J. Strateg. Manag. Stud. Vol. 15, No. 60, Winter 2024, PP: 257-283 ISSN (Print): 2228-6853, (Online): 2676-6744

Journal of Strategic Management Studies

Homepage: https://www.smsjournal.ir/?lang=en

Original Research Article **10.22034/smsj.2023.399599.1861**

Dynamic analysis of electric energy supply system based on climate change trends in Iran

Sona Razzaghy *, PhD student, Department of Industrial Engineering, Ivan k University, Ivan k, Iran
Ali Mohammad Ahmadvand, Professor, Department of Industrial Engineering, Ivan k University, Ivan k, Iran
Marzieh Samadi-Foroushani, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Ivan k University, Ivan k, Iran

ARTICLE INFO

Article History
Received: 29 May 2023
Revised: 24 July 2023
Accepted: 25 August 2023

Keywords
System dynamics,
Supply of electrical energy resources,
Climate change,
Sustainable development

Corresponding Author Email: s-s.razzaghy@eyc.ac.ir

ABSTRACT

The electricity industry has faced challenges such as increasing demand, greenhouse gas emissions, and climate change in the world. Given the increasing trend of electric energy demand and climate change, the need for policymaking in energy efficiency and renewable energies considered as one of the strategic priorities in the country's upstream documents. Due to the complexities of the energy sector, the present study considers the system dynamics approach and models and simulates the dynamics of the country's electric energy supply system with regard to the trends driving changes in electric energy demand due to climate change, population, and economic growth over a 30-year horizon. Next, it identifies and evaluates electric energy supply policies based on adaptation to climate change in Iran. Four strategies have identified: 1) electric energy supply based on management of electric energy supply from non-renewable sources; 2) electric energy supply based on management of electric energy supply from renewable sources; 3) electric energy supply based on management of electric energy demand, and 4) electric energy supply based on adaptation to climate change. Then, by applying the policies of each strategy separately and in combination, the behavior of the target variables of the model was examined and compared. Finally, the combined policies including: 1) reducing supply losses through the efficiency of power plant production factors; 2) reducing energy transmission and distribution losses; 3) reducing per capita electrical energy consumption; 4) developing solar power plants; 5) managing water demand in the food sector; 6) developing heat recovery systems, 7) developing wind power plants, and 8) developing biogas power plants were selected as the best policies for supplying electrical energy based on adapting to the climate change process.

How to cite this article:
Razzaghy, S., Ahmadvand, A. M., & Samadi Foroushani, M. (2024). Dynamic analysis of electric energy supply system based on climate change trends in Iran, *Journal of Strategic Management Studies*, 60(15), 257-283. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22034/smsj.2023.399599.1861

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s)and the source.

J. Strateg. Manag. Stud., Vol. 15, No. 60, Winter 2024
Web**:** http://smsjournal.ir
Doi: **10.22034/smsj.2023.399599.1861**

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The electricity industry, which plays a decisive role in the energy security of countries, has faced many challenges in the world such as increasing demand, greenhouse gas emissions and climate change, reducing fossil fuel reserves and economic conditions. Forecasts have shown that this trend will continue. Considering the continued increase in the demand for electrical energy and climate change, the necessity of policy making in energy efficiency and renewable energies is always considered as one of the strategic priorities in the country's top level documents. In this regard, this research intends to identify the dynamics of the country's electric energy supply system from a macro perspective, paying attention to the trends of drivers of changes in electric energy demand due to climate change, population and economic growth, and based on these dynamics, obtain a correct estimate of the continuation of the existing situation.

Methodology

Considering the complexities governing the energy sector, the dynamic system approach is very suitable for investigating the issue. Therefore, in this research, the main goal is to present a dynamic model of electric energy supply for Iran and analyze the influencing factors of this relationship. Therefore, it has been tried to study the dimensions of electric energy supply under the influence of climate change in the country. Then, with a systemic approach, the behavior of the electrical energy supply system was simulated based on the climate change trend in the 30-year horizon (1400-1430) in the country.

Results and Discussion

The obtained results showed that the simulated model can provide acceptable behavior and results compared to reality. With a pathological and systematic view, the effective factors have been examined in a regular and coordinated function to reveal the existing synergies and trade-offs to identify general strategies for providing electrical energy. In the following, according to the declining behavior of the security of electrical energy resources, the identification and evaluation of the policies of supplying electrical energy resources based on adaptation to the climate changes of Iran was discussed. According to the results of the sensitivity analysis of the dynamic model, four strategies include: (1) Electric energy supply based on the management of electric energy supply from non-renewable sources; (2) Electric energy supply based on the management of electric energy supply from renewable sources; (3) Electric energy supply based on electric energy demand management and (4) Electric energy supply based on adaptation to climate changes were identified. In the following, by applying separately and combined policies of each of the strategies; The behavior of target variables of the model was investigated and compared. Finally, combined policies include: (1) reducing supply losses through the productivity of power plant production factors; (2) reducing energy transmission and distribution losses; (3) Per capita reduction of electrical energy consumption; (4) Development of solar power plants and (5) Management of water demand in the food sector; (6) Development of heat recovery systems, (7) Development of wind power plants and (8) Development of biogas power plants were selected as the best policies for supplying electrical energy resources based on adaptation to the climate change process.

Conclusion

Finally, based on the implementation of selected combined policies in the model, in short, the following solutions will lead to the supply of electrical energy security under the influence of climate: (1) 16% development of nuclear power plants in order to manage the supply of electrical energy from non-renewable and low-carbon sources in order to reduce supply losses through the productivity of production factors. (2) 18% reduction in the ratio of production of gas power plants to the total production of non-renewable power plants and increasing the production of combined cycle power plants through conversion from gas to combined cycle in order to increase the productivity of production factors and manage the supply of non-renewable resources. (3) Consolidation of energy and development of heat recovery systems in industrial

J. Strateg. Manag. Stud., Vol. 15, No. 60, Winter 2024
Web**:** http://smsjournal.ir
Doi: **10.22034/smsj.2023.399599.1861**

units in order to develop heat recovery power plants by 32%. (4) Development of biogas, wind and solar power plants according to the key potentials in the country in order to manage energy supply from renewable sources and reduce greenhouse gas emissions. (5) 5% reduction in energy transmission and distribution losses in order to manage demand and maintain electrical energy security. (6) Reducing per capita energy consumption and reaching the global average due to the increasing demand due to population growth. (7) Management of water demand in the food sector by increasing the irrigation efficiency to about 85%, increasing the area of land under the irrigation network and reducing food losses. It is worth mentioning that in this study, the simulation was based on historical trends, so in the field of research proposals for future research, it is suggested to investigate the effects of climate change under climate change scenarios and climate forecasting models. In this review, technical and economic variables are not taken into consideration. More studies are needed on the technical and cost effects of the variability of renewable sources and the effects of extreme weather events on all elements of the energy system. The impact of severe weather changes compared to gradual changes (such as weather events with higher or lower than normal values) can be significant. prolonged periods of calm winds or drought, or reduced predictability of weather patterns, which may occur under more or more severe climate change; It could be problematic for energy systems with a high share of renewable energy in the future.

Keywords: System dynamics, Supply of electrical energy resources, Climate change, Sustainable development

مطالعات مدیریت راهبردی، دوره ۱۵، شماره ۶۰، زمستان ۱۴۰۳، صفحه: ۲۵۷ تا ۲۸۳ شاپای چاپی: ۶۸۵۳-۲۲۲۸ الکترونیکی: ۶۷۴۴-۲۶۷۶

مطالعات مدیریت راهبردی

Homepage: https://www.smsjournal.ir

مقاله پژوهشی 10.22034/smsj.2023.399599.1861 OPEN ACCESS

تحلیل پویایی سیستم تامین منابع انرژی الکتریکی با روند تغییرات اقلیمی ایران

سونا رزاقی*، دانشجوی دکتری، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران
علی‌محمد احمدوند، استاد، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران
مرضیه صمدی فروشانی، استادیار، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

اطلاعات مقاله

سابقه مقاله
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۳

واژه‌های کلیدی
پویایی سیستم،
تامین منابع انرژی الکتریکی،
تغییر اقلیم،
توسعه پایدار

ایمیل نویسنده مسئول
s.razzaghy@eyc.ac.ir

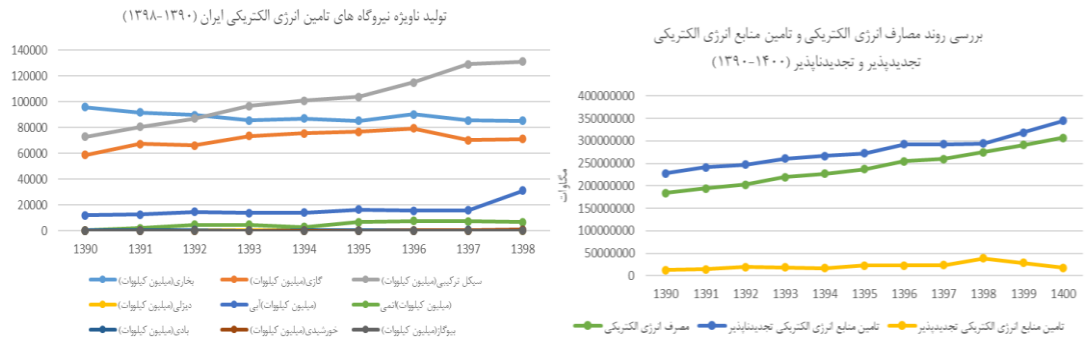
چکیده

صنعت برق که در امنیت انرژی کشورها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد در جهان با چالش‌هایی نظیر افزایش تقاضا، انتشار گازهای گل‌خانه‌ای و تغییرات اقلیمی مواجه شده است. با توجه به روند افزایشی تقاضای انرژی الکتریکی و تغییرات اقلیمی، ضرورت سیاست‌گذاری در بهره‌وری انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر، با نقش یکی از اولویت‌های استراتژیک دراسناد بالادستی کشور مطرح است. به علت پیچیدگی‌های بخش انرژی، پژوهش حاضر رویکرد پویایی سیستم را در نظر گرفته و به مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویایی‌های سیستم تامین انرژی الکتریکی کشور با توجه به روند پیشران‌های تغییرات تقاضای انرژی الکتریکی ناشی از تغییر اقلیم، جمعیت و رشد اقتصادی در افق ۳۰ ساله پرداخته است. در ادامه به شناسایی و ارزیابی سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی ایران پرداخته شده است. چهار راهبرد شامل: ۱) تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر؛ ۲) تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر؛ ۳) تامین انرژی الکتریکی مبتنی مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی و ۴) تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی شناسایی گردید. سپس با اعمال جداگانه و ترکیبی سیاست‌های هر یک از راهبردها؛ رفتار متغیرهای هدف مدل، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در نهایت سیاست‌های ترکیبی شامل: ۱) کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید نیروگاه‌ها؛ ۲) کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی؛ ۳) کاهش سرانه مصرف انرژی الکتریکی؛ ۴) توسعه نیروگاه‌های خورشیدی؛ ۵) مدیریت تقاضای آب در بخش غذا؛ ۶) توسعه سیستم‌های بازیافت حرارتی، ۷) توسعه نیروگاه‌های بادی و ۸) توسعه نیروگاه‌های بیوگاز به مثابهٔ بهترین سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با روند تغییر اقلیم انتخاب گردید.

استناد به این مقاله: رزاقی، سونا؛ احمدوند، علی‌محمد؛ صمدی فروشانی، مرضیه (۱۴۰۳). تحلیل پویایی سیستم تامین منابع انرژی الکتریکی با روند تغییرات اقلیمی ایران. مطالعات مدیریت راهبردی، ۶۰(۱۵)، ۲۵۷-۲۸۳.

۱. مقدمه

منطبق با پیش‌بینی شورای جهانی انرژی، تقاضای انرژی در جهان تا سال ۲۰۵۰ دو برابر می‌شود [۴۴]. آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی، دنیا را با خطرهای جدی مواجه کرده است. مهم‌ترین این مخاطرات، انتشار گازهای گلخانه‌ای است که طی یک قرن گذشته باعث گرم شدن تدریجی زمین و پدید آمدن عوارض ناشی از آن شده است. پیش‌بینی می‌شود در نتیجه مصرف بی‌رویه انرژی، انتشار دی‌اکسیدکربن دست‌کم تا سال ۲۰۳۰ افزایش چشمگیر داشته باشد [۱۶،۲۱]. حاصل این افزایش انتشار، افزایش ۴ الی ۶ درجهٔ سانتی‌گراد در دمای جهانی به دلیل خودتقویتی گرمایش است. گرمایش زمین می‌تواند فرایند شکست بسیاری از سیستم‌های زیستی، اقتصادی و اجتماعی را آغاز کند [۱۸،۴۳،۴۴]. سیستم تامین انرژی می‌تواند انتشار کربن زیادی ایجاد کند در حالی که انتشار کربن به نوبه خود می‌تواند بر تقاضای سیستم انرژی تأثیر بگذارد [۲۸]. بنابراین تامین امنیت عرضه انرژی و مهار سهم انرژی در تغییرات اقلیمی دو چالش اساسی بخش انرژی در مسیر آینده‌ای پایدار هستند [۱،۲۴]. یکی از جنبه‌های مهم بحث جهانی و توانایی کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، سرعت انتقال از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر است [۱۴]. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA[1]) و آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA[2])، انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در حدود ۴۴٪ از کل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۲۰ نقش داشته باشد. همچنین بهبود بازده انرژی، تقریباً به همان اندازه، توانایی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کوتاه‌مدت تا میان‌مدت دارد [۱۷،۲۱]. با توجه به روند افزایشی تقاضای انرژی الکتریکی در کشور ناشی از رشد جمعیت شهری و رشد اقتصادی، ضرورت سیاست‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی، همواره یکی از اولویت‌های استراتژیک دراسناد بالادستی کشور مطرح بوده است، با این وجود بررسی روند توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور مطابق نمودار ۱، حاکی از سهم بسیار اندک در تامین انرژی الکتریکی است. از سوی دیگر به گزارش سازمان هواشناسی کشور مبنی بر گزارش مخاطرات تغییر اقلیم مرجع ملی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC[3]) روند تغییر بارش در ۵۰ سال اخیر کشور (۱۳۵۰–۱۴۰۰) با آهنگ کاهشی ۱/۰۱ میلی‌متر در سال و میانگین دمایی سالیانه در کل کشور نیز با افزایش ۰/۴ درجه سلسیوس در هر دهه مواجه بوده است و در نتیجه روند افزایشی گرمایش در اقلیم ایران، مجموع تبخیر و تعرق بالقوه سالیانه کل کشور با آهنگ افزایشی ۴/۴۷ میلی‌متر در سال شده است [۲۱]. بی‌توجهی به‌مسائل تغییرات اقلیم می‌تواند مانع بزرگی برای توسعه پایدار ایجاد کند. درک خطرات تغییر اقلیم در تامین انرژی و برنامه‌ریزی برای مدیریت خطرات به تصمیم گیرندگان اجازه می‌دهد تا از قبل با تغییرات اقلیمی سازگاری ایجاد کنند.



نمودار ۱. روند مصارف انرژی الکتریکی و تولید نیروگاه‌های تامین منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر کشور (ترازنامه انرژی کشور، ۱۴۰۰)

تغییرات اقلیمی نیز می‌توانند بر انعطاف‌پذیری سیستم‌های انرژی و قابلیت اطمینان تامین انرژی، بر روی سیستم‌های انتقال یا مکان‌های زیرساخت تأثیر بگذارند [۴۶]. بنابر آنچه مطرح شد مسئله تامین انرژی الکتریکی، موضوع ایده‌آلی برای بررسی فعل و انفعالات آب و هوا و اهمیت تاثیر و تاثیر آن‌ها بر هم است. با درک چنین مواردی، این مطالعه یک بررسی در مورد تغییرات اقلیمی و تأثیراتی که می‌تواند بر روی تامین انرژی

[1] International Energy Agency
[2] International Renewable Energy Agency
[3] Intergovenmental Panel on Climate Change

(به طور خاص انرژی الکتریکی) در ایران داشته باشند، ارائه می‌دهد. به طور خلاصه پژوهش پیش رو در جستجوی این است که تغییرات اقلیمی چگونه بر تامین انرژی الکتریکی در ایران موثر است؟ و به تبع آن به دنبال راه‌کارهایی برای سازگاری و در واقع کاهش پیامدهای تاثیرات این تغییرات است.

۲. مبانی و چارچوب نظری تحقیق

آژانس بین‌المللی انرژی، انرژی تجدیدپذیر را انرژی ناشی از فرآیندهای طبیعی، به طور دائمی و پایدار تکرارپذیر و در اشکال مختلف مشتق از خورشید یا حرارت تولیدی از اعماق زمین تعریف و انرژی تولیدی از منابع خورشید، باد، زیست توده، زمین گرمایی، برقابی و سوخت‌های زیستی را انرژی‌های تجدیدپذیر دسته‌بندی می‌کند [۲۰]. توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از راهبردهای کشورها در تامین انرژی مورد نیاز، پاسخگویی به تقاضای انرژی و رفع چالش‌ها و نگرانی‌های محیط‌زیستی سوخت‌های فسیلی و تغییرات اقلیمی آنه‌است. تغییر اقلیم به تغییر جهت‌دار افزایشی و یا کاهشی در میانگین عناصر اقلیمی (بارندگی، درجه حرارت، سرعت باد، تابش خورشید) در یک دورهٔ طولانی بیش از ۳۰ سال گفته می‌شود [۴۵]. در طول سال‌ها تغییرات بسیاری در آب و هوا ایجاد شده است؛ به دلیل پدیده‌های طبیعی مانند زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی، طوفان‌ها، گردبادها و غیره و نیز فعالیت‌های انسانی که منجر به تخریب لایه اوزون، تشکیل باران‌های اسیدی، انتشارگازهای گلخانه‌ای[۱](GHGs) و غیره شده است. تغییر اقلیم با گرم شدن کره زمین که افزایش میانگین دمای سطح زمین است مشخص می‌شود. تغییرات اقلیمی این ظرفیت را دارد که تمامی سیستم‌های طبیعی و انسانی را تحت تاثیر قرار دهد و تهدیدی برای توسعه و بقای انسان است [۳۳]. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) بسیاری از کشورها را برای ظرفیت‌سازی توسعه یا بهبود سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر تشویق می‌کند و بسیاری از کشورها با توجه به توافق‌نامه تغییر اقلیم پاریس با سرمایه‌گذاری بر انرژی‌های تجدیدپذیر تعهداتی را در راستای کاهش انتشار کربن و کاهش تغییرات اقلیم زمین پذیرفته‌اند [۲۰].

با توجه به ضرورت و اهمیت سیستم تامین امنیت منابع انرژی و با توجه به رشد تقاضای انرژی و اثر تغییرات اقلیمی بر روند توسعه سیاست‌های بخش انرژی، مطالعات گسترده‌ای در سال‌های اخیر در این حوزه انجام شده است. پررا و همکاران (۲۰۲۰) به تعیین کمیت و شدت اثرات تغییرات اقلیم بر سیستم‌های انرژی در سوئد پرداخته‌اند. در این پژوهش یک روش بهینه‌سازی تصادفی برای در نظر گرفتن تغییرات تدریجی و رویدادهای شدید ارائه شده است. کاربرد این روش، نشان می‌دهد که عدم قطعیت در پتانسیل انرژی تجدیدپذیر و تقاضا می‌تواند منجر به شکاف عملکردی قابل توجهی (تا ۳۴ درصد) ناشی از تغییرات اقلیمی در آینده شود وکمی‌سازی مناسب اثرات تغییرات آب و هوایی، عملکرد قوی سیستم‌های انرژی را تضمین کرده و نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر را بیش از ۳۰ درصد ممکن می‌سازد [۳۰]. راوستاین[۲] و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر تغییرات اقلیم را بر عرضه منابع انرژی تجدیدپذیر در اروپا بر اساس شبیه‌سازی‌های مدل آب و هوایی جهانی مورد ارزیابی قرار داده‌اند و نشان دادند که اگر الزامات سیستم قدرت از جمله افزایش ظرفیت با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی لحاظ شود، سیستم قدرت می‌تواند با اثرات تغییر آب‌وهوا مقابله کند [۳۳]. سولون و سردا (۲۰۱۹)[۳] در پژوهشی به بررسی مطالعاتی پرداخته که تاثیر تغییرات آب‌وهوایی بر تولید انرژی تجدیدپذیر را بر روی فناوری‌های خورشیدی، بادی، آبی و دیگر فناوری‌های تولید تجدیدپذیر به صورت کمی برآورد ساخته‌اند [۳۹]. کرونین، آناندراجاه و دسنز (۲۰۱۸) به طور انتقادی به مرور پیشینه در مورد اثرات تغییر اقلیم بر روی سیستم تامین انرژی با توجه به منطقه مطالعات، روند نتایج آن‌ها و منابع عدم توافق پرداخته و مدل‌های ارزیابی یکپارچه سیستم انرژی الکتریکی نشان داده‌اند [۷]. کانگ و همکارانش (۲۰۲۰)[۴] بررسی سیستماتیک روی سیستم‌های انرژی برای کاهش تغییرات اقلیمی انجام داده‌اند. در این پژوهش ۱۱۸۴ مقاله منتشر شده در پایگاه داده WOS را بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ بررسی کرده تا تاکید بر آخرین پیشرفت‌ها و اولویت‌های کاری سیستم‌های انرژی را برای محققان و عموم مردم شناسایی کند. در این پژوهش آمده است که یکی از جنبه‌های مهم بحث جهانی و توانایی کاهش تغییرات اقلیمی، سرعت انتقال از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر است [۱۴]. می و همکارانش (۲۰۲۰) در پژوهش خود نشان می‌دهند که (۱) تقاضای برق ملی چین در ۳۰ سال آینده تحت تغییرات اقلیمی حدود ۵۸/۶ درصد رشد خواهد کرد. (۲) برای کاهش تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار، سوخت‌های فسیلی به تدریج با انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین

---

۱ Green House Gases

۲ Ravestein

۳ (Solaun & Cerda, 2019)

۴ (Kang, et al.,2020)

می‌شوند (یعنی سهم سوخت‌های فسیلی از کل عرضه انرژی ۲۲/۵٪ کاهش می‌یابد و سهم برق تولید شده از انرژی‌های تجدید پذیر ۲۷٪ تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد). (۳) در مقایسه با مقدار اوج در سال ۲۰۳۰، انتشار دی اکسید کربن تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۱۵/۱ درصد کاهش می‌یابد [۲۸]. چن و همکارانش (۲۰۲۰)[۱] راه‌هایی برای کاهش تغییرات آب و هوایی با انرژی۱۰۰٪ تجدیدپذیر و پایدار برای جامائیکا ارائه می‌دهد. در این تحقیق راه‌حل مشکلات با اجرای سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS)[۲] و یک مسیر گام به گام به سوی انرژی‌های۱۰۰٪ تجدیدپذیر با رعایت دستورالعمل کاهش تغییرات آب و هوایی تجویز شده توسط هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC) (۲۰۱۸)[۳] به شیوه‌ای که از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر و در نتیجه پایدار باشد، بیان شده است [۶]. گرنات و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات آب و هوا بر تامین انرژی‌های تجدیدپذیر را بررسی کرده‌اند. آن‌ها در پژوهش خود از مدل‌های ارزیابی اقلیمی و یکپارچه برای تخمین این تأثیر بر انرژی‌های تجدیدپذیر کلیدی استفاده کرده‌اند. این تحقیق به طور سیستماتیک تأثیر احتمالی تغییر اقلیم بر ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر و تأثیر متعاقب آن بر سیستم‌های انرژی جهانی و منطقه‌ای را تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم از چهار مدل آب و هوایی ارزیابی کرده است. این پژوهش اثرات آب و هوا بر طیفی از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در سناریوهای مختلف گرمایش آب و هوا را به‌جای یک ارزیابی واحد از یک فناوری تجدیدپذیر ارائه کرده است [۱۱]. یالو و همکاران (۲۰۲۰) اثرات تغییر اقلیم را بر سیستم‌های انرژی در سناریوهای جهانی و منطقه‌ای ارائه کرده است. در پژوهش او، پیشینه مربوط به اثرات پیش‌بینی‌شده تغییرات آب و هوایی بر سیستم‌های انرژی منطقه‌ای و جهانی مرور شده است. اثرات بالقوه تغییر آب و هوا بر سیستم‌های انرژی را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ترکیب کرده و نشان داده که تأثیرات تغییرات آب و هوایی در هر منطقه و منبع انرژی تا حد زیادی متفاوت است. به طور کلی، این مطالعه شکاف‌های دانش در مقیاس منطقه‌ای و جهانی را در مورد تأثیر تغییرات آب و هوا بر سیستم‌های انرژی شناسایی کرده و بینشی ارائه داده که می‌تواند چارچوب‌های تحقیقات و ارزیابی آینده را هدایت کند [۴۶].

در مطالعات داخلی، پژوهش‌هایی در زمینه مدل‌سازی پویایی سیستم اثر تغییر اقلیم بر تامین انرژی وجود دارد. در این زمینه می‌توان به پژوهش امینی ناغانی و همکاران (۱۴۰۰) اشاره کرد که اثر تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقابی سد کارون را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش بررسی اثر تغییراقلیم بر تولید انرژی برقابی سد کارون در دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۹) تحت سناریوهای اقلیمی مختلف انجام شده است. نتایج مدل‌سازی بارش- رواناب حاکی از کاهش رواناب در شرایط تغییر اقلیم به میزان ۳۴ ٪ و ۲۱ ٪ تحت دو سناریوی مختلف در بازه زمانی مورد مطالعه بوده است. در نهایت نتایج این تحقیق نشان داده است که تغییراقلیم با اثرگذاری روی متغیرهای آب و هوایی و چرخه هیدرولوژیکی، منجر به کاهش تولید برقابی در بازه زمانی مورد نظر شده است [۲]. مطالعات دیگری نیز در حوزه پویایی سیستم تامین انرژی تجدیدپذیر نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این زمینه نخعی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱) به طراحی مدل برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی الکتریکی با استفاده از رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی خطی و پویایی‌شناسی سیستمی پرداختند و ضمن تاکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نشان دادند انرژی خورشیدی فتوولتاییک پایدارترین منبع انرژی است [۲۹]. سلیمانی و آرمانی مهر (۱۳۹۹) به بررسی نقش سیاست‌های اقتصادی بر به‌کارگیری انرژی‌های نو در نیروگاه‌های ایران با استفاده پویایی سیستم پرداختند و نشان دادند هر سه ابزار سیاستی مورد بررسی (یارانه تولیدکننده انرژی‌های نو، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه انرژی‌های نو) بر افزایش ظرفیت تولیدی انرژی‌های نو و کاهش ظرفیت انرژی‌های فسیلی اثر داشته و از این میان سیاست کاهش هزینه برای گسترش انرژی‌های نو بیشترین اثر را داشته است. همچنین رابطه مستقیمی بین ظرفیت تولید انرژی‌های نو با توسعه پایدار و رابطه معکوسی بین ظرفیت تولید انرژی های نو و انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد [۴۰].

بررسی پیشینهٔ اثرات بالقوه و پیش‌بینی شده تغییرات آب‌وهوایی بر سیستم‌های انرژی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات اقلیمی در هر منطقه و منبع انرژی تا حد زیادی متفاوت است. از نظر کلی موضوع انرژی و مسائل زیست محیطی در بحران تغییر اقلیم؛ توسط محققین بسیاری در سرتاسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است؛ از طرفی از آنجا که تامین انرژی خود تاثیر گذار و همچنین تاثیرپذیر از تغییرات آب و هوایی است؛ در مورد سازگاری سیستم‌های انرژی در برابر خطرات اقلیمی نیز مطالعاتی صورت گرفته است ولی تعداد بسیار کمی از آن‌ها

---

[۱] (Chen, et al., 2020)

[۲] Battery Energy Storage System

[۳] (Global Warming of 1.5℃, 2018)

مسئله تامین انرژی و به طور خاص حوزه تامین انرژی الکتریکی را با تاثیرات اقلیمی آن هم به صورت بخشی و منطقه‌ای مدنظر قرار داده‌اند. لازم به ذکر است چنین مسئله‌ای با رویکرد پویایی‌های سیستم مورد استفاده قرار نگرفته است. بنابراین این تحقیق بستر تحلیلی پویا را با توجه به کمبود تحقیقات در زمینه موضوع و رویکرد توضیح داده شده پیشنهاد می‌کند. تازگی این پژوهش در مقایسه با پیشینه، در استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم است. از سوی دیگر مدل‌سازی تامین انرژی الکتریکی از نظر ساختار کلان تامین انرژی الکتریکی در مطالعات قبلی بررسی نشده است. بنابراین پویایی سیستم روابط پیچیده، حلقه‌های بازخورد و تأخیرها را که می‌تواند برای زنجیره تأمین انرژی الکتریکی مدل شود، در نظر می‌گیرد. بر این مبنا پژوهش حاضر ضمن مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویایی‌های سیستم تامین منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر کشور، امنیت منابع انرژی الکتریکی را با توجه به روند پیشران‌های تغییرات تقاضای انرژی الکتریکی ناشی از تغییر اقلیم، جمعیت و رشد اقتصادی ایران در افق ۳۰ ساله مورد بررسی قرار داده و به تحلیل سیاست‌های تامین منابع انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی ایران پرداخته است.

۳. روش شناسی تحقیق

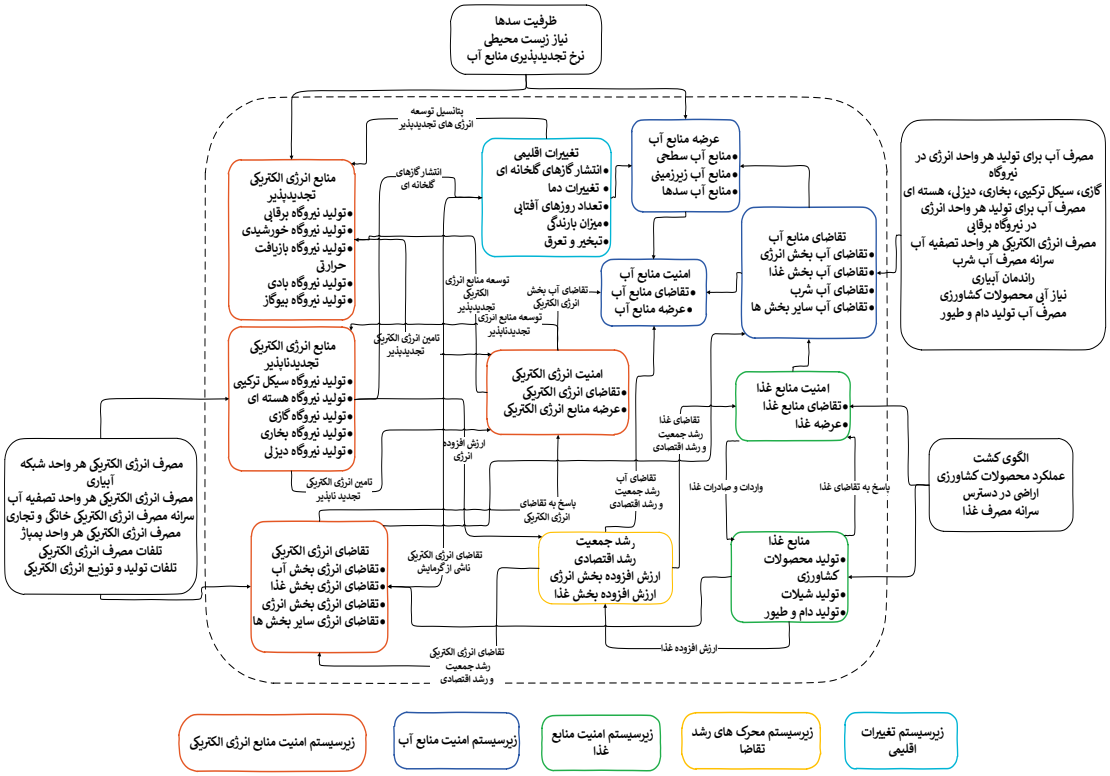
در تحقیق حاضر، بنابر ماهیت موضوع. از دو روش توصیفی و تحلیلی استفاده می‌شود. در بخش نخست که دیدگاه‌های نظری و پیشینه موضوع مطالعه گردید از روش توصیفی به مطالعه و توصیف واقعیت‌ها، ویژگی‌های وضع موجود، ابهامات و شکاف‌های موجود در رابطه با موضوع پرداخته و در مرحله بعد تلاش گردید با فراهم کردن شناخت بیشتر و کسب بینش عمیق‌تر از تغییرات اقلیمی و تاثیرات آن بر تامین انرژی الکتریکی با تحلیل نظام‌مند ارتباط بین آن‌ها را مشخص کرده و برای دستیابی به روابط علی و شناخت روابط بین متغیرها از روش تحلیلی با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. پژوهش حاضر به لحاظ جهت‌گیری و هدف از اجرا جز تحقیقات توسعه‌ای-کاربردی است. برای حل چالش‌های مدیریت تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر خطرات تغییرات اقلیمی، روش‌شناسی تحقیق بر مبنای مراحل کلی رویکرد پویایی‌شناسی سیستم می‌باشد. پویایی‌شناسی سیستم توانایی آشکارسازی پیامدهای نامشخص و پیش‌بینی نشده تصمیمات یا رویدادها را داراست و امکان بررسی مسائل و تشریح رفتار سیستم‌های پیچیده را ممکن می‌سازد و بنابراین به درک سیستم‌های پیچیده کمک می‌کند. به کمک این فهم می‌توان سناریوهای مختلف را با دید سیستمی ارزیابی نمود. این رویکرد این امکان را فراهم می‌آورد تا تصمیم‌گیرنده راهکارهای پیشنهادی خود را قبل از اعمال در سیستم حقیقی در مدل شبیه‌سازی شده تست کرده و پیامدهای آن را برای دوره زمانی بلندمدت مطالعه و بررسی کند. حل مسئله توسط روش پویایی شناسی سیستم در پنج مرحله به انجام می‌رسد: ۱) شناسایی و تعریف مسئله، ۲) ساخت نمودارهای علی – معلولی، ۳) ساخت مدل ریاضی (نمودارحالت-جریان)، ۴) شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل، ۵) تعریف سیاست‌های مختلف، ارزیابی و انتخاب راه حل مناسب [۴۱]. بنابراین، هدف اصلی پژوهش ارائه مدل پویایی‌های سیستم به منظور تحلیل ارتباط اثرات تغییر اقلیم بر انرژی در حوزه تامین انرژی الکتریکی به منظور بهبود درک از این ارتباط است تا از این درک برای طراحی سیاست‌های مؤثر اهرمی در جهت سازگاری با تغییرات اقلیمی یا خنثی‌سازی پیامدهای تغییرات اقلیمی در تامین انرژی الکتریکی استفاده شود. اهداف ویژه پژوهش نیز عبارتند از: شناسایی عوامل کلیدی اقلیمی موثر بر انرژی در حوزه تامین انرژی الکتریکی، شناسایی حلقه‌های بازخوردی موجود، شناسایی نقاط اهرمی، سناریوسازی بر مبنای آن‌ها و انتخاب سناریوی مطلوب و بهبود رفتار در زمینه مدیریت تامین انرژی در رویایی با فشارهای اقلیمی از طریق شبیه‌سازی پیامدها. همچنین با توجه به این که نتیجه حاصل از این پژوهش، کاربردی خواهد بود، هدف کاربردی پژوهش از طریق ارائه مدل پویایی‌های سیستم، تحقیق حاضر به لحاظ جهت گیری و هدف از اجرا جز تحقیقات کاربردی است. انتظار این خواهد بود که خروجی تحقیق همراه با یک سری سیاست‌ها و راهکارهای اجرایی و کاربردی باشد که برای افزایش آمادگی در قالب اقدامات پیشگیرانه در به حداقل رساندن تاثیرات منفی خطرات و افزایش انعطاف‌پذیری در رویارویی با چالش‌های تغییرات اقلیمی از طریق تصمیم گیری موثرتر برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت بهینه در جهت بهبود مدیریت تامین انرژی الکتریکی که تحقیق بر اساس آن شکل گرفته است، به کار می‌رود. در این تحقیق شناخت ارتباط تغییرات اقلیمی و تاثیرات آن بر تامین انرژی الکتریکی، با کشف ارتباطات علی و معلولی و با کمک رویکرد پویایی‌های سیستم، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل‌سازی شده است و نهایتا با اجرای نرم افزاری مدل به تشریح رویدادها و پیامدها پرداخته و سپس، با پیش بینی روند آتی با توجه به روند گذشته، راهکارهایی برای رویایی با تغییرات

اقلیمی در تامین انرژی الکتریکی ارائه شده است. داده‌های پژوهش بر اساس مستندات سازمانی از جمله وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، مرکز آمار ایران، سازمان هواشناسی کشور و سازمان مدیریت منابع آب ایران گردآوری شده است. مدل با استفاده از داده‌های زمانی (۱۳۹۰–۱۴۰۰) در نرم افزار ونسیم نسخه Vensim DSS 6.4E طراحی و در افق ۳۰ ساله (۱۴۳۰–۱۴۰۰) شبیه‌سازی شده است.

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

منطبق با گام‌های روش‌شناسی پویایی سیستم، مدل پویای تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران ارائه شده است.

ساختاربندی مسئله: پس از بررسی موضوعی مسئله تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم و سیاست‌های سازگاری کشور، با توجه به مسئله پژوهش و پیوند منابع آب، غذا و انرژی، با مشارکت خبرگان و درگیر مسئله، تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران در پنج زیر سیستم شامل زیرسیستم‌های تغییرات اقلیمی؛ محرک‌های رشد تقاضا؛ امنیت منابع انرژی الکتریکی؛ امنیت منابع آب؛ امنیت منابع غذا شناسایی و با توجه به اجزای هر یک از زیرسیستم‌ها، روابط و مرز سیستم ساختاردهی گردید. نمودار زیرسیستم‌های مدل، اجزای هر زیرسیستم و چگونگی تعامل زیرسیستم‌های مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. زیرسیستم‌های مدل مسئله پویایی تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران

مدل پویایی سیستم: با توجه به نمودار زیرسیستم‌های مسئله، با استفاده از پیشینه و مصاحبه‌های عمیق با مشارکت‌کنندگان پژوهش روابط علّی متغیرهای مدل تعیین و با استفاده از مستندات و داده‌های کمی گزارش‌ها و مستندات در دسترس مرکز آمار ایران، وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، سازمان مدیریت منابع آب و سازمان هواشناسی کشور در طول سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۴۰۰ مدل جریان مسئله فرموله گردید. در ادامه به تشریح زیرسیستم‌های مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران پرداخته شده است.

زیرسیستم امنیت منابع انرژی: انرژی الکتریکی از دو منبع اصلی یعنی منابع تجدیدپذیر و منابع تجدیدناپذیر تولید می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران شامل خورشیدی، برق آبی، بادی، بیوگاز، بازیافت حرارت و منابع انرژی تجدیدناپذیر شامل نفت، گاز و هسته‌ای است. درواقع این بخش با دریافت منابع اولیه و تولید انرژی، انرژی مورد نیاز بخش‌های دیگر را تأمین می‌کند، از طرفی منابع اولیه و همچنین انرژی تولیدی را از دنیای خارج وارد و یا حتی به آن صادر می‌کند. همچنین برای تولید انرژی برق آبی، جهت استخراج و پالایش منابع انرژی جهت تولید برق فسیلی از نیروگاه‌های حرارتی، این بخش نیازمند مقدار قابل توجهی آب به منظور خنک کننده و سایر مصارف است که از این طریق با بخش آب ارتباط پیدا می‌کند. از طرفی تولید برق فسیلی از نیروگاه‌های حرارتی سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی می‌شود و به این ترتیب با زیر سیستم تغییر اقلیم ارتباط می‌یابد.

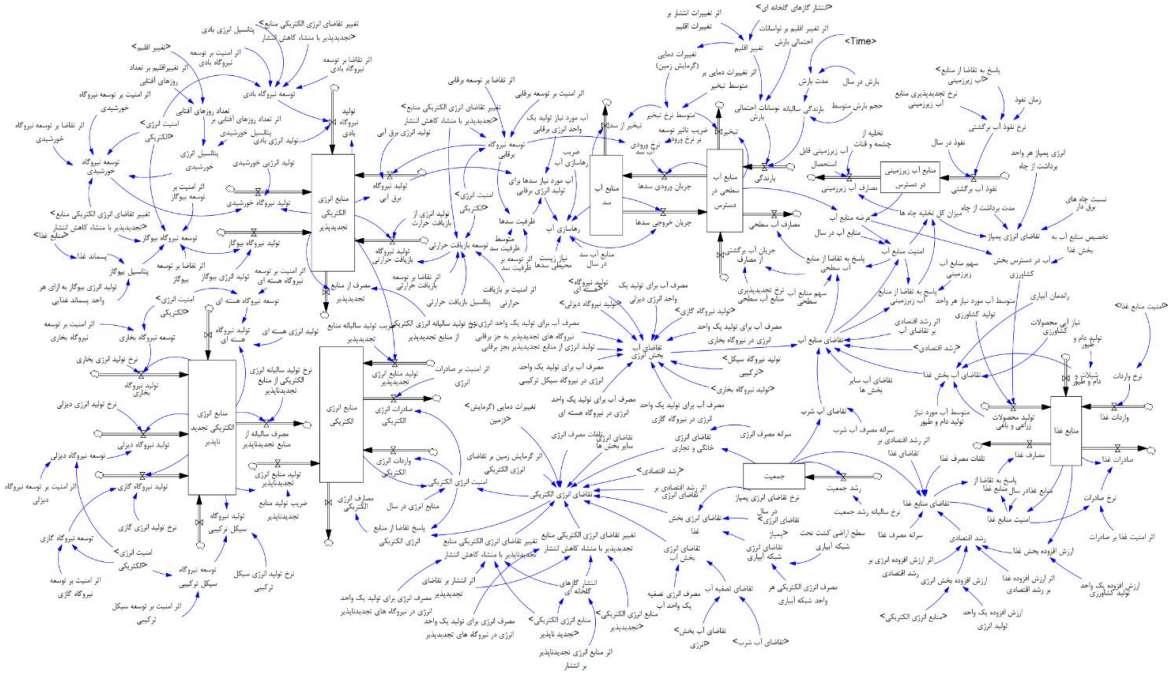
زیر سیستم تغییرات اقلیمی: تغییرات اقلیم بر ارتباط آب برای انرژی تأثیرگذار است. تغییرات الگوی بارندگی و دما بر منابع آبی کشور اثر دارد. مقدار برق قابل تولید از نیروگاه های برق به تغییر در جریان آب ورودی به مخازن نیروگاه‌ها بستگی دارد. بنابراین کاهش بارندگی منجر به کاهش در دسترس بودن آب برای تولید برق خواهد شد. همچنین تغییرات دما بر تقاضای انرژی الکتریکی و آب برای سرمایش و گرمایش اثر می‌گذارد.

زیرسیستم محرک‌های رشد تقاضا: رشد جمعیت و رشد اقتصادی اثر مثبتی بر تولید ناخالص داخلی دارند. هنگامی‌که تولید ناخالص داخلی یک کشور افزایش می‌یابد، مصرف برق و تقاضای انرژی افزایش خواهد یافت. تقاضای انرژی متناسب با میزان تقاضای داخلی نیروگاه‌ها، تقاضای بخش خانگی و تجاری که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف انرژی، تقاضای بخش آب جهت تصفیه و تقاضای بخش غذا که حاصل جمع تقاضای انرژی پمپاژ و تقاضای انرژی شبکه آبیاری و نیز تقاضای سایر نقاط کشور است. با توجه به افزایش جمعیت و در پی آن پیش‌بینی رشد تقاضای برق در کشور، چنانچه این نیاز مطابق با روند سنتی که مبتنی بر تولید برق به کمک نیروگاه‌های فسیلی است ادامه یابد، روند تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تغییرات اقلیمی افزایش می‌یابد [۴۰]. مقدار ارزش افزوده در بخش انرژی و در بخش حاصل از تامین غذا نقش مهمی در تولید ناخالص داخلی و رشد اقتصادی دارد. انرژی یکی از مهمترین عوامل رشد اقتصادی جوامع می‌باشد و ارتباط متقابلی میان بخش انرژی و اقتصاد در جوامع مختلف وجود دارد. به‌گونه‌ای که رشد اقتصادی هر جامعه نیازمند توسعه بخش انرژی آن بوده و توسعه بخش انرژی نیازمند توسعه اقتصاد آن جامعه می‌باشد. به این ترتیب زیر سیستمی با عنوان محرک‌های رشد تقاضا نیز در نظر گرفته شده است که متمرکز بر تاثیرات جمعیت و رشد اقتصادی است.

زیر سیستم امنیت منابع آب: دبی آب (میزان آب عبوری) رودخانه‌های اصلی متأثر از میزان بارش سالانه بوده و تغییرپذیری‌های اقلیم با کاهش بارش منجر به کاهش جریان‌های سطحی ورودی به منابع آب سدهایی که بر روی این رودخانه‌ها قرار گرفته‌اند و دارای نیروگاه تولید برق می‌باشند، می‌شود و بدین صورت بر تولید برق اثر می‌گذارد. بنابراین تامین امنیت آب و انرژی به گونه‌ای که بتواند افزون بر پاسخگویی به نیاز کنونی، نیاز آینده را نیز در نظر بگیرد دارای اهمیت است. در این مطالعه زیرسیستم امنیت منابع آب به بخش‌های منابع آب، امنیت آب و تقاضای آب تقسیم شده است. بخش عمده آب صرف کشاورزی شده و بخشی برای مصارف خانگی و تجاری و بخشی دیگر برای سایر استفاده می‌شود. طبیعی است که برای انتقال و توزیع و تصفیه آب نیز به مصرف برق نیاز است. رشد جمعیت از طریق تقاضای آب شرب بر تقاضای آب اثرگذار است. رشد اقتصادی همچنین می‌تواند به میزان قابل توجهی بر تقاضای منابع آب تاثیر بگذارد. تقاضای کل حاصل جمع تقاضای آب برای بخش انرژی (جمع تقاضای آب هریک از نیروگاه‌ها برای تولید برق)، تقاضای آب بخش غذا، تقاضای آب شرب و تقاضای آب سایر بخش‌ها است. میزان تقاضای آب برای کاربردهای خانگی با میزان جمعیت و سرانه آب شرب مصرفی تعریف می شود. نیاز زیست محیطی به صورت برونزا (۲۲۸۳/۸۴ میلیون مترمکعب در سال) وارد مدل شده است. از سوی دیگر تقاضای آب در بخش غذا نیز تابعی از نیاز آبی محصولات کشاورزی و میزان تولیدات کشاورزی و راندمان آبیاری قابل محاسبه است [۲۷]. عرضه منابع آبی، از طریق دو انباشت منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی تامین می‌گردد و امنیت منابع آب اختلاف بین عرضه و تقاضای آب در نظر گرفته شده است [۲۶].

زیر سیستم امنیت منابع غذا: عرضه غذا در ایران از منابع غذا بخش کشاورزی، شیلات و دام و طیور تامین می‌گردد. هر یک از این زیر بخش‌ها با بخش آب و بخش انرژی ارتباط دارد. برای کشت محصولات کشاورزی و نیز پرورش دام و طیور به ماشین آلات و تأسیسات و نیز

مواد اولیه‌ای نیاز است کـه نیـروی محرکـه آن‌هـا، انـرژی در اشکال مختلف آن است. بخش تولیدات غذایی با استفاده از آب و نیز با دریافت انرژی و همچنین تولید بیوگاز و ضایعات آلی جهت استفاده منبع انرژی تجدیدپـذیر بـا بخش انرژی ارتباط پیدا می‌کند [۳۸]. تقاضای غذا متناسب با میزان تقاضای داخلی غذا که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف غذا است؛ همچنین رشد اقتصادی می‌تواند بر تقاضای منابع غذایی تاثیر بگذارد. از طرفی تقاضای کل آب در بخش غذا از مجموع تقاضای آب هر سه بخش کشاورزی، دام و طیور و شیلات حاصل می‌شود. عمده‌ترین تقاضای آب مربوط به بخش کشاورزی است که ناشی از میزان تولید محصولات زراعی و باغی و نیاز آبی محصولات در بخش کشاورزی است [۳۴]. همچنین، ارتباط با دنیای خارج نیز از طریـق تـأمین مـواد اولیـه مورد نیاز دو بخش تولیـدی مزبـور و نیـز صـادرات و یـا واردات محصـولات مـی‌توانـد بـه ارتقای امنیت غذایی منجر شود [۴]. در شکل ۲ نمودار حالت جریان مدل، در جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب مقادیر متغیرهای انباشت و روابط ریاضی و منطقی حاکم بین متغیرهای مدل ارائه شده است.



شکل ۲ . نمودار حالت جریان تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم

جدول ۱. مقادیر متغیرهای انباشت مدل در سال پایه و واحد اندازه‌گیری آن‌ها

متغیر حالت	مقدار	واحد	متغیر حالت	مقدار	واحد
منابع انرژی الکتریکی	۲۴۰۳۹۰۳۰۰	مگاوات	منابع آب زیرزمینی	۱۱۰۰۰۰	میلیون متر مکعب
منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر	۱۸۰۴۴۰۰۰	مگاوات	منابع آب سطحی	۲۴۸۵۵۰	میلیون مترمکعب
منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر	۲۲۷۷۵۴۳۰۰	مگاوات	منابع غذا	۱۲۱/۸۴۷	میلیون تن
منابع آب سد	۵۷۱۷	میلیون مترمکعب	جمعیت	۷۴۹۶۱۷۰۲	جمعیت

جدول ۲. برخی روابط ریاضی متغیرهای مدل پویایی سیستم تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر اقلیم

یکا	رابطه ریاضی و منطقی	متغیر
مگاوات	تقاضای انرژی الکتریکی – منابع انرژی الکتریکی	امنیت انرژی الکتریکی

متغیر	رابطه ریاضی و منطقی	یکا
منابع انرژی الکتریکی	INTEG (واردات + تولید منابع انرژی تجدیدناپذیر+تولید منابع انرژی تجدیدپذیر) (مصارف انرژی الکتریکی-انرژی الکتریکی-صادرات انرژی الکتریکی	مگاوات
منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر	INTEG ((تولید نیروگاه سیکل + تولید نیروگاه بخاری+تولید نیروگاه دیزلی+ تولید نیروگاه گازی)-مصرف سالیانه از منابع ترکیبی+تولید نیروگاه هسته ای تجدیدناپذیر)	مگاوات
منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر	INTEG (تولید نیروگاه برق + تولید نیروگاه بادی+تولید نیروگاه بازیافت حرارتی) (تولید نیروگاه خورشیدی)-مصرف از منابع تجدیدپذیر+ آبی+تولید نیروگاه بیوگاز	مگاوات
تولید نیروگاه بادی	توسعه نیروگاه بادی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی بادی)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه بازیافت حرارتی	توسعه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی از بازیافت حرارت) نیروگاه بازیافت حرارتی	مگاوات/سال
تولید نیروگاه بخاری	توسعه نیروگاه بخاری+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی بخاری)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه برق ابی	توسعه نیروگاه برق آبی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی برق آبی)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه بیوگاز	توسعه نیروگاه بیوگاز+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی بیوگاز)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه خورشیدی	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی خورشیدی) خورشیدی	مگاوات/سال
تولید نیروگاه دیزلی	توسعه نیروگاه دیزلی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی دیزلی)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه سیکل ترکیبی	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی سیکل ترکیبی) سیکل ترکیبی	مگاوات/سال
تولید نیروگاه گازی	توسعه نیروگاه گازی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی گازی)	مگاوات/سال
تولید نیروگاه هسته ای	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی هسته‌ای) هسته‌ای	مگاوات/سال
تقاضای انرژی الکتریکی	(تقاضای انرژی سایر بخش‌ها+ تقاضای انرژی خانگی و تجاری + تقاضای انرژی بخش غذا+ تلفات توزیع و انتقال انرژی+ تقاضای انرژی بخش آب+ تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار + تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدناپذیر با منشاء کاهش انتشار) × (۱+((رشد اقتصادی×اثر رشد اقتصادی بر تقاضای انرژی)+(اثر گرمایش زمین بر تقاضای انرژی الکتریکی×"تغییرات دمایی (گرمایش زمین)")))	مگاوات/سال
تقاضای انرژی خانگی و تجاری	جمعیت×سرانه مصرف انرژی	مگاوات/سال
پاسخ تقاضا از منابع انرژی الکتریکی	IF THEN ELSE(امنیت انرژی الکتریکی>=۰, تقاضای انرژی الکتریکی (امنیت انرژی الکتریکی+ تقاضای انرژی الکتریکی	مگاوات/سال
انتشار گازهای گلخانه ای	(منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر × اثر منابع انرژی تجدیدناپذیر بر انتشار)	میلیون تن
تقاضای آب بخش انرژی	مصرف آب برای تولید یک واحد × تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر بجز برقابی)) تولید نیروگاه هسته)+(انرژی در نیروگاه های تجدیدپذیر به جز برقابی تولید نیروگاه)+(ای×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه هسته ای تولید)+(بخاری×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه بخاری تولید نیروگاه)+(نیروگاه دیزلی×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی دیزلی مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه سیکل ترکیبی× سیکل ترکیبی مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه × تولید نیروگاه گازی)+(((گازی	میلیون مترمکعب/سال

یکا	رابطه ریاضی و منطقی	متغیر
مگاوات/سال	امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر)ABS(MIN) ,پتانسیل بازیافت حرارتی)MIN تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با منشاء)+(((بازیافت حرارتی, ۰ ((کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه بازیافت حرارتی	توسعه بازیافت حرارتی
مگاوات/سال	امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر)ABS(MIN) ,پتانسیل انرژی بادی)MIN تغییر تقاضای)+ انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با (((توسعه نیروگاه بادی, ۰) ((منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه بادی	توسعه نیروگاه بادی
مگاوات/سال	امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر)ABS(MIN) ,پتانسیل انرژی خورشیدی)MIN تغییر تقاضای)+ انرژی الکتریکی منابع (((توسعه نیروگاه خورشیدی, ۰) ((تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه خورشیدی	توسعه نیروگاه خورشیدی
مگاوات/سال	امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر)ABS(MIN) ,پتانسیل انرژی بیوگاز)MIN تغییر تقاضای)+ انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با (((توسعه نیروگاه بیوگاز, ۰) ((منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه بیوگاز	توسعه نیروگاه بیوگاز
مگاوات/سال	اثر × تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار) اثر امنیت بر × امنیت انرژی الکتریکی)ABS(MIN)+(تقاضا بر توسعه برقابی (((۰,توسعه برقابی	توسعه نیروگاه برقابی
مگاوات/سال	((۰ , امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بخاری)ABS(MIN	توسعه نیروگاه بخاری
مگاوات/سال	((۰ ,امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه دیزلی)ABS(MIN	توسعه نیروگاه دیزلی
مگاوات/سال	((۰ , اثر امنیت بر توسعه سیکل ترکیبی×امنیت انرژی الکتریکی)ABS(MIN	توسعه نیروگاه سیکل ترکیبی
مگاوات/سال	((۰ , امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه هسته ای)ABS(MIN	توسعه نیروگاه هسته ای
مگاوات/سال	((۰ , امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه گازی)ABS(MIN	توسعه نیروگاه گازی
میلیون مترمکعب/سال	تقاضای منابع آب – عرضه منابع آب	امنیت منابع آب
میلیون مترمکعب	منابع آب زیرزمینی در دسترس+منابع آب سطحی در دسترس	عرضه منابع آب
میلیون مترمکعب/سال	تقاضای آب بخش انرژی+تقاضای آب بخش غذا+تقاضای آب سایر بخش‌ها) (((۱+(رشد اقتصادی×اثر رشد اقتصادی بر تقاضای آب × تقاضای آب شرب)+	تقاضای منابع آب
مگاوات/سال	تقاضای تصفیه آب×مصرف انرژی تصفیه یک واحد آب	تقاضای انرژی بخش آب
میلیون مترمکعب/سال	آب زیرزمینی قابل ,(میزان کل تخلیه چاه‌ها+تخلیه از چشمه و قنات))MIN (استحصال	مصارف آب زیرزمینی
میلیون مترمکعب/سال	(۰/۱۵× ((امنیت منابع آب)ABS+پاسخ به تقاضا از منابع آب زیرزمینی))	میزان کل تخلیه چاه‌ها
میلیون مترمکعب	(نفوذ آب برگشتی–مصارف آب زیرزمینی) INTEG	منابع آب زیرزمینی در دسترس
میلیون مترمکعب/سال	بارندگی سالیانه×نوسانات احتمالی بارش	بارندگی
میلیون مترمکعب/سال	رهاسازی آب×منابع آب سد	جریان خروجی سدها
میلیون مترمکعب/سال	منابع آب سد >=آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی برقابی)IF THEN ELSE آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی برقابی)) , نیاز زیست محیطی سدها+ منابع آب سد /(نیاز زیست محیطی سدها+	رهاسازی آب
میلیون مترمکعب/سال	منابع آب سطحی در دسترس×نرخ ورودی آب سد	جریان ورودی سدها
میلیون مترمکعب/سال	متوسط نرخ تبخیر×منابع آب سطحی در دسترس	تبخیر
میلیون مترمکعب	- بارندگی+جریان آب برگشتی از مصارف+جریان خروجی سدها))) INTEG (((تبخیر–جریان ورودی سدها–مصارف آب سطحی	منابع آب سطحی در دسترس
میلیون مترمکعب	(جریان ورودی سدها–تبخیر از سد –جریان خروجی سدها)) INTEG	منابع آب سد

متغیر	رابطه ریاضی و منطقی	یکا
متوسط نرخ تبخیر	اثر تغییرات دمایی بر متوسط × تغییرات دمایی (گرمایش زمین)"))"+۱) ×۰/۲× تبخیر	۱/سال
آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی برقابی	IF THEN ELSE ظرفیت سدها>=(آب مورد نیاز تولید یک واحد انرژی برقابی×تولید نیروگاه برق آبی), آب مورد نیاز تولید یک واحد انرژی برقابی×تولید نیروگاه برق آبی , ظرفیت سدها)	میلیون مترمکعب/سال
امنیت منابع غذا	تقاضای منابع غذا–منابع غذا	میلیون تن/سال
منابع غذا	واردات غذا–+ تولید محصولات زراعی و باغی+شیلات و دام و طیور))) INTEG (((صادرات غذا–مصارف غذا	میلیون تن
تقاضای منابع غذا	(جمعیت×سرانه مصرف غذا×تلفات مصرف غذا)+(اثر رشد ×رشد اقتصادی) اقتصادی بر تقاضای غذا	میلیون تن/سال
تقاضای انرژی بخش غذا	تقاضای انرژی شبکه +(تقاضای انرژی پمپاژ×نرخ تقاضای انرژی پمپاژ در سال) آبیاری	مگاوات/سال
تقاضای انرژی شبکه آبیاری	سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری×مصرف انرژی الکتریکی هر واحد شبکه آبیاری	مگاوات/سال
تقاضای انرژی پمپاژ	(انرژی پمپاژ هر × نسبت چاه های برق دار×میزان کل تخلیه چاه ها) INTEG واحد برداشت از چاه×مدت برداشت از چاه	مگاوات
تعداد روزهای آفتابی	(تغییر اقلیم×اثر تغییراقلیم بر تعداد روزهای آفتابی ، ۳۶۵)MIN	روز
تغییر اقلیم	تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای×اثر تغییرات انتشار بر تغییرات اقلیم	بدون واحد
تغییرات دمایی (گرمایش زمین)	تغییر اقلیم	بدون واحد
جمعیت	(رشد جمعیت) INTEG	*نفر*
رشد جمعیت	جمعیت×نرخ سالیانه رشد جمعیت	نفر/سال
رشد اقتصادی	ارزش)+(اثر ارزش افزوده انرژی بر رشد اقتصادی×ارزش افزوده بخش انرژی) (افزوده بخش غذا×اثر ارزش افزوده غذا بر رشد اقتصادی	درصد

روابط منطقی و ریاضی مدل بر مبنای اصول پویایی سیستم تعریف شده است. در مورد برخی از متغیرهای کیفی رفتار متغیر در بازه زمانی ۱۳۹۰ الی ۱۴۰۰ مشخص و بر مبنای تعیین ضرایب رگرسیونی بین متغیرهای علّی و معلول و یا وزن‌دهی، میزان تغییرات رفتار متغیر کیفی برآورد شده است. برخی از متغیرها از جمله متغیرهای اقلیمی مانند حجم بارش متوسط برحسب میلیون متر مکعب در هر سال از طریق تابع لوک آپ تعریف و به صورت زوج مرتب برای ۳۰ سال (۱۳۷۰–۱۴۰۰) وارد مدل شده است.

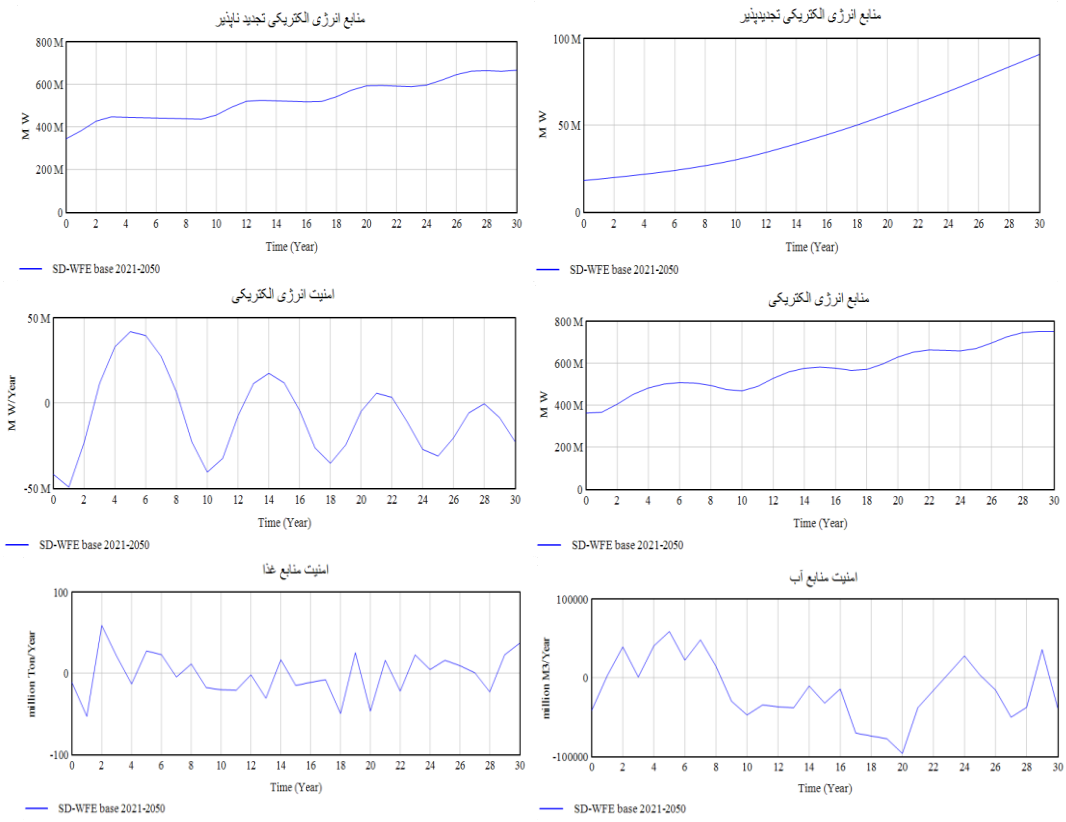
اعتبارسنجی و شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم: برای اعتبارسنجی علاوه بر تأیید آزمون کفایت مرزهای مدل و تطبیق ساختار مدل با دانش توصیفی از سیستم توسط خبرگان بر مبنای معیارهای اعتمادپذیری، قابلیت انتقال‌پذیری، تاییدپذیری و قابلیت اعتماد، آزمون‌های اعتبار ساختاری و رفتاری شامل آزمون‌های برازندگی،شرایط حدی، تائید پارامتری، حساسیت پارامتری، سازگاری ابعاد، خطای تجمیعی و بازتولید رفتار با توجه به شاخص ریشه میانگین مربع درصد خطا RMSPE[۱] انجام گردید. جدول ۳ نتایج آزمون بازتولید رفتار برخی از متغیرهای مدل را نشان می‌دهد. شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی اولیه را ارائه کرده است.

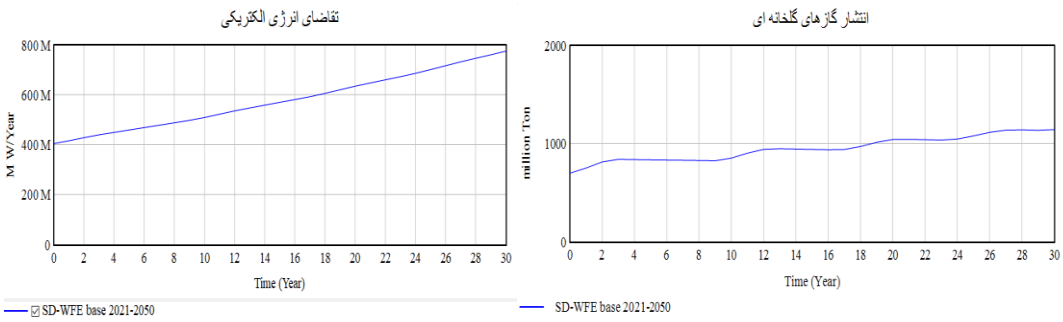
[۱] Root Mean Square Percentage Error

پس از انجام موفقیت آمیز آزمون‌های اعتبارسنجی، شبیه سازی اولیه در افق ۳۰ ساله انجام شد. در نمودار ۲ تغییرات هر یک از متغیرهای کلیدی نمودار جریان که رفتار آن‌ها برای بررسی وضعیت کلی اهمیت دارد، ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه داده‌های واقعی (At) و شبیه‌سازی (St) برخی متغیرهای مدل و محاسبه شاخص RMSPE

متغیر مدل	منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر		منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر		منابع انرژی الکتریکی کل		جمعیت	
	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده
۱۳۹۰	۱۲۶۳۶۰۰۰	۱۲۶۳۶۰۰۰	۲۲۷٬۷۵۴٬۳۰۰	۲۲۷٬۷۵۴٬۰۰۰	۲۴۰۳۹۰۳۰۰	۲۴۰۳۹۰۰۰۰	۷۴٬۹۶۱٬۷۰۲	۷۴٬۹۶۱٬۷۰۰
۱۳۹۱	۱۴۵۱۴۰۰۰	۱۳۴۷۵۹۰۰	۲۴۱٬۵۹۹٬۳۰۰	۲۵۲٬۶۵۲٬۰۰۰	۲۵۶۱۱۳۳۰۰	۲۴۴۰۹۴۰۰۰	۷۶٬۰۷۵٬۰۰۰	۷۵٬۴۷۱٬۴۰۰
۱۳۹۲	۱۹۲۸۳۰۰۰	۱۸۵۲۳۳۰۰	۲۴۷٬۴۵۴٬۹۰۰	۲۶۸٬۹۲۴٬۰۰۰	۲۶۶۷۳۷۹۰۰	۲۵۴۳۷۴۰۰۰	۷۷٬۰۱۵٬۰۰۰	۷۵٬۹۸۴٬۶۰۰
۱۳۹۳	۱۸۶۱۰۰۰۰	۱۶۵۷۰۷۰۰	۲۶۰٬۳۴۲٬۱۰۰	۲۸۸٬۹۸۹٬۰۰۰	۲۷۸۹۵۲۱۰۰	۲۶۴۶۵۵۰۰۰	۷۷٬۹۷۰٬۰۰۰	۷۶٬۵۰۱٬۳۰۰
۱۳۹۴	۱۷۲۹۶۰۰۰	۱۶۶۵۴۵۰۰	۲۶۶٬۳۰۷٬۰۰۰	۲۸۲٬۶۹۱٬۰۰۰	۲۸۳۶۰۳۰۰۰	۲۷۴۹۳۹۰۰۰	۷۸٬۹۴۱٬۰۰۰	۷۷٬۰۲۱٬۶۰۰
۱۳۹۵	۲۳۴۲۰۰۰۰	۱۹۸۳۱۳۰۰	۲۷۲٬۳۹۵٬۸۰	۲۹۳٬۰۳۲٬۰۰۰	۲۹۵۸۱۵۸۰۰	۲۸۵۲۲۵۰۰۰	۷۹٬۹۲۶٬۳۰۰	۷۷٬۵۴۵٬۳۰۰
۱۳۹۶	۲۲۹۸۰۰۰۰	۲۱۱۳۳۱۰۰	۲۹۲٬۳۴۸٬۲۰۰	۳۰۰٬۶۷۹٬۰۰۰	۳۱۵۳۲۸۲۰۰	۳۰۵۵۱۳۰۰۰	۸۱٬۰۷۰٬۰۰۰	۷۸٬۰۷۲٬۶۰۰
۱۳۹۷	۲۳۹۲۵۰۰۰	۲۱۵۷۹۵۰۰	۲۹۲٬۵۰۲٬۰۰۰	۳۰۷٬۳۵۵٬۰۰۰	۳۱۶۴۲۷۰۰۰	۳۰۹۸۰۳۰۰۰	۸۲٬۰۸۴٬۰۰۰	۷۸٬۶۰۳٬۵۰۰
۱۳۹۸	۲۸۹۱۰۰۰۰	۳۵۱۸۱۴۰۰	۲۹۴٬۲۷۷٬۴۰۰	۳۱۷٬۳۵۵٬۰۰۰	۳۳۳۱۸۷۴۰۰	۳۱۶۰۹۶۰۰۰	۸۳٬۰۷۵٬۰۰۰	۷۹٬۱۳۸٬۰۰۰
۱۳۹۹	۲۸۸۸۲۰۰۰	۲۸۹۵۱۷۰۰	۳۱۸٬۹۴۵٬۰۰۰	۳۲۷٬۳۵۵٬۰۰۰	۳۴۷۸۲۷۰۰۰	۳۲۶۳۹۱۰۰۰	۸۳٬۶۸۱٬۴۵۳	۷۹٬۶۷۶٬۱۰۰
۱۴۰۰	۱۸۰۴۴۰۰۰	۲۴۸۹۵۷۰۰	۳۴۴٬۳۵۹٬۰۰۰	۳۶۷٬۳۵۵٬۰۰۰	۳۶۲۴۰۳۰۰۰	۳۴۶۶۸۸۰۰۰	۸۴٬۲۵۱٬۴۱۶	۸۰٬۲۱۷٬۹۰۰
RSMPE	۰/۰۹		۰/۰۶		۰/۰۳		۰/۰۲	

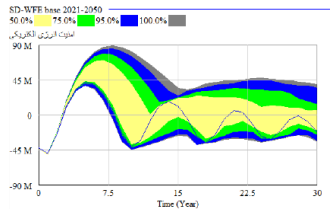
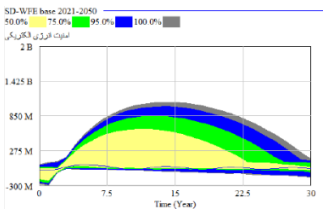
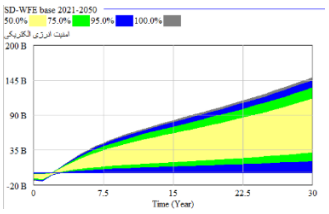
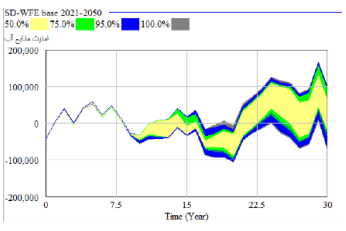
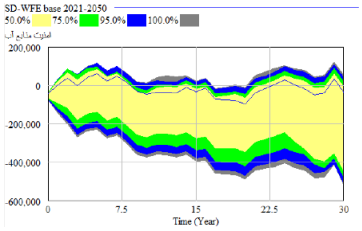
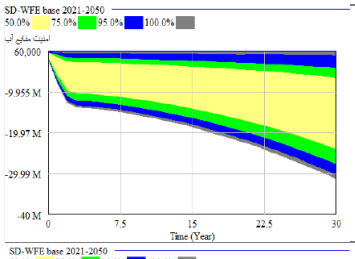
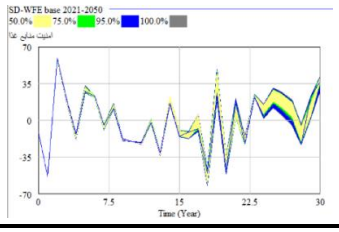
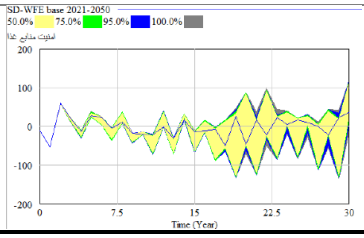
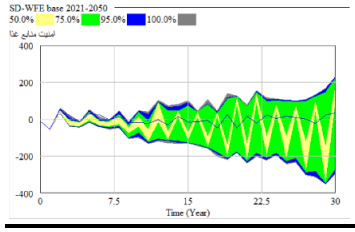


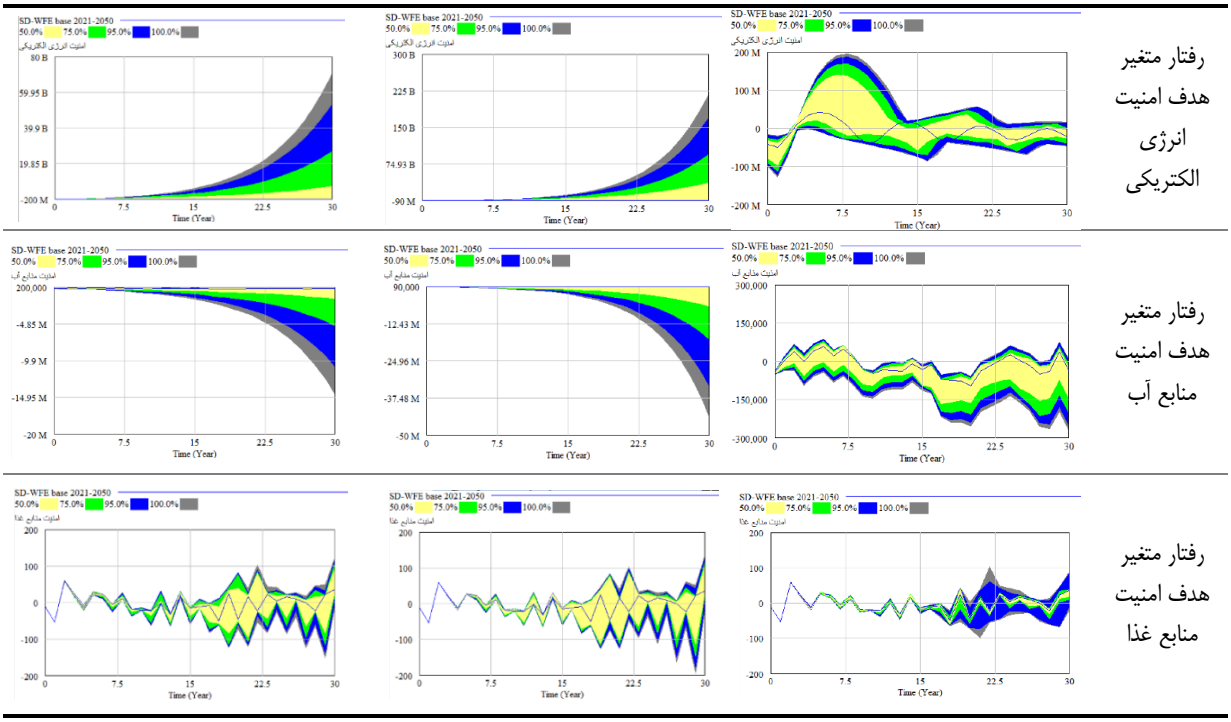


نمودار ۲. رفتار متغیرهای مدل در افق شبیه‌سازی ۳۰ ساله

در طول افق شبیه سازی سی ساله (۱۴۳۰–۱۴۰۰) مشاهده شده است که امنیت انرژی و امنیت آب با وجود نوساناتی که دارند، مقادیر آنها منفی شده و در گذر زمان به زیر صفر می‌رسند. همچنین روند انتشار گازهای گلخانه‌ای رو به افزایش خواهد بود. پس از شبیه سازی اولیه، تحلیل حساسیت مونت کارلو انجام شده است. در ادامه با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل، متغیرهایی که بیشترین دامنه تغییرات را ایجاد کرده‌اند و به عبارتی نقاط اهرمی مدل شناسایی شدند. نتایج تحلیل حساسیت مدل در جدول ۴ آورده شده است. نتایج تحلیل حساسیت مدل بر روی رفتار متغیرهای اصلی هدف شامل امنیت انرژی الکتریکی، امنیت منابع آب و امنیت منابع غذا به انجام رسیده است.

جدول ۴. تحلیل حساسیت مونت کارلو متغیرهای برون‌زای مدل و نتایج در متغیرهای هدف

متغیر و بازه	اثر منابع تجدیدناپذیر بر انتشار (صفر الی ۰,۰۰۰۰۱)	سرانه مصرف انرژی (۰,۵ الی ۲)	تلفات انتقال و توزیع انرژی (صفر الی ۰۰۰۰۰۰۰۰۱)
رفتار متغیر هدف امنیت انرژی الکتریکی			
رفتار متغیر هدف امنیت منابع آب			
رفتار متغیر هدف امنیت منابع غذا			
متغیر و بازه	مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی (صفر الی ۰,۱)	نرخ تولید انرژی سیکل ترکیبی (۰,۲ الی ۰,۵)	نرخ تولید نیروگاه گازی (۰,۲ الی ۰,۵)



شناسایی و ارزیابی سیاست‌ها: مطابق با نتایج تحلیل حساسیت مدل پویایی سیستم و شناسایی نقاط اهرمی و نیز به استناد استراتژی‌های کاهشی یا سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت تامین انرژی الکتریکی، سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر شرایط تغییر اقلیم بر اساس مطالعات و برنامه‌ریزی‌های موجود و همچنین با استفاده از نظر خبرگان در بخش‌های درگیر مسئله در چهار دسته راهبرد شناسایی گردید. با اعمال هر یک از سیاست‌ها در مدل، نتایج بر روی متغیرهای کلیدی از جمله: امنیت منابع آب، امنیت منابع غذا، امنیت انرژی الکتریکی، منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر، منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر، تقاضای انرژی الکتریکی و انتشار گازهای گلخانه‌ای سنجیده شد. در ادامه به تشریح هر یک از دسته راهبردها پرداخته شده است.

راهبرد توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر. این استراتژی متمرکز بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر طراحی شده است؛ برای این راهبرد سیاست کاهش تلفات عرضه انرژی الکتریکی از طریق بهره‌وری عوامل تولید در نظر گرفته شده است. اقدامات بهره‌وری انرژی برای اطمینان از بهره‌وری انرژی در تامین، تولید و مصرف انرژی اعمال می‌شود. هدف آن‌ها کاهش مقدار انرژی مورد نیاز برای ارائه همان سطح راحتی یا مطلوبیت است. اقدامات بهره‌وری انرژی از راه‌های اصلی کاهش تغییرات اقلیمی نیز هستند[۳۱].

با کاهش مصرف داخلی نیروگاه‌ها نیز بهره‌وری افزایش یافته و می‌توان به راهکار مدیریت عرضه دست یافت. در بررسی بهره‌وری نیروگاه‌های حرارتی به استناد ترازنامه انرژی کشور، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بالاترین بهره‌وری و نیروگاه‌های گازی کمترین بهره‌وری را داشته‌اند. نیروگاه-های گازی با احداث واحد بخار می‌توانند به نیروگاه سیکل ترکیبی تبدیل شوند و بازدهی خود را ۱۰–۱۵ درصد بالا ببرند. از طرفی مسئله وابستگی صنعت انرژی به گاز طبیعی همواره یکی از ایرادات صنعت برق کشور به حساب می‌آید، زیرا این مسئله می‌تواند امنیت انرژی کشور را به خطر بیندازد، در شرایطی که تامین گاز کشور به هر دلیل دچار مشکل شود، در این حالت قطعا صنعت برق کشور نیز با بحران جدی مواجه شده و شاهد خاموشی گسترده خواهیم بود. در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، فناوری انرژی هسته‌ای کم‌کربن است. سهم فناوری‌های کم‌کربن در ترکیب برق باید به صورت روز افزون افزایش یابد. این امر مستلزم تلاش برای تغییر به سمت استفاده از فناوری هسته‌ای است. محرک کلیدی برای این انتقال، بهره‌وری انرژی خواهد بود [۸]. همچنین انتظار می‌رود انرژی هسته‌ای نقش کلیدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته

باشد و بنابراین تأثیر کمتری بر تغییرات اقلیمی دارد در نتیجه سیستم تامین انرژی آینده را پایدارتر کند [۴۵ ،۳]. به استناد گزارشات سازمان انرژی اتمی ایران با توجه به امکانی که در اختیار کشور است و نیاز به توسعه انرژی و همچنین برای رفع کمبودهای کشور در حوزه انرژی، در نظر است تا سهم برق اتمی در افق ۲۰ ساله در سبد انرژی کشور به ۲۰ درصد برسد. بر این مبنا در سیاست‌های مربوط به راهبرد مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدناپذیر، با توجه به مطالعات در زمینه بهره‌وری انرژی، میزان تغییرات بهینه در هریک از بخش‌ها در نظر گرفته شده است.

راهبرد توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر. این استراتژی متمرکز بر افزایش تامین انرژی الکتریکی در کشور از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر (به استثنای برق آبی بزرگ) طراحی شده است. برای این راهبرد چهار سیاست توسعه سیستم‌های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی، توسعه نیروگاه‌های بیوگاز، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و توسعه نیروگاه‌های بادی در نظر گرفته شده است. یکی از جنبه‌های مهم بحث جهانی تغییر اقلیم، سرعت انتقال از منابع تجدیدناپذیر (سوخت‌های فسیلی) به انرژی‌های تجدیدپذیر است[۱۴]. هدف این تحولات حذف وابستگی فعلی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به یک سیستم انرژی مدرن پاک، کم‌کربن، ایمن و بسیار کارآمد است [۷]. ایران به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد، تا جایی که به طور میانگین سالیانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی گزارش شده است، اما با این وجود نتوانسته به جایگاهی که شایسته است دست یابد. به استناد ترازنامه انرژی کشور سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید برق در ایران در سال ۱۴۰۰، ۸/۴ درصد بوده است. بیشتر این انرژی به صورت آبی (۶/۴ ٪) و انرژی اتمی (۱/۶٪) و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر(بادی، خورشیدی و بازیافت حرارتی) ۰/۴٪ است. با توجه به این که ایران دارای پتانسیل کلیدی از منابع تجدیدپذیر(خورشیدی و بادی) است، نیاز است تلاش‌هایی برای تغییر سیستم‌های انرژی فعلی انجام شود. بنابراین در ایران ایجاد یک برنامه کلی برای توسعه انرژی در سه دهه آینده مهم است. اهداف این برنامه شامل محدود کردن سهم منابع انرژی تجدیدناپذیر در ترکیب انرژی، افزایش سهم انرژی‌های بادی، خورشیدی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر بوده و به طور خلاصه گنجاندن طرح‌های تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در برنامه کلی توسعه انرژی الکتریکی است. از جمله این طرح ها، افزایش ظرفیت نیروگاه‌های بیوگاز سوز در مراکز دفن بهداشتی زباله، توسعه نیروگاه‌های بازیافت حرارت از طریق تجمیع انرژی و توسعه سیستم‌های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی است. با توجه به موارد بیان شده، بر این اساس نرخ توسعه تولید برق از هریک از نیروگاه‌های تجدیدپذیر در مدل تغییر کرده است. میزان تغییرات و بازه امکان‌پذیری توسعه‌ها با توجه به مطالعات و به استناد گزارشات و مستندات در زمینه مربوطه اعمال شده‌اند. شایان ذکر است که در مدل، توسعه هریک از نیروگاه‌های تجدیدپذیر به دو علت کمبود عرضه برق و اثر امنیت انرژی الکتریکی و دیگری اثر افزایش تقاضا در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای صورت گرفته است. از آنجایی که سیاست‌های مربوط به این راهبرد در جهت مدیریت عرضه می‌باشند، تغییر اعمالی روی مدل در جهت توسعه از طریق تغییر اثر امنیت بر توسعه هر یک از نیروگاه‌ها صورت گرفته است.

راهبرد تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی. این استراتژی متمرکز بر مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی طراحی شده است. مدیریت تقاضا مربوط به برنامه‌ریزی، برای تمام مواردی است که اثرات مطلوبی بر روی مصرف انرژی الکتریکی دارد و مصرف‌کنندگان به تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد مصرف انرژی الکتریکی اجازه می‌یابند و به کاهش تقاضا کمک می‌کند. در راستای پیاده‌سازی سیاست‌های مدیریت سمت تقاضا و کاهش هدر رفت انرژی، گفته می‌شود که حفظ یک واحد انرژی برابر است با تولید دو واحد انرژی. رشد تقاضای انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر و بروز عدم تعادل بین نرخ رشد تولید و مصرف در این بخش، در کنار چالش‌های سمت عرضه برای ایجاد نیروگاه‌های جدید و توسعه شبکه انتقال و توزیع خصوصاً در دوره تحریم، ضرورت بهره‌گیری از راهکارهای سمت تقاضا و بهبود ساختارهای حکمرانی متناسب با این تغییر رویکرد را بیش از پیش روشن ساخته است. این راهکارها که عمدتاً باهدف ایجاد تعادل در عرضه و تقاضای انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با بهره‌گیری از ابزارهای متنوع مالی، تنظیم‌گری رفتاری و داوطلبانه، سعی در مدیریت مصرف یا کاهش آن دارند. از جمله منافع اجرای مدیریت تقاضا عبارتند از:کاهش هزینه‌ها، ارتقاء بهره‌وری انرژی، حفظ محیط زیست،کاهش آلاینده‌ها.

از آنجا که مقدار تقاضا، تعیین‌کننده‌ی مقدار تولید برق (عرضه) است. برای کاهش ضرورت به تولید برق اضافی، می‌تواند اقداماتی در جهت کاهش یا کنترل تقاضای برق صورت گیرد. برای مدیریت رشد تقاضای برق و ثبات اقتصادی برنامه‌های مدیریت تقاضای برق کمک می‌کنند تا مصرف‌کنندگان تقاضای انرژی و مصرف برق خود را کنترل کنند. همچنان این برنامه‌ها به منظور کم‌ساختن پروژه‌های تولیدی برق، کاستن

مصارف و ذخیره‌ی انرژی برق می‌باشد. روش‌های مدیریت تقاضای برق به نوع مشترک برق ارتباط دارد. با توجه به موارد بیان شده در این راهبرد چهار سیاست شامل موارد زیر در نظر گرفته شده است.

سیاست کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی: به استناد ترازنامه انرژی در ایران به طور میانگین ۹/۲ درصد تلفات عرضه انرژی (از تولید تا انتقال و توزیع) وجود دارد. در هدررفت انرژی در شبکه انتقال و توزیع برق امکان مدیریت بهینه وجود دارد. چنانچه با شناسایی تلفات به مدیریت و کاهش آن بپردازیم، در واقع منجر به افزایش عرضه انرژی الکتریکی شده‌ایم. براساس مطالعات صورت گرفته علت اصلی بالا بودن تلفات برق در ایران به‌دلیل فرسودگی شبکه توزیع و انتقال برق است که هزینه‌های نوسازی خطوط انتقال فرسوده و به کارگیری فناوری به روز بسیار کمتر از درآمد حاصل از نوسازی است.

سیاست کاهش سرانه مصرف انرژی: تقاضای برق متناسب با تقاضای بخش خانگی و تجاری که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف انرژی است. با توجه به این که جمعیت محرک رشد تقاضا بوده، بنابراین برنامه‌های مدیریت تقاضای برق در بخش خانگی و تجاری و کاهش سرانه مصرف انرژی از سیاست‌های مورد توجه در این راهبرد است.

سیاست کاهش تقاضای انرژی بخش آب: تقاضای برق همچنین متناسب با میزان تقاضای بخش آب جهت تصفیه است. استفاده از پمپ‌های با راندمان بالا در جهت بهره‌وری و کاهش مصرف برق برای تصفیه در بخش آب می‌تواند به کاهش تقاضای انرژی در بخش آب منجر شود.

سیاست کاهش تقاضای انرژی بخش غذا: تقاضای انرژی در بخش غذا حاصل تقاضای انرژی پمپاژ و تقاضای انرژی شبکه آبیاری است، بنابراین استفاده از پمپ‌های با راندمان بالا در جهت بهره‌وری مصرف برق در قسمت پمپاژ وکاهش مصرف انرژی برای برداشت آب از چاه و همچنین کاهش مصرف انرژی در شبکه آبیاری می‌تواند به کاهش تقاضای انرژی در بخش غذا منجر شود.

راهبرد تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی. سیاست کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر: رویکردهای سازگاری از مداخلات اولیه مبتنی بر زیرساخت به رویکرد توسعه‌گراتر مبتنی بر ایجاد انعطاف‌پذیری گسترده‌تر در برابر مخاطرات اقلیمی با پرداختن به علل زمینه‌ای آسیب‌پذیری به جای پاسخ دادن به علائم، تکامل یافته است [۵، ۶]. به طور کلی، دو دیدگاه متمایز در مورد چگونگی رویکرد سازگاری در زمینه‌های کشورهای در حال توسعه وجود دارد. اولی بر کاهش تغییرات آب و هوایی و دومی بر کاهش آسیب پذیری و ایجاد انعطاف پذیری تمرکز دارد؛ در عمل، بیشتر مداخلات در جایی بین این دو قرار می‌گیرند [۳۶،۲۵]. سازگاری موفقیت‌آمیز مستلزم مداخلاتی است که به طیف کامل چالش‌ها، از جمله علل زمینه‌ای آسیب‌پذیری، مدیریت خطرات اقلیمی و ایجاد ظرفیت پاسخگویی و توسعه رسیدگی کند. سازگاری مؤثر نخواهد بود مگر اینکه در سیاست توسعه ادغام شود [۳۲].

در بخش انرژی اقدامات اصلی شامل سیاست‌هایی برای ارتقای منابع انرژی تجدیدپذیر و اقداماتی برای افزایش بهره‌وری انرژی در جهت تامین امنیت عرضه است [۴۲]؛ که راهبردهای اول و دوم مطرح شده در پژوهش براین اساس طراحی شدند. مهار سهم انرژی در تغییرات آب و هوایی چالش اساسی دیگری در بخش انرژی در مسیر آینده‌ای پایدار است [۱،۲۴]. سیاست کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر با تمرکز بر این چالش در نظر گرفته شده است که در واقع سیاست‌های راهبرد اول دارای همپوشانی استراتژیک با این سیاست هستند؛ از آن جهت که مدیریت عرضه منابع تجدیدناپذیر از طریق ایجاد بهره‌وری عوامل تولید نیز سبب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع تجدیدناپذیر خواهند شد، بنابراین راهکارهای عملیاتی سیاست‌های راهبرد اول سبب کاهش اثر منابع تجدیدناپذیر بر انتشار مطابق با سیاست پیشنهادی در راهبرد چهارم نیز خواهند شد.

سیاست توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با توجه به افزایش تعداد روزهای آفتابی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران: با توجه به روند افزایش گازهای گلخانه‌ای و افزایش گرمایش زمین، ایران به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی دارای توانایی کلیدی است و به طور میانگین سالیانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی گزارش شده است. با تمرکز بر این پتانسیل می‌توان تهدید گرمایش را به فرصت توسعه تولید انرژی الکتریکی از منبع انرژی خورشیدی تبدیل کرد. لازم به ذکر است که از آنجایی که سیاست پیشنهادی برای توسعه نیروگاه خورشیدی و افزایش این تقاضا در جهت کاهش انتشارگازهای گلخانه‌ای و سازگاری با تغییرات اقلیمی می‌باشند، تغییر اعمالی روی مدل از طریق تغییر اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه خورشیدی صورت گرفته است.

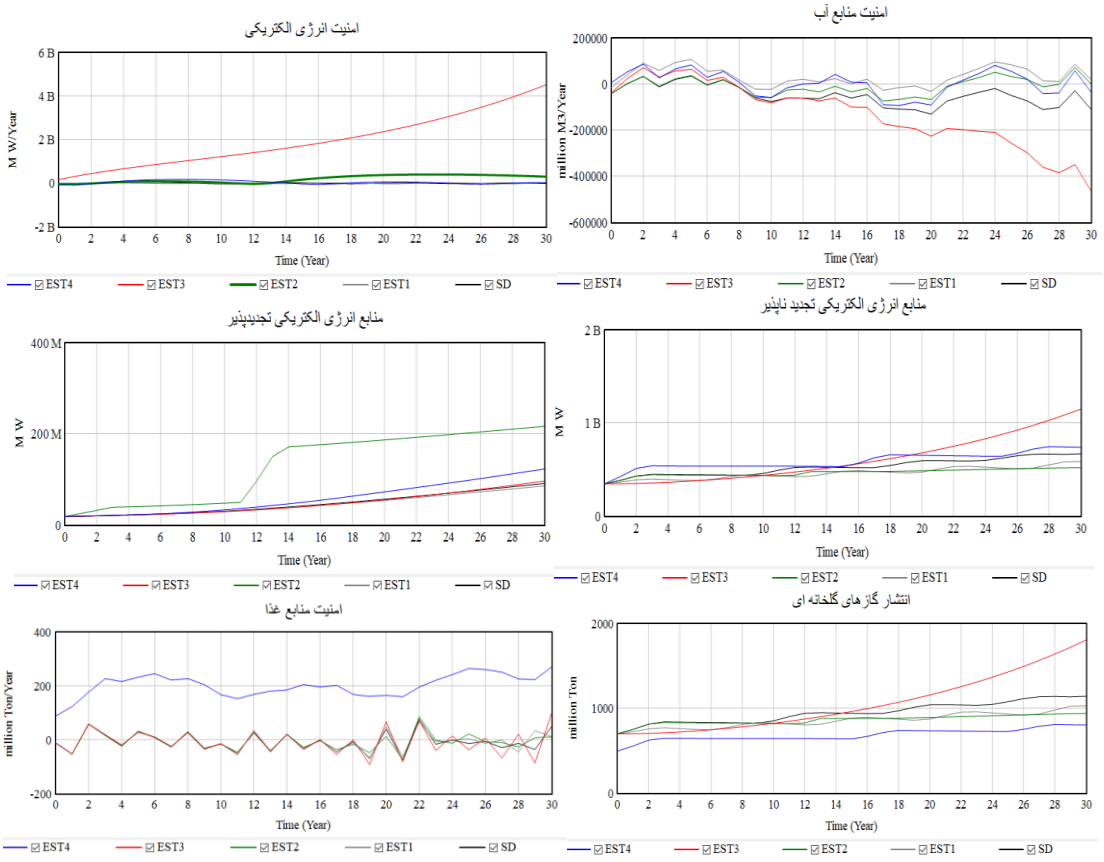
سیاست مدیریت آب در بخش غذا: بسیاری از زیرساخت‌های انرژی موجود در جهان به آب (یک منبع بسیار حساس به آب و هوا) وابسته است [۱۵]. در راهبرد چهارم سیاست مدیریت آب در بخش غذا از این منظر در نظر گرفته شده است که در میان منابع تجدیدپذیر منابع آب بیش از سایر منابع تحت تاثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرد. همچنین بزرگترین متقاضی آب بخش کشاورزی است. توجه این سیاست بر افزایش راندمان آبیاری از طریق توسعه فناوری سیستم آبیاری است. با توجه به اینکه در حال حاضر ۳۰ درصد اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری هستند، اگر سایر اراضی نیز تحت پوشش شبکه آبیاری قرار بگیرند، از کل نیاز آبیاری بخش کشاورزی کاسته خواهد شد [۲۶]. از طرفی درصد غذایی که سالانه در مراحل اصلی چرخه حیات سیستم غذایی از بین می‌رود، نشان دهنده اتلاف آب و انرژی‌ای است که برای تولید آن‌ها استفاده می‌شود. حجم آب مورد استفاده در تولید مواد غذایی کشاورزی بسیار زیاد است. بنابراین، اگر ۳۰ درصد از تمام مواد غذایی تولید شده به هدر رود، به این معنی است که بیش از ۳۰ درصد از آب مورد استفاده در تولید و پردازش مواد غذایی نیز به هدر می‌رود. این امر به معنای کمک به هدر رفتن منابع آب‌های سطحی وزیر زمینی است.کاهش ضایعات مواد غذایی برای پر کردن شکاف مواد غذایی و کمک به کاهش شکاف‌های آب و انرژی بسیار ضروری است. کاهش ضایعات و تلفات غذا به مشارکت دولت، سیاستگذاران، کشاورزان، صنایع غذایی، خرده فروشان و مصرف‌کنندگان نیاز دارد. در جدول ۵ راهبردها، دسته سیاست‌ها و تغییرات اعمالی روی مدل به صورت خلاصه ارائه شده است.

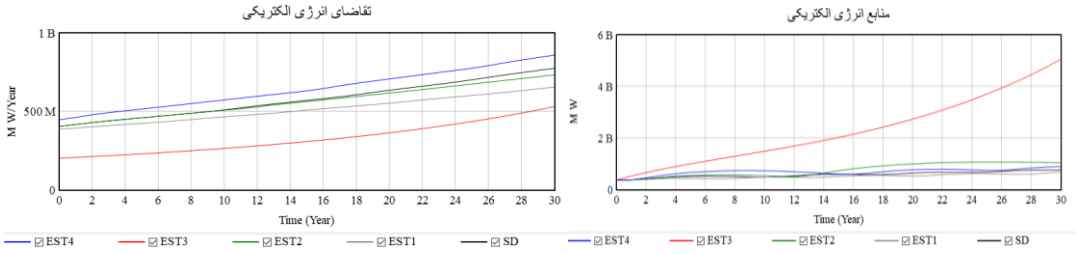
جدول ۵. خلاصه استراتژی‌ها و سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم

استراتژی	سیاست	تغییر اعمالی روی مدل	توصیه سیاستی میزان تغییر
توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدناپذیر	کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید	افزایش نرخ تولید انرژی سیکل ترکیبی	۱۸٪ افزایش در طول ۵ سال
		کاهش مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه‌های تجدیدناپذیر	۲٪ کاهش در طول ۵ سال
		کاهش نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر	۱۸٪ کاهش در طول ۵ سال
		افزایش نرخ اثر امنیت بر توسعه نیروگاه هسته ای	۱۰-۲۰٪ افزایش(۱۶٪) در طول ۵ سال
توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر	تجمیع انرژی و توسعه سیستم های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بازیافت حرارتی	۰/۰۰۰۶ به ۰/۰۲ در طول ۵ سال
	توسعه نیروگاه‌های بیوگاز	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بیوگاز	از ۰/۰۰۰۲ به ۰/۰۲ در طول ۱۰ سال
	توسعه نیروگاه‌های خورشیدی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه خورشیدی	از ۰/۰۰۰۱۷ به ۰/۵ در طول ۱۰ سال
	توسعه نیروگاه‌های بادی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بادی	از ۰/۰۱ به ۰/۳ در طول ۱۰ سال
تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر	کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی	کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی	۵٪ کاهش
	کاهش سرانه مصرف انرژی	کاهش سرانه مصرف انرژی به مقدار میانگین جهانی	از ۰/۹۲۶ به ۰/۱۸۲
	کاهش تقاضای انرژی بخش آب	کاهش تقاضای انرژی بخش آب	۳۰٪ کاهش در طول ۵ سال
	کاهش تقاضای انرژی بخش غذا	کاهش انرژی هر واحد برداشت از چاه	۰/۰۰۰۰۰۶ به ۰/۰۰۰۰۰۳ در طول ۵ سال

استراتژی	سیاست	تغییر اعمالی روی مدل	توصیه سیاستی میزان تغییر
مدیریت تقاضای انرژی		کاهش انرژی هر واحد شبکه آبیاری	۱۰٪ کاهش در طول ۵ سال
تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر	کاهش اثر منابع انرژی تجدیدناپذیر بر انتشار	از ۰/۰۰۰۰۰۱۳۷۹ به ۰/۰۰۰۰۰۰۷۸۶۰۳ در طول ۱۰ سال
	توسعه نیروگاه خورشیدی با توجه به افزایش تعداد روزهای آفتابی تحت تاثیر تغییر اقلیم	افزایش اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه خورشیدی	از ۰/۰۰۰۸۶ به ۰/۰۰۳ در طول ۱۰ سال
	مدیریت تقاضای آب در بخش غذا	افزایش راندمان آبیاری	از ۵۶٪ به ۸۵٪ در طول ۵ سال
		افزایش سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری	۲۷٪ افزایش در طول ۵ سال
		کاهش تلفات غذا به مقدار میانگین جهانی	از۳/۵ به ۰/۹ در طول ۵ سال

در ادامه با اعمال سیاست‌ها بر روی متغیرهای مدل، چهار استراتژی پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفتند. نمودار ۳ رفتار متغیرهای کلیدی مدل به منظور مقایسه چهار استراتژی را نشان می‌دهد.



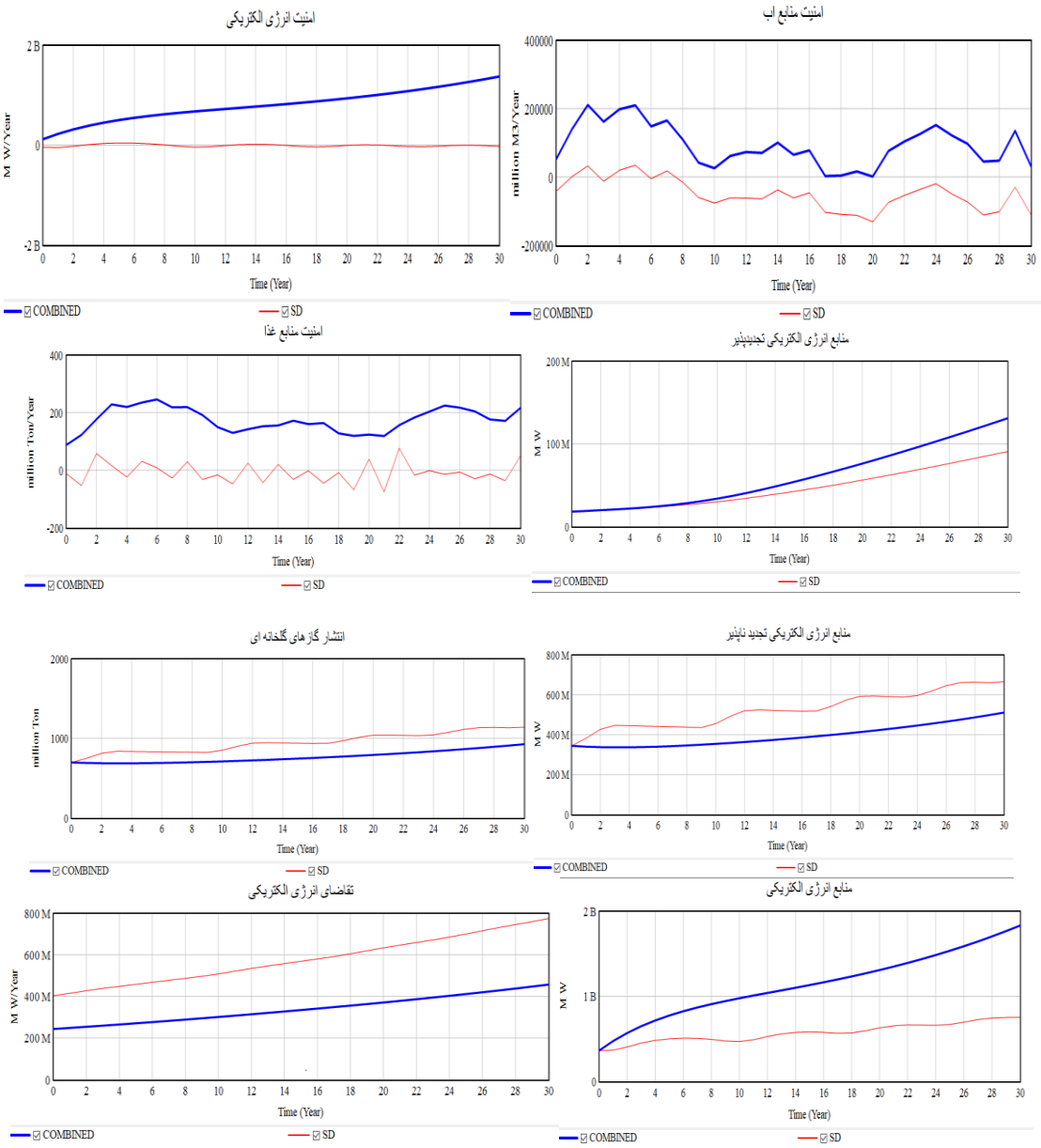


نمودار ۳. مقایسه چهار استراتژی از طریق سیاست‌های اعمالی روی متغیرهای مدل در افق شبیه سازی ۳۰ ساله

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از سیاست‌ها متمرکز بر توسعه و بهبود از یک یا دو منظر هستند و به طور هم‌زمان بهبود در همه متغیرهای کلیدی مدل حاصل نشده است. با توجه به اینکه هر یک از استراتژی‌ها به تنهایی منجر به بهبود در همه متغیرهای کلیدی نشدند، استراتژی سیاست‌های منتخب ترکیبی در نظر گرفته شد. بر این مبنا پس از اعمال هر یک از سیاست‌ها به صورت جداگانه بر روی مدل و نیز اعمال سیاست‌های ترکیبی دوتایی و سه تایی، ترکیبات مختلف بر روی مدل مورد آزمون قرار گرفت و متغیرهای کلیدی مدل بررسی شد و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان دادند ترکیبی از سیاست‌های هر چهار استراتژی که در جدول ۶ آورده شده است، بهترین راهکار برای بهبود متغیرهای کلیدی مسئله برای ۳۰ سال شبیه‌سازی شده می‌باشند. نمودار ۴ نتایج اعمال سیاست‌های ترکیبی را بر روی متغیرهای کلیدی نشان می‌دهد.

جدول ۶. سیاست‌های ترکیبی منتخب سه استراتژی مدیریت تقاضای انرژی، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و سازگاری با اقلیم

ردیف	سیاست‌های منتخب	تغییر اعمالی روی مدل	توصیه سیاستی میزان تغییر
۱	کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید	افزایش نرخ تولید انرژی سیکل ترکیبی	۱۸٪ افزایش در طول ۵ سال
		کاهش مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه های تجدیدناپذیر	۲٪ کاهش در طول ۵ سال
		کاهش نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر	۱۸٪ کاهش در طول ۵ سال
		افزایش نرخ اثر امنیت بر توسعه نیروگاه هسته‌ای	۱۶٪ افزایش در طول ۵ سال
۲	کاهش سرانه مصرف انرژی خانگی و تجاری	کاهش سرانه مصرف انرژی به مقدار میانگین جهانی	از ۰/۹۲۶ به ۰/۱۸۲ در طول ۵ سال
۳	کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی	کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی الکتریکی	۵٪ کاهش تلفات توزیع در طول ۵ سال
۴	توسعه سیستم‌های بازیافت حرارت واحدهای صنعتی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بازیافت حرارتی	تغییر از ۰/۰۰۰۶ به ۰/۰۲ در طول ۵ سال
۵	مدیریت تقاضای آب در بخش غذا مبتنی بر سازگاری با تغییر اقلیم	افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی	تغییر از ۵۶٪ به ۸۵٪ در طول ۵ سال
		افزایش سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری در بخش کشاورزی	افزایش ۲۷٪ در طول ۵ سال
		کاهش تلفات غذا به مقدار میانگین جهانی	تغییر از ۳/۵ به ۰/۹ در طول ۵ سال
۶	توسعه نیروگاه‌های خورشیدی مبتنی بر سازگاری با تغییر اقلیم	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه خورشیدی و افزایش اثر تقاضای انرژی تجدیدپذیر بر توسعه نیروگاه خورشیدی	تغییر اثر امنیت از ۰/۰۰۰۱۷ به ۰/۵ و اثر تقاضا از ۰/۰۰۰۸۶ به ۰/۰۰۳ در طول ۱۰ سال
۷	توسعه نیروگاه‌های بادی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بادی	تغییر از ۰/۰۱ به ۰/۳ در طول ۱۰ سال
۸	توسعه نیروگاه‌های بیوگاز	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بیوگاز	از ۰/۰۰۰۲ به ۰/۰۲ در طول ۱۰ سال



نمودار ۴. مقایسه استراتژی ترکیب سیاست‌های منتخب در افق شبیه سازی ۳۰ ساله

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش تلاش شد ابعاد تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم در کشور مورد مطالعه قرار گیرد تا با یک رویکرد سیستمی به شبیه‌سازی رفتار سیستم تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم در افق ۳۰ ساله (۱۴۰۰–۱۴۳۰) در کشور پرداخته شود. نتایج نشان داد که مدل شبیه‌سازی‌شده می‌تواند رفتار و نتایج قابل قبولی را نسبت به واقعیت ارائه دهد. حفاظت، مدیریت مصارف انرژی و توسعه انرژی جایگزین ضرورت می‌یابد. نهایتا باید برنامه‌های تولید و مصرف انرژی الکتریکی در کشور بر اساس الگوهای هماهنگ با محیط زیست بخصوص تغییر اقلیم و جایگزینی انرژی‌های نو در کشور تنظیم گردد و فرهنگ‌سازی مناسب در این زمینه بطور جدی انجام شود. بر این اساس با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل و نظر خبرگان و تصمیم‌گیرندگان راه‌کارهای مطلوب در راستای تامین امنیت انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همانطور که در مقایسه سیاست‌ها مشاهده شد، سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت

تقاضا در کوتاه مدت سبب بهبود امنیت انرژی شده است. همچنین سیاست کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید در کوتاه مدت سبب بهبود امنیت آب، کاهش تقاضا و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. بنابراین این دو دسته سیاست می‌توانند راهکارهای کوتاه مدت مدنظر قرار بگیرند. با توجه به سیاست بهره‌روی عوامل تولید، ظرفیت کنونی قابل تبدیل به سیکل ترکیبی در نیروگاه‌های کشور در حدود ۷۵۰۰ مگاوات است. با انجام عملیات تبدیل نیروگاه‌های گازی، سالانه ۱۲ میلیارد متر مکعب در مصرف سالانه گاز صرفه‌جویی خواهد شد، راندمان ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی به بیش از ۴۲ درصد خواهد رسید و از انتشار حدود ۴۳ میلیون تن گازِ گلخانه‌ای در سال جلوگیری می‌شود.

از طرفی سیاست‌های مبتنی بر مدیریت عرضه از منابع تجدیدپذیر در بلند مدت و با تاخیر زمانی ۱۰-۱۲ سال سبب جهشی در بهبود امنیت انرژی و افزایش تولید از منابع تجدیدپذیر و همزمان کاهش عرضه از منابع تجدیدناپذیر و در نتیجه کاهش انتشار گازهای‌گلخانه‌ای شده‌اند. همچنین سیاست مدیریت تقاضای آب در بخش غذا تاثیر قابل توجهی در بهبود امنیت غذایی ایجاد کرده و نیز با تاخیر زمانی و بعد از حدود ۱۰ سال سبب افزایش تولید و عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر شده است. بنابراین سیاست‌های منتخب ترکیبی در دوسته سیاست‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در نظر گرفته شدند.

در مورد سیاست توسعه نیروگاه‌های بازیافت حرارتی شایان توجه است که حرارت ایجاد شده در فرایندهای صنعتی اغلب بسیار زیاد بوده و این حرارت تنها در بخشی از فرایند تولید که مورد نیاز می‌باشد مورد مصرف قرار گرفته و پس از آن به محیط آزاد هدایت می‌گردد. در نیروگاه‌های بازیافت حرارت با هدایت گازهای خروجی از کوره‌ها و یا فرایندهای صنعتی به یک توربین بخار اقدام به تولید برق می شود. حرارت بازیافت تلفات حرارتی در صنایع باعث افزایش راندمان شده و بدون نیاز به مصرف سوخت اضافی، برق و یا حرارت قابل استفاده نیز در کنار فرآیند صنعتی تولید می‌گردد. تولید انرژی الکتریکی از بازیافت انرژی هدررفته در صنعت سیمان می‌تواند تا ٪۴۰ برق موردنیاز در کارخانه را تامین کند. سیاست برای تصمیم‌گیری درست بسیار مهم است. در سطح جهانی ثابت شده است که سیاست‌های مناسب تا حد زیادی باعث گسترش بازار انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. کشورهایی مانند برزیل، سنگال، چین، هند و آفریقای جنوبی در رسیدگی به چالش‌های دسترسی و پایداری انرژی، گنجاندن طرح‌های انرژی تجدیدپذیر در برنامه‌های بلندمدت گسترده‌تر، پیشرفت بارزی داشته‌اند [۱۰]. شواهد نشان می‌دهد که نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر به بازارهای در حال توسعه که انعطاف‌پذیر هستند وابسته است تا به فناوری یا اقتصاد. سیاست‌هایی که مسئول توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هستند به بهبود امنیت انرژی، تشویق توسعه اقتصادی، به ویژه در مورد بخش روستایی و کشاورزی و همچنین حفاظت از آب و هوا و محیط زیست، گسترده تر از اثرات سایر سیاست‌ها کمک می‌کنند. بررسی پیشینه نشان می‌دهد که انواع مختلفی از سیاست‌ها در بسیاری از کشورها در سراسر جهان برای ترویج تولید برق تجدیدپذیر استفاده شده است. برای مثال، برخی از کشورها صندوق‌های ویژه انرژی تجدیدپذیر را برای تأمین مالی مستقیم سرمایه‌گذاری‌ها، ارائه وام‌های کم بهره، یا تسهیل بازارهای انرژی‌های تجدیدپذیر به روش‌های مختلف از جمله تحقیقات، آموزش و استانداردها ایجاد کرده‌اند. یک مثال خوب، صندوق برق دهی روستایی است که در سنگال تأسیس شده است و تأمین مالی امتیازات انرژی‌های تجدیدپذیر را با یارانه سرمایه گذاری تا ۸۰ درصد سرمایه اولیه تأمین می‌کند. به طور مشابه، فیلیپین یک صندوق ۲ میلیارد دلاری در سال ۲۰۰۹ تأسیس کرد و از بیش از ۶۵ پروژه انرژی تجدیدپذیر حمایت کرد [۳۵].

حال، بر اساس پیاده‌سازی سیاست‌های منتخب ترکیبی مدل، راهکارهای زیر به تامین امنیت انرژی الکتریکی تحت تاثیر اقلیم منجر خواهند شد:

- توسعه ۱۶ درصدی نیروگاه‌های هسته‌ای به منظور مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدناپذیر و کم‌کربن در جهت کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید
- کاهش ۱۸ درصدی نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر و افزایش تولید نیروگاه سیکل ترکیبی از طریق تبدیل گازی به سیکل ترکیبی در جهت بهره‌وری عوامل تولید و مدیریت عرضه از منابع تجدیدناپذیر
- تجمیع انرژی و توسعه سیستم‌های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی در جهت توسعه نیروگاه‌های بازیافت حرارتی به میزان ۳۲ درصد
- توسعه نیروگاه‌های بیوگاز، بادی و خورشیدی با توجه به توانایی‌های کلیدی موجود در کشور در جهت مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
- کاهش ۵ درصدی تلفات انتقال و توزیع انرژی در جهت مدیریت تقاضا و حفظ امنیت انرژی الکتریکی

- کاهش سرانه مصرف انرژی و رسیدن به میانگین جهانی با توجه به افزایش تقاضای روز افزون ناشی از افزایش جمعیت
- مدیریت تقاضای آب در بخش غذا با استفاده از افزایش راندمان آبیاری تا حدود ۸۵ درصد، افزایش سطح اراضی تحت شبکه آبیاری و کاهش تلفات غذایی

شایان ذکر است در این مطالعه شبیه‌سازی بر اساس روندهای تاریخی صورت گرفته است. بنابراین در زمینه پیشنهادهای پژوهش برای تحقیقات آتی بررسی اثرات تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای تغییر آب و هوا و مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی پیشنهاد می‌گردد. در این بررسی متغیرهای فنی و اقتصادی مدنظر قرار نگرفته‌اند. مطالعات بیشتری در مورد تأثیرات فنی و هزینه‌ای تغییرپذیری منابع تجدیدپذیر و تأثیرات رویدادهای آب و هوایی شدید بر همه عناصر سیستم انرژی مورد نیاز است. تأثیر تغییرات شدید آب و هوا نسبت به تغییرات تدریجی (مانند رویدادهای آب و هوایی با مقادیر بالاتر یا پایین تر از حد نرمال) می‌تواند قابل توجه باشد. دوره‌های طولانی بادهای آرام یا خشکسالی، یا کاهش قابلیت پیش‌بینی الگوهای آب و هوا، این دوره‌ها که ممکن است تحت تغییرات آب و هوایی بیشتر یا شدیدتر رخ دهند؛ می‌تواند برای سیستم‌های انرژی با سهم بالایی از انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده دردسرساز باشد.

منابع

1. Abbasi, T., & Abbasi, S. (2010). Renewable energy sources: Their impact on global warming and pollution. *PHI Learning.*
2. Amini Naghani, F., Mirabbasi Najafabadi, R., Zamani, R., & Nasr Esfahani, M. (2021). Investigating the effect of climate change on the amount of electrical energy production of Karun Dam 4. I*ranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11th year, number 44, 236-251 [In Persian]
3. Avraamidou, S., Beykal, B., Pistikopoulos, I., & Pistikopoulos, E. (2018). A hierarchical Food-Energy-Water Nexus (FEW-N) decision-making approach for Land Use Optimization. *Computer Aided Chemical Engineerin*g, 44, 1885-1890. doi:10.1016/B978-0-444-64241-7.50309-8
4. Bakhtiari, P., Ostadi Jafari, M., Karamroudi, M., & Habibian, M. (2009). The place of renewable energies in the theory of sustainable passenger transportation. *Traffic Management Studies* 4(12), 77-96, https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=104215 [In Persian]
5. Borowski, P. (2020). Nexus between water, energy, food and climate change as challenges facing the modern global, European and Polish economy. AIMS Geosciences. Warsaw University of Life Sciences. Institute of Mechanical Engineering, 6(4), 397-421. doi:10.3934/geosci.2020022
6. Chen, A., Stephens, A., Koon Koon, R., Ashtine, M., & Koon, K.-K. (2020). Pathways to climate change mitigation and stable energy by 100 % renewable for a small island: Jamaica as an example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121. doi:10.1016/j.rser.2019.109671
7. Cronin, J., Anandarajah, G., & Dessens, O. (2018, August 6). Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. *Climatic Change*, 151, 79-93. doi:10.1007%2Fs10584-018-2265-4
8. Dayant, F. Spring 2021. Systemic modeling of planning the development of renewable electricity production in competition with fossil electricity. *Scientific journal of energy planning and policy research*, 7th year, number 22, pages 7-50. [In Persian]
9. Ebrahimi Serin Dizj, A., & Zarghami, M. (2016). Comparing the impact of revitalization policies under the influence of climate change with the help of systems dynamics; A case study of Urmia lake ecosystem. *Iran Water Resources Research*, 13(4), 184-189. [In Persian]
10. Elum, Z., & Momodu, A. (2017). Climate change mitigation and renewable energy for sustainable. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 72-80. doi:10.1016/j.rser.2017.03.040
11. Gernaat, D., Boer, H., Daioglou, V., Yalew, S., Müller, C., & Vuuren , D. (2021). Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature Climate Change*, 11, 119-125. doi:10.1038/s41558-020-00949-9
12. Ghasemi, M., Soltani Mohammadi, A., Naseri, A., & Moazd, H. (2019). Evaluation and application of the system dynamics model in the investigation and determination of nitrate leaching under different climatic scenarios in Amir Kabir sugarcane cultivation and industrial lands. *Iran Irrigation and Drainage Journal*,14(1), 217-229.
13. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 (2018 edition). Retrieved from irena.org
14. Global Trends 2040. (2021). *A Publication Of The National Intelligence Council*, ISBN 978-1-929667-33-8. Retrieved from www.dni.gov/nic/globaltrends
15. H. Dale , V., A. Efroymson , R., & L. Kline, K. (2011). The land use–climate change–energy nexus. *Landscape Ecol* (2011) 26:755–773, 26, 755-773. doi:10.1007/s10980-011-9606-2
16. IEA (International Energy Agency) (2015). Global energy-related emissions of carbon dioxide stalled in 2014. http://www.iea.org/newsroom/news/2015/march/global-energy-related-emissions-of-carbondioxide-stalled-in-2014.html. Accessed 15 Apr. 2017
17. IEA (International Energy Agency) (2014a). Capturing the multiple benefits of energy efficiency. IEA, Paris
18. IEA. (2013) OECD/IEA Technology Roadmap. Wind Energy 63
19. IEA (International Energy Agency) . World energy outlook: 2008. OECD/IEA; 2008.p.578
20. IPCC (Intergovenmental Panel on Climate Change)((2014). *Climate change 2014: mitigation of climate change*. IPCC, New York.
21. IRENA (International Renewable Energy Agency) (2015) Synergies between renewable energy and energy efficiency. IRENA/Copenhagen.
22. IRENