انتقال و توزیع برق استفاده می‌گردد. این ضریب در این مطالعه به‌عنوان وزن سیاستی مورد استفاده در چارچوب آستانه به‌کار گرفته شده است نه به‌عنوان ضریب تبدیل فنی انرژی، تا

سنجش انطباق خانوارها با قاعده اجرایی طراحی آستانه به‌صورت مستقیم و قابل تفسیر انجام شود. بنابراین، دو کمیت متفاوت اما مکمل در مقاله به‌کار می‌رود: یکی شاخص هم‌مقیاس برای تحلیل روابط و مقایسه‌ها، و دیگری معیار آستانه‌محور برای سنجش انطباق و طراحی پیام سیاستی.

برای آنکه مسیر تحلیل آزمون‌پذیر و روشن باشد، سؤال‌های پژوهش به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که دو محور اصلی تبیین سطح مصرف و حکمرانی آستانه را پوشش دهند. در محور نخست، پرسش این است که مصرف انرژی ترکیبی خانوارها در سال ۱۴۰۳ چگونه توزیع شده و میزان ناهمگنی و چولگی آن در سطح استان تا چه حد است؛ همچنین کدام عوامل اقتصادی–اجتماعی و کالبدی بیشترین نقش را در تبیین تفاوت‌های مصرف دارند و رتبه اهمیت نسبی آن‌ها چگونه برآورد می‌شود. در این بخش، علاوه بر آزمون‌های آماری کلاسیک (از جمله تحلیل واریانس و آزمون ناپارامتری کروسکال–والیس و مقایسه‌های تعقیبی)، از روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی به‌عنوان ابزار مکمل استفاده می‌شود تا بدون اتکا به فرض خطی‌بودن رابطه‌ها، امکان شناسایی الگوهای غیرخطی و برهم‌کنش‌های محتمل میان متغیرها فراهم شود و سپس عملکرد آن در کنار مدل‌های خطی مرجع، با گزارش شاخص‌های خطا و اعتبارسنجی مقایسه گردد. در محور دوم، سهم خانوارهایی که در شاخص سیاستی انرژی ترکیبی پایین‌تر/بالاتر از آستانه سرانه ملی قرار می‌گیرند برآورد می‌شود و با تعریف متغیر پاسخ دودویی موفقیت (قرارگرفتن زیر آستانه)، یک مدل اقتصادسنجی لوجیت برای تبیین احتمال عبور از آستانه ارائه می‌شود. در نهایت، برای تبدیل نتایج به یک ارزیابی حساسیت سیاستی، یک شبیه‌سازی مکانیکی- محاسباتی تحت فرض کاهش یکنواخت ۲۰ درصدی مصرف انجام می‌شود و تغییر نرخ قرارگرفتن خانوارها زیر آستانه محاسبه می‌گردد. این سناریو به‌معنای برآورد اثر علّی یک مداخله رفتاری یا سیاست قیمتی اجراشده نیست، بلکه صرفا نشان می‌دهد اگر مصرف مشاهده‌شده خانوارها به‌صورت یکنواخت ۲۰ درصد کاهش یابد، چه نسبتی از خانوارها از وضعیت عبور از آستانه به وضعیت انطباق با آستانه منتقل می‌شوند. همچنین فرضیه‌های قابل آزمون متناظر با ادبیات تقاضای انرژی به‌صورت مشخص بررسی می‌شود، از جمله انتظار می‌رود افزایش دهک رفاهی، زیربنای بیشتر و سن بنای بالاتر با احتمال عبور بیشتر از آستانه همراه باشد و نسبت به اقلیم خشک، اقلیم‌های سردسیر و معتدل با احتمال عبور بالاتر از آستانه مشاهده شوند.

از نظر نوآوری، این پژوهش نخست بر داده‌های واقعی مصرف برق و گاز در سطح خانوار تکیه دارد و معیار موفقیت و عدم‌موفقیت را به‌صورت عملیاتی بر مبنای انطباق با آستانه سرانه ملی و متناسب‌سازی با بعد خانوار تعریف می‌کند. دوم، یک نوآوری اجرایی و داده‌ای مهم، گردآوری میدانی اطلاعات با رهیافت تسهیل‌گری محلی و ثبت برخط در سامانه موبایلی و سپس لینک‌کردن هم‌زمان چند منبع داده (مصرف واقعی برق، مصرف واقعی گاز و دهک رفاهی از سامانه رفاهی) با اطلاعات کالبدی و جمعیت‌شناختی خانوار است. زنجیره یکپارچه گردآوری و لینک داده‌های خرد در مطالعات مشابه کشور کمتر گزارش شده و امکان تحلیل دقیق‌تر ناهمگنی مصرف را فراهم می‌سازد. در این چارچوب، از آزمون‌های آماری کلاسیک برای سنجش تفاوت‌های گروهی، از مدل‌های خطی به‌عنوان مبنای مقایسه، از جنگل تصادفی به‌عنوان ابزار مکمل برای رتبه‌بندی اهمیت نسبی عوامل و شناسایی روابط غیرخطی و برهم‌کنش‌های احتمالی و از مدل لوجیت برای تحلیل احتمال قرارگرفتن زیر آستانه استفاده می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

در ادبیات اقتصاد انرژی، بررسی الگوهای مصرف خانوار و طراحی ابزارهای سیاستی برای مدیریت ناترازی مصرف، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. نظریه‌های کلاسیک مصرف انرژی بیان می‌کنند که تصمیمات مصرفی خانوار نه‌تنها از سطح درآمد و قیمت نسبی حامل‌های انرژی تأثیر می‌پذیرد، بلکه متأثر از هنجارهای اجتماعی، آگاهی زیست‌محیطی و شرایط اقلیمی نیز هست، (گیلینگهام[1] و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات جدیدتر در حوزه‌ی اقتصاد رفتاری انرژی نیز نشان داده‌اند که مداخلات غیرقیمتی مانند اطلاع‌رسانی هدفمند، مقایسه‌ی اجتماعی مصرف و ارائه‌ی بازخوردهای مستمر، اثری مشابه تغییرات قیمتی در کاهش مصرف دارند، (کاروس[2] و همکاران، ۲۰۲۱، آلکات و راجرز[3]، ۲۰۱۴ و آبراهامسه[4] و همکاران، ۲۰۰۵). این یافته‌ها مبنای طراحی سیاست‌های مبتنی بر تغییر رفتار در حوزه‌ی انرژی هستند و در پژوهش حاضر نیز از همین رویکرد برای ارزیابی سناریوی صرفه‌جویی

1. Gillingham
2. Carrus
3. Alcott and Rogers
4. Abrahamse

۲۰ درصدی استفاده شده است، این سناریو از نظر جهت اثر، با منطق نظری واکنش مصرف‌کننده به واقعی‌ترشدن قیمت‌ها، مشوق‌های مالی یا انگیزه‌های اجتماعی صرفه‌جویی همخوان است. در زمینه‌ی تحلیل آستانه‌های مصرف، مطالعات بین‌المللی بر ضرورت تدوین شاخص‌های سرانه‌ی انرژی خانوار تأکید دارند تا ارزیابی کارایی مصرف، با در نظر گرفتن اندازه‌ی خانوار، نوع سکونت و شرایط اقلیمی، به‌صورت منصفانه انجام شود، (جیانگ[1] و همکاران، ۲۰۲۲). در ایران نیز برخی پژوهش‌های ملی و استانی با هدف تعیین آستانه‌های سرانه‌ی برق و گاز و مقایسه‌ی آن با مصرف واقعی انجام شده‌اند، (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۰). با این حال، تمرکز بر خانوارهای ادغامی شهری–روستایی و تحلیل هم‌زمان مصرف برق و گاز در مقیاس خرد، در مطالعات پیشین کمتر دیده می‌شود و وجه تمایز پژوهش حاضر محسوب می‌گردد. افزون بر مبانی نظری، تجارب بین‌المللی متعددی بر اهمیت مداخلات اجتماعی و فرهنگی در بهینه‌سازی مصرف انرژی تأکید کرده‌اند. در مطالعه‌ای میدانی بر روی بیش از ۸۰ هزار خانوار در ایالات متحده، تنها با ارسال گزارش‌های مقایسه‌ای مصرف و برجسته‌سازی هنجارهای مثبت صرفه‌جویی، مصرف برق به‌طور میانگین دو درصد کاهش یافت، (آلکات، ۲۰۰۹، آلکات و روجرز، ۲۰۱۴). بررسی‌های انجام‌شده توسط موندا‌کا[2] و ژو[3] (۲۰۲۲) و آژانس بین‌المللی انرژی[4] (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که تلفیق سه نوع مداخله‌ی رفتاری، فناورانه و تعرفه‌ای بیشترین اثربخشی را در بهینه‌سازی مصرف خانگی دارد. لذا آنچه در اصلاح الگوی مصرف نقش محوری دارد، ایجاد انگیزه و آگاهی برای تغییر رفتار است. بدون انگیزه، حتی سیاست‌های فنی یا تعرفه‌ای نیز اثر پایداری نخواهند داشت. بر این اساس، اصلاح پایدار مصرف انرژی مستلزم ترکیب سه محور مکمل رفتاری، فنی و اقتصادی است که باید به‌صورت هم‌افزا طراحی شوند. مطالعه‌ای در کشور اندونزی در حوزه یارانه‌های انرژی نشان داد که سیاست‌های حمایتی عمومی در عمل می‌توانند ناکارآمد باشند و بر اساس مطالعه بین‌کشوری (دل‌گراندو[5] و همکاران، ۲۰۱۲)، ۲۰ درصد ثروتمندترین جمعیت این کشور به‌طور متوسط شش برابر بیش از ۲۰ درصد فقیرترین‌ها از یارانه سوخت بهره‌مند می‌شوند و بیان‌گر این موضوع است که یارانه‌های عمومی انرژی در

