



Journal of Environmental Research

Vol. 15, No. 29, Spring & Summer 2024

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Print ISSN: 2008-9597 Online ISSN 2008-9590

Sustainable and Optimal Combination of Power Plants in Iran With Emphasis on the Position of Nuclear Power Plants

Document Type
Research Paper

Received
2024/02/17

Accepted
2024/05/26

Babak Kateb¹, Majid Abbaspour², Zahra Abedi³

1. PhD student in Environmental Management- Environmental Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

DOI: 10.22034/eiap.2024.206728



Abstract

Sustainable energy development is one of the requirements for the continued growth and sustainable development of societies and humanity. The main purpose of this study is to plan the supply of sustainable electricity by share of each type of the share of different power plants in the country.

The methodology of this study is applied based on the purpose and has been done by mixed method (documentary, qualitative and quantitative). This research has been collected and analyzed using the data obtained from the study of documents, using (selected model) MESSAGE software and in the form of three reference scenarios, energy sustainability and high fuel price, the optimal composition of the country's power plant until 2050 has been investigated and proposed.

Based on results and the model outputs, the optimal power plant composition in the form of energy sustainability scenario is the priority of combined cycle, nuclear and renewable power plants, respectively. Also, according to the findings, nuclear power plants are in the second place in the reference scenario and the sustainability scenario, and in the third place in the fuel price increase scenario. The results obtained from this study, considering the need for sustainable development of electricity in the country and according to the upstream documents and laws, it is necessary to prioritize the development of power plants, respectively.

Keywords: Sustainable Electricity Supply Planning, Power Plants, MESSAGE Model

Introduction

Sustainable energy development in societies is considered as a requirement for sustainable development of countries. In Iran in recent years, the supply of electricity with an average annual growth of 15.1 percent and its consumption with a growth of 15.4 percent is increasing. Available data indicate that the electricity deficit, especially in recent years, has been achieved through electricity imports, while the average growth of energy supply and demand in the world is lower than in Iran. According to the performance report of the water and electricity industry in 2020, it is observed that the total installed capacity of power plants in 2016 compared to 2015, has increased by about 2.2 percent, while in the same year, the energy sent abroad increased by 19.4% compared to the previous year and the energy received abroad increased by 103.1% compared to the previous year.

There are important and influential variables in national electricity supply planning, including the type of electricity generation technology, final electricity demand, base year and time horizon, load areas, resource constraints and performance constraints, as well as technical and economic specifications, power plants pointed out. This is done in most countries through existing models, the most important of which are the following models: MARKAL, LEAP, MESSAGE, WASP,

Methodology

Energy models are a standard tool for energy planning. In recent years, many efforts have been made to formulate and implement energy planning strategies and various energy models have been proposed in the world. Some of these models have also been implemented in Iran. In this study, the above four models were investigated. In order to select a suitable model for planning the supply of electricity in Iran, the above 4 models with the following indicators were reviewed and evaluated: Objectives, Model assumptions, Methodology, Geographical coverage, Time horizon, Inputs and Outputs.

Results and Discussion

The present research is based on an applied purpose and is a mixed method (documentary, qualitative and quantitative). In this study, the collection of statistics and information, capabilities and bottlenecks of energy supply planning models from the perspective of inputs and outputs as well as previous studies have been studied. The information obtained in this step made it possible to select the appropriate software. The data required to implement the model were performed using the official statistical sources of the country. In order to select the appropriate model, at first the most appropriate software based on AHP method to determine the optimal composition of power plants in the country and then using selected software (MESSAGE) to determine the optimal composition of power plants in the horizon of 2050 was taken.

The hypotheses and main questions of this research are:

Hypothesis 1: The MESSAGE model is the most compatible model for planning the supply of electrical energy with the environment in Iran.

The research questions are as follows:

Question 1: What is the optimal and sustainable composition of the country's power plants in the long run based on environmental considerations?

Question 2: What is the position of nuclear power plants in the optimal and long-term sustainable composition of the country's power plants?

Model selection

To select the most suitable model, the hierarchical process method was used, so that by selecting the appropriate indicators and receiving the opinion of experts, different models of sustainable electricity supply planning for Iran were reviewed and compared by 9 indicators. The decision model for selecting the appropriate model was completed according to the designed questionnaire in the form of pairwise comparisons of the introduced models.

After determining the weight of the nine criteria, in the next step, 4 energy supply planning models were compared in pairs based on each criterion. Then, in order to integrate the relative weights, the weight matrix of the indicators for each energy supply model was multiplied by the weight of the indicators and the energy supply models were ranked. Based on the obtained results, MESSAGE model with a score of 0.1387 and then

LEAP model with a score of 0.0902 are the most suitable models for energy supply planning in Iran. Based on this, the hypothesis of the present study is confirmed.

Determining the optimal composition of the countries power plant

According to previous studies, in order to study and evaluate the energy supply system, it is necessary to consider the interactions of different sub-sectors. For this purpose, the concept of "energy reference system" is introduced, which is used as a framework for analyzing supply models. In this study, the year 2018 as the base year of calculations and planning horizon of energy supply is equal to the total length of the study period in terms of years, which was considered from 2020 to 2050 in 5-year sections. Also, the final demand for electricity was exogenously applied in the electricity supply model. According to the forecasts of the Ministry of Energy, the demand for electricity will be a maximum of 762 TWh at the end of the study period. The forecast of the final electricity demand trend during the planning period 2018 to 2050 has been estimated assuming a decrease in demand, so that from the beginning of the period to 2035 the annual growth of final electricity demand is about 4%, from 2035 to 2045 about 3% and from 2045 About 2.5% has been applied until the end of the period.

In this study, the load areas intended for modeling the country's electricity supply system, the limitations applied in the model and also the technical-economic specifications of power plants, are predicted and applied, as well as scenarios. Also, the scenarios considered in the implementation of the model are: 1) "reference" scenario, 2) "high fuel price scenario" and 3) "energy sustainability scenario"

In response to question No. 1, At the beginning of the period (2018) is equal to 80 GW, which with a growth of 3.04 percent per year at the end of the period will reach 244 GW based on the reference scenario, which is reduced to 66 GW based on the energy stability scenario and At the end of the period, with an annual growth of 2.11 percent, it will reach 177 GW. Also, in the scenario of high fuel prices, the installed capacity has been reduced to 221 GW with an annual growth of 2.75%.

The position of nuclear power plants

The position of nuclear power plants in the optimal and long-term sustainable composition of the country's power plants (Answer to Question 2 of this study), given that the proposed capacity to install nuclear power plants by 2050 in all three scenarios is the same and about 20,000 MW The optimal trend of electricity generation in the reference scenario by various nuclear power plant technologies at the end of the program (2050) will account for about 12 percent (12.29) of the share of electricity generation. In the scenario of energy sustainability, it will account for about 19% (18.96) and in the scenario of high fuel prices, it will account for about 18% (17.84) of electricity production. Therefore, the position of nuclear power plants in the optimal and long-term sustainable composition of the country's power plants was obtained as follows.

Conclusion

Based on results and based on the model outputs, the optimal power plant composition in the form of energy sustainability scenario is the priority of combined cycle, nuclear and renewable power plants, respectively. Also, considering the need for sustainable development of electricity in the country and according to the upstream documents and laws, it is necessary to prioritize the development of power plants, respectively.

References

- Agassi, A. & Vafa Jo, L. 2014. Markal Model in Modeling Energy Systems. Iranian Chemical Engineering. 14(80), 54-63. (In Persian)
- Heydari, K. 2016. Strategic document of comprehensive energy planning of the country. Niro Research Institute. (In Persian)
- Manzour, D.; Farnad, M.; Aryanpor, V. & Shafiei, E. 2014. Impact of Carbon Tax and Fossil Fuel Price on Long-term Development of Iranian Electricity Supply System. JES (Journal of Environmental Studies), 40(2), 415-430. (In Persian)
- Manzour, D. & Majed V. 2011. A Prologue on Energy Planning Methodology. IJE (Iranian Journal of Energy), 14(3), 79-100. (In Persian)

Ministry of Energy, 2019. Energy balance sheet 1398. Deputy Minister of Electricity and Energy, Office of Planning and Macroeconomics of Electricity and Energy, Tehran. (In Persian)

Ministry of Energy, 2021. Performance Report for 1399 Water and Power Industry. Deputy of Research and Human Resources, Information Technology and Statistics Office, Tehran. (In Persian)

Sedighzadeh, M. & Marafet Jo, H. 2018. Introduction of GEP WASP software for power plant planning studies. The 15th Iranian Electrical Engineering Student Conference, Kashan. (In Persian)

ارایه ترکیب پایدار و بهینه نیروگاهی برق در ایران با تاکید بر جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای

بابک کاتب^۱، مجید عباسپور^{۲*}، زهرا عابدی^۳

۱. دانشجوی دکترای مدیریت محیط‌زیست- گرایش اقتصاد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

توسعه پایدار انرژی از الزامات تداوم رشد و توسعه پایدار جوامع و بشریت به حساب می‌آید. هدف اصلی این مطالعه برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار به تفکیک سهم هر یک از انواع نیروگاه‌های تولید برق در کشور می‌باشد. روش‌شناسی این مطالعه بر اساس هدف، کاربردی بوده و با روش ترکیبی (اسنادی، کیفی و کمی) انجام پذیرفته است. این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از مطالعه اسناد، جمع‌آوری و تحلیل‌شده، و نیز با استفاده از نرم‌افزار (منتخب) MESSAGE و در قالب سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت، ترکیب بهینه نیروگاهی کشور تا سال ۱۴۳۰ انجام گرفته است. بر اساس یافته‌های این مطالعه و بر اساس خروجی‌های مدل، ترکیب بهینه نیروگاهی در قالب سناریوی پایداری انرژی به ترتیب اولویت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، هسته‌ای و تجدید پذیر می‌باشند. همچنین مطابق یافته‌ها، نیروگاه‌های هسته‌ای در سناریوی مرجع و سناریوی پایداری جایگاه دوم و در سناریوی افزایش قیمت سوخت جایگاه سوم را به خود اختصاص داده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه با عنایت به لزوم توسعه پایدار عرضه انرژی الکتریکی در کشور و بر اساس اسناد و قوانین بالادستی، لازم است در توسعه نیروگاه‌های برق، به ترتیب در اولویت قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: توسعه پایدار، انرژی، برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار، نیروگاه‌های برق، مدل MESSAGE

سرآغاز

توسعه پایدار انرژی در جوامع، از الزامات توسعه پایدار کشورها قلمداد می‌شود. موضوعاتی از قبیل؛ افزایش تقاضای انرژی، استفاده از سوخت‌های فسیلی و تجدیدپذیر برای تولید انرژی، سرمایه‌گذاری در توسعه انواع حامل‌های انرژی، تکنولوژی‌های تولید انرژی و ... از جمله مباحث اساسی در هر کشوری می‌باشد. در این میان، جایگاه عرضه انرژی الکتریکی به‌عنوان انرژی نهایی عمده موردنیاز بشر از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. بررسی اولیه اسناد بالادستی در حوزه انرژی مشتمل بر: سند ملی راهبرد انرژی و برنامه‌های توسعه پنجم، ششم و هفتم کشور حاکی از نبود برنامه عملیاتی معین و مدون در این حوزه می‌باشد، به‌نحوی که قانون‌گذار بعد از اجرای ۵ برنامه توسعه بعد از انقلاب در کشور، در ماده ۴۵ قانون برنامه ششم توسعه، وزارتخانه‌های نفت و نیرو را با همکاری سایر دستگاه‌های اجرایی ذی‌ربط موظف نموده است تا برنامه اجرایی «طرح جامع انرژی کشور» را تا پایان سال اول اجرای این قانون تهیه و به تصویب هیئت‌وزیران برساند. این مصوبه از یک‌سو از خلأ برنامه عملیاتی مشخص در حوزه انرژی حکایت دارد و از سوی دیگر به‌ضرورت تهیه و تدوین چنین برنامه مدون و موثری تأکید می‌نماید.

بر اساس گزارش‌های وزارت نیرو، در ایران طی سال‌های اخیر، عرضه انرژی الکتریکی با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۵/۱ درصد و مصرف آن با رشدی معادل ۵/۴ درصد در حال افزایش است. اطلاعات در دسترس حاکی از آن است که کسری انرژی الکتریکی به ویژه در سال‌های اخیر از طریق واردات برق انجام پذیرفته است و این در حالی است که متوسط رشد عرضه و تقاضای انرژی در جهان کمتر از ایران است. براساس گزارش عملکرد سال ۱۳۹۹ صنعت آب و برق (Ministry of Energy, 2021)، مشاهده می‌شود که کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۴، حدود ۲/۲ درصد افزایش یافته است و این در حالی است که در همان سال انرژی ارسال شده برون‌مرزی نسبت به سال قبل ۱۹/۴ درصد افزایش و انرژی دریافت شده برون‌مرزی نسبت به سال قبل ۱۰۳/۱ درصد افزایش یافته است. در این میان، ترکیب بهینه و به ویژه پایدار نیروگاه‌های تولید برق در کشور از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

در برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی ملی، متغیرهای مهم و تاثیرگذاری وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نوع تکنولوژی

تولید انرژی الکتریکی، تقاضای نهایی برق، سال پایه و افق زمانی موردنظر، نواحی باری، محدودیت منابع و قیود عملکردی و همچنین مشخصات فنی و اقتصادی نیروگاه‌ها اشاره کرد. این مهم در اغلب کشورها از طریق مدل‌های موجود انجام می‌پذیرد که از جمله مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان از مدل‌های زیر نام برد: (1) MARKAL، (2) LEAP، (3) MESSAGE، (4) WASP و در دهه‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون اقتصاد و نقش پیچیده انرژی در این زمینه، نمی‌توان تصمیمات مربوط به انرژی را به‌سادگی اتخاذ کرد؛ زیرا با توجه به نقش انرژی به‌عنوان یکی از نهاده‌های اصلی تولید، هرگونه تصمیم‌گیری در این زمینه اقتصاد کشورها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در واقع برنامه‌ریزی انرژی به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که در سطح کلان مطالعه ارتباط متقابل بین بخش انرژی و سایر بخش‌های اقتصادی اجتماعی با تأکید بر ملاحظات محیط‌زیستی به‌منظور ایجاد هماهنگی بین عرضه و تقاضا در سطوح محلی، ملی، منطقه‌ای و جهانی با ارزیابی محدودیت‌های سیستم انرژی است (Manzour & Majed, 2011).

هدف اصلی این مطالعه، برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار به تفکیک سهم انواع نیروگاه‌های تولید برق در ایران می‌باشد. همچنین دستیابی به مدلی سازگار با محیط‌زیست جهت تعیین ترکیب بهینه نیروگاه‌های برق در کشور برای عرضه انرژی الکتریکی پایدار به عنوان هدف فرعی این مطالعه مدنظر می‌باشد.

مدل‌های برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی

مدل‌های انرژی، ابزاری استاندارد برای برنامه‌ریزی‌های انرژی هستند. در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای فرموله کردن و اجرای راهبردهای برنامه‌ریزی انرژی انجام شده و مدل‌های انرژی مختلفی در جهان ارائه شده‌اند. برخی از این مدل‌ها در ایران نیز اجرا شده‌اند.

مدل تخصیص بازار

مدل مارکال (MARKAL) که مختصر شده مدل تخصیص بازار است، یک مدل کلی است که با ورود داده‌ها می‌تواند برای نمایش تغییرات یک سیستم انرژی خاص در طول یک دوره ۴۰ تا ۵۰ ساله در سطح ملی، منطقه‌ای، استانی یا جوامع کوچک به کار رود. این مدل، یک مدل ریاضی از سیستم انرژی یک یا چند ناحیه

مثال نیروگاه‌های زغال‌سنگ و نیروگاه‌های گاز در ماژول تولید برق. چهار نوع ماژول مختلف وجود دارند که عبارتند از: ماژول‌های ساده، ماژول‌های انتقال و توزیع، ماژول‌های جزیه‌جز و ماژول‌های برق.

مدل سیستم‌های عرضه انرژی

مدل سیستم‌های عرضه انرژی (MESSAGE) که مدل سیستم‌های عرضه انرژی و تأثیرات محیط‌زیستی آن‌هاست، یک مدل برنامه‌ریزی خطی پویاست که هزینه تنزیل شده کل عرضه انرژی را در طول یک افق زمانی مفروض حداقل می‌کند. هدف اصلی مدل، ایجاد تعادل بین تقاضای انرژی ثانویه (یا نهایی) و عرضه منابع انرژی اولیه از طریق فناوری‌های مختلف است. مهم‌ترین محدودیت‌های مدل بیانگر محدودیت‌هایی بر روی سرعت افزایشی فناوری‌ها، دسترسی منابع بومی و وارداتی و روابط فناورانه است. مهم‌ترین ویژگی‌های متمایز مدل، لحاظ کردن نواحی بار برای تقاضای برق، تقسیم‌بندی منابع به طبقاتی بر حسب هزینه و در نظر گرفتن تأثیرات محیط‌زیستی راهبردهای عرضه انرژی است. خروجی مدل برای توصیف سناریوهای عرضه انرژی به کار می‌رود (Heydari, 2016).

مدل برنامه‌ریزی نیروگاه‌های هسته‌ای

مدل برنامه‌ریزی نیروگاه‌های هسته‌ای (WASP) به ویژه نسخه WASP-IV مانند مدل‌های پیش از خود برای یافتن سیاست بهینه اقتصادی برای توسعه تولید سیستم برق بر اساس محدودیت‌هایی که کاربر تعیین می‌کند، طراحی شده است. این مدل از برآورد احتمالی برای هزینه‌های تولید سیستم، هزینه انرژی تامین نشده و قابلیت اطمینان سیستم، از تکنیک برنامه‌ریزی خطی برای تعیین سیاست بهینه توزیع که محدودیت‌های برون‌زا بر روی انتشار آلاینده‌ها را ارضا می‌کند، در دسترس بودن سوخت و تولید برق توسط برخی نیروگاه‌ها و از روش دینامیک بهینه‌سازی برای مقایسه هزینه سیاست‌های دیگر توسعه سیستم استفاده می‌کند. ساختار ماژولار WASP-IV به کاربر اجازه می‌دهد که نتایج میانی را کنترل کند. مدل WASP-IV، برنامه توسعه بهینه برای یک سیستم تولید برق در طول یک دوره حداکثر ۳۰ ساله را بر اساس محدودیت‌هایی تعیین شده توسط برنامه‌ریز تعیین می‌کند. پاسخ بهینه بر اساس حداقل هزینه کل تنزیل شده به دست می‌آید. محاسبه هر یک از این اجزا در WASP توسط مدل‌های خاصی

است که یک پایه فنی قوی برای ارزیابی دینامیک انرژی در طول یک افق زمانی متشکل از چند دوره ایجاد می‌کند. مدل مارکال تعادل انرژی را در تمام سطوح یک سیستم انرژی شامل منابع اولیه، سوخت‌های ثانویه، انرژی نهایی و خدمات انرژی محاسبه می‌کند و تلاش می‌کند که از طریق سرمایه‌گذاری در تجهیزات، تصمیمات عملیاتی و تصمیمات عرضه انرژی اولیه، خدمات انرژی را با حداقل هزینه کل در یک ناحیه عرضه کند. (Agassi & Vafajo, 2014). بخش اقتصاد انرژی مدل مارکال از تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان حامل‌های انرژی تشکیل شده است. مارکال مانند بیشتر مدل‌های تعادل اقتصادی، بازار رقابت کامل را برای حامل‌های انرژی در نظر می‌گیرد که در آن، تولیدکنندگان به دنبال حداکثر کردن سود و مصرف‌کنندگان به دنبال حداکثرسازی بهره‌وری هستند که حاصل آن، یک تعادل عرضه-تقاضاست که اضافه رفاه کل را حداکثر می‌کند. با این حال، ممکن است مدل مارکال از فرض بازار رقابت کامل با معرفی فروض خاصی که توسط کاربر معرفی می‌شوند، فاصله بگیرد.

مدل برنامه‌ریزی بلندمدت انرژی

مدل برنامه‌ریزی بلندمدت جایگزین‌های انرژی (LEAP) اولین بار در موسسه محیط‌زیست استکهلم واقع در مرکز موسسه تلوسو با حمایت و همکاری بسیاری از سازمان‌های دیگر توسعه یافت. در سال ۱۳۹۵، مدل LEAP دارای بیش از ۵۰۰۰ هزار کاربر در بیش از ۱۷۰ کشور جهان شد. این مدل، دارای چارچوب حسابداری، کاربرپسند، سناریو-محور و شامل ابزار مدل‌سازی هم‌زمان انرژی و محیط‌زیست است. مدل LEAP یک سیستم انرژی را به صورت تمام و کمال در برمی‌گیرد و امکان تحلیل هر دو دسته فناوری‌های عرضه و تقاضا و همچنین اثرات کلی سیستم را امکان‌پذیر می‌سازد (Heydari, 2016). LEAP یک مدل تقاضامحور است. این مدل به پیش‌بینی تقاضای انرژی می‌پردازد و بر اساس این تقاضای پیش‌بینی شده، برنامه تبدیل در LEAP به شبیه‌سازی عرضه و فرایندهای تبدیل می‌پردازد تا از کفایت منابع اولیه به‌منظور برآورده ساختن تقاضا و مقاصد صادراتی اطمینان حاصل کند. سیستم تبدیل دارای دو سطح تحلیل است: سطح ماژول و سطح فرایند. سطح ماژول، صنایع و بخش‌های انرژی را ارایه می‌کند، برای مثال، تولید برق، پالایشگاه، تولید زغال‌چوب و توزیع گرمایش و سطح فرایند به توصیف فناوری‌های مجزا و گروهی در یک ماژول می‌پردازد، برای

- احتمالات وضعیت آب‌وهوای کشور در دوره‌های مختلف (کم‌آبی، پرآبی، متوسط، ...)
- انتشار آلاینده‌ها
- محدود کردن ترکیب‌های توسعه‌ای نیروگاه‌ها. (Sedighizadeh & Marefat Jo, 2018)
- بر اساس بررسی‌های انجام یافته، ویژگی‌های مدل‌های عرضه انرژی الکتریکی برشمرده در قالب جدول (۱) ارائه شده است.

صورت می‌گیرد تا ویژگی‌های پیش‌بینی بار، ویژگی‌های نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ویژگی‌های نیروگاه‌های برقی، شرایط آب و هوایی و هزینه انرژی تامین نشده نیز لحاظ شوند. محدودیت‌هایی که در مسئله بهینه‌سازی WASP به کار می‌روند عبارتند از:

- حداقل و حداکثر تولید نیروگاه‌ها
- حد رزرو در نیروگاه‌ها
- قابلیت اطمینان سیستم

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های مدل‌های عرضه انرژی الکتریکی (source: research findings)

ردیف	از منظر	MARKAL	LEAP	MESSAGE	WASP	مزایای مدل
۱	اهداف			*		برنامه‌ریزی میان‌مدت و بلندمدت، تحلیل سیاست‌های انرژی، توسعه سناریوها
۲	مفروضات			*		تعیین جریان بهینه انرژی از منابع اولیه تا تقاضای نهایی، ارائه ترکیبی از گزینه‌های عرضه ممکن با کمترین هزینه
۳	متدولوژی	*	*	*	*	بهینه‌سازی
۴	پوشش جغرافیایی		*	*		محلی، ملی، منطقه‌ای، بین‌المللی
۵	افق زمانی	*	*	*	*	میان‌مدت، بلندمدت
۶	ورودی‌ها			*		منابع انرژی اولیه، تقاضای انرژی، پایگاه فناوری‌ها مانند بازده هزینه‌ها و آلاینده‌ها، محدودیت‌های صادرات و واردات و نرخ‌های نفوذ فناوری
۷	خروجی‌ها			*		تخمین مقادیر تمامی متغیرها در بازه زمانی تعیین‌شده، ارائه ترکیب بهینه فناوری‌ها و سوخت‌ها برای تأمین تقاضا در هر بخش

روش‌شناسی مواد و روش بررسی

پژوهش حاضر بر اساس هدف کاربردی می‌باشد و از نظر روش ترکیبی (اسنادی، کیفی و کمی) است. در واقع در این پژوهش داده‌های حاصل از مطالعه اسنادی، کیفی و کمی جمع‌آوری و تحلیل شده است.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب برای تعیین ترکیب بهینه انرژی از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP⁽³⁾) استفاده شد. ابزار تجزیه و تحلیل اطلاعات برای ارائه سیاست‌ها و برنامه‌های آتی توسعه انرژی برق در ایران با استفاده از مدل منتخب عرضه انرژی الکتریکی انجام شده است. ابتدا بر اساس روش AHP مناسب‌ترین نرم‌افزار برای تعیین ترکیب بهینه نیروگاه‌های برق در کشور انتخاب شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار منتخب (MESSAGE)

نسبت به تعیین ترکیب بهینه نیروگاه‌های تولید برق در افق ۱۴۳۰ ه.ش. اقدام شد. در این مطالعه، مدل‌های معروف برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی در جهان، مشتمل بر ۴ مدل برنامه‌ریزی شامل: MARKAL، LEAP، MESSAGE و WASP مورد بررسی قرار گرفت و مدل منتخب از بین آنها انتخاب شده است. سه سناریوی ۱. مرجع، ۲. پایداری انرژی و ۳. قیمت بالای سوخت برای تعیین ترکیب پایدار و بهینه نیروگاهی کشور در این مطالعه موردنظر بوده است. فرضیه و سوال‌های محوری این پژوهش عبارت است از:

فرضیه ۱: مدل MESSAGE سازگارترین مدل برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی با محیط‌زیست است.
پرسش ۱: ترکیب بهینه و پایدار نیروگاه‌های تولید برق کشور در

بلندمدت بر اساس ملاحظات محیط زیستی چیست؟
پرسش ۲: نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیب بهینه و بلندمدت پایدار نیروگاه‌های برق کشور از چه جایگاهی برخوردار است؟

خبرگان، مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار برای کشور ایران، توسط ۹ شاخص زیر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. قابل ذکر است که خبرگان، کارشناسان سازمان انرژی اتمی، وزارت نیرو، وزارت نفت و همچنین برخی اساتید دانشگاه‌های شهر تهران بوده‌اند.

نتایج

انتخاب مدل

با توجه به خصوصیات مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار، در این مطالعه چهار مدل اصلی MARKAL، LEAP، MESSAGE و WASP موردنظر قرار گرفت. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل، از روش فرایند سلسله مراتبی استفاده شد، بدین ترتیب که با انتخاب شاخص‌های مناسب و دریافت نظر

مدل تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل مناسب موردنظر، مطابق پرسشنامه طراحی شده به صورت مقایسه‌های زوجی مدل‌های معرفی شده تکمیل شد. پس از اخذ نظر خبرگان و ترکیب آنها، با استفاده از میانگین هندسی، وزن‌های نسبی شاخص‌ها و وزن مدل‌های مختلف بر اساس شاخص‌ها مطابق با جدول (۲) به دست آمده است.

جدول (۲): اوزان شاخص‌ها در انتخاب مدل بهینه (source: research findings)

شاخص‌ها	وزن (بردار ویژه)	شاخص‌ها	وزن (بردار ویژه)
۱- پوشش حامل‌های مختلف انرژی	۰/۱۶	۶- دسترسی به نرم‌افزار	۰/۲۰
۲- مناسب برای کشورهای در حال توسعه	۰/۱۴	۷- عدم نیاز به داده‌های زیاد	۰/۰۹
۳- استفاده بیشتر در مطالعات موردی	۰/۰۸	۸- روش شناسی، متدولوژی و ابزار ریاضی	۰/۰۹
۴- ماژولار بودن	۰/۰۹	۹- پوشش جغرافیایی	۰/۱۰
۵- کاربرد آسان	۰/۰۵		

نتیجه نهایی به همراه محاسبه وزن‌ها در قالب جدول (۳) ارایه شده است.

پس از تعیین وزن معیارهای نه‌گانه، در گام بعدی ۴ مدل برنامه‌ریزی عرضه انرژی به صورت زوجی بر اساس هر معیار مقایسه شدند. با توجه به تعدد جداول زوجی برای این کار، صرفاً

جدول (۳): اوزان مدل‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف (source: research findings)

شاخص‌ها	یک	دو	سه	چهار	پنج	شش	هفت	هشت	نه
MARKAL	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
LEAP	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۴
MESSAGE	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۴
WASP	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۱

در این مرحله به منظور ادغام وزن‌های نسبی، ماتریس وزن شاخص‌ها برای هر مدل عرضه انرژی در بردار وزن شاخص‌ها ضرب و رتبه‌بندی مدل‌های عرضه انرژی مطابق با جدول (۴) انجام شد.

اساس محاسبات فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده که در قالب ماتریس مقایسه‌ها زوجی ظاهر می‌شود، صورت می‌پذیرد. بنابراین هرگونه خطا و ناسازگاری در مقایسه عناصر، نتیجه نهایی به دست آمده از محاسبات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مرحله، سازگاری ماتریس‌های مختلف تصمیم بررسی و مورد تأیید قرار گرفته است.

اساس محاسبات فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده که در قالب ماتریس مقایسه‌ها زوجی ظاهر

جدول (۴): رتبه‌بندی مدل‌های مختلف عرضه انرژی
(source: research findings)

رتبه	امتیاز	مدل
۱	۰/۱۳۸۷	MESSAGE
۲	۰/۰۹۰۲	LEAP
۳	۰/۰۷۳۵۹	MARKAL
۴	۰/۰۶۷۴	WASP

مطرح می‌شود که از آن به عنوان چارچوب تحلیل مدل‌های عرضه استفاده می‌شود. سیستم مرجع انرژی، شبکه‌ای از تکنولوژی‌های مختلف با ورودی‌ها و خروجی‌های مشخص است که در آن حامل‌های انرژی نظیر نفت خام، گاز، زغال‌سنگ، فرآورده‌های نفتی، برق و ... در سطوح مختلف جریان می‌یابند. سیستم مرجع عرضه انرژی الکتریکی، دربرگیرنده فناوری‌های مختلف تولید برق می‌باشد.

در این مطالعه سال ۱۳۹۷ در حکم سال پایه محاسبات و افق برنامه‌ریزی عرضه انرژی برابر با کل طول دوره مطالعه بر حسب سال است که از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۳۰ به تفکیک مقاطع ۵ ساله در نظر گرفته شد. همچنین تقاضای نهایی برق به صورت برون‌زا در مدل عرضه انرژی الکتریکی اعمال شد. براساس پیش‌بینی‌های وزارت نیرو (Ministry of Energy, 2019)، تقاضای برق حداکثر ۷۶۲ تراوات ساعت در انتهای دوره مطالعه خواهد بود. پیش‌بینی روند تقاضای نهایی برق طی دوره برنامه‌ریزی ۱۳۹۷ تا ۱۴۳۰ با فرض کاهش بودن تقاضا برآورد گردیده است، به نحوی که از ابتدای دوره تا ۱۴۱۵ رشد سالانه تقاضای نهایی برق حدود ۴ درصد، از ۱۴۱۵ تا ۱۴۲۵ حدود ۳ درصد و از ۱۴۲۵ تا پایان دوره حدود ۲/۵ درصد اعمال شده است. با این فرض، پیش‌بینی روند تقاضای نهایی برق طی دوره برنامه‌ریزی در نمودار (۱) نشان داده شده است.

تقاضای برق طی هر روز و در دوره‌های طولانی‌تر نظیر ماه یا سال دچار تغییر می‌شود. برای اعمال این تغییرات در برنامه‌ریزی سیستم، از مفهوم منحنی تداوم بار استفاده می‌شود. مدل MESSAGE برای در نظر گرفتن پراکندگی‌های زمانی و مفهوم تداوم بار، از نواحی باری استفاده می‌کند و تقسیم‌بندی در دو سطح نواحی باری سالانه (جزئی از ۳۶۵) و روزانه (جزئی از ۲۴ ساعت) انجام می‌شود.

در این مطالعه، نواحی باری در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی سیستم عرضه برق کشور، محدودیت‌های اعمال شده در مدل و همچنین مشخصات فنی-اقتصادی نیروگاه‌ها، مطابق مطالعه منظور و همکاران (۱۳۹۳)، پیش‌بینی و اعمال شده است. سناریوهای مورد نظر در اجرای مدل عبارت است از: ۱. سناریوی «مرجع»؛ ادامه روند کنونی، ۲. «سناریوی قیمت بالای سوخت»؛ ثبات قیمت سوخت‌های فسیلی در سطح قیمت‌های فعلی بین‌المللی و ۳. «سناریوی پایداری انرژی»؛ در این سناریو مصرف‌کنندگان بخش‌های مختلف برای صرفه‌جویی در مصرف

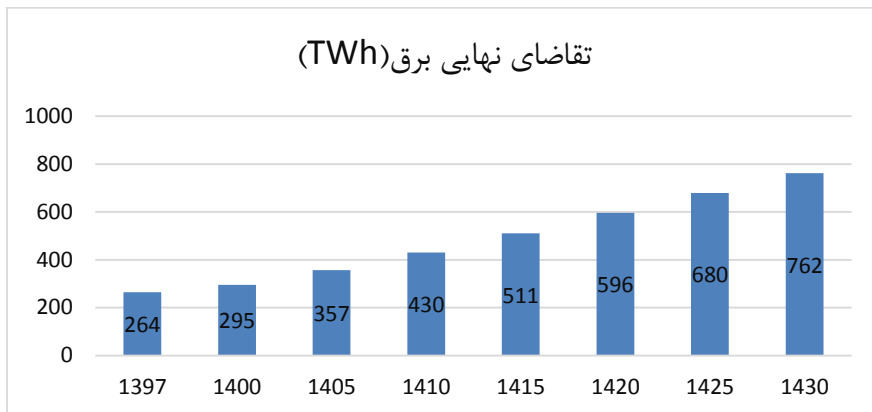
بر اساس نتایج پیش‌گفته، می‌توان گفت مدل MESSAGE با کسب امتیاز ۰/۱۳۸۷ و سپس مدل LEAP با امتیاز ۰/۰۹۰۲ به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای برنامه‌ریزی عرضه انرژی در ایران می‌باشند. بررسی این مدل‌ها برای عرضه انرژی بدون در نظر گرفتن ملاحظات محیط‌زیستی این نتیجه را در پی داشته است و بر اساس قابلیت‌های فنی مدل‌ها و نرم‌افزارها این رتبه‌بندی انجام شده است. در ادامه بر اساس نظر خبرگان و تحلیل کیفی صورت گرفته مجدداً مدل‌ها مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند. بر اساس تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به صورت زوجی مقایسه شدند و سپس رتبه‌بندی آنها با لحاظ کردن ملاحظات محیط‌زیستی انجام شده است که در ادامه نتیجه رتبه‌بندی قابل مشاهده است. لذا فرضیه مطالعه حاضر مبنی بر این که، «مدل MESSAGE سازگارترین مدل برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی با محیط‌زیست است»، مورد تایید قرار می‌گیرد.

جدول (۵): فناوری‌های مختلف تولید برق در سیستم مرجع عرضه انرژی الکتریکی در کشور منبع: (Manzour & et al., 2014)

۱- نیروگاه‌های بخاری	۲- نیروگاه‌های توربین گازی
۳- نیروگاه‌های سیکل ترکیبی	۴- نیروگاه‌های دیزلی
۵- نیروگاه‌های زغال سنگ	۶- نیروگاه هسته‌ای
۷- سیستم‌های حرارتی- خورشیدی	۸- نیروگاه‌های زمین گرمایی
۹- نیروگاه‌های آبی	۱۰- نیروگاه‌های بادی
۱۱- نیروگاه‌های زیست‌توده (لندفیل‌ها و زباله‌سوز)	۱۲- نیروگاه‌های پیل سوختی
۱۳- نیروگاه‌های فتوولتائیک	۱۴- نیروگاه توربین‌های انبساطی

ارایه ترکیب بهینه نیروگاهی کشور

مطابق مطالعات پیشین، به منظور مطالعه و بررسی سیستم عرضه انرژی لازم است تاثیرات متقابل زیر بخش‌های مختلف در آن مدنظر قرار گیرد. بدین منظور مفهوم «سیستم مرجع انرژی»



نمودار (۱): پیش بینی تقاضای بلندمدت برق در کشور منبع: (Ministry of Energy, 2019).

در پاسخ به پرسش شماره ۱، تحت عنوان، «ترکیب بهینه و پایدار نیروگاه‌های تولید برق کشور در بلندمدت بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی چیست؟»، نتایج حاصل از اجرای مدل در بخش روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی، حاکی از آن است که ظرفیت بهینه نیروگاهی موردنیاز تا انتهای دوره بر اساس سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت به ترتیب در نمودارهای (۲)، (۳ و ۴) نشان داده شده است. ظرفیت نصب شده در ابتدای دوره (سال ۱۳۹۷) معادل ۸۰۳۱۳ مگاوات معادل ۸۰ گیگاوات می‌باشد که با رشدی معادل ۳/۰۴ درصد در سال در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع به ۲۴۳۹۵۰ مگاوات یا ۲۴۴ گیگاوات خواهد رسید که این رقم بر اساس سناریوی پایداری انرژی به میزان ۶۶۶۱۰ مگاوات یا ۶۶ گیگاوات کاهش یافته و در پایان دوره با رشد سالانه‌ای معادل ۲/۱۱ درصد به ۱۷۷۳۴۰ مگاوات یا ۱۷۷ گیگاوات خواهد رسید. همچنین در سناریوی قیمت بالای سوخت ظرفیت نصب شده با رشد سالانه‌ای معادل ۲/۷۵ درصد به ۲۲۱۳۰۰ مگاوات یا ۲۲۱ گیگاوات کاهش یافته است.

نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در سناریوی مرجع همواره از یک روند صعودی برخوردار می‌باشند و ظرفیت اسمی این نوع نیروگاه‌ها از حدود ۲۴۹۲۳ مگاوات در سال ۱۳۹۷ با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۴/۸۱ درصد به ۱۲۰ هزار مگاوات در سال ۱۴۳۰ خواهد رسید. در سناریوی پایداری انرژی، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نیز با افزایش روبه‌رو خواهد بود و با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۴/۲۴ درصد به ۷۲ هزار مگاوات در سال ۱۴۳۰ افزایش می‌یابد. در سناریوی قیمت بالای سوخت، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با افزایش قابل توجهی روبه‌رو خواهد بود و با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۴/۹۸ درصد به ۱۲۴ هزار

برق اهتمام جدی خواهند داشت. بهبود راندمان تجهیزات مصرف‌کننده انرژی، بهره‌برداری مناسب از تجهیزات، رعایت دمای آسایش و رعایت استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان سازی از جمله اقداماتی است که در این سناریو مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در این سناریو ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، آبی، زمین گرمایی، زیست توده) افزایش می‌یابد تا به نوعی از منابع فسیلی کمتر استفاده شود و برای نسل‌های آینده نیز مشکل ایجاد نشود و هم به حفظ محیط‌زیست کمک حداکثری نمود.

قیمت سوخت‌های فسیلی در ابتدای دوره در هر سه سناریو، قیمت‌های بین‌المللی سال ۲۰۱۸ در نظر گرفته شده است و در طول دوره مطالعه از یک روند افزایشی مطابق سناریوی مرجع دپارتمان انرژی ایالات متحده و به میزان ۲/۵ درصد در سال برخوردار است. همچنین در این مطالعه نرخ رشد اقتصادی، نرخ رشد جمعیت، سهم بخش‌های اقتصادی از تولید ناخالص داخلی، روند توسعه فناوری، میزان تقاضای نهایی برق و سطح مبادلات برق (واردات و صادرات) در هر سه سناریو یکسان در نظر گرفته شده است.

در سناریوی مرجع، شاخص شدت انرژی ادامه روند موجود خواهد بود و اقدامات و راهکارهای جدیدی توسط بخش‌های مصرف‌کننده انرژی برق در جهت بهبود و اصلاح الگوی مصرف انرژی برق و صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف برق انجام نخواهد شد. بنابراین میزان تقاضای برق در طول دوره مطالعه با در نظر گرفتن مفروضات فوق و با استفاده از مطالعه دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو تحت عنوان «برنامه بلندمدت توسعه بخش انرژی کشور» سالانه ۳/۴ درصد رشد خواهد یافت.

نیروگاه‌های فتوولتائیک و زیست‌توده از سال ۱۴۲۰ به بعد با رشد فزاینده‌ای روبه‌رو خواهند شد.

- سهم نیروگاه‌های بادی در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت در پایان سال ۱۴۳۰ به ترتیب حدود ۱۴، ۱۵/۷۸ و ۱۳/۵ درصد خواهد بود. اما میزان رشد سالانه نیروگاه‌های بادی در سناریوی مرجع ۴۶ درصد، در سناریوی پایداری انرژی ۷۰ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت ۴۰/۳ درصد بوده است که کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی بعد از سال ۱۴۱۰ در هر سه سناریو از رشد قابل توجهی برخوردار می‌شود به طوری که نصب و راه‌اندازی بیش از حدود ۳۰ هزار مگاوات توربین بادی در افق مطالعه در هر سه سناریو پیشنهاد می‌شود. این موضوع به دلیل بازنشستگی نیروگاه‌های فسیلی موجود و جایگزینی آنها با نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیرآبی نظیر بادی است.

- سهم نیروگاه‌های زیست توده در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت در پایان سال ۱۴۳۰ به ترتیب حدود ۰/۳، ۳/۹۵ و ۳/۶ درصد خواهد بود.

- سهم نیروگاه‌های فتوولتائیک در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت در پایان سال ۱۴۳۰ به ترتیب حدود ۰/۸۲، ۶/۷۶ و ۵/۸۷ درصد خواهد بود.

- در خصوص سهم نیروگاه‌های زیست توده و فتوولتائیک در سناریوی مرجع رشد چندانی مشاهده نمی‌شود ولی در دو سناریوی پایداری انرژی و سناریوی قیمت بالای سوخت در سه دوره آخر یعنی از سال ۱۴۲۰ به بعد با رشد قابل توجهی روبه‌رو و سهم زیادی را به خود اختصاص خواهند داد و این نوع نیروگاه‌ها به شدت رقابت‌پذیر خواهند شد.

- نیروگاه‌های هسته‌ای در سناریوی مرجع تا سال ۱۴۱۰ و در دو سناریوی پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت تا سال ۱۴۲۰ سهم اندکی را به خود اختصاص داده‌اند. به طوری که در سناریوی مرجع تا سال ۱۴۱۰ تنها ۱۰۲۰ مگاوات ساعت یعنی همان ظرفیت موجود سال پایه باقیمانده است ولی در ادامه با یک روند افزایشی در پایان دوره به ۱۵ هزار مگاوات خواهد رسید. در سناریوی پایداری انرژی و سناریوی قیمت بالای سوخت تا سال ۱۴۰۵ همان ظرفیت سال پایه (هزار مگاوات) باقی می‌ماند، تا سال ۱۴۲۰ ظرفیت به ۳ هزار مگاوات و در ادامه تا پایان دوره ۲۰ هزار مگاوات به ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای اختصاص داده شده است. دلیل اصلی

مگاوات در سال ۱۴۳۰ افزایش می‌یابد که دلیل این رشد، افزایش قیمت سوخت و به تبع آن راندمان بالای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است.

مجموع نیروگاه‌های حرارتی رایج کشور نظیر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری و گازی در ابتدای دوره حدود ۸۰/۷۲ درصد ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که این سهم در سناریوی پایداری انرژی حدود ۸۸ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت ۸۰ درصد در افق مطالعه از یک روند صعودی برخوردار بوده و در سال ۱۴۳۰ بر اساس سناریوی مرجع تنها ۶۶ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاهی در کشور به این گونه نیروگاه‌ها اختصاص داده خواهد شد و بر اساس سناریوی پایداری انرژی، نزدیک به ۵۱/۸۷ درصد از نیروگاه‌ها به نیروگاه‌های حرارتی فوق و در سناریوی قیمت بالای سوخت نزدیک به ۵۹/۴۲ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاهی به نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) اختصاص یافته است. مهمترین دلیل این افت حذف تدریجی نیروگاه‌های بخاری به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در مقایسه با سایر نیروگاه‌های حرارتی و راندمان نسبتاً پایین آنها در کنار افزایش قیمت سوخت می‌باشد. اما نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل راندمان بالا و هزینه نسبتاً پایین در مقایسه با سایر گزینه‌های نیروگاهی، در افق مطالعه تقریباً بدون رقیب باقی خواهند ماند.

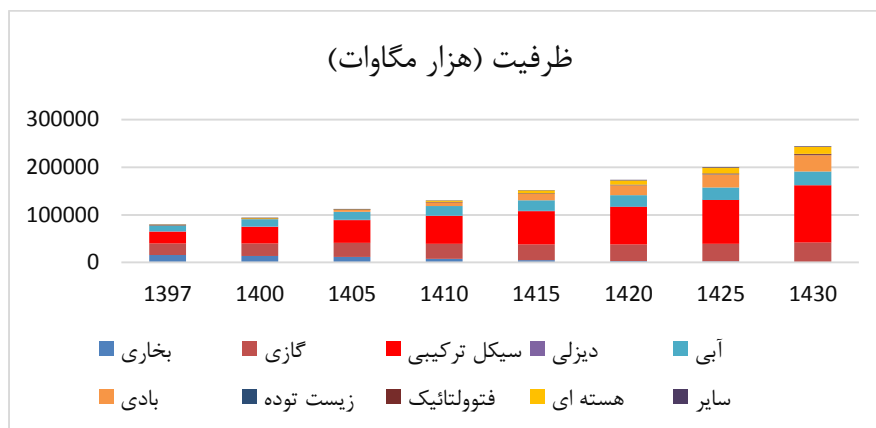
نیروگاه‌های برق آبی در هر سه سناریو از یک روند صعودی برخوردار می‌باشند و ظرفیت اسمی این نوع نیروگاه‌ها در سناریوی مرجع از حدود ۱۲ هزار مگاوات در سال ۱۳۹۷ با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۲/۴۱ درصد به ۲۹ هزار مگاوات در سال ۱۴۳۰ خواهد رسید. در سناریوی پایداری انرژی، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های برق آبی با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۲/۲۸ درصد به ۱۶ هزار مگاوات در سال ۱۴۳۰ افزایش می‌یابد. در سناریوی قیمت بالای سوخت، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های برق آبی با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۱/۴۲ درصد به ۱۷ هزار مگاوات در سال ۱۴۳۰ افزایش می‌یابد. روند نزولی ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی در دو سناریوی قیمت بالای سوخت و پایداری انرژی به دلیل افزایش قیمت حامل‌های سوخت و همچنین بحث صرفه‌جویی و پایداری است.

ظرفیت اسمی نیروگاه‌های تجدیدپذیر (بادی، زیست توده و فتوولتائیک) به این شرح است که:

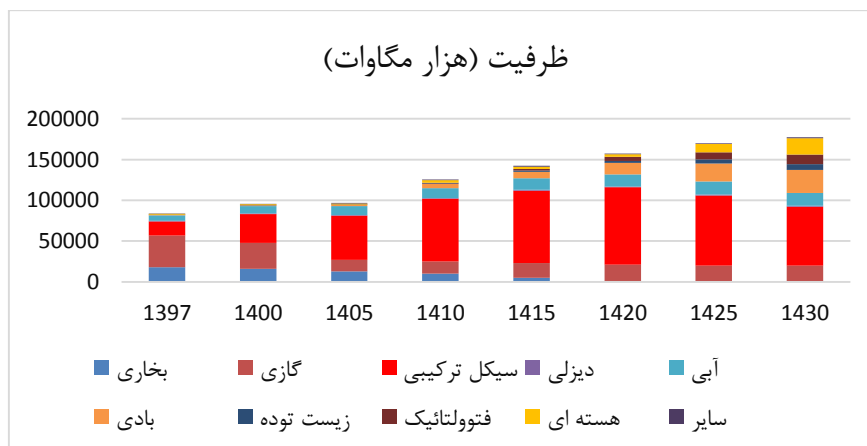
- در سناریوی مرجع نیروگاه‌های بادی از سال ۱۴۱۰ به بعد،

قابل ملاحظه‌ای پیدا نموده، به نحوی که تا سال ۱۴۳۰ ایجاد ۲۰ هزار مگاوات نیروگاه هسته‌ای در هر دو سناریو توسط مدل پیشنهاد می‌گردد. پیشنهاد مدل برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای عملاً به اواخر دوره برنامه‌ریزی مرتبط می‌شود. دلیل این امر هم کاهش قابل توجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آن تا سال ۱۴۲۰ (۳۶ هزار دلار بر کیلووات) و همچنین افزایش تدریجی قیمت سوخت‌های فسیلی و به ویژه گاز طبیعی (حدود ۴۰ سنت بر متر مکعب) است. همچنین بر اساس نتایج تحلیل مدل می‌توان گفت، سایر نیروگاه‌ها سهم چندانی در بخش نیروگاهی نخواهند داشت و با رشد اندکی روبه‌رو خواهند شد.

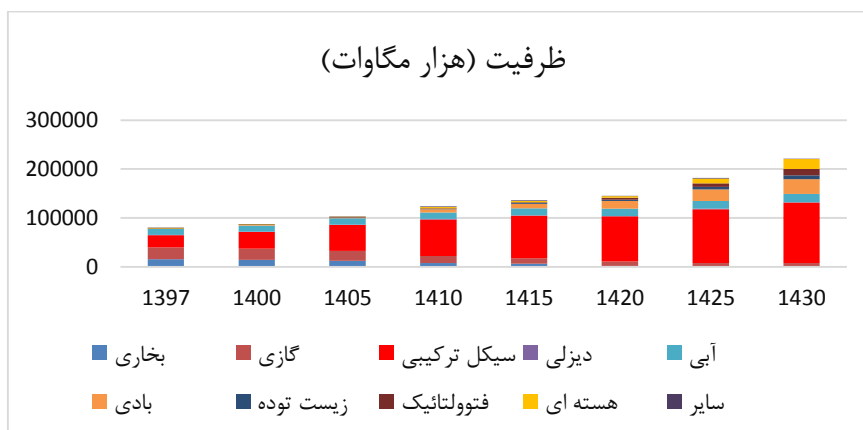
این مساله، مفروضات مربوط به هزینه‌های تولید برق هسته‌ای، به ویژه بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آنها می‌باشد که رقابت‌پذیری آنها را در مقایسه با سایر فناوری‌های جایگزین کاهش داده است. از این رو تا سال ۱۴۱۰ به جز تولید برق از نیروگاه‌های هسته‌ای موجود (واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر) احداث ظرفیت جدیدی در مدل پیشنهاد نشده است ولی از حدود سال ۱۴۱۰ فاز دوم و سوم نیروگاه بوشهر افتتاح خواهند شد. اما ظرفیت‌های جدید دیگری نیز قابل پیش‌بینی است که در این سناریو تا سال ۱۴۳۰ حدود ۱۴/۸ درصد رشد خواهد داشت که معادل ۲۰ هزار مگاوات ظرفیت نصب پیش‌بینی شده است. اما در دو سناریوی دیگر از سال ۱۴۲۰ به بعد (دوره آخر)، این نوع نیروگاه‌ها رقابت‌پذیری



نمودار (۲): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سناریوی مرجع (source: research findings)



نمودار (۳): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سناریوی پایداری انرژی (source: research findings)



نمودار (۴): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سناریوی قیمت بالای سوخت (source: research findings)

روند بهینه تولید برق در سناریوی‌های مختلف و در ترکیب بهینه و بلندمدت پایدار نیروگاه‌های برق کشور نشان می‌دهد در پایان برنامه یعنی سال ۱۴۳۰ جایگاه فناوری‌های نیروگاهی هسته‌ای در رده دوم انواع نیروگاه‌ها قرار دارد.

همان گونه که قابل مشاهده است، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در سناریوی مرجع جایگاه ششم را دارد ولی در دو سناریوی دیگر جایگاه اول در تولید برق را به خود اختصاص داده است. نیروگاه‌های گازی در سناریوی مرجع جایگاه اول، در سناریوی پایداری جایگاه ششم و در سناریوی افزایش قیمت سوخت جایگاه پنجم را دارد. نیروگاه‌های بادی در سناریوی مرجع و سناریوی پایداری جایگاه سوم و در سناریوی افزایش قیمت سوخت جایگاه دوم را به خود اختصاص داده است. نیروگاه‌های هسته‌ای در سناریوی مرجع و سناریوی پایداری جایگاه دوم و در سناریوی افزایش قیمت سوخت جایگاه سوم را به خود اختصاص داده است. سایر نیروگاه‌ها و جایگاه آنها به شرح جدول (۶) می‌باشد.

جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیب بهینه نیروگاهی کشور

جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیب بهینه و بلندمدت پایدار نیروگاه‌های برق کشور (پاسخ پرسش ۲ این مطالعه)، با توجه به این که ظرفیت پیشنهادی برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای تا سال ۱۴۳۰ در هر سه سناریو یکسان و به میزان حدود ۲۰ هزار مگاوات بود (Islamic Council of Iran, 2005)، روند بهینه تولید برق در سناریوی مرجع به وسیله انواع فناوری‌های نیروگاهی هسته‌ای در پایان برنامه (سال ۱۴۳۰) حدود ۱۲ درصد (۱۲/۲۹) از سهم تولید برق را به خود اختصاص خواهد داد. در سناریوی پایداری انرژی حدود ۱۹ درصد (۱۸/۹۶) و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۱۸ درصد (۱۷/۸۴) از تولید برق را به خود اختصاص خواهد داد. بنابراین جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیب بهینه و بلندمدت پایدار نیروگاه‌های برق کشور به شرح زیر به دست آمد.

جدول (۶): جایگاه انواع نیروگاه‌ها بر اساس روند بهینه تولید برق در سناریوی‌های مختلف (بر حسب میلیارد کیلووات ساعت در پایان سال برنامه) (source: research findings)

جایگاه	سناریوی افزایش قیمت سوخت		جایگاه	سناریوی پایداری		جایگاه	سناریوی مرجع		نوع نیروگاه
	پایان برنامه	سال پایه		پایان برنامه	سال پایه		پایان برنامه	سال پایه	
۱۰	۰	۸۷	۱۰	۰	۹۱	۱۰	۰	۸۷	بخاری
۵	۴۹	۳۱	۶	۴۷	۲۸	۱	۴۶۶	۱۶۳	گازی
۱	۱۸۹	۱۵۹	۱	۱۹۳	۱۶۲	۶	۷۶	۳۰	سیکل ترکیبی
۸	۲۳	۰	۹	۲۴	۰	۷	۲۵	۰	دیزلی
۷	۳۴	۱۹	۷	۳۵	۲۰	۸	۴۲	۲۲	آبی
۲	۱۲۷	۵	۳	۱۰۱	۴	۳	۱۰۳	۲	بادی

جایگاه	سناریوی افزایش قیمت سوخت		جایگاه	سناریوی پایداری		جایگاه	سناریوی مرجع		نوع نیروگاه
	پایان برنامه	سال پایه		پایان برنامه	سال پایه		پایان برنامه	سال پایه	
۶	۴۶	۰	۵	۴۹	۰	۴	۸۵	۰	زیست توده
۴	۵۹	۰	۴	۵۵	۰	۵	۸۲	۰	فتولتائیک
۳	۱۱۹	۶	۲	۱۲۴	۵	۲	۱۲۵	۵	هسته‌ای
۹	۲۱	۰	۸	۲۶	۰	۹	۱۳	۰	سایر
	۶۶۷	۳۰۷		۶۵۴	۳۱۰		۱۰۱۷	۳۰۹	مجموع

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری انرژی در کشور در راستای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار به تفکیک سهم انواع نیروگاه‌های تولید برق در ایران می‌باشد.

بدین منظور ابتدا با هدف تعیین و اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری انرژی در کشور در راستای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار به تفکیک سهم انواع نیروگاه‌های تولید برق در ایران چندین سوال مطرح شده است که پاسخ به آنها محقق را به هدف اصلی رهنمون می‌سازد. در واقع در این مطالعه، فرضیه و سوال‌های پژوهش به قرار زیر است:

فرضیه ۱: مدل MESSAGE سازگارترین مدل برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی با محیط‌زیست است.

پرسش ۱: ترکیب بهینه و پایدار نیروگاه‌های تولید برق کشور در بلندمدت بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی چیست؟

پرسش ۲: نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیب بهینه و بلندمدت پایدار نیروگاه‌های برق کشور از چه جایگاهی برخوردار است؟

روش تحقیق در این مطالعه از نظر هدف کاربردی و از نظر جمع‌آوری آمار و اطلاعات کتابخانه‌ای (اسنادی) و میدانی (کیفی و کمی) بوده است. جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز بر اساس منابع آمار رسمی کشور و به روش کتابخانه‌ای (اسنادی) گردآوری شد.

در بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی، بر اساس اهمیت مدل‌های عرضه انرژی الکتریکی در جهان، نمونه آماری موردنظر مشتمل بر ۴ مدل برنامه‌ریزی LEAP، MARKAL، MESSAGE و WASP بود. جمع‌آوری اطلاعات در خصوص قابلیت‌ها و تنگناهای مدل‌های برنامه‌ریزی عرضه انرژی از منظر ورودی‌ها و خروجی‌ها و همچنین مطالعات پیشین مورد بررسی

قرار گرفت. اطلاعات به دست آمده در این مرحله، امکان انتخاب مدل و نرم افزار مناسب را فراهم نمود. داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل با کمک گرفتن از نحوه گردآوری اطلاعات در مطالعات پیشین و براساس دوره زمانی مورد بررسی و مفروضات اصلی مدل، با توجه به متغیرهای اصلی با استفاده از منابع رسمی آماری کشور، از جمله: ترازنامه‌های انرژی، آمارهای وزارت نیرو و شرکت برق کشور، بولتون ماهانه اوپک، ترازنامه هیدروکربوری، و سایر نهادهای حاکمیتی تولید کننده آمار در حوزه انرژی الکتریکی به ویژه نیروگاه‌ها انجام شد.

به منظور انتخاب مدل مناسب برای تعیین ترکیب بهینه انرژی از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد و مناسب‌ترین و سازگارترین مدل بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی انتخاب شد. در نهایت از مدل MESSAGE برای تعیین ترکیب بهینه و پایدار انرژی در ایران استفاده شد و جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای نیز مشخص شد.

برای تعیین ترکیب بهینه و پایدار نیروگاه‌های تولید برق کشور بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی در بلندمدت ابتدا سیستم مرجع انرژی به منزله چارچوب تحلیل مدل‌های عرضه تعیین شده است. سپس مفروضات اصلی و اطلاعات ورودی اجرای مدل از جمله سال پایه (۱۳۹۷) و افق زمانی مورد مطالعه (۱۴۳۰)، میزان تقاضای نهایی برق (که حداکثر ۷۶۲ تراوات ساعت در انتهای دوره مطالعه خواهد بود که در ابتدای ۲۹۵ تراوات ساعت بوده است)، نواحی بار (شامل ۱۲ ناحیه باری سالانه و ۵ ناحیه باری روزانه است)، محدودیت‌های دسترسی به منابع (عامل محدودیت مقدار سوخت‌ها یا ورودی‌های فناوری‌های تولید برق)، مشخصات فنی-اقتصادی نیروگاه‌ها (شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های ثابت و متغیر تعمیر و نگهداری، بازده، ضریب ظرفیت، طول عمر و مدت زمان ساخت) مشخص شدند. در ادامه علاوه بر سناریوی

قیمت بالای سوخت ۴۰/۳ درصد را به خود اختصاص می‌دهند.
- نیروگاه‌های فتوولتائیک (خورشیدی) در پایان دوره در سناریوی مرجع حدود ۰/۸۲ درصد، در سناریوی پایداری انرژی حدود ۶/۷۶ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۵/۸۷ درصد به خود اختصاص می‌دهند.

- نیروگاه‌های زیست توده در سناریوی مرجع حدود ۰/۳ درصد، در سناریوی پایداری انرژی حدود ۳/۹۵ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۳/۶ درصد را به خود اختصاص می‌دهند.

ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای براساس «قانون دستیابی به فناوری صلح‌آمیز هسته‌ای» مصوب مجلس شورای اسلامی در سال ۱۳۸۴، معادل ۲۰ هزار مگاوات برق هسته‌ای، هدف‌گذاری شده است. این در حالی است که با توجه به اولویت تامین انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه‌های تجدیدپذیر در دنیا از یک سو و از سوی دیگر به دلیل محدودیت‌های جدی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در دنیا و به ویژه در ایران به دلیل محدودیت‌های مختلف اعم از، مسایل بین‌المللی، تامین مواد اولیه، تامین منابع مالی، فناوری و ...، توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور یکی از چالش‌های پیش‌رو می‌باشد.

پیشنهادها

نتایج این تحقیق به عنوان یک مطالعه کاربردی می‌تواند توسط برنامه‌ریزان حوزه انرژی مورد استفاده قرار گیرد. سیاست‌ها و برنامه‌های عملیاتی حوزه انرژی باید موجب ارتقای شاخص‌های توسعه پایدار انرژی گردد و در حوزه عرضه انرژی الکتریکی باید برنامه‌های اجرایی در راستای توسعه نیروگاه‌های برق در افق زمانی ۳۰ ساله منطبق با سناریوی پایداری انرژی انجام پذیرد.

یادداشت‌ها

1. MARKet ALlocation model (MARKAL)
2. Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP)
3. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts (MESSAGE)
4. Wein Automatic System Planning Package (WASP)
5. Analytic Hierarchy Process (AHP)

سیستم مرجع انرژی، دو سناریوی دیگر یعنی سناریوی پایداری انرژی و سناریوی قیمت بالای سوخت نیز تعریف شدند. در نهایت مدل در قالب سناریوهای مختلف اجرا شده است که نتایج حاصل از اجرای مدل، روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی را به تفکیک انواع نیروگاه‌ها ارائه نمود.

- ظرفیت نصب شده در ابتدای دوره (سال ۱۳۹۷) معادل ۸۰ گیگاوات می‌باشد که در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع ۲۴۴ گیگاوات (رشد ۳/۰۴ درصد)، سناریوی پایداری انرژی ۱۷۷ گیگاوات (رشد ۲/۱۱ درصد) و در سناریوی قیمت بالای سوخت ظرفیت ۲۲۱ گیگاوات (رشد ۲/۷۵ درصد) خواهد رسید.
- ظرفیت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ابتدای دوره حدود ۲۴۹۲۳ مگاوات می‌باشد که در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع به ۱۲۰ هزار مگاوات (رشد ۴/۸۱ درصد)، در سناریوی پایداری انرژی به ۷۲ هزار مگاوات (رشد ۴/۲۴ درصد) و در سناریوی قیمت بالای سوخت به ۱۲۴ هزار مگاوات (رشد ۴/۹۸ درصد) افزایش می‌یابد که دلیل این رشد، افزایش قیمت سوخت و به تبع آن راندمان بالای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است.

- ظرفیت مجموع نیروگاه‌های حرارتی در ابتدای دوره حدود ۸۰/۷۲ درصد ظرفیت نصب شده را شامل می‌شود و در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع تنها ۶۶ درصد، سناریوی پایداری انرژی ۵۱/۸۷ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت نزدیک به ۵۹/۴۲ درصد را به خود اختصاص خواهند داد. مهمترین دلیل این افت حذف تدریجی نیروگاه‌های بخاری به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در مقایسه با سایر نیروگاه‌های حرارتی و راندمان نسبتاً پایین آنها در کنار افزایش قیمت سوخت می‌باشد. اما نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل راندمان بالا و هزینه نسبتاً پایین در مقایسه با سایر گزینه‌های نیروگاهی، در افق مطالعه تقریباً بدون رقیب باقی خواهند ماند.
- ظرفیت نیروگاه‌های برقی در ابتدای دوره حدود ۱۲ هزار مگاوات می‌باشد که در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع ۲۹ هزار مگاوات (رشد ۲/۴۱ درصد)، در سناریوی پایداری انرژی ۱۶ هزار مگاوات (رشد ۲/۲۸ درصد) و در سناریوی قیمت بالای سوخت به ۱۷ هزار مگاوات (رشد ۱/۴۲ درصد) خواهد رسید.

- نیروگاه‌های بادی در پایان دوره در سناریوی مرجع حدود ۴۶ درصد، در سناریوی پایداری انرژی ۷۰ درصد و در سناریوی

منابع

- Agassi, A. & Vafa Jo, L. 2014. Markal Model in Modeling Energy Systems. Iranian Chemical Engineering, 14(80), 54-63. (In Persian)
- Heydari, K. 2016. Strategic document of comprehensive energy planning of the country. Niro Research Institute. (In Persian)
- Islamic Council of Iran. 2005. The Law of Achieving Peaceful Nuclear Technology. (In Persian)
- Manzour, D.; Farmand, M.; Aryanpor, V. & Shafiei, E. 2014. Impact of Carbon Tax and Fossil Fuel Price on Long-term Development of Iranian Electricity Supply System. JES (Journal of Environmental Studies), 40(2), 415-430. (In Persian)
- Manzour, D. & Majed V. 2011. A Prologue on Energy Planning Methodology. IJE (Iranian Journal of Energy), 14(3), 79-100. (In Persian)
- Ministry of Energy. 2019. Energy balance sheet 2019. Deputy Minister of Electricity and Energy, Office of Planning and Macroeconomics of Electricity and Energy, Tehran. (In Persian)
- Ministry of Energy. 2021. Performance Report for 2020 Water and Power Industry. Deputy of Research and Human Resources, Information Technology and Statistics Office, Tehran. (In Persian)
- Sedighizadeh, M. & Marefat Jo, H. 2018. Introduction of GEP WASP software for power plant planning studies. The 15th Iranian Electrical Engineering Student Conference, Kashan. (In Persian)