The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Modeling and Forecasting the Trend of Electricity Consumption in Iran

Mahsa Ebrahimi Nezhomi[1] | Mohammad Mirbagherijam[2*] | Hamideh Moharrami[3]

1. M.A. in Economic Systems Planning, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: mahsa.ebrahimi@sharoodut.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering and Management, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: m.mirbagherijam@shahroodut.ac.ir
3. M.A. in Economic Systems Planning, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: hemi.mhrmi77@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 28 January 2024
Revised 28 February 2024
Accepted 25 April 2024
Published Online 26 August 2024

Keywords:
Forecasting models,
Neural network,
Power consumption trend,
Regression model,
Simple predictive indicators.

ABSTRACT

Accurate forecasting of a country's energy consumption trend is crucial in addressing the imbalance between supply and demand. Given the significant contribution of electricity to Iran's energy consumption portfolio, this research aims to model and forecast the trend of electricity consumption in Iran. Factors influencing the trend of electricity consumption were identified based on previous studies, and relevant data were collected for the period 1978-2021develop forecast models. Various models and methods were employed to predict the trend of electricity consumption, including simple indicators, energy consumption intensity, trend line analysis, regression modeling, and neural networks. The regression model estimation results indicate that the trend of electricity consumption in Iran is significantly influenced by per capita income and consumption in the previous period. From a statistical perspective, other variables such as energy price, air temperature, and rainfall did not have a significant impact on the trend. The results show that electricity consumption in Iran has increased by approximately 22.14% over the period 1978-2021, with an average annual growth rate of 7.49%. According to the forecast, electricity consumption is expected to reach 455,603 thousand megawatts by 2026. In contrast, the regression model forecast for this year is 368,959 thousand megawatts. A comparison of the prediction results reveals that the accuracy of different models and approaches varies, with the regression method exhibiting a lower measurement error than the other investigated methods in predicting the electricity consumption trend.

Cite this article: Ebrahimi Nezhomi, M.; Mirbagherijam, M. & Moharrami, H. (2024). Modeling and Forecasting the Trend of Electricity Consumption in Iran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (3), 323-339. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.377117.1081

© Mahsa Ebrahimi Nezhomi, Mohammad Mirbagherijam, Hamideh Moharrami
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.377117.1081

1. Introduction

In 2022, electricity consumption accounted for 10.39% of the national energy consumption portfolio in Iran, with total sales reaching 316,632 million kilowatt-hours—a 3.3% increase from the previous year. Unlike other energy sources, electricity's inefficiency in large-scale storage requires its production to align closely with consumption.

To maintain energy sustainability, it is essential to align supply and demand. Solutions for addressing excess demand include investing in the electricity sector, enhancing power plant capacities, constructing new facilities, or entering energy swap agreements. The prolonged duration of power generation investments highlights the necessity for modeling electricity consumption trends and forecasting medium- to long-term energy demand. Accurate forecasts can inform investment strategies and enable regional electricity companies to optimize operations, maximizing power plant utilization.

Current research generally focuses on predicting total electricity consumption using historical data, often neglecting a comprehensive analysis of economic and demographic influences. There is a

notable lack of extensive studies on electricity consumption modeling and long-term forecasting, particularly within a five-year mid-term horizon. This study aims to address this gap by employing various analytical techniques—including simple indices, energy intensity analysis, consumption trends, regression models, and neural networks—while comparing their predictive accuracies.

2. Material and Method

This study utilized various methodologies to model and forecast energy consumption trends in Iran. A systematic review of prior research identified key variables influencing energy consumption. Data on electricity consumption from 1978 to 2021 was collected and refined for analysis. Forecasting for the period 2022 to 2026 was accomplished using the following approaches:

1. Simple Index Method
2. Energy Intensity Analysis
3. Trend Analysis
4. Multivariate Linear Regression
5. Neural Network Model

The hypotheses examined in this study are:

- ✓ Per capita income significantly positively impacts electricity consumption.
- ✓ Air temperature significantly positively influences electricity consumption.
- ✓ Energy prices significantly negatively affect electricity consumption.
- ✓ Rainfall has a significant negative impact on electricity consumption.
- ✓ Previous electricity consumption levels (lagged values) influence current consumption.

Key variables impacting electricity consumption were identified from prior studies. The dependent variable analyzed was per capita electricity consumption, with independent variables including air temperature, rainfall, per-capita income, population, and electricity prices.

3. Results and Discussion

The analysis of electricity consumption forecasts in Iran highlights the significant impact of different methodologies on estimates. In 2022, forecasts varied substantially, with the Simple Index at 341,663 GWh, Energy Intensity at 302,320 GWh, and Trend Analysis at 321,690 GWh, reflecting diverse influences on consumption.

Future projections demonstrate an upward trend, with Trend Analysis predicting 501,306 GWh and Regression forecasting 368,959 GWh by 2026. The disparities underline the necessity of appropriate methodology selection for effective policy-making. Model accuracy, assessed using Mean Absolute Error, identifies the Regression model as the most reliable for forecasting electricity consumption trends.

4. Conclusion

Forecasts predict a population decline of 30,106 thousand by 2062, with an estimated population of 89,971,484 by 2026.

Per capita income has fluctuated since 1978, projected to rise from 0.04 billion rials in 1988 to 0.09 billion rials by 2026.

Historical rainfall has varied, with forecasts indicating approximately 297 mm annually by 2026, while average temperature is expected to reach 18.14 °C.

Electricity consumption increased from 14,345 thousand megawatt-hours in 1978 to 317,728 thousand megawatt-hours in 2021, averaging a growth of 7.49%.

Predictions estimate consumption will exceed 455,603 thousand megawatt-hours by 2026.

Energy intensity rose from 0.005 to 0.04, anticipated to reach 0.42 by 2026.

Analysis shows that per capita income significantly influences electricity consumption, while other factors such as temperature and rainfall have a negligible effect.

Using regression analysis, consumption for 2026 is predicted at 368,959 thousand megawatt-hours, while the neural network approach estimates 257,660 thousand megawatt-hours.

Variability in forecasting accuracy was observed across different models, with regression providing the most reliable predictions, emphasizing the importance of selecting appropriate performance assessment criteria for improved decision-making.

Electricity consumption forecasts for 2026 range from a minimum of 257,660 thousand megawatt-hours to a maximum of 501,306 thousand megawatt-hours, surpassing the production capacity of 337,700 thousand megawatt-hours. This necessitates a medium-term planning approach over the next three years. The significant correlation of 0.84 between per capita income and electricity consumption suggests a substantial impact; a 1% increase in income could lead to an 8% rise in consumption.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مدل‌سازی و پیش‌بینی روند مصرف انرژی برق در ایران

مهسا ابراهیمی نزهمی[۱] | محمد میرباقری جم[۲*] | حمیده محرمی[۳]

۱. کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: mahsa.ebrahimi@sharoodut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: m.mirbagherijam@shahroodut.ac.ir

۳. کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: hemi.mhrmi77@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

کلیدواژه:
روند مصرف برق،
مدل‌های پیش‌بینی،
مدل رگرسیون،
شبکهٔ عصبی،
شاخص‌های سادهٔ پیش‌بینی.

چکیده

پیش‌بینی روند مصرف انرژی کشور در رفع مشکل ناترازی (شکاف بین عرضه و تقاضا) آن کمک‌کننده است. با توجه به اهمیت نسبی انرژی برق در سبد انرژی مصرفی کشور، در این پژوهش روند مصرف برق در ایران مدل‌سازی و پیش‌بینی شده است. عوامل و متغیرهای مؤثر بر روند مصرف برق کشور بر اساس مطالعه‌های پیشین شناسایی شده و داده‌های مربوطه طی دورهٔ ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی جمع‌آوری شده است. در پیش‌بینی روند مصرف برق از مدل و روش‌های متعددی ازجمله روش استفاده از شاخص‌های ساده، شدت مصرف انرژی، خط روند مصرف، مدل رگرسیون و شبکهٔ عصبی استفاده شده است. نتایج تخمین مدل رگرسیون نشان می‌دهد روند مصرف برق در کشور تحت تأثیر درآمد سرانه و مصرف دورهٔ قبل است و از لحاظ آماری سایر متغیرها مانند قیمت انرژی، دمای هوا و بارندگی اثر معنادار بر روند آن نداشته است. مصرف برق طی سال‌های ۱۳۵۷ـ ۱۴۰۰ تقریباً ۲۲/۱۴ برابر شده و رشد متوسط سالیانهٔ آن ۷/۴۹ درصد است که بر اساس این پیش‌بینی مصرف برق برای سال ۱۴۰۵ برابر با ۴۵۵۶۰۳ هزار مگاوات است. در حالی که پیش‌بینی مصرف برق در این سال با مدل رگرسیون برابر ۳۶۸۹۵۹ هزار مگاوات است. مقایسهٔ نتایج پیش‌بینی مصرف برق نشان می‌دهد دقت پیش‌بینی مدل‌ها و رویکردهای مختلف یکسان نیست و روش رگرسیون میزان خطای اندازه‌گیری کمتری نسبت به دیگر روش‌های مورد بررسی در پیش‌بینی روند مصرف برق دارد.

استناد: ابراهیمی نزهمی، مهسا؛ میرباقری جم، محمد و محرمی، حمیده (۱۴۰۳). مدل‌سازی و پیش‌بینی روند مصرف انرژی برق در ایران. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۳ (۳) ۳۲۳-۳۳۹. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.377117.1081

© مهسا ابراهیمی نزهمی، محمد میرباقری جم، حمیده محرمی
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.377117.1081

۱. مقدمه

روند افزایشی مصرف برق در کشور باعث شده تا سهم این نوع انرژی در سبد انرژی مصرفی کشور سال ۱۴۰۱ به سطح ۱۰/۳۹ درصد برسد. استناد به سالنامهٔ آماری وزارت نیرو، میزان مصرف (فروش) برق سال ۱۴۰۱ برابر با ۳۱۶۶۳۲ میلیون کیلووات ساعت بوده است که نسبت به سال قبل ۳/۳ درصد رشد داشته است. همچنین، بیشترین مصرف برق کشور با سهم ۳۶/۲ درصد در بخش صنعتی کشور است. سهم بخش خانگی و تجاری در مصرف برق ۳۱/۸۷ درصد، کشاورزی ۱۴/۴ درصد، عمومی ۸/۷ درصد، روشنایی معابر ۱/۵ درصد و سایر مصارف حدود ۷/۵ درصد بوده است.

مهم‌ترین وجه تمایز انرژی برق با سایر منابع انرژی، قابلیت پایین ذخیره‌سازی آن در حجم بالا به دلیل محدودیت‌های فنی و اقتصادی است که نتیجهٔ آن ضرورت هم‌زمانی تولید و مصرف برق است [۱]. مسئلهٔ اصلی در تأمین پایداری انرژی حذف شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی است. در صورتی که در کشور مازاد تقاضای انرژی برق باشد، یک راه حل ممکن برای رفع کمبود عرضه یا مازاد تقاضا سرمایه‌گذاری در صنعت برق و گسترش ظرفیت نیروگاه‌ها و ایجاد نیروگاه‌های جدید و یا انجام معاملات سواپ انرژی است، اما با توجه به اینکه سرمایه‌گذاری در پروژه‌های نیروگاهی پدیده‌ای زمان‌بر و بلندمدت است؛ بنابراین لازم است که روند مصرف برق مدل‌سازی شود و تقاضای مصرف انرژی برای افق بلندمدت (میان‌مدت) به طور دقیق پیش‌بینی شود تا بر اساس آن اقدام به اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری در صنعت برق کرد. پیش‌بینی دقیق روند مصرف برق برای شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق نیز یکی از چالش‌های مهم است، چون اطلاع از میزان مصرف برق در بازه‌های زمانی مختلف آینده می‌تواند موجب کنترل بهینهٔ سیستم و به‌کارگیری مفید از ظرفیت نیروگاه‌ها شود [۲].

ضرورت انجام تحقیق حاضر را می‌توان با استناد به چندین دلیل علمی و کاربردی توجیه کرد:

- نگاه سیاست‌گذاران صنعت برق: حفظ تعادل میان عرضه و تقاضای برق و تأمین امنیت انرژی از چالش‌های کلیدی این صنعت است. پیش‌بینی روند مصرف برق شرایطی را برای برنامه‌ریزی مؤثرتر در مدیریت منابع انرژی فراهم می‌آورد.
- دیدگاه دولت: پیش‌بینی مصرف برق به دولت کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهتری برای اخذ مالیات بر فروش برق داشته باشد و در نتیجه درآمدهای عمومی را بهبود بخشد.
- کمک به نیروگاه‌ها و تأمین‌کنندگان انرژی: شناسایی روند افزایش تقاضا به نیروگاه‌ها و تأمین‌کنندگان انرژی امکان می‌دهد تا برای افزایش ظرفیت تولید و عرضهٔ برنامه‌ریزی مؤثری داشته باشند.
- اهمیت پیش‌بینی برای سرمایه‌گذاران: با توجه به زمان‌بر بودن پروژه‌های انرژی، پیش‌بینی روند مصرف برق به سرمایه‌گذاران این امکان را می‌دهد که تصمیمات مناسبی در زمینهٔ سرمایه‌گذاری اتخاذ کنند و به تغییرات تقاضای بازار برق پاسخ دهند.

تحقیقات انجام‌گرفته در این حوزه بیشتر به پیش‌بینی میزان برق مصرفی کل کشور برای دوره‌های آتی بر اساس داده‌های تاریخی و با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و جمعیتی محدود می‌شوند. به رغم این، داخل کشور مطالعهٔ عمیق و مدون در ارتباط با مدل‌سازی مصرف برق و پیش‌بینی‌های بلندمدت (به‌ویژه در بازهٔ میان‌مدت ۵ ساله) وجود ندارد، که این پژوهش به عنوان یک پاسخ مؤثر به این خلأ تحقیقاتی محسوب می‌شود. علاوه بر این، اکثر مطالعات این حوزه معمولاً به استفاده از یک روش خاص می‌پردازند؛ در حالی که این تحقیق بر روش‌های متنوعی نظیر استفاده از شاخص‌های ساده، شدت مصرف انرژی، خط روند مصرف، مدل رگرسیون، و شبکه‌های عصبی تأکید دارد و با معیار حداقل خطای پیش‌بینی به مقایسهٔ روش‌های مختلف پیش‌بینی روند مصرف برق پرداخته است.

۲. مبانی نظری و پیشینهٔ تحقیق

تحلیل تقاضای انرژی و پیش‌بینی آنکه در شناخت و برنامه‌ریزی مؤثر ناترازی انرژی کمک کننده است با رویکردهای متعددی قابل بررسی است. در ادامه به این رویکردها اشاره می‌شود.

۲. ۱. رویکردهای تحلیل تقاضای انرژی

- این رویکرد شامل به‌کارگیری شاخص‌های کاربردی است که به توصیف تغییرات تقاضای انرژی و ارتباط آن با متغیرهای اقتصادی کمک می‌کند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نرخ رشد مصرف انرژی: این شاخص به صورت سالیانه یا میانگین در یک دوره محاسبه می‌شود و روند تغییر تقاضا را نشان می‌دهد. نرخ رشد سالیانه به طور سال‌به‌سال محاسبه می‌شود و متوسط نرخ رشد تصویری کلی از دوره ارائه می‌دهد.

شدت انرژی: این شاخص میزان انرژی مورد نیاز برای تولید یک واحد از متغیرهای اقتصادی مانند تولید ناخالص داخلی (یا ارزش افزوده) را نشان می‌دهد و می‌تواند به مصرف یک منبع انرژی خاص یا مجموعه‌ای از منابع انرژی مرتبط باشد.

- تجزیهٔ تقاضا. این رویکرد به درک عوامل محرک تقاضای انرژی می‌پردازد. عواملی مانند تغییر در فعالیت اقتصادی، بهره‌وری فناورانه و ساختار اقتصادی در این تحلیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. مدل‌های تجزیه تلاش می‌کنند سهم هر یک از این عوامل را در تغییرات مصرف انرژی تعیین کنند.
- اقتصادسنجی. این رویکرد شامل تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های معادلات منفرد و هم‌زمان است. تحلیل تقاضای انرژی باید تصمیمات کلیدی کاربر مانند خرید تجهیزات، انتخاب سوخت و استفاده از ظرفیت را در نظر بگیرد. روش اقتصادسنجی با استفاده از فن‌های مدل‌سازی مختلف، تقاضای مشتق‌شده برای انرژی را به تصویر می‌کشد.

۲. ۲. رویکردهای پیش‌بینی تقاضای انرژی

- پیش‌بینی با استفاده از شاخص‌های ساده. پیش‌بینی تقاضای انرژی با استفاده از شاخص‌های ساده مانند نرخ رشد، کشش‌ها، میزان مصرف و شدت انرژی انجام می‌شود. این فرایند شامل دو مرحله است:

الف- ایجاد شاخص: با استفاده از اطلاعات تاریخی مصرف انرژی، شاخص‌ها درک و ایجاد می‌شوند.

ب- پیش‌بینی: با توجه به تحولات احتمالی آینده، شاخص‌ها طی دورهٔ مورد نظر پیش‌بینی می‌شوند.

- پیش‌بینی با رویکرد تحلیل مصرف انرژی. این رویکرد به برون‌یابی تغییرات رشد گذشته می‌پردازد و معمولاً با تطبیق نوعی از روند زمانی با رفتار گذشته انجام می‌شود. در این روش فرض می‌شود که تغییر کمی در الگوی رشد یا عوامل تعیین‌کنندهٔ تقاضا مانند درآمد، قیمت و سلایق مصرف‌کننده وجود خواهد داشت. این روش به دلیل سادگی و کاربردی بودن، متداول‌ترین رویکرد برای پیش‌بینی است. عدم توانایی در پیش‌بینی تغییرات ساختاری و عدم توضیح دقیق عوامل تأثیرگذار بر تقاضا از محدودیت‌های این رویکرد است [۳].
- پیش‌بینی با استفاده از فن‌های پیشرفته مانند روش شبکه‌های عصبی مصنوعی.

۲. ۳. عوامل مؤثر بر مصرف انرژی برق

الگوی مصرف برق مشترکین به عنوان تابعی پیچیده و غیرخطی، تحت تأثیر عوامل متنوعی قرار دارد که در جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند. این الگو شامل دو نوع تغییرات اصلی است: ۱. تغییرات روندی که معمولاً ناشی از عوامل اقتصادی و اجتماعی است. ۲. تغییرات دوره‌ای (ساعتی، روزانه، ماهیانه و فصلی) که تحت تأثیر عوامل محیطی و زمان قرار دارند. درک این تغییرات برای تحلیل رفتار مصرف‌کنندگان و پیش‌بینی تقاضای انرژی ضروری است.

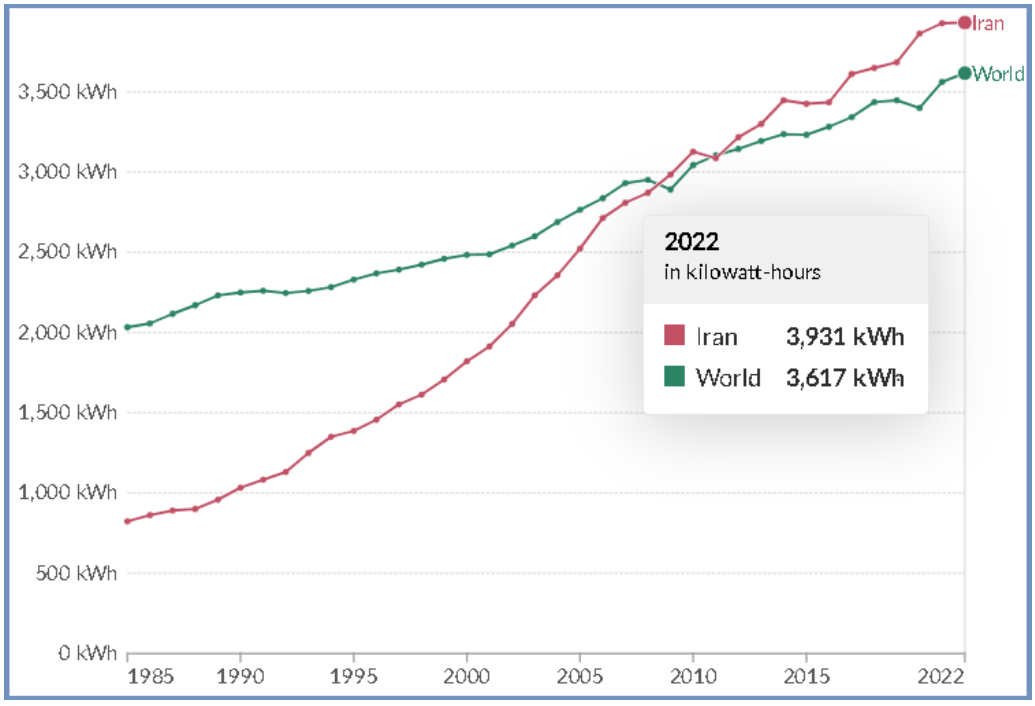
۲. ۴. وضعیت مصرف/تولید انرژی برق در ایران و مقایسه آن با سایر کشورهای جهان

مصرف برق در سالیان اخیر به دلایل متعددی نظیر رشد سریع جمعیت، توسعهٔ شهرنشینی، افزایش سطح زندگی و رفاه، واقعی نبودن تعرفه‌ها، تغییرات آب‌وهوایی و توسعهٔ صنعتی و تجاری افزایش داشته است. طبق آخرین آمار ارائه‌شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی، مصرف انرژی الکتریکی در سال ۲۰۱۸ در جهان ۲۶۷۶۰۰۶۵ گیگاوات ساعت بوده و از این میزان سهم کشور ایران ۱/۰۹ درصد مصرف جهانی و برابر با ۲۸۴۱۷۹/۴ گیگاوات ساعت بوده است [۱۰].

همچنین طبق گزارش‌های سایت جهان ما در آینهٔ آمار، میانگین مصرف انرژی برای هر نفر در ایران سال ۱۹۷۸ برابر ۱۱۲۷۱ کیلووات ساعت بوده، حال آنکه این مقدار در سال ۲۰۲۲ به ۳۸۱۳۳ کیلووات ساعت رسیده است. شاخص تولید انرژی ایران در سال ۱۹۷۸ برابر ۴۰۶ تراوات ساعت بوده که این مقدار در سال ۲۰۲۲ به ۳۳۷۷ تراوات ساعت رسیده است. همچنین، تولید سرانهٔ برق در ایران در سال‌های ۱۹۸۵ و ۲۰۲۲ به‌ترتیب برابر ۸۲۳ کیلووات ساعت و ۳۹۳۱ کیلووات ساعت است. این شاخص در جهان در سال ۱۹۸۵ برابر ۲۰۳۳ کیلووات ساعت و در سال ۲۰۲۲ برابر ۳۶۱۷ کیلووات ساعت است. مقایسهٔ این نتایج بیانگر شیب تند روند مصرف سرانهٔ برق در ایران نسبت به متوسط جهانی آن است که به طور واضح در شکل ۱ نمایان است.

جدول ۱. عوامل مؤثر بر مصرف انرژی برق

ردیف		توضیحات
عوامل اقتصادی و اجتماعی	بعد خانوار	تعداد افراد یک خانوار به علت مصرف مشترک اعضای یک خانوار تأثیر منفی بر میزان مصرف سرانهٔ برق دارد [۴].
	درآمد خانوار	درآمد خانوار می‌تواند به دو شکل بر مصرف برق تأثیر بگذارد: ۱. با افزایش درآمد، تقاضا برای لوازم و تجهیزات الکترونیکی افزایش می‌یابد و به همین‌دلیل، مصرف برق نیز افزایش می‌یابد. ۲. سهم مخارج برق کاهش یافته و خانوارها توجه کمتری به قیمت‌ها دارند، که موجب افزایش مصرف می‌شود [۵].
	مشخصات واحد مسکونی و نوع مصالح	افزایش مساحت واحد مسکونی و تعداد اتاق‌ها باعث افزایش مصرف برق می‌شود. واحدهای مسکونی نوساز که از تجهیزات و مصالح مدرن استفاده می‌کنند، مصرف انرژی کمتری دارند [۶].
عوامل محیطی	ویژگی‌های محل اقامت	شامل مشخصاتی همچون منطقهٔ شهری، نوع کنتور و خصوصیات عمرانی ساختمان است.
	شرایط آب‌وهوایی	تأثیر مستقیم بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها و مصرف انرژی دارد. عوامل مؤثر شامل درجهٔ هوا، ساعت‌های آفتابی، ابرها، رطوبت، جهت و سرعت باد، بارش و فشار هستند [۷].
عامل زمان		صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در زمان‌های خاص اتفاق می‌افتد. همچنین، ساعت‌های تابستانی ممکن است موجب افزایش مصرف انرژی شود [۸]. تغییرات فصلی به‌ویژه در تابستان به دلیل افزایش دما و بارهای تهویهٔ مطبوع بر تقاضای انرژی تأثیر می‌گذارد [۷]. تأثیر فعالیت‌های انسانی در مصرف انرژی نیز می‌تواند بر اساس روز هفته یا ماه سال تحلیل شود [۹].



شکل ۱. وضعیت تولید سرانهٔ برق در ایران و مقایسهٔ آن با سایر کشورهای جهان (منبع: https://ourworldindata.org)

در جدول ۲ میزان مشارکت انرژی‌های مختلف در تأمین انرژی برق کشور و جهان مقایسه شده است. به رغم اینکه مناطق مختلف ایران پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی بادی، خورشیدی و زمین گرمایی را در تأمین برق دارد [۱۱]، ولی سهم جایگاه انرژی گاز طبیعی در تأمین انرژی برق از بقیه انرژی‌ها بیشتر است. در سال ۲۰۲۲ سهم گاز طبیعی در تأمین انرژی برق کشور برابر ۷۹/۲۷ درصد بوده است. این در حالی است که بیشترین منبع تأمین انرژی برق جهان به زغال‌سنگ با مقدار ۳۵/۷۲ درصد مربوط می‌شود.

جدول ۲. مقایسهٔ سهم منابع تولید انرژی برق در ایران و جهان (منبع: https://ourworldindata.org)

	گاز طبیعی	نفت	برق‌آبی	هسته‌ای	بادی	خورشیدی	زغال سنگ	انرژی زیستی	دیگر	جمع
ایران	۷۹/۲۷	۱۴/۶۳	۴/۸۴	۰/۹۵	۰/۳۰	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۰۱	-	۱۰۰
جهان	۲۲/۱۲	۳/۱۰	۱۵/۱۷	۹/۱۵	۷/۵۰	۴/۵۲	۳۵/۷۲	۲/۳۸	۰/۳۵	۱۰۰

۲. ۵. پیشینهٔ پژوهش

مدل‌سازی و پیش‌بینی روند مصرف برق در مدیریت حفظ توازن مدیریت عرضه و تقاضای انرژی و تصمیمات سرمایه‌گذاری و تأمین پایدار انرژی مهم است. لذا پژوهش‌های انجام‌یافته در این زمینه بسیار متعدد و متنوع است. جنبه‌های مورد توجه در این مطالعات عبارت‌اند از: ۱- شناسایی عوامل تعیین‌کنندهٔ مصرف برق در دورهٔ زمانی کوتاه‌مدت یا بلندمدت؛ ۲- مدل‌سازی اثر عوامل و ۳- پیش‌بینی مصرف انرژی و ارزیابی دقت پیش‌بینی.

در تحلیل مصرف برق طیف وسیعی از متغیرها و عوامل معرفی شده است. عوامل اقتصادی مثل رشد تولید ناخالص داخلی و تعرفه‌های برق و عوامل اجتماعی مانند تغییرات جمعیتی و شهرنشینی و تغییر بعد خانوار، عوامل اقلیمی و شرایط آب‌وهوایی، تغییرات پیشرفت فناوری و برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی و تغییر الگوی مصرف و غیره همه در روند مصرف برق و انرژی مؤثر هستند. در نیجریه [۱۲]، در پاکستان [۱۳] و در اندونزی [۱۴] با بررسی مصرف برق در یک دورهٔ بلندمدت نشان داده شده که سطح فعالیت‌های اقتصادی، جمعیت و تعرفه‌های برق اثر معنادار بر روند مصرف برق دارد. مطالعاتی مانند [۱۵ و ۱۶] و اخیراً نیز در [۱۷] اثرات عوامل اجتماعی مانند شهرنشینی و بعد خانوار را بر مصرف انرژی بخش خانگی برجسته شده است. [۱۸] نشان داده‌اند که یک درجه افزایش دمای روزهای تابستان و زمستان ممکن است مصرف برق را به‌ترتیب به اندازهٔ ۰/۰۱۵ و ۰/۰۰۲ درصد در مناطق روستایی چین افزایش دهد. همچنین، پیشرفت فناوری باعث کارایی انرژی شده و در نتیجه، مصرف انرژی در همهٔ بخش‌های اقتصادی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ با این وجود [۱۹] با مطالعه روی ۳۵ کشور آفریقایی نشان داده است که نوآوری فناورانه باعث کارایی انرژی نشده و لذا اثر معنادار بر مصرف برق در این کشورها نداشته است. در عمل دستیابی به کارایی انرژی از شیوه‌های مختلف قابل دستیابی است. طراحی شبکهٔ چندمنظوره زنجیرهٔ [۲۰] تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر پایدار، تعیین اندازهٔ بهینه سیستم فتولتالیک و باتری مسکونی متصل به شبکه براساس هزینهٔ انرژی و اوج بار [۲۱] و کنترل بهینهٔ شبکهٔ توزیع برق با تخمین دقیق حالت شبکه [۲۲] نمونه‌های از مطالعات اخیر در ارتقای کارایی انرژی است.

روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های پیشین در مدل‌سازی و پیش‌بینی مصرف برق نیز بسیار متعدد و متنوع است. چندین مطالعه مروری ازجمله [۲۳ و ۲۴] در این خصوص وجود دارد. تحلیل سری‌های زمانی [۲۵]، رگرسیون خطی چندمتغیره [۶]، شبکهٔ عصبی [۲۶ و ۲۷]، استفاده از مدل‌های ترکیبی [۲۸ ـ ۳۰] و یادگیری ماشین [۳۱] نمونه‌هایی از رویکردهای استفاده‌شده در مطالعات پیشین است. افق زمانی، سطح پیش‌بینی مصرف برق (در سطح کشور، یک بخش اقتصادی، استان، شهر و خانوار) و نوع داده‌های در دسترس ممکن است در رویکرد مدل‌سازی و پیش‌بینی محدودیت ایجاد کند.

معیارهای سنجش دقت پیش‌بینی و عملکرد مدل‌ها متنوع و متعدد هستند. در پژوهشی که توسط [۳۲] انجام شده است، توپولوژی و ساختار بیش از ۴۰ معیار سنجش دقت عملکرد مدل بررسی و طبقه‌بندی شده‌اند. در این پژوهش به منظور سادگی از معیار متداول متوسط قدرمطلق خطا برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی استفاده خواهد شد. با توجه به تنوع معیارها، مقایسهٔ دقت پیش‌بینی مدل‌ها به موضوع چالش‌برانگیز تبدیل شده است که اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

۳. روش کار (مواد و روش‌ها)

در این پژوهش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی روند مصرف انرژی در ایران از چند روش مؤثر استفاده شده است. به منظور شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر میزان مصرف انرژی، ابتدا تحقیقات و پژوهش‌های پیشین در این حوزه بررسی و متغیرهای مؤثر شناسایی شده‌اند. پس از شناسایی این متغیرها، داده‌ها و اطلاعات مربوط به مصرف انرژی برق به صورت سالیانه از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ جمع‌آوری و پالایش شده است. سرانجام داده‌ها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و با رویکردهای زیر، مصرف انرژی برق برای دورهٔ ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ پیش‌بینی شده است:

- رویکرد استفاده از شاخص ساده
- شدت مصرف انرژی
- خط روند
- مدل رگرسیون خطی چندمتغیره
- مدل شبکهٔ عصبی

نرم‌افزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل اکسل و ایویوز[1] و R بوده‌اند. این نرم‌افزارها به‌ترتیب برای مدل‌سازی و پیش‌بینی روند مصرف برق با رویکرد شاخص‌های ساده، مدل رگرسیون خطی و مدل شبکهٔ عصبی به کار گرفته شده‌اند.

فرضیه‌های تحقیق شامل موارد زیر است:

- ✓ درآمد سرانهٔ تأثیر مثبت و معناداری بر میزان مصرف انرژی برق دارد.
- ✓ دمای هوا تأثیر مثبت و معناداری بر میزان مصرف انرژی برق دارد.
- ✓ قیمت انرژی تأثیر منفی و معناداری بر میزان مصرف انرژی برق دارد.
- ✓ میزان بارندگی تأثیر منفی و معناداری بر میزان مصرف انرژی برق دارد.
- ✓ میزان مصرف انرژی برق تحت تأثیر مصرف دورهٔ گذشته خود است و به میزان مصرف دورهٔ قبل خود وابسته است.

متغیرهای مورد استفاده در پیش‌بینی

متغیرهای تأثیرگذار بر روند مصرف انرژی برق با مطالعهٔ پژوهش‌های پیشین مشخص و فهرست شده‌اند. این متغیرها به عنوان ابزارهای سنجش در تحقیق استفاده شده‌اند. برخی از این متغیرها استاندارد و برخی دیگر توسط محقق تعریف شده‌اند. به عنوان مثال، متغیر مصرف سرانهٔ برق که با تقسیم کل مصرف برق کشور در هر سال بر جمعیت کشور در آن سال محاسبه شده است. متغیر وابستهٔ پژوهش، مصرف سرانهٔ برق در کشور ایران و متغیرهای مستقل مورد استفاده شامل دمای هوا، بارندگی، درآمد سرانه، جمعیت و قیمت برق هستند.

پیش‌بینی متغیرهای مستقل

- جمعیت: برای پیش‌بینی جمعیت کشور در دورهٔ مورد نظر از پیش‌بینی‌های سالیانهٔ جمعیتی سازمان ملل استفاده شده است. طبق گزارش‌ها جمعیت ایران تا سال ۱۴۰۵ به ۸۹۹۷۱۴۸۴ نفر می‌رسد.
- درآمد سرانه: درآمد سرانهٔ حقیقی، از تقسیم تولید ناخالص داخلی به قیمت‌های ثابت سال ۱۳۹۰ بر جمعیت کشور به دست می‌آید؛ بنابراین برای پیش‌بینی آن طی دورهٔ مورد نظر لازم است علاوه بر پیش‌بینی جمعیت کشور، سطح درآمد حقیقی برای سال‌های یادشده نیز پیش‌بینی و محاسبه شود. در اینجا برای پیش‌بینی سطح تولید ناخالص داخلی، همان‌طور که صندوق بین‌المللی پول برای سال ۲۰۲۳ میلادی پیش‌بینی کرده است فرض می‌کنیم که بخش حقیقی اقتصاد سالیانه مقدار ثابت ۲/۰۵ درصد رشد خواهد داشت.
- قیمت انرژی: برای پیش‌بینی قیمت انرژی برق از روند افزایش قیمت انرژی برق استفاده شده است.
- بارندگی و دمای هوا: میزان بارندگی و دمای هوا طی سال‌های ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ بررسی شده و روند نوسانی آن‌ها مستند شد.

1. EViews

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. نتایج پیش‌بینی روند مصرف انرژی برق با شاخص‌های ساده

مصرف برق از ۱۴۳۴۵ هزار مگاوات در سال ۵۷ به ۳۱۷۷۲۸ هزار مگاوات در سال ۱۴۰۰ افزایش پیدا کرده است که این مقدار افزایش ۲۲/۱۴ برابری را نشان می‌دهد؛ همچنین متوسط نرخ رشد مصرف سالیانهٔ برق نیز ۷/۴۹ به دست آمده است. بر اساس این پیش‌بینی، مصرف برق تا سال ۱۴۰۵ بیش از ۴۵۵۶۰۳ هزار مگاوات است.

۴. ۲. نتایج کشش بلندمدت و کوتاه‌مدت مصرف انرژی برق

کشش به مفهوم درصد تغییرات یک متغیر نسبت به متغیر دیگر است. لذا با مفروض بودن مقدار کشش و درصد تغییرات یکی از متغیرها امکان محاسبهٔ درصد تغییرات متغیر دیگر وجود دارد. بر این‌اساس در جدول ۳ کشش‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت مصرف انرژی نسبت به بخش‌های قیمت انرژی، درآمد سرانه، ارزش افزوده به دست آمده است.

جدول ۳. درصد تغییرات مصرف انرژی بر اساس کشش

کشش بلندمدت مصرف انرژی نسبت به قیمت انرژی	۰/۹۱۴۹
کشش بلندمدت مصرف انرژی نسبت به درآمد سرانه	−۸/۴۶۱۹
کشش بلندمدت مصرف انرژی نسبت به ارزش افزوده	۲/۸۳۵۴
کشش کوتاه‌مدت (یک سال) مصرف انرژی نسبت به قیمت انرژی	۰/۵۳۸۲
کشش کوتاه‌مدت (یک سال) مصرف انرژی نسبت به درآمد سرانه	−۰/۶۵۸۲
کشش کوتاه‌مدت (یک سال) مصرف انرژی نسبت به ارزش افزوده	−۰/۸۰۱۴
پیش‌بینی بانک جهانی برای رشد درآمد سرانه ایران	۲/۴
درصد تغییرات مصرف انرژی بر اساس کشش کوتاه‌مدت درآمد سرانه	−۱/۹۴۷۸
درصد تغییرات مصرف انرژی بر اساس کشش بلندمدت درآمد سرانه	۷/۰۰۱۲

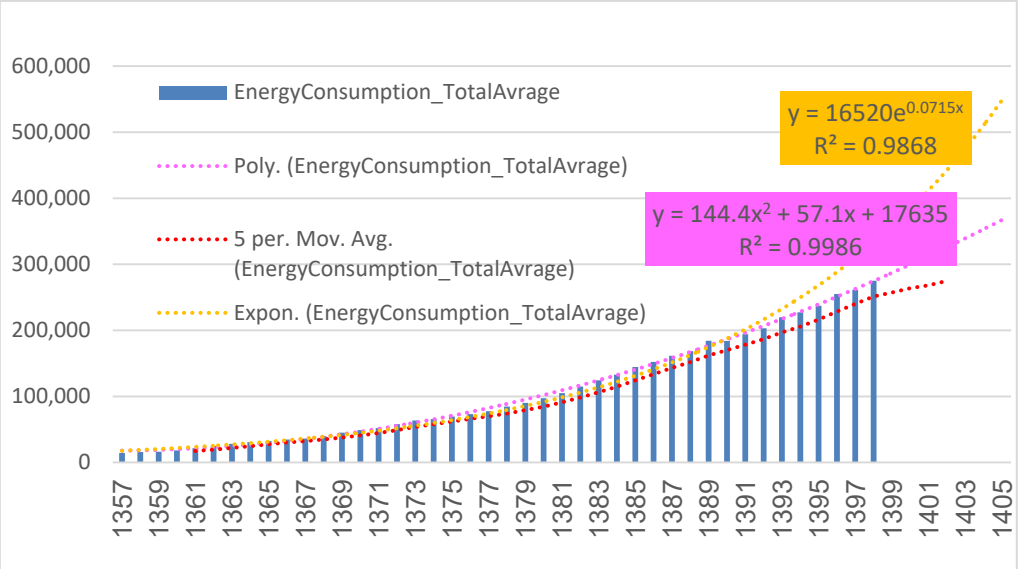
۴. ۳. نتایج پیش‌بینی کل مصرف انرژی برق بر اساس شدت انرژی

شدت انرژی از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ همواره در حال افزایش بوده است و از مقدار ۰/۰۰۵ به ۰/۰۴ رسیده است. پیش‌بینی می‌شود که این روند از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ ادامه یابد و شدت انرژی به ۰/۴۲۰ افزایش یابد. درخور یادآوری است که این پیش‌بینی براساس فرض ثابت بودن داده‌ها در سال ۱۴۰۰ انجام شده است.

۴. ۴. نتایج پیش‌بینی کل مصرف انرژی بر اساس تابع روند

در شکل ۲ سه نوع روند متفاوت برای مصرف برق ترسیم شده است. در خط روند اول، مصرف برق بر اساس تابع نمایی[1] پیش‌بینی شده است، در حالی که خط روند دوم از تابع چندجمله‌ای[2] برای تجزیه‌وتحلیل استفاده می‌کند و خط روند سوم مبتنی بر میانگین متحرک است. بر اساس پیش‌بینی‌ها، مصرف برق ایران از سال ۱۴۰۱ تا سال ۱۴۰۵ به طور تقریبی از ۳۲۱ هزار مگاوات به ۵۰۱ هزار مگاوات افزایش خواهد یافت.

1. $Y = 16796e^{0/0704x}$
2. $Y=152.76x^2 + 239.69x + 19338$



شکل ۲. پیش‌بینی و میزان مصرف برق بر اساس خط روند طی سال‌های ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۵

۴. ۵. نتایج مدل‌سازی مصرف سرانهٔ انرژی برق بر اساس معادلهٔ رگرسیون

در این بخش، مصرف برق بر اساس متغیرهای میانگین بارندگی، میانگین دما، قیمت انرژی، درآمد سرانه و مصرف دورهٔ قبل توسط مدل زیر و با استفاده از نرم‌افزار ایویوز مدل‌سازی و پیش‌بینی شده است:

$$\mathrm{Log}(\mathrm{energy_consumption}) = \alpha_i + \beta_1 \log(\mathrm{income}) + \beta_2 \log(\mathrm{EP}) + \beta_3 \log(\mathrm{CELLULARPRECIPITATION}) + \beta_4 \log(\mathrm{average}_{\mathrm{temperature}}) + \beta_5 \log(\mathrm{energy_cosumption}(-1)) + \varepsilon_t$$

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴، سطح معناداری برای متغیرهای عرض از مبدأ، درآمد سرانه و مصرف دورهٔ قبل در پیش‌بینی مصرف انرژی برق کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده است؛ این مقدار نشان‌دهندهٔ وجود رابطهٔ معنادار بین این متغیرها و مصرف انرژی برق است. در مقابل، سطح معناداری برای متغیرهای میانگین بارندگی، میانگین دما و قیمت انرژی در پیش‌بینی مصرف انرژی برق بیشتر از ۰/۰۵ به دست آمده است، که نشان‌دهندهٔ نبود رابطهٔ معنادار بین این متغیرها و مصرف انرژی برق است. بنابراین، در سطح اطمینان ۹۵ درصد فرضیه‌های اول و پنجم پژوهش تأیید و فرضیه‌های دوم، سوم و چهارم رد می‌شود.

جدول ٤. نتایج برازش معادلهٔ رگرسیون

متغیرها	ضریب	خطای استاندارد	آماره t	p.value
α	۰/۴۴۹	۰/۶۳۸	۰/۷۰۴	۰/۰۸۵
درآمد سرانه	۰/۰۸۴	۰/۰۳۹	۲/۱۴۰	۰/۰۳۹
Log(EP)[1]	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۳۵۶	۰/۷۲۳
Log(CELLULARPRECIPITATION)[2]	−۰/۰۱۹	۰/۰۲۴	−۰/۷۷۳	۰/۴۴۴
Log(average_temperature)[3]	۰/۱۶۷	۰/۱۶۹	۰/۹۹۳	۰/۳۲۷
Log(energy_cosumption(1))[4]	۰/۹۵۰	۰/۰۳۸	۲۴/۸۸	۰,۰۰۰
R^2		۰/۹۹۸		
تعدیل‌شده R^2		۰/۹۹۸		
آمارهٔ F		۴۱۵۱/۰۹		
سطح معناداری آمارهٔ F		۰/۰۰۰		

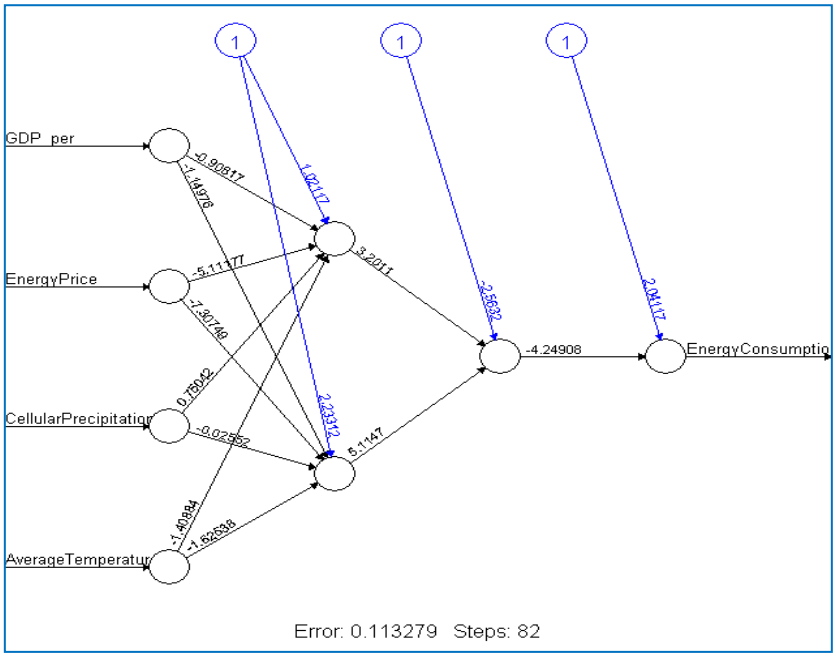
۱. قیمت انرژی
۲. میزان بارندگی
۳. میانگین دما
۴. مصرف دورهٔ قبل

۴. ۶. نتایج مدل‌سازی مصرف انرژی برق بر اساس مدل شبکهٔ عصبی

نتایج برآورد پارامترها و متغیرهای مدل شبکهٔ عصبی، همراه با شکل ساختار آن، به‌ترتیب در جدول ۵ و شکل ۳ ارائه شده‌اند. همچنین، نتایج پیش‌بینی مدل مربوطه در جدول ۶ درج شده است. در این مدل متغیرهای ورودی شامل درآمد سرانه، شدت انرژی، میانگین دما و میانگین بارش هستند. تعداد لایه‌ها و متغیرهای هر لایه، به استثنای لایهٔ اول، بهینه‌سازی شده است. به طور خاص، تعداد متغیرهای موجود در لایهٔ دوم برابر با دو متغیر تعیین شده است.

جدول ۵. برآورد پارامترها و متغیرهای مدل شبکهٔ عصبی

عنوان متغیرها در مدل شبکهٔ عصبی	مقادیر برآوردشده
reached.threshold	۰/۰۰۷۰۶
steps	۸۲/۰۰۰۰
Intercept.to.1layhid1	۱/۰۲۲۱۴
Income per.to.1layhid1	−۰/۹۰۸۲۷
EnergyPrice.to.1layhid1	−۵/۱۱۱۸۷
CellularPrecipitation.to.1layhid1	۰/۷۵۰۴۱
AverageTemperature.to.1layhid1	−۱/۴۰۷۸۴
Intercept.to.1layhid2	۲/۲۳۳۱۲
Income per.to.1layhid2	−۱/۱۴۹۵۶
EnergyPrice.to.1layhid2	−۷/۳۰۷۳۸
CellularPrecipitation.to.1layhid2	−۰/۰۲۵۵۲
AverageTemperature.to.1layhid2	−۱/۶۲۶۳۸
Intercept.to.2layhid1	−۲/۵۶۳۲۰
1layhid1.to.2layhid1	−۳/۲۰۱۱۰
1layhid2.to.2layhid1	۵/۱۱۴۷۰
Intercept.to.EnergyConsumption_per	۲/۰۴۱۱۷
2layhid1.to.EnergyConsumption_per	−۴/۲۴۹۰۸



شکل ۳. مدل‌سازی مصرف برق از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ با رویکرد مدل شبکهٔ عصبی

جدول ٦. پیش‌بینی مصرف برق بر اساس مدل شبکهٔ عصبی

سال	پیش‌بینی مصرف کل برق
۱۴۰۱	۲۴۶۶۷۰/۱۰
۱۴۰۲	۲۴۷۰۸۰/۸۴
۱۴۰۳	۲۵۰۱۷۳/۳۰
۱۴۰۴	۲۵۶۳۶۳/۷۰
۱۴۰۵	۲۵۷۶۶۰/۱۰

۴. ۷. مقایسهٔ نتایج پیش‌بینی مصرف انرژی برق با رویکردهای مختلف

جدول ۷ نتایج مقایسهٔ پیش‌بینی مصرف برق ایران (به هزار مگاوات) را بر اساس رویکردهای مختلف از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ ارائه می‌دهد. این داده‌ها نشان‌دهندهٔ تأثیر متفاوت رویکردهای پیش‌بینی بر تخمین سطح مصرف برق در کشور هستند و به‌ویژه اهمیت انتخاب روش صحیح در تحلیل و پیش‌بینی مصرف انرژی را مورد تأکید قرار می‌دهند.

در سال ۱۴۰۱، پیش‌بینی مصرف برق با رویکردهای مختلف متفاوت است. شاخص ساده، با پیش‌بینی ۳۴۱۶۶۳ هزار مگاوات، پایین‌ترین مقدار را ارائه می‌دهد. با این‌حال، با استفاده از رویکرد شدت مصرف انرژی، مقدار ۳۰۲۳۲۰ هزار مگاوات برآورد می‌شود که نشان‌دهندهٔ اثرگذاری متغیرهای اقتصادی و اجتماعی بر مصرف انرژی است. در مقابل، رویکرد خط روند بیشترین پیش‌بینی را با ۳۲۱۶۹۰ هزار مگاوات در همان سال نشان می‌دهد به پیش‌بینی خوش‌بینانه‌تری اشاره دارد.

با نگاهی به سال‌های آتی، مشخص است که پیش‌بینی مصرف برق در رویکردهای مختلف به طور عمومی رو به افزایش است. پیش‌بینی‌های خط روند و رگرسیون به طور مشهود در حال افزایش هستند، به طوری که در سال ۱۴۰۵، مصرف برق با استفاده از رویکرد خط روند به ۵۰۱۳۰۶ هزار مگاوات می‌رسد، در حالی که این عدد برای رگرسیون ۳۶۸۹۵۹ هزار مگاوات پیش‌بینی می‌شود. این نتایج نشان‌دهندهٔ اختلاف قابل توجهی در تخمین‌ها بسته به روش‌های مختلف پیش‌بینی است. بنابراین، ارزیابی عملکرد مدل‌ها با معیار مناسب در انتخاب یک مدل سیاست‌گذاری کمک‌کننده است. به همین‌دلیل، دقت پیش‌بینی مدل‌ها با معیار متداول میانگین قدرمطلق خطا سنجیده شده و نتایج برای مقایسه در جدول ۸ ارائه شده است. مدل رگرسیون با کمترین خطای پیش‌بینی مدل مناسب برای پیش‌بینی روند مصرف برق است.

جدول ۷. مقایسهٔ پیش‌بینی مصرف برق (هزار مگاوات) ایران بر اساس رویکردهای مختلف از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵

رویکرد پیش‌بینی	۱٤۰۱	۱٤۰۲	۱٤۰۳	۱٤۰٤	۱٤۰٥
شاخص ساده	۳۴۱۶۶۳	۳۶۷۸۷۰	۳۹۳۳۴۳	۴۲۲۶۴۰	۴۵۵۶۰۳
شدت مصرف انرژی	۳۰۲۳۲۰	۳۰۷۶۶۰	۳۱۶۹۷۶	۳۲۲۵۶۰	۳۳۲۳۳۱
خط روند	۳۲۱۶۹۰	۳۹۵۶۲۰	۴۱۰۳۵۹	۴۶۶۲۱۴	۵۰۱۳۰۶
رگرسیون	۳۱۴۲۰۱	۳۲۵۵۷۰	۳۴۲۴۴۰	۳۵۵۴۳۰	۳۶۸۹۵۹
شبکهٔ عصبی	۲۴۶۶۷۰/۱۰	۲۴۷۰۸۰/۸۴	۲۵۰۳۷۰/۳۰	۲۵۶۳۶۳/۷۰	۲۵۷۶۶۰/۱۰

جدول ۸. مقایسهٔ خطای پیش‌بینی مدل‌های مختلف پژوهش

روش	شاخص ساده	شدت مصرف انرژی	خط روند	رگرسیون	شبکهٔ عصبی
میزان خطا	۰/۰۳۱۶۲	۰/۰۰۰۲۵۵	۰/۰۰۰۲۰۱	۰/۰۰۰۱۷۶	۰/۰۲۰۳۲

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی روند مصرف سالیانهٔ برق در ایران با استفاده از چندین روش مدل‌سازی و برای سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ پرداخته است. مدل‌های استفاده‌شده شامل شاخص‌های ساده، شدت مصرف انرژی، خط روند، مدل رگرسیون خطی و شبکهٔ عصبی بودند. نتایج پژوهش به شرح زیر است:

الف- نتایج تحلیل و پیش‌بینی متغیرهای مستقل

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد تغییرات سالیانهٔ جمعیت ایران تا سال ۲۰۶۲ به منفی ۳۰۱۰۶ هزار نفر (معادل ۳۰۱۰۶۰۰۰ نفر) خواهد رسید. بر اساس پیش‌بینی‌های سازمان ملل، جمعیت ایران تا سال ۱۴۰۵ به ۸۹۹۷۱۴۸۴ نفر می‌رسد.

روند درآمد سرانهٔ کشور از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ صعودی ولی نوسانی بوده است. در سال ۱۳۶۷، کمترین سطح درآمد سرانه معادل ۰/۰۴ میلیارد ریال ثبت شده و پیش‌بینی می‌شود که این مقدار تا سال ۱۴۰۵ به ۰/۰۹ میلیارد ریال افزایش یابد. صندوق بین‌المللی پول نیز پیش‌بینی کرده است که بخش حقیقی اقتصاد در سال ۲۰۲۳ میلادی با نرخ ثابت ۲/۵ درصد رشد خواهد داشت.

میزان بارندگی در ایران نیز از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ نوساناتی را تجربه کرده است؛ شاهد کمترین میزان بارندگی در سال ۱۳۷۸ (۱۵۵ میلی‌متر) و بیشترین مقدار در سال ۱۳۷۱ (۳۷۷ میلی‌متر) بودیم. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که میزان بارندگی تا سال ۱۴۰۵ به ۲۹۷ میلی‌متر در سال برسد.

نوسانات دما نیز در دورهٔ مورد بررسی مشهود است؛ کمترین دما در سال ۱۳۷۱ (۱۵/۷۱ درجهٔ سانتی‌گراد) و بیشترین دما در سال ۱۳۸۹ (۱۸/۷۸ درجهٔ سانتی‌گراد) گزارش شده است. پیش‌بینی‌ها بیانگر افزایش دما تا ۱۸/۱۴ درجهٔ سانتی‌گراد در سال ۱۴۰۵ است.

ب- نتایج تحلیل و پیش‌بینی روند مصرف برق

طبق پیش‌بینی‌های انجام‌شده، مصرف برق با استفاده از شاخص‌های ساده از ۱۴۳۴۵ هزار مگاوات در سال ۵۷ به ۳۱۷۷۲۸ هزار مگاوات در سال ۱۴۰۰ رسیده است، که نشان‌دهندهٔ افزایش ۲۲/۱۴ برابری است و متوسط نرخ رشد مصرف برق برابر با ۷/۴۹ درصد برآورد می‌شود. پیش‌بینی می‌شود مصرف برق تا سال ۱۴۰۵ به بیش از ۴۵۵۶۰۳ هزار مگاوات برسد.

شدت انرژی در ایران از سال ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ در حال افزایش بوده و از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۴ رسیده است. پیش‌بینی می‌شود که این رقم از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ به ۰/۴۲ افزایش یابد.

بر اساس پیش‌بینی تابع روند، مصرف برق ایران از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵ به‌ترتیب از ۳۲۱۶۹۰ هزار مگاوات به ۵۰۱۳۰۶ هزار مگاوات خواهد رسید.

تحلیل مدل رگرسیون نشان می‌دهد روند مصرف برق تحت تأثیر درآمد سرانه و مصرف دورهٔ قبل است، اما سایر متغیرهایی نظیر دمای هوا، بارندگی و قیمت انرژی اثر معناداری ندارند. پیش‌بینی مصرف برق در سال ۱۴۰۵ با مدل رگرسیون برابر ۳۶۸۹۵۹ هزار مگاوات است.

در روش شبکهٔ عصبی، متغیرهای بررسی‌شده شامل درآمد سرانه، شدت انرژی، میانگین دما و میانگین بارندگی است. بر اساس نتایج، مصرف برق در سال ۱۴۰۵ به مقدار ۲۵۷۶۶۰ هزار مگاوات خواهد رسید.

نتایج پیش‌بینی از رویکردها و مدل‌های مختلف، نشان‌دهندهٔ عدم یکسانی در دقت پیش‌بینی‌ها است. مقایسهٔ نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیار متوسط قدر مطلق خطا، بیان‌کنندهٔ برتری مدل رگرسیون در پیش‌بینی روند مصرف برق است. با این‌حال، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در سنجش عملکرد مدل‌ها، معیارهای متنوعی وجود دارد و به همین‌دلیل، استفاده از این معیارها ممکن است نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشد. به منظور ساده‌سازی فرایند تصمیم‌گیری، می‌توان به جای استفاده از تمامی معیارها، مقادیر حداقل، حداکثر یا میانگین پیش‌بینی مدل‌های مختلف را همانند جدول ۹ به عنوان مبنای سیاست‌گذاری در نظر گرفت. این رویکرد به ما این امکان را می‌دهد که بر چالش انتخاب یک مدل سیاست‌گذاری مناسب غلبه کنیم و به یک نتیجه‌گیری جامع و کارآمد در زمینهٔ پیش‌بینی مصرف برق دست یابیم.

جدول ۹. پیش‌بینی کمترین و بیشترین حد مصرف برق بر اساس نتایج پژوهش

سال	Max مصرف برق	Min مصرف برق	میانگین
۱۴۰۱	۳۴۱۶۶۳ (شاخص ساده)	۲۴۶۶۷۰/۰۱ (شبکهٔ عصبی)	۲۹۴۱۶۶/۵
۱۴۰۲	۳۹۵۶۲۰ (خط روند)	۲۴۸۰۷۰/۸۴ (شبکهٔ عصبی)	۳۲۱۳۵۰
۱۴۰۳	۴۱۰۳۵۹ (خط روند)	۲۵۰۱۷۳/۳۰ (شبکهٔ عصبی)	۳۳۰۲۶۶
۱۴۰۴	۴۶۶۲۱۴ (خط روند)	۲۵۶۳۶۳/۷۰ (شبکهٔ عصبی)	۳۶۱۲۸۸
۱۴۰۵	۵۰۱۳۰۶ (خط روند)	۲۵۷۶۶۰/۱۰ (شبکهٔ عصبی)	۳۷۹۴۸۳

با توجه به پیش‌بینی‌ها، میزان مصرف انرژی برق در افق ۱۴۰۵ بیشینه‌ای برابر ۵۰۱۳۰۶ هزار مگاوات و کمینه‌ای معادل ۲۵۷۶۶۰ هزار مگاوات خواهد داشت. ظرفیت تولید برق کشور ۳۳۷۷۰۰ هزار مگاوات است که توان تأمین نیاز مصرف در حالت حداکثری را ندارد. بنابراین، نیاز به برنامه‌ریزی میان‌مدت ۳ ساله از سال آتی به‌شدت احساس می‌شود.

درآمد سرانه با ضریب ۰/۸۴ و سطح معناداری۰/۰۳ بر مصرف انرژی برق تأثیر دارد. در صورت تغییر ۱ درصدی در درآمد سرانه و با فرض ثابت بودن سایر شرایط، میزان مصرف انرژی برق ۸ درصد تغییر خواهد کرد.

این پژوهش به بررسی و مقایسهٔ روش‌های مختلفی مثل شاخص ساده، شدت مصرف انرژی، خط روند، رگرسیون و شبکهٔ عصبی با معیار متوسط قدرمطلق خطا پرداخته است. در مطالعات آتی می‌توان سایر روش‌های ترکیبی، یادگیری ماشینی و دیگر معیارهای سنجش عملکرد استفاده کرد.

منابع

[1]. Goto M, Sueyoshi T. Electric power market reform in Japan after Fukushima Daiichi nuclear plant disaster: Issues and future direction. International Journal of Energy Sector Management. 2015; 9(3):336-60. doi:10.1108/IJESM-05-2014-0009.

[2]. Chapagain K, Kittipiyakul S, Kulthanavit P. Short-term electricity demand forecasting: Impact analysis of temperature for Thailand. Energies. 2020; 13(10):2498. doi:10.3390/en13102498.

[3]. Bhatia R. Energy demand analysis in developing countries: a review. The Energy Journal. 1987; 8:1-33.

[4]. Bhattacharyya SC. Energy economics: concepts, issues, markets and governance. Springer Nature; 2019.

[5]. Olaleye SO, Akinbode SO. Analysis of households' demand for alternative power supply in Lagos State, Nigeria. Curr Res J Soc Sci. 2012; 4(2):121-7.

[6]. Bianco V, Manca O, Nardini S. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models. Energy. 2009; 34(9):1413-21. doi:10.1016/j.energy.2009.06.034.

[7]. Aguilar Madrid E, Antonio N. Short-term electricity load forecasting with machine learning. Information. 2021; 12(2):50. doi:10.3390/info12020050.

[8]. Mirza FM, Bergland O. The impact of daylight saving time on electricity consumption: Evidence from southern Norway and Sweden. Energy Policy. 2011; 39(6):3558-71.

[9]. Sewdien VN, Preece R, Torres JR, Rakhshani E, van der Meijden MAMM. Assessment of critical parameters for artificial neural networks based short-term wind generation forecasting. Renew Energy. 2020; 161:878-92. doi:10.1016/j.renene.2020.07.117.

[10]. International Energy Agency (IEA). Global energy review 2019. IEA; 2020. Available from: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019. License: CC BY 4.0.

[11]. Zahedi R, Sadeghitabar E, Khazaee M, Faryadras R, Ahmadi A. Potentiometry of wind, solar and geothermal energy resources and their future perspectives in Iran. Environ Dev Sustain. 2024 Mar 9; 1-27. doi:10.1007/s10668-024-04633-2.

[12]. Ubani O. Determinants of the dynamics of electricity consumption in Nigeria. OPEC Energy Rev. 2013; 37(2):149-61. doi:10.1111/opec.12004.

[13]. Wahid F, Ullah H, Ali S, Jan SA, Ali A, Khan A, Bibi M. The determinants and forecasting of electricity consumption in Pakistan. Int J Energy Econ Policy. 2021; 11(1):241-8.

[14]. Ayasyifa S. Determinants of electricity consumption in Indonesia. Jurnal Ilmu Ekonomi Terapan. 2022; 7(1). doi:10.20473/jiet.v7i1.30777.

[15]. O'Neill BC, Chen BS. Demographic determinants of household energy use in the United States. Popul Dev Rev. 2002; 28:53-88.

[16]. Lin B, Raza MY. Analysis of electricity consumption in Pakistan using index decomposition and decoupling approach. Energy. 2021; 214:118888. doi:10.1016/j.energy.2020.118888.

[17]. Park J, Yun SJ. Social determinants of residential electricity consumption in Korea: Findings from a spatial panel model. Energy. 2022; 239:122272. doi:10.1016/j.energy.2021.122272.

[18]. Zhang C, Liao H, Mi Z. Climate impacts: temperature and electricity consumption. Nat Hazards. 2019; 99(3):1259-75. doi:10.1007/s11069-019-03653-w.

[19]. Owoeye T, Olanipekun DB, Ogunsola AJ, Kutu AA. Energy prices, income and electricity consumption in Africa: The role of technological innovation. Int J Energy Econ Policy. 2020; 10(5):392-400.

[20]. Moghadam SS, Gholamian MR, Zahedi R, Shaqaqifar M. Designing a multi-purpose network of sustainable and closed-loop renewable energy supply chain, considering reliability and circular economy. Appl Energy. 2024 Sep 1; 369:123539. doi:10.1016/j.apenergy.2024.123539.

[21]. Khah MV, Zahedi R, Eskandarpanah R, Mirzaei AM, Farahani ON, Malek I, Rezaei N. Optimal sizing of residential photovoltaic and battery system connected to the power grid based on the cost of energy and peak load. Heliyon. 2023 Mar 1; 9(3). doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14414.

[22]. Shaghaghi A, Zahedi R, Ghorbani M, Ranjbar Z, Arzhangi SS, Keshavarzzadeh M, Alipour H. State estimation for distribution power systems by applying an advanced optimization approach. Expert Syst Appl. 2024 Apr 15; 240:122325. doi:10.1016/j.eswa.2023.122325.

[23]. Ozoh P, Abd-Rahman S, Labadin J, Apperley M. A comparative analysis of techniques for forecasting electricity consumption. Int J Comput Appl. 2014; 88(15).

[24]. Klyuev RV, Morgoev ID, Morgoeva AD, Gavrina OA, Martyushev NV, Efremenkov EA, Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. Energies. 2022; 15(23):8919. doi:10.3390/en15238919.

[25]. Jain PK, Quamer W, Pamula R. Electricity consumption forecasting using time series analysis. In: Advances in Computing and Data Sciences: Second International Conference, ICACDS 2018, Dehradun, India; 2018 Apr 20-21. Revised selected papers, Part II. Singapore: Springer; 2018. p. 327-35. doi:10.1007/978-981-13-1813-9_33.

[26]. Yumuşak R, Özcan EC, Danışan T, Eren T. Electricity consumption forecast by artificial neural networks: The case of Turkey. Proceedings Book. 2019; 31.
[27]. Omidy MR, Omidy N, Asgari H, Jafari Eskandari M. Modeling and forecasting electricity production and consumption in Iran. Futur Stud Manag. 2016; 27(1):71-83. [Persian].
[28]. Fan GF, Wei X, Li YT, Hong WC. Forecasting electricity consumption using a novel hybrid model. Sustainable Cities and Society. 2020; 61:102320. doi:10.5815/ijisa.2021.05.02.
[29]. Yavari K, Zolghadr M. Modeling and forecasting short-term electricity consumption in the country using neural networks and wavelet transform (focusing on environmental and climatic effects). Energy Econ Stud. 2012; 9(33):1-29. [Persian].
[30]. Amiri Domari M, Khateebi Bardsiri O. Forecasting electricity consumption using a combination of neural network and harmony search optimization algorithm. The 5th National Conference on Computer Science and Information Technology; 2018; Babol. Available from: https://civilica.com/doc/810304 [Persian].
[31]. Almuhaini SH, Sultana N. Forecasting long-term electricity consumption in Saudi Arabia based on statistical and machine learning algorithms to enhance electric power supply management. Energies. 2023; 16(4):2035. doi:10.3390/en16042035.
[32]. Botchkarev A. A new typology design of performance metrics to measure errors in machine learning regression algorithms. Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management. 2019; 14:45-76. doi:10.28945/4184.