1. Jiang
2. Mundaca
3. Zhu
4. International Energy Agency (IEA)
5. Del Granado

آن کشور نه‌تنها کارآمدی لازم برای حمایت از اقشار کم‌درآمد را ندارند، بلکه می‌توانند به تشدید نابرابری در مصرف و توزیع منابع منجر شوند. در کنار این ابزار مالی، انگیزه‌های فرهنگی و اجتماعی در اصلاح رفتار مصرفی نقشی اساسی ایفا می‌کنند. ایجاد هنجارهای اجتماعی پیرامون مصرف بهینه می‌تواند زمینه‌ای فراهم سازد که مصرف نامتعارف نه‌تنها پرهزینه، بلکه رفتاری ناپسند و غیرمسئولانه تلقی شود و صرفه‌جویی به‌عنوان ارزش فرهنگی و اجتماعی نهادینه گردد. شواهد بین‌المللی نیز این یافته را تأیید می‌کنند. برای مثال، پژوهش انجام‌شده توسط مؤسسه فناوری ماساچوست در قالب طرح میدانی بر روی بیش از ۸۰ هزار خانوار نشان داد که تنها با ارسال گزارش‌های مقایسه‌ای مصرف و برجسته‌سازی هنجارهای مثبت صرفه‌جویی، مصرف برق به‌طور متوسط حدود دو درصد کاهش یافت (آلکات، ۲۰۰۹)، این نتیجه بیان‌گر آن است که مداخلات فرهنگی اجتماعی کم‌هزینه می‌توانند تغییرات پایدار و معناداری در رفتار مصرفی ایجاد کنند.

در سطح جهانی، رویکرد تسهیل‌گری محلی نیز در پروژه‌های مرتبط با انرژی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تغییر رفتار مصرفی و ارتقای آگاهی عمومی به کار رفته است. در کشور نروژ، برای اجرای یک طرح ملی موسوم به ZEN[1] با مشارکت تسهیل‌گران محلی منجر به جمع‌آوری داده‌های دقیق و ارتقای آگاهی عمومی درباره‌ی انرژی و محیط‌زیست گردید، (ویکی[2] و همکاران، ۲۰۲۲). در بنگلادش نیز تجربه‌ی اجرای برنامه‌ی «اجاق‌های بهبودیافته» نشان داد که حضور تسهیل‌گران آموزش‌دیده در منازل و گفت‌وگوهای چهره‌به‌چهره با خانوارها، عامل اصلی موفقیت برنامه‌های ملی انرژی پاک بوده است، (گزارش نهایی بانک جهانی[3]، ۲۰۱۰، گزارش سازمان بین‌المللی اجاق‌های خورشیدی[4]، ۲۰۲۳ و گروه تحقیقاتی جهانی انرژی پایدار[5] برای همه، ۲۰۲۰). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که اصلاح رفتار مصرفی در سطح خرد، نیازمند ترکیب سه محور مکمل است: تعریف آستانه‌های مصرف متناسب با بعد خانوار و اعمال ضریب اقلیم؛ مداخلات رفتاری و فرهنگی برای تغییر نگرش مصرف‌کنندگان؛ اقدامات فناورانه و سیاست‌های تعرفه‌ای برای پایداری بلندمدت. پژوهش

1. Zero Emission Neighbourhoods (ZEN)
2. Wiik
3. The world Bank
4. Cooking Solar Cookers International
5. Sustainable Energy for All

حاضر نیز بر اساس همین چارچوب تلفیقی، به تحلیل و شبیه‌سازی رفتار مصرف انرژی خانوارهای استان سمنان با هدف رفع پایدار ناترازی انرژی می‌پردازد.

۳. روش

پژوهش حاضر با هدف تبیین و سنجش اثر متغیرهای کالبدی واحد مسکونی، ویژگی‌های خانوار و شرایط اقلیمی بر مصرف واقعی انرژی (برق و گاز) در سطح خانوارهای استان سمنان انجام شد و در کنار آن، سنجش انطباق با آستانه‌های ملی و اجرای سناریوی رفتاری به‌عنوان خروجی مکمل در نظر گرفته شد. طراحی تحقیق توصیفی و تحلیلی و با رویکرد کاربردی است و داده‌های مورد استفاده ترکیبی از اطلاعات میدانی خانوار و واحد مسکونی، مصرف واقعی برق و گاز در سال ۱۴۰۳ و شاخص‌های رفاهی خانوار است. به‌منظور جلوگیری از اتکای صرف به داده‌های خوداظهاری و افزایش قابلیت حسابرسی، تولید داده‌ها در قالب یک مسیر داده چندمنبعی تعریف شد که از گردآوری میدانی آغاز و پس از پاک‌سازی، اعتبارسنجی و لینک‌کردن رکوردها به تشکیل پایگاه داده یکپارچه برای تحلیل‌های آماری و اقتصادسنجی منتهی گردید. مجری و نهادهای درگیر در گردآوری و تأمین داده به‌صورت مشترک استانداری سمنان و دانشگاه سمنان بوده‌اند و اجرای میدانی با مشارکت ساختاریافته فرمانداری‌ها، بخشداری‌ها و دهیاری‌ها انجام شده است. تأمین داده‌های ثبتی مصرف نیز با همکاری شرکت‌های توزیع نیروی برق و شرکت گاز استان صورت پذیرفت و اطلاعات رفاهی خانوار از طریق سامانه رفاهی اخذ شد. این سازوکار بین‌نهادی سبب شد هم اجرای نمونه‌گیری در سطح استان امکان‌پذیر شود و هم داده‌های مصرف واقعی به‌صورت رکورد به رکورد به داده‌های میدانی متصل گردد.

جامعه آماری شامل کلیه خانوارهای دارای اشتراک برق و گاز در مناطق شهری و روستایی استان سمنان است. برای دستیابی به نمونه‌ای قابل تعمیم که ناهمگنی اقلیمی، سطح برخورداری اقتصادی و الگوهای متفاوت مصرف را پوشش دهد، از نمونه‌گیری چندمرحله‌ای خوشه‌ای–طبقه‌ای–تصادفی استفاده شد. در مرحله نخست، استان بر حسب ویژگی‌های اقلیمی به سه ناحیه سردسیر، معتدل و خشک تقسیم و در هر ناحیه،

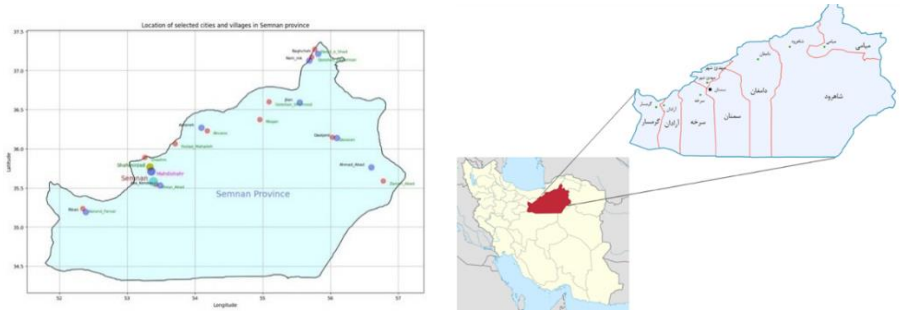
بخش شهری و روستایی به‌طور مستقل لحاظ شد. در بخش روستایی، با لحاظ سه سطح برخورداری، ۲۰ روستا به‌عنوان خوشه‌های اولیه انتخاب شد. در بخش شهری نیز سه شهر با اقلیم‌های متفاوت (شهمیرزاد، مهدی‌شهر و سمنان) انتخاب و محله‌ها به سه سطح برخورداری تفکیک شدند و در مجموع ۲۳ محله شهری در نمونه‌گیری لحاظ گردید. در مرحله دوم، در هر روستا و محله منتخب، خانوارها بر اساس مصرف سالانه برق در سال ۱۴۰۳ به چهار طبقه مصرفی (چارک اول تا چهارم مصرفی) تقسیم شدند تا حضور خانوارهای کم‌مصرف و پرمصرف به‌صورت کنترل‌شده تضمین گردد. سپس از هر طبقه، خانوارها به‌صورت تصادفی ساده انتخاب شدند و برای تداوم اجرای میدانی، در هر طبقه نمونه اصلی و نمونه ذخیره تعریف شد تا در صورت عدم دسترسی یا عدم همکاری، جایگزینی طبق قواعد از پیش تعیین‌شده انجام گیرد. برای اجرای گردآوری میدانی، از رهیافت تسهیل‌گری محلی استفاده شد تا هم دقت داده‌ها افزایش یابد و هم اعتماد اجتماعی و همکاری خانوارها تقویت گردد. تسهیل‌گران از میان معتمدان محلی، دهیاران، معلمان و اعضای شوراهای اسلامی شناسایی شدند و انتخاب نهایی آنان پس از مصاحبه‌های ساختاریافته انجام گرفت. به‌طوری که از میان حدود ۲۵۰ داوطلب اولیه، در نهایت ۷۸ تسهیل‌گر (۳۰ تسهیل‌گر روستایی و ۴۸ تسهیل‌گر شهری) برگزیده شدند. پیش از آغاز کار میدانی، کارگاه‌های آموزشی تخصصی برای تسهیل‌گران برگزار شد و موضوعاتی نظیر معرفی مطالعه و اخذ رضایت آگاهانه، محرمانگی اطلاعات، قواعد نمونه اصلی و ذخیره، اصول دقت در ثبت داده‌ها، شناخت وسایل انرژی‌بر و تیپ‌های ساختمانی و نحوه کار با سامانه موبایلی و کاربرگ‌های الکترونیکی آموزش داده شد. برای رسمیت‌بخشی و ایجاد پاسخگویی اجرایی، احکام تسهیل‌گران توسط استاندار صادر گردید.

ثبت اطلاعات میدانی با سامانه موبایلی برخط طراحی‌شده انجام شد که در آن فیلدهای کلیدی اجباری بوده و کنترل‌های دامنه و منطق برای متغیرهای اصلی اعمال می‌شد. برخط بودن ثبت داده‌ها امکان نظارت مستمر را فراهم ساخت. به‌گونه‌ای که گزارش‌های روزانه از تعداد رکوردهای ثبت‌شده، وضعیت تکمیل فیلدهای کلیدی و پیشرفت هر خوشه استخراج و به تیم اجرایی ارسال می‌شد و عملکرد تسهیل‌گران به‌صورت روزانه پایش و بررسی می‌گردید .این پایش روزانه، علاوه بر کنترل سرعت

و پوشش نمونه، به کشف سریع موارد ناقص یا ناسازگار و اصلاح به‌موقع فرآیند میدانی کمک کرد.

در کنار داده‌های میدانی، داده‌های ثبتی مصرف واقعی برق و گاز خانوارها برای سال ۱۴۰۳ از شرکت‌های توزیع برق و شرکت گاز استخراج و به‌منظور هم‌ترازی زمانی وارد پایگاه داده شد. همچنین شاخص دهک رفاهی از سامانه رفاهی دریافت و به‌عنوان متغیر اقتصادی به رکوردهای خانوار افزوده شد. پس از پاک‌سازی و یکسان‌سازی، لینک‌کردن رکوردها در سطح خانوار انجام گرفت و تنها رکوردهایی وارد تحلیل شدند که مصرف واقعی برق و گاز و حداقل متغیرهای اصلی میدانی را به‌صورت کامل در اختیار داشتند. در گام نخست ۴۹۸۴ پرسش‌نامه تکمیل شد و پس از پاک‌سازی، تطبیق و لینک چندمنبعی و حذف خانوارهای فاقد گاز، نهایتاً ۲۶۸۶ خانوار به‌عنوان مجموعه داده نهایی لینک‌شده مبنای تحلیل‌های اصلی قرار گرفت. پس از تشکیل پایگاه داده نهایی، شاخص‌های آستانه‌محور مطابق قاعده اجرایی آستانه تعریف شد. آستانه سرانه ملی سالانه برق و گاز برای سال ۱۴۰۳ (۷۰۰ مترمکعب گاز و ۱۲۰۰ کیلووات ساعت برق) مبنا قرار گرفت و آستانه خانوار متناسب با بعد خانوار محاسبه شد. در شکل ۱ (راست)، موقعیت استان سمنان روی نقشه‌ی ایران و (چپ) موقعیت نقاط نمونه‌برداری شهری و روستایی نمایش داده شده است. برای جمع‌آوری داده‌ها از رهیافت تسهیل‌گری محلی بهره گرفته شد. در این رویکرد، به‌جای مأموران رسمی، اطلاعات توسط تسهیل‌گران بومی هر منطقه گردآوری شد. به‌کارگیری رهیافت تسهیل‌گری محلی ضمن افزایش دقت داده‌ها، باعث اعتماد اجتماعی و همکاری بالای خانوارها شد و یکی از نقاط قوت این پژوهش در مقایسه با طرح‌های مشابه ملی به‌شمار می‌آید، (باجوند، ۱۴۰۱ و کاظمیان، ۱۴۰۱).

شکل ۱. (راست) موقعیت محدوده مورد مطالعه روی نقشه ایران، (چپ) موقعیت روستاها و شهرهای مورد نمونه‌گیری در استان سمنان



داده‌ها پس از گردآوری، در دو مرحله‌ی مکمل مورد تحلیل قرار گرفتند. در گام نخست، آزمون‌های استنباطی کلاسیک شامل تحلیل واریانس[1]، آزمون ناپارامتری کروسکال والیس[2] و آزمون تعقیبی توکی[3] برای مقایسه و ارزیابی معناداری تفاوت میان گروه‌های مختلف خانوار به‌کار گرفته شد. در گام دوم، برای شناسایی الگوهای چندمتغیره و سنجش سهم نسبی هر متغیر در تبیین تغییرات مصرف، از الگوریتم جنگل[4] تصادفی بهره گرفته شد. این ترکیب رویکردی، امکان تحلیل هم‌زمان روابط آماری و ساختارهای پیچیده غیرخطی را فراهم کرد و دیدی دقیق‌تر نسبت به عوامل تعیین‌کننده رفتار مصرف انرژی خانوار ارائه داد .ابتدا با فرض نرمالیتی و همگنی واریانس‌ها مدل واریانس یک‌طرفه به‌صورت

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2),$$

تعریف گردید، که در آن Y_{ij} مقدار مصرف انرژی ترکیبی خانوار در سال ۱۴۰۳، μ میانگین (اثر) کل، α_i اثر عامل گروه iام و ε_{ij} خطای تصادفی است. آماره آزمون تحلیل واریانس از نسبت میانگین مربعات بین‌گروهی به درون‌گروهی به صورت

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} = \frac{SS_B / (k-1)}{SS_W / (N-k)}$$

1. Analysis of Variance (ANOVA)
2. Kruskal-Wallis
3. Tukey’s Honestly Significant Difference Test
4. Random Forest

به دست می آید، که در آن SS_B، SS_W، MS_B و MS_W به ترتیب مجموع مربعات بین گروهی و درون گروهی، میانگین مربعات بین گروهی و درون گروهی، k و N به ترتیب تعداد گروه ها و تعداد کل مشاهدات هستند، (مونت‌گمری[1]، ۲۰۱۹). در صورت معنادار بودن اثر، مقایسه‌های زوجی با روش توکی (هوجبرگ[2] و تمهانی[3]، ۱۹۸۷) به صورت

$$HSD_{ij} = |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > q_{\alpha,k,N-k}\sqrt{\frac{MS_W}{n}}$$

می‌شود، که در آن $q_{\alpha,k,N-k}$ مقدار بحرانی است که از جدول توزیع دامنه استونت بدست می‌آید. با توجه به این که ممکن است شرایطی که نرمالیتی یا همگنی واریانس‌ها برقرار نباشد، از آزمون ناپارامتری کروسکال والیس نیز استفاده گردید (هولندر[4] و همکاران، ۲۰۱۴)، آماره این آزمون به‌صورت

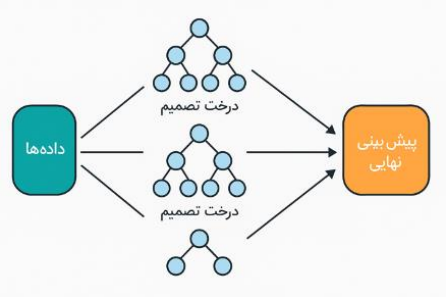
$$H = \frac{12}{N(N+1)}\sum_{i=1}^{k}\frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

می‌باشد، که در آن R_i مجموع رتبه‌های گروه و $N = \sum_i n_i$ است. در گام دوم، به‌منظور تحلیل هم‌زمان متغیرهای تأثیرگذار بر مصرف انرژی، مدل جنگل تصادفی برای متغیر پاسخ Y_j مصرف انرژی ترکیبی به عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین استفاده شد. پیشینه تاریخی الگوریتم جنگل تصادفی برای اولین بار توسط بریمن[5] (۲۰۰۱)، لیا[6] و وینر (۲۰۰۲) و بریمن و کاتلر[7] (۲۰۰۴) ارائه شد و هستی[8] و همکاران (۲۰۰۹) به طور مفصل‌تر به ارائه این رهیافت پرداختند. این الگوریتم برای داده‌هایی با تعداد زیاد متغیرها، وجود روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده بین متغیرها عملکرد بسیار مناسبی دارد و از نظر دقت پیش‌بینی و تفسیرپذیری یکی از روش‌های شناخته‌شده در حوزه داده‌های واقعی است. الگوریتم جنگل تصادفی از ترکیب تعداد زیادی درخت تصمیم[9] ساخته می‌شود. هر درخت تصمیم،

1. Montgomery
2. Hochberg
3 . Tamhane
4. Hollander
5. Breiman
6. Liaw
7. Cutler
8. Hastie
9. Decision Tree

یک مدل ساده است که داده‌ها را بر اساس مجموعه‌ای از قواعد «اگر ...آنگاه ...» به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کند. به عبارت دیگر درخت تصمیم مدلی سلسله‌مراتبی است که داده‌ها را بر اساس مجموعه‌ای از پرسش‌ها یا شرایط، گام‌به‌گام تقسیم می‌کند تا در نهایت به یک تصمیم نهایی برسد. شکل ۲ نمودار سازوکار کلی الگوریتم جنگل تصادفی را نشان می‌دهد.

شکل ۲. عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در تبدیل داده‌های ورودی به پیش‌بینی نهایی از طریق ترکیب درخت‌های تصمیم مستقل.



به‌عنوان مثال، فرض کنید می‌خواهیم پیش‌بینی کنیم آیا مصرف برق یک خانوار بالاتر از میانگین است یا خیر. درخت تصمیم می‌تواند از پرسش‌هایی مانند: آیا متراژ منزل بیش از ۱۰۰ متر است؟ آیا خانوار بیش از ۴ عضو دارد؟ آیا وسایل سرمایشی پرمصرف دارد؟ آیا در اقلیم گرم و خشک زندگی می‌کند؟ استفاده کند. پاسخ هر سؤال مسیر داده را در درخت مشخص می‌کند تا در نهایت، به تصمیم نهایی برسد. در هر گره از درخت، الگوریتم سعی می‌کند بهترین تقسیم داده‌ها را بیابد. این کار با معیارهایی مانند معیار ناخالصی جینی یا میانگین مربعات خطا انجام می‌شود. اما اگر فقط یک درخت استفاده شود، ممکن است به داده‌های آموزشی بیش از حد وابسته شده و برای داده‌های جدید دقت کمی داشته باشد. برای رفع این مشکل، جنگل تصادفی چندین درخت مستقل می‌سازد و نتیجه نهایی را از میانگین یا رأی اکثریت آن‌ها به‌دست می‌آورد.

در این روش، مجموعه داده‌های اولیه به‌صورت تصادفی بین چندین درخت تصمیم مستقل تقسیم می‌شود. هر درخت با استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌ها و ویژگی‌ها، یک پیش‌بینی جداگانه انجام می‌دهد. در پایان، خروجی تمام درخت‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شود

تا پیش‌بینی نهایی شکل گیرد؛ به‌گونه‌ای که در مسائل طبقه‌بندی رأی اکثریت درخت‌ها معیار تصمیم است و در مسائل رگرسیونی میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده محاسبه می‌شود. این سازوکار موجب کاهش واریانس، افزایش دقت و پایداری مدل در برابر داده‌های نویزی و ناهمگن می‌شود و از جنگل تصادفی الگوریتمی پایدار، دقیق و مقاوم در برابر برازش بیش از حد می‌سازد. در هر مرحله‌ی نمونه‌گیری، حدود ۳۷ درصد از داده‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب نمی‌شوند و در آموزش آن درخت به‌کار نمی‌روند. این داده‌ها را داده‌های خارج از کیسه[1] می‌نامند. مدل می‌تواند با استفاده از همین داده‌ها، عملکرد خود را بدون نیاز به داده‌ی آزمون جداگانه ارزیابی کند. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های جنگل تصادفی نسبت به روش‌های آماری کلاسیک این است که فرضی درباره‌ی شکل رابطه بین متغیرها ندارد. در مدل‌های کلاسیکی مثل رگرسیون خطی فرض می‌شود رابطه بین متغیر پاسخ و توضیحی خطی است، اما در جنگل تصادفی، تقسیم‌بندی‌های متوالی در درخت‌ها باعث می‌شود روابط غیرخطی و اثرات متقابل بین متغیرها (مثلاً تأثیر هم‌زمان زیربنا و دهک رفاهی بر مصرف انرژی) مدل‌سازی شوند. به‌طور خلاصه، جنگل تصادفی مدلی مبتنی بر یادگیری جمعی است که با ترکیب درخت‌های تصمیم تصادفی، می‌تواند روابط غیرخطی و اثرات چندمتغیره را بدون نیاز به فرض‌های آماری پیچیده شناسایی کند. این روش برای داده‌هایی با متغیرهای زیاد (مانند داده‌های واقعی مصرف انرژی خانوارها) مناسب است. ساختار کلی مدل به‌صورت

$$\hat{f}_{RF}(x) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} T_b(x)$$

تعریف می‌شود، که در آن $T_b(x)$ پیش‌بینی درخت bام است و B تعداد کل درخت‌ها می‌باشد. کارایی مدل با داده‌های خارج از کیسه و با معیار

$$R^2_{OOB} = 1 - \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_{OOB,i})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2},\quad RMSE_{OOB} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i (Y_i - \hat{Y}_{OOB,i})^2},$$

محاسبه می‌شود. در نهایت اهمیت متغیرها بر اساس

$$Imp(X_j) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}\left[MSE_{OOB,b}(X_j) - MSE_{OOB,b}\right],$$

1. Out of Bag

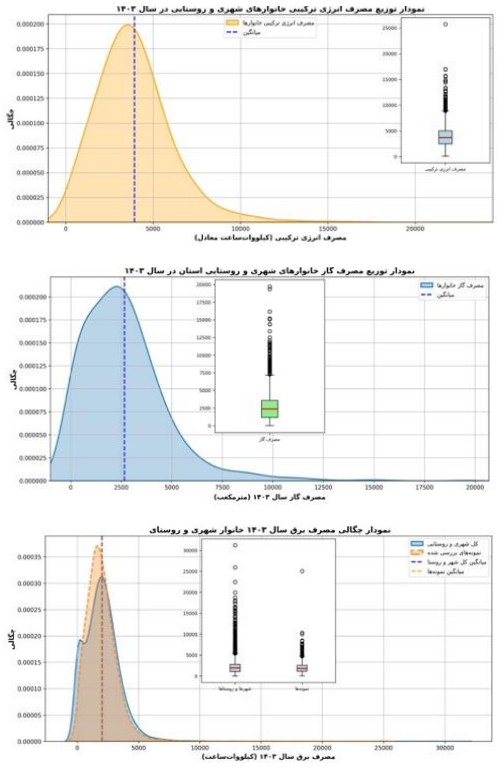
برآورد می‌شوند. در این روش، ابتدا مدل آموزش داده می‌شود، سپس مقادیر متغیر X_j در داده‌های آزمون یا داده‌های خارج از کیسه به‌صورت تصادفی درهم‌ریخته می‌شود و کاهش دقت مدل سنجیده می‌شود. هرچه مقدار بزرگ‌تر باشد، اهمیت متغیر بیشتر است. ترکیب رهیافت‌های آماری و مدل یادگیری ماشین این امکان را فراهم ساخت تا تفاوت‌های معنادار آماری میان گروه‌ها و همچنین اهمیت نسبی هر متغیر در ساختار کلی مصرف انرژی خانوار به‌صورت هم‌زمان شناسایی شود. این نتایج مبنای طراحی مدل‌های سیاستی برای اصلاح الگوی مصرف و تعیین آستانه‌های بهینه یارانه انرژی در استان سمنان را تشکیل دادند. ترکیب این دو رهیافت، امکان تحلیل هم‌زمان تفاوت‌های آماری و روابط غیرخطی را فراهم ساخت و دیدی عمیق‌تر نسبت به عوامل تعیین‌کننده‌ی مصرف انرژی خانوار ارائه داد. برآیند نتایج، مبنای طراحی الگوهای سیاستی برای اصلاح مصرف و رفع ناترازی انرژی در سطح خرد و کلان استان سمنان قرار گرفت.

۴. یافته‌ها

داده‌های گردآوری‌شده از خانوارهای شهری و روستایی استان سمنان در سال ۱۴۰۳ نشان داد که الگوی مصرف انرژی در میان خانوارها از یکنواختی فاصله دارد و توزیع مصرف هر دو حامل برق و گاز چوله به راست است؛ بدین معنا که گروه کوچکی از خانوارهای پرمصرف، میانگین کل را به‌طور قابل توجهی به سمت بالا می‌کشانند. در بخش روستایی، میانگین مصرف سالانه برق خانوارها ۱۸۳۶ کیلووات‌ساعت با میانه ۱۶۷۳ کیلووات‌ساعت و انحراف معیار ۱۳۱۷ کیلووات‌ساعت برآورد شد که بیانگر تنوع بالا و پراکندگی زیاد در الگوهای مصرف است. مصرف گاز طبیعی نیز در همین بخش حدود ۲۲۰۰ مترمکعب بود. تحلیل صدک‌ها نشان داد که ۲۵ درصد خانوارها مصرفی کمتر از ۹۷۶ کیلووات‌ساعت دارند، در حالی‌که ۲۵ درصد دیگر بیش از ۲۴۲۱ کیلووات‌ساعت برق مصرف می‌کنند. شاخص ترکیبی برق و گاز که با وزن‌دهی مقیاسی و هم‌واحدسازی محاسبه شد، حدود ۳۶۸۹ کیلووات‌ساعت به‌دست آمد. در نمونه‌های شهری نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. میانگین مصرف برق ۲۱۲۲ کیلووات‌ساعت و میانگین مصرف گاز ۳۲۱۷ مترمکعب بود، به‌طوری که شاخص ترکیبی برق و گاز در خانوارهای شهری حدود ۴۲۴۳ کیلووات‌ساعت برآورد گردید. ادغام داده‌های شهری و روستایی و تشکیل مجموعه ادغامی، امکان تحلیل

یکپارچه در سطح استان را فراهم کرد. در این الگو، میانگین مصرف ترکیبی ۳۹۳۶ کیلووات‌ساعت برآورد شد و مانند نمونه‌های جداگانه، توزیع داده‌ها چوله به راست باقی ماند (شکل ۳).

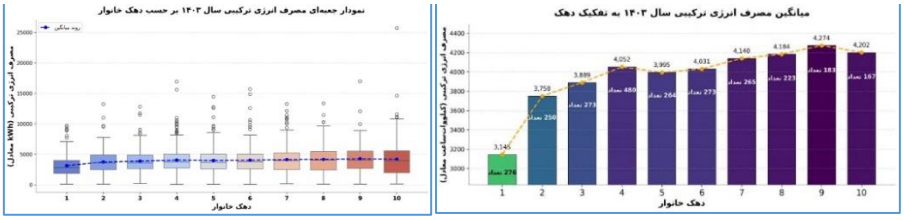
شکل۳. برازش توزیع مصرف برق، گاز و انرژی ترکیبی سال ۱۴۰۳ خانوارهای مورد مطالعه سمنان



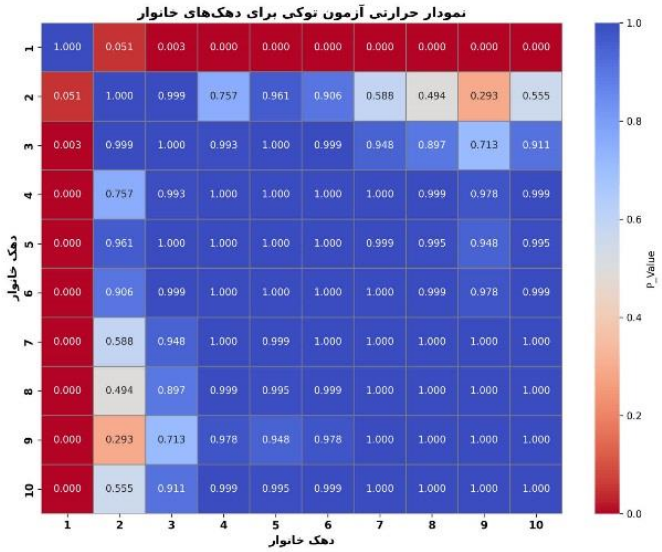
بررسی اثر متغیرهای جمعیت‌شناختی و اقتصادی نشان داد که دهک رفاهی خانوار از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده مصرف انرژی است. نمودارهای میله‌ای و جعبه‌ای (شکل ۴) روند افزایشی مصرف را از دهک‌های پایین به دهک‌های بالاتر تأیید می‌کنند. آزمون‌های آماری تحلیل واریانس و کروسکال والیس نیز تفاوت معنادار میان گروه‌های دهکی را تأیید کردند و آزمون تعقیبی توکی نشان داد که تفاوت معنادار عمدتاً میان دهک‌های پایین و سایر گروه‌ها مشاهده می‌شود (نمودار حرارتی شکل ۵). البته تحلیل منفرد دهک‌ها تصویر کاملی از رفتار مصرفی ارائه نمی‌دهد، هنگامی که دهک در کنار سایر متغیرها (مانند بعد خانوار یا زیربنا و ..) و با استفاده از

ابزارهایی چون نمودارهای خورشیدی و الگوریتم جنگل تصادفی بررسی می‌شود، نقش واقعی آن در تبیین تفاوت‌های مصرف آشکارتر می‌گردد.

شکل ۵. نمودار حرارتی و نتایج آزمون آنالیز واریانس و کروسکال والیس



شکل ٤. نمودار میله‌ای و جعبه‌ای مصرف انرژی ترکیبی سال ۱٤۰۳ به تفکیک دهک



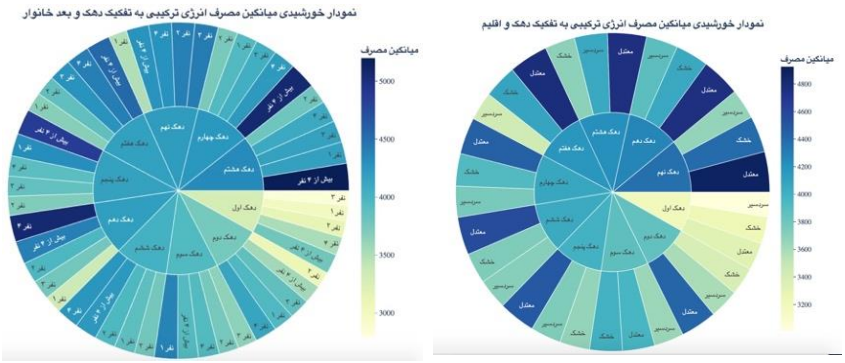

```
============================================================
ANOVA Table بر اساس طبقه‌بندی دهک خانوار:

                          sum_sq      df    F  PR(>F)
C(HouseholdTithing)   248761481.97    9.00 5.75    0.00
Residual            12709257851.52 2644.00  NaN     NaN
============================================================

Kruskal-Wallis Test Result بر اساس طبقه‌بندی دهک خانوار:
Statistic (H): 61.158
P-value: 0.0000
```

از نظر اقلیمی، میانگین مصرف در مناطق سردسیر پایین‌تر و الگوی مصرف متمرکزتر است، در حالی‌که در اقلیم‌های معتدل، میانگین و پراکندگی بالاتری مشاهده می‌شود. نمودار خورشیدی (شکل۶-راست) نشان می‌دهد که در تمام اقلیم‌ها با افزایش دهک رفاهی، سطح مصرف انرژی به‌طور معناداری افزایش می‌یابد؛ امری که بیانگر تأثیر هم‌زمان سطح رفاه و اقلیم بر شدت مصرف است. نمودار مشابه (شکل ۶-چپ) رابطه دهک و بعد خانوار را نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که در خانوارهای با بعد مشابه، دهک‌های بالاتر مصرف بیشتری دارند.

شکل ٦: نمودار خورشیدی میانگین مصرف انرژی خانوارها (چپ) دهک و بعد، **(راست) دهک و اقلیم**

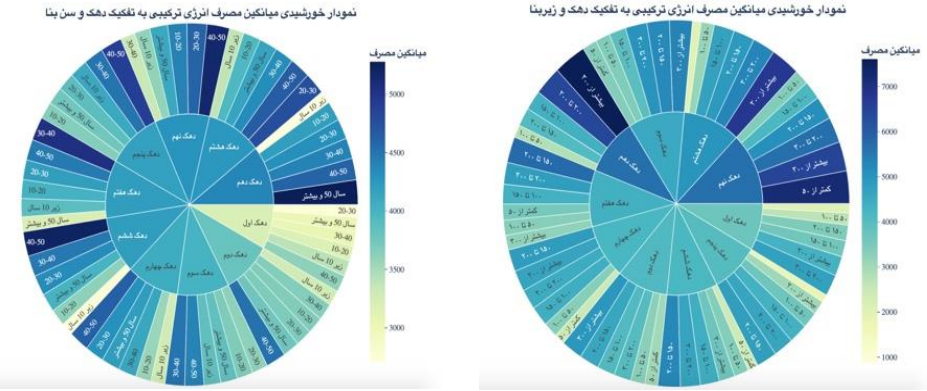


بررسی متغیرهای کالبدی واحد مسکونی نیز نشان داد که زیربنا و سن بنا نقش مهمی در رفتار مصرفی ایفا می‌کنند. نمودار خورشیدی (شکل ۷-راست) نشان می‌دهد که افزایش زیربنا با افزایش سطح مصرف همراه است، در حالی‌که نمودار (شکل ۷-چپ) نشان می‌دهد در دهک‌های پایین‌تر، ساختمان‌های بسیار قدیمی (بیش از ۵۰ سال) و بسیار جدید (کمتر از ۱۰ سال) میانگین مصرف کمتری دارند. در دهک‌های بالاتر، مصرف در تمام سنین ساختمان بالا است که بیانگر غلبه عامل رفاه بر کارایی فنی ساختمان‌ها می‌باشد .

تحلیل تعداد تجهیزات انرژی‌بر و وجود کسب‌وکار خانگی نیز مکمل یافته‌های فوق است. بر اساس داده‌ها، حدود ۹۷ درصد خانوارهای نمونه فاقد کسب‌وکار خانگی و تنها ۳ درصد

دارای فعالیت‌هایی چون خیاطی، آرایشگری یا پرورش دام و قارچ بوده‌اند. نتایج آماری نشان می‌دهد وجود کسب‌وکار خانگی به‌طور معنادار با افزایش مصرف ترکیبی انرژی همراه است، زیرا تجهیزات زندگی و کاری به‌صورت هم‌زمان مصرف انرژی دارند (شکل ۸).

شکل ۷: نمودار خورشیدی میانگین مصرف ترکیبی انرژی خانوارها براساس (چپ) دهک و سن ساختمان، (راست) دهک و زیربنا



همچنین در دهک‌های بالاتر، هرچند از تجهیزات جدیدتر و کارآمدتر استفاده می‌شود، اما سطح رفاه بالاتر و الگوی مصرف پرشدت، باعث افزایش کلی مصرف می‌گردد.

شکل ۸: نمودار خورشیدی میانگین مصرف ترکیبی انرژی خانوارها براساس دهک و تعداد وسایل برقی (نمونه ادغامی شهر و روستا)



برای استخراج عوامل کلیدی مؤثر بر مصرف انرژی ترکیبی، از الگوریتم جنگل تصادفی به‌عنوان یک مدل انعطاف‌پذیر برای بازنمایی روابط غیرخطی و تعاملات میان ویژگی‌های

خانوار، اقلیم و ویژگی‌های ساختمانی استفاده شد. به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش و ارائه گزارشی قابل اتکا، اجرای جنگل تصادفی براساس فرآیند مدل‌سنجی و اعتبارسنجی صورت گرفت. در گام نخست، دو مدل خطی پایه شامل رگرسیون خطی[1] و رگرسیون ریج[2] اجرا شدند تا مبنای مقایسه فراهم شود. سپس ابرپارامترهای جنگل تصادفی با جست‌وجوی تصادفی و معیار مربع میانگین خطا (MSE[3]) در چارچوب اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی[4] تنظیم گردید. تابع هدف در این مرحله به‌صورت

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$$

تعریف شد و برای تفسیرپذیری بهتر، خطای جذر میانگین مربعات نیز به‌صورت

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\mathrm{MSE}}$$

گزارش گردید. همچنین معیار قدرمطلق میانگین خطا (MAE[5]) برابر

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|$$

به‌عنوان شاخص پایاتر نسبت به نقاط دورافتاده محاسبه شد. بر اساس این فرآیند تنظیم و انتخاب مدل، پیکربندی بهینه شامل تعداد درخت‌ها ۸۰۰، عمق بیشینه ۱۸حداقل نمونه برای شکستن گره ۵ و حداقل نمونه در برگ ۲ تنظیم شد که حساسیت مدل به نویز و ناهمگنی داده‌های میدانی را کاهش می‌دهند. برای پرهیز از اتکای صرف به یک تفکیک تصادفی آموزش-آزمون، علاوه بر گزارش نتایج روی داده آزمون، عملکرد مدل نهایی با اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی نیز سنجیده شد که نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل نسبت به تغییر نمونه‌های آموزش و آزمون حساسیت شدید ندارد و نتایج صرفاً محصول یک تقسیم‌بندی خاص نیست.

همچنین مقایسه با مدل‌های خطی پایه نشان داد مدل جنگل تصادفی خطای کمتری و ضریب تعیین بالاتری (حدود ده درصد) ایجاد می‌کند (جدول ۱). این برتری، وجود الگوهای غیرخطی و تعاملات بین متغیرها را در رفتار مصرف انرژی خانوارها تقویت می‌کند.

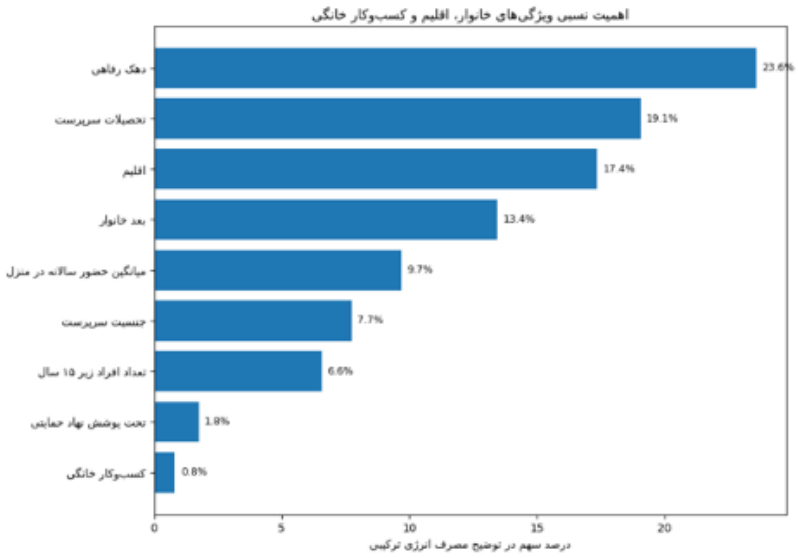
1. Linear Regression
2. Ridge Regression
3. Mean Squared Error
4. 5-fold Cross-Validation
5. Mean Absolute Error

جدول ۱. مقایسه مدل جنگل تصادفی با مدل‌های پایه

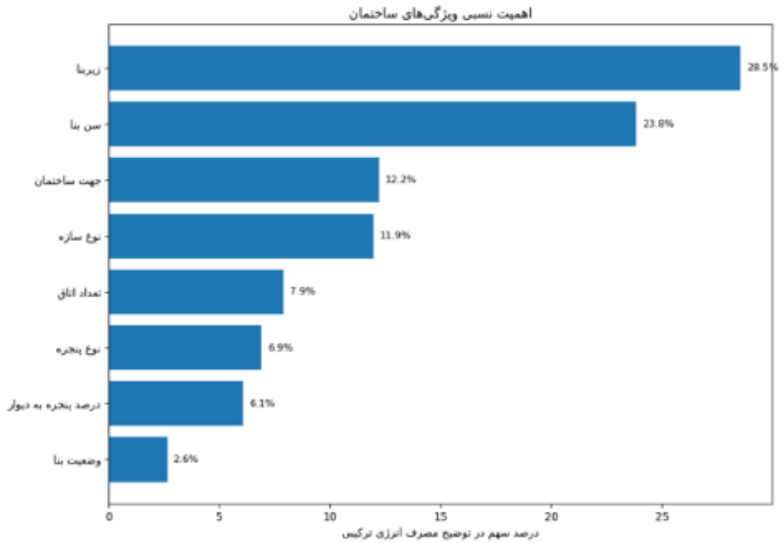
مدل	MAE	RMSE
جنگل تصادفی	۱۳۳۵/۷۴۹	۱۷۵۵/۲۱۳
رگرسیون ریج	۱۴۲۶/۹۷۸	۱۸۳۳/۲۰۷
رگرسیون	۱۴۲۷/۷۲۸	۱۸۳۳/۸۱۷

همچنین مدل جنگل تصادفی به تفکیک در دوحالت ابتدا روی ۹ متغیر مربوط به مشخصات خانوار و اقلیم و سپس روی ۸ متغیر مشخصات ساختمان اجرا شد. نتایج نشان داد که در میان ویژگی‌های خانوار، دهک رفاهی بیشترین سهم را در تبیین مصرف دارد (شکل ۹)، همچنین در میان ویژگی‌های کالبدی (شکل ۱۰)، زیربنا و سپس سن بنا اثرگذارترین عوامل‌اند. سایر متغیرها مانند اقلیم و کسب‌وکار خانگی در مراتب بعدی اهمیت قرار گرفتند. این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که برای کاهش ناترازی انرژی باید سیاست‌ها بر سه محور بهسازی ساختمان‌ها، مدیریت زیربنا و تراکم و اصلاح تعرفه‌ها و آموزش رفتار مصرفی متمرکز شوند.

شکل ۹: نمودار اهمیت نسبی ویژگی‌های مشخصات خانوار، اقلیم، کسب و کار خانگی در مصرف انرژی



شکل ۱۰: نمودار اهمیت نسبی ویژگی‌های واحد مسکونی در مصرف انرژی



در گام بعد، داده‌های واقعی مصرف برق و گاز خانوارهای ادغامی با آستانه‌های سرانه ملی مقایسه شد تا وضعیت موفقیت یا عدم موفقیت در رعایت الگوی بهینه مشخص شود. نتایج نشان داد در وضعیت پایه، بخشی از خانوارها توانسته‌اند مصرف برق خود را در محدوده آستانه حفظ کنند، در حالی‌که در گاز طبیعی، سهم بیشتری از خانوارها از حد مجاز عبور کرده‌اند. در مجموع، ۴۵ درصد خانوارها در شاخص ترکیبی برق و گاز در وضعیت عدم موفقیت و ۵۵ درصد در وضعیت موفقیت قرار داشتند. با درنظرگرفتن بعد خانوار، مشخص شد که نرخ شکست خانوار (۴۵ درصد) در مقیاس جمعیتی معادل ۳۵ درصد جمعیت نمونه است، زیرا خانوارهای کم‌بعد سهم بالایی در نمونه داشته‌اند. این تمایز نشان می‌دهد که ارزیابی موفقیت باید با وزن‌دهی جمعیتی انجام شود تا شدت واقعی ناترازی در سطح جامعه به‌درستی تفسیر گردد. در شبیه‌سازی مکانیکی- محاسباتی تحت فرض کاهش یکنواخت ۲۰ درصدی مصرف، نتایج نشان داد که نرخ موفقیت افزایش می‌یابد به‌طوری که در مصرف برق، بهبود چشمگیر حاصل شد، در حالی‌که در مصرف گاز این بهبود محدودتر بود و همچنان بخشی از خانوارها فراتر از آستانه باقی ماندند. با این حال، در شاخص ترکیبی، نسبت خانوارهای ناموفق از ۴۵ درصد به ۳۴ درصد کاهش یافت و خانوارهای موفق از ۵۵ درصد به ۶۶ درصد افزایش یافتند.

از نظر مکانی، بیشترین بهبود در اقلیم‌های معتدل و خشک مشاهده شد، در حالی‌که در اقلیم‌های سردسیر، به‌رغم اصلاح رفتار، سطح بالای نیاز گرمایشی مانع از دستیابی به مصرف بهینه گردید. این نتیجه بر ضرورت وزن‌دهی اقلیمی در تعیین آستانه‌های مصرف تأکید دارد تا عدالت در تخصیص انرژی با کارایی سیاستی هم‌زمان محقق شود. در مجموع، نتایج نشان داد که واکنش به مداخلات رفتاری میان حامل‌ها متفاوت است؛ برق نسبت به تغییرات رفتاری سریع‌تر و انعطاف‌پذیرتر واکنش نشان می‌دهد، در حالی‌که گاز نیازمند مداخلات فنی و بهسازی ساختمانی است. از این‌رو، مدیریت ناترازی انرژی مستلزم رویکردی چندبعدی و تلفیقی است که شامل اصلاحات رفتاری در بخش برق، فنی در بخش گاز و ساختاری در سطح تعرفه‌ای و سیاستی باشد.

با هدف تبیین عوامل مؤثر بر قرار گرفتن خانوارها در وضعیت مصرف انرژی ترکیبی کمتر از آستانه، از رگرسیون لوجستیک (مدل لوجیت) استفاده می‌شود. از آنجا که متغیر پاسخ دودویی است، این چارچوب امکان می‌دهد احتمال موفقیت هر خانوار به‌صورت مستقیم مدل‌سازی و تفسیر شود. با اتکا به آستانه‌های ملی سرانه برای سال ۱۴۰۳ (برق ۱۲۰۰ کیلووات‌ساعت و گاز ۷۰۰ مترمکعب)، آستانه سرانه انرژی ترکیبی به‌دست آمد و آستانه خانوار با ضرب آن در بعد خانوار تعریف شد. بنابراین متغیر پاسخ به‌صورت اگر مصرف خانوار کمتر از آستانه $Y_i = 1$ و در غیر این‌صورت $Y_i = 0$ در نظر گرفته شد. بر این اساس، مدل آماری در ادامه احتمال $p_i = \mathrm{P}(Y_i = 1)$ را به عنوان تابعی از متغیرهای توضیحی برآورد می‌کند. از نظر نظری، در رگرسیون لوجیت به جای مدل‌سازی مستقیم p_i ، لگاریتم نسبت شانس به‌صورت

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_k x_{ik},$$

خطی‌سازی و پارامترها معمولا با حداکثر درست‌نمایی برآورد می شوند.

به‌منظور تفسیرپذیری نتایج، ضرایب برآوردشده به نسبت شانس تبدیل شدند؛ به‌طوری که برای هر متغیر x_j مقدار نسبت بخت[1] $OR_j = \exp(\beta_j)$ بیان می‌کند با یک واحد تغییر در x_j (یا تغییر سطح طبقه‌ای نسبت به گروه مرجع)، شانس موفقیت چند برابر می‌شود، مشروط بر ثابت بودن سایر متغیرها. در تعریف متغیرهای توضیحی، برای کنترل الگوهای

1. Odds Ratio

غیرخطی و افزایش قابلیت تفسیر، زیربنا و سن بنا به‌صورت رده‌بندی‌شده وارد مدل شدند. زیربنا به چهار سطح زیربنای کم، متوسط-کم، متوسط-زیاد و زیاد تبدیل شد؛ به‌نحوی که ابتدا برای کاهش اثر مقادیر پرت، زیربنا در بازه صدک‌های ۱ تا ۹۹ محدود شد و سپس بر اساس چارک‌ها به چهار سطح تقسیم گردید. سن بنا نیز بر اساس چارک‌ها به چهار سطح سن بنای کم، متوسط-کم، متوسط-زیاد و زیاد رده‌بندی شد. اقلیم نیز به‌صورت سطوح اصلی داده شامل خشک، معتدل و سردسیر در مدل قرار گرفت. برای دهک رفاهی، دهک‌ها به سه گروه رده‌بندی شدند، دهک یک تا سه (کم‌برخوردار)، دهک چهار تا هفت (متوسط) و دهک هشت تا ده (برخوردار) . این رده‌بندی علاوه بر افزایش تفسیرپذیری، از افزایش غیرضروری پارامترها جلوگیری می‌کند و امکان مقایسه مستقیم گروه‌های رفاهی را فراهم می‌سازد.

برای انتخاب مدل نهایی، رویکرد مدل‌سنجی به‌صورت سیستماتیک انجام شد؛ بدین معنا که ابتدا مدل کامل با مجموعه‌ای از متغیرهای کاندید در نظر گرفته شد و سپس با حذف متغیرها، مدل‌های رقیب ساخته و با معیارهای استاندارد مقایسه شدند. در این مقایسه، از معیارهای مدل‌گزینی، اطلاع آکائیکه AIC[1] و اطلاعات بیزی BIC[2] و همچنین اعتبارسنجی متقابل مساحت زیرمنحنی CV-AUC[3] استفاده شد. نتایج نشان داد مشخصه‌سازی دهک به صورت «۱۰ سطح» به دلیل افزایش تعداد پارامترها، BIC را بدتر و CV-AUC را نیز کاهش می‌دهد، در حالی که دهک سه‌گروهی رفاهی بهترین AIC و بالاترین CV-AUC را ارائه می‌کند و اختلاف BIC آن با حالت دهک عددی بسیار ناچیز است. بنابراین، با توجه به هم‌خوانی نظری با تعریف رفاهی و عملکرد بهتر در معیارهای پیش‌بینی، مدل نهایی با دهک سه‌گروهی انتخاب شد. مدل نهایی به شکل زیر برازش شد:

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \gamma(\text{AreaCat4}_i) + \delta(\text{AgeCat4}_i) + \eta(\text{Climate}_i) + \theta(\text{DecileGroup3}_i),$$

که در آن گروه‌های مرجع به‌ترتیب زیربنای کم، سن بنای کم، اقلیم خشک و دهک (یک تا سه) کم‌برخوردار هستند. اکنون برای پاسخ به فرضیات زیر

1. Akaike Information Criterion
2. Bayesian Information Criterion
3. Cross-Validation Area Under the Roc Curve

H_1: با افزایش دهک رفاهی، احتمال عبور از آستانه مصرف انرژی افزایش می‌یابد.
H_2: زیربنای بیشتر، احتمال عبور از آستانه را افزایش می‌دهد.
H_3: سن بنای بالاتر، احتمال عبور از آستانه را افزایش می‌دهد.
H_4: نسبت به اقلیم خشک (مرجع)، اقلیم سردسیر و معتدل با احتمال عبور بالاتر از آستانه همراه است.

نسبت بخت‌ها نسبت به گروه مرجع به‌دست می‌آید. بر اساس نتایج برازش مدل نسبت بخت‌ها برای گروه‌ها نسبت به گروه مرجع به‌دست آمد. بررسی گروه‌های رفاهی نشان می‌دهد که نسبت به گروه مرجع (کم‌برخوردار)، گروه متوسط دارای نسبت بخت ۰/۷۲۶ با بازه اطمینان ۹۵ درصد (۰/۸۷۷ و ۰/۶۰۱) و مقدار احتمال ۰/۰۰۰۹ است؛ بدین معنا که شانس قرار گرفتن زیر آستانه در گروه متوسط حدود ۲۷ درصد کمتر از گروه کم‌برخوردار است. همچنین برای گروه برخوردار نسبت به گروه مرجع، مقدار نسبت بخت ۰/۶۶۳ با بازه اطمینان ۹۵ درصد (۰/۸۳۳ و ۰/۵۲۸) و مقدار احتمال ۰/۰۰۰۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده کاهش حدود ۳۴ درصد در شانس موفقیت است. از نظر توصیفی نیز همین الگو مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که نرخ موفقیت مشاهده‌شده در سه گروه دهکی به‌ترتیب برابر ۰/۶۱۶(کم‌برخوردار)، ۰/۵۳۰ (متوسط) و ۰/۵۰۸ (برخوردار) است. از نظر عوامل ساختمانی، اثر زیربنا نسبت به گروه مرجع (زیربنای کم) به‌صورت معنادار منفی بر موفقیت ظاهر شد. برای سطح زیربنای متوسط-کم، مقدار نسبت بخت ۰/۶۷۴ با مقدار احتمال ۰/۰۰۰۵ به‌دست آمد که کاهش حدود ۳۳ درصد در شانس موفقیت را نشان می‌دهد. برای زیربنای متوسط-زیاد، مقدار نسبت بخت ۰/۳۹۸ با مقدار احتمال $۱۰^{-۱۳}$ و برای زیربنای زیاد، مقدار نسبت بخت ۰/۴۱۶ با مقدار احتمال $۱۰^{-۱۱}$ محاسبه شد؛ بنابراین افزایش زیربنا یکی از تعیین‌کننده‌های ساختاری مهم در افزایش احتمال عبور از آستانه مصرف و کاهش شانس موفقیت است. در مورد سن بنا، نسبت به سن بنای کم، سطوح بالاتر به‌ویژه سن بنای متوسط-زیاد و سن بنای زیاد اثر منفی و معنادار نشان دادند (به‌ترتیب نسبت بخت ۰/۵۲۳ و ۰/۴۶۳ با مقدار احتمال نزدیک صفر). این نتیجه می‌تواند بیانگر آن باشد که در ساختمان‌های قدیمی‌تر، کارایی انرژی پایین‌تر بوده و احتمال مصرف بالاتر (و در نتیجه عبور از آستانه) افزایش می‌یابد، در حالی‌که اثر در سطح سن بنای متوسط-کم مرزی و ضعیف‌تر است. برای اقلیم نیز، نسبت به گروه مرجع (خشک)، هر دو گروه معتدل و سردسیر با کاهش شانس موفقیت همراه هستند؛ به‌طوری که برای سطح

معتدل، نسبت بخت ۰/۵۹۱ با مقدار احتمال $۱۰^{-۶}$ و برای سردسیر نسبت بخت ۰/۵۷۶ با مقدار احتمال $۱۰^{-۶}$ به‌دست آمد. در اقلیم‌های سردسیر و معتدل، نیاز گرمایشی و الگوی مصرف می‌تواند احتمال عبور از آستانه را افزایش دهد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با اتکا به داده‌های واقعی مصرف برق و گاز خانوارهای استان سمنان در سال ۱۴۰۳ و با یکپارچه‌سازی چندمنبعی داده‌ها در سطح خانوار (مصرف واقعی، دهک رفاهی و داده‌های میدانی خانوار و ساختمان) انجام شد. نوآوری اصلی مطالعه در سطح داده و زیرساخت تحلیلی آن است. گردآوری میدانی با اتکا به تسهیل‌گران محلی و ثبت برخط و سپس اتصال رکورد-به-رکورد داده‌های میدانی به پایگاه‌های رسمی مصرف و رفاه، امکان تحلیل خرد و سیاست‌پذیر را فراهم کرد؛ امکانی که در بسیاری از مطالعات داخلی به‌دلیل فقدان داده‌های هم‌زمان و قابل اتصال، محدود بوده است.

نتایج مقایسه مصرف واقعی با آستانه سرانه (متناسب با بعد خانوار) نشان داد که در شاخص ترکیبی برق و گاز، حدود ۵۵ درصد خانوارها در وضعیت موفقیت (کمتر از آستانه) و حدود ۴۵ درصد در وضعیت عدم‌موفقیت قرار دارند. همچنین توزیع مصرف چوله به راست است؛ یعنی سهمی از خانوارهای پرمصرف میانگین کل را به‌طور معناداری افزایش می‌دهند و بنابراین سیاست‌گذاری مؤثر باید بر شناسایی و هدف‌گیری گروه‌های پرمصرف متمرکز شود. برای حرکت از توصیف به مدل اقتصادسنجی و پاسخ به پرسش "چه عواملی احتمال عبور از آستانه را افزایش می‌دهد؟" یک مدل لوجیت برای احتمال موفقیت خانوار برآورد شد و مشخصات نهایی مدل بر اساس معیارهای مدل‌سنجی و قابلیت تعمیم انتخاب گردید. نتایج نشان داد که عوامل کالبدی و رفاهی هم‌زمان نقش دارند. افزایش زیربنا احتمال موفقیت را کاهش می‌دهد. از نظر اقلیم نیز با در نظر گرفتن اقلیم خشک به‌عنوان گروه مرجع، نسبت شانس موفقیت در اقلیم سردسیر و اقلیم معتدل نسبت به خشک کمتر است؛ این یافته نشان می‌دهد حتی پس از کنترل اثر سایر متغیرها، احتمال عبور از آستانه در اقلیم‌های سردسیر و معتدل بالاتر از اقلیم خشک است و ضرورت ضریب تعدیل اقلیمی در در سیاست‌های اجرایی را تقویت می‌کند. از حیث رفاه، خانوارهای برخوردار نسبت به کم‌برخوردار شانس موفقیت کمتری دارند به طوری که شانس قرار گرفتن زیر آستانه در گروه متوسط (دهک

۴ تا ۷) کاهش حدود ۲۷ درصد و برای گروه برخوردار (دهک هشت تا ده) کاهش حدود ۳۴ درصد در شانس موفقیت نسبت به گروه کم‌برخوردار (دهک یک تا سه) است.

در کنار مدل لوجیت، برای شناسایی روابط غیرخطی و تعاملات محتمل میان متغیرها، از جنگل تصادفی استفاده شد. این روش برخلاف رگرسیون‌های کلاسیک به فروض سخت‌گیرانه‌ای مانند خطی‌بودن رابطه و قیود توزیعی وابسته نیست.

در شبیه‌سازی مکانیکی- محاسباتی تحت فرض کاهش یکنواخت ۲۰ درصدی مصرف انرژی، مصرف مشاهده‌شده هر خانوار به میزان ۲۰ درصد کاهش داده شد و سپس وضعیت انطباق آن با آستانه مجدداً محاسبه گردید. نتایج نشان داد که تحت این فرض، نسبت خانوارهای ناموفق در شاخص ترکیبی از ۴۵ درصد به ۳۴ درصد کاهش می‌یابد و نسبت خانوارهای موفق از ۵۵ درصد به ۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. بنابراین بخشی از خانوارهای نزدیک به آستانه، در صورت کاهش یکنواخت مصرف، از وضعیت عبور از آستانه به وضعیت انطباق منتقل می‌شوند. اما از آنجا که احتمال عبور از آستانه با زیربنا، سن بنا و اقلیم نیز پیوند دارد، طراحی سیاست‌های آستانه‌محور باید علاوه بر انگیزه‌های صرفه‌جویی، هم‌زمان هدف‌گیری رفاهی، تعدیل اقلیمی و توجه به ویژگی‌های کالبدی را در نظر بگیرد.

رفع ناترازی انرژی در سطح خانوارها از مسیر ترکیب سیاست‌های رفتاری، فنی و ساختاری و با محوریت مردم‌سازی و آموزش امکان‌پذیر است. سیاست‌های انرژی زمانی موفق خواهند بود که مردم نه به اجبار، بلکه به انتخاب آگاهانه و منفعت شخصی، در مسیر صرفه‌جویی گام بردارند. دستیابی به این هدف در گرو دگرگونی در چارچوب فکری مدیریت انرژی و گذار از الگوی متمرکز دولتی به سمت نظام حکمرانی مشارکتی است که در آن، نقش خانوار از مصرف‌کننده به عامل فعال در تحقق عدالت و پایداری انرژی تغییر می‌یابد. ارتقای سواد انرژی، تبیین آثار زیست‌محیطی و اقتصادی مصرف بی‌رویه، و ترویج مفهوم «مصرف مسئولانه» از طریق رسانه‌ها، مدارس و شبکه‌های محلی ضروری است. در این چارچوب، ایده‌ی پرورش تسهیل‌گران انرژی محلی می‌تواند به عنوان یکی از ابزارهای نوین در مدیریت مصرف انرژی کشور مورد توجه قرار گیرد. تسهیل‌گران انرژی، افراد آموزش‌دیده‌ای هستند که در سطح محله یا روستا با خانوارها ارتباط مستقیم برقرار می‌کنند، وضعیت مصرف را توضیح می‌دهند، راهکارهای صرفه‌جویی را آموزش می‌دهند و بازخورد آن را در سامانه ملی پایش ثبت می‌کنند. این نقش، برخلاف مأمور دولتی، ماهیت مشارکتی

و آموزشی دارد و ضمن افزایش اعتماد عمومی، به شکل‌گیری رفتار داوطلبانه کمک می‌کند. از منظر فنی و اقتصادی، استفاده از پنل‌های خورشیدی کوچک، آبگرم‌کن‌های خورشیدی و توربین‌های بادی خانگی در کنار طرح خرید تضمینی برق مازاد، توسعه سیستم‌های زمین‌گرمایی برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کاهش فشار شبکه و افزایش امنیت انرژی داشته باشد. حمایت‌ها باید در قالب تسهیلات بازپرداختی یا امتیاز قبض و نه کمک بلاعوض، ارائه شوند تا انگیزه‌های واقعی حفظ شود.

با توجه به مقطعی بودن داده‌ها (سال ۱۴۰۳) و این واقعیت که در داده‌های مورد استفاده، اطلاعات مستقیم و مشاهده‌پذیر درباره قیمت‌های مؤثر، ساختار تعرفه، میزان یارانه پرداختی یا شوک‌های سیاستی وجود ندارد، نتایج این مطالعه باید در چارچوب روابط تجربی و همبستگی‌های شرطی تفسیر شود. به بیان دیگر، برآوردهای مدل لوجیت و رتبه‌بندی‌های به‌دست‌آمده از جنگل تصادفی، به‌تنهایی مبنای استنتاج علّی درباره اثر سیاست‌های قیمت، یارانه و تعرفه یا طراحی جزئی سیاست‌گذاری دولتی نیستند، بلکه نشان می‌دهند کدام ویژگی‌های رفاهی، کالبدی و اقلیمی با مصرف بالاتر یا احتمال عبور از آستانه همراه‌اند و از این منظر برای شناخت ناهمگنی مصرف و شناسایی گروه‌های پرریسک کاربرد دارند.

از نظر کاربردی، ارزش افزوده این پژوهش در ارائه یک چارچوب داده‌محور برای هدف‌گیری و اولویت‌بندی مداخلات در سطح خانوار است، به‌گونه‌ای که نتایج می‌تواند برای شناسایی خانوارهای در معرض عبور از آستانه، طراحی مداخلات رفتاری هدفمند و نیز اولویت‌دهی به برنامه‌های بهسازی و افزایش کارایی انرژی در اقلیم‌ها و تیپ‌های ساختمانی خاص مورد استفاده قرار گیرد.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

سپاسگزاری

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 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.

ORCID

Mohammad Javad Kolivand https://orcid.org/0009-0008-8599-1611
Esmail Saghab Esfahani https://orcid.org/0009-0005-4320-5422
Seyfolah Saedodin https://orcid.org/0000-0001-5066-8103
Majid Gholhaki https://orcid.org/0000-0002-9904-8623
Omid Karimi https://orcid.org/0000-0001-7586-6587
Fatemeh Hosseini ❋ https://orcid.org/0000-0003-1826-4090
Farajolah Iliat https://orcid.org/0009-0005-4320-5422

*Corresponding Author: fatemeh.hoseini@semnan.ac.ir
How to Cite:

منابع و مأخذ

باجووند، بهزاد، (۱۴۰۱)، فنون تسهیلگری و جلب مشارکت مردمی در پروژه‌های ملی، انتشارات ارسطو.

کاظمیان، فرزانه، (۱۴۰۱)، راهنمای تسهیلگری ویژه تسهیلگران توسعه روستایی، نشر آموزش کشاورزی.

مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۴۰۰). تحلیل هزینه‌های ناترازی انرژی در ایران.

References

Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., and Rothengatter, J. A. (20٠٥). *Encouraging sustainable household energy use: A review of intervention studies*. Journal of Environmental Psychology, ٢٥, ٢٧٣-٢٩١.

Allcott, H. (2009). *Social norms and energy conservation. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research*, Working Paper 09-014. https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2023/02/2009-014.pdf

Allcott, H., & Rogers, T. (2014). *The short-run and long-run effects of behavioral interventions: Experimental evidence from energy conservatio.* American Economic Review, 104(10), 3003–3037.

Breiman, L. (2001). *Random forests*. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Breiman, L., & Cutler, A. (2004). *Random forests – classification and regression.* Technical Report, University of California, Berkeley. Retrieved from https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/

Carrus G, Tiberio L, Mastandrea 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.

Del Granado, J. A., Coady, D., & Gillingham, R. (2012*). The unequal benefits of fuel subsidies: A review of evidence for developing countries.* World Development, 40(11), 2234–2248.

Gillingham, K., Rapson, D., & Wagner, G. (20١٦). *The rebound effect and energy efficiency policy*. Review of Environmental Economics and Policy, ١٠(1), 68–88.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). New York: Springer.

Hochberg, Y., & Tamhane, A. C. (1987). *Multiple Comparison Procedures*. Wiley.

Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric Statistical Methods* (3rd ed.). Wiley.

International Energy Agency. (2022). *Energy efficiency 2022*. IEA.

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.

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). *Classification and regression by random Forest*. R News, 2(3), 18–22.

Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). Wiley.

Mundaca, L., Zhu, X., Hackenfort, M., Behavioural insights for sustainable energy use Energy Policy, 171 (2022), Article 113292.

Nationally Determined Contributions with Emphasis on Solar, *Cooking Solar Cookers International*, Sacramento, CA, U.S.A.

Sustainble Energy for All (2020). *Energizing Finance Research Series: Understanding the Landscape* 2020, Chapter 5, Clean Cooking in Bangladesh.

The World Bank (2010). *Improved Cookstoves and Better Health in Bangladesh*. Washington, D.C.

Wiik, M. K., Fjellheim, K., Vandervaeren, C., Krekling, S., Meland, S., Nordström, T., Baer, D., Cheng, C., Truloff, S., Brattebø, H., and Gustavsen, A., (2022), *Zero Emission Neighbourhoods in Smart Cities, Definition, assessment criteria and key performance indicators*: Version 3.0. English, ZEN REPORT No. 39.

In Persian

Bajovand, B. (2022). *Facilitation Techniques and Public Participation in National Projects.* Arasto [In Persian]

Kazemian, F. (2022). *Facilitation Guide for Rural Development Facilitators.* Agricultural Education Publishing. [In Persian]

Islamic Parliament Research Center Of The Islamic Republic Of IRAN, (2021*). Analysis of Energy Imbalance Costs in Iran*. [In Persian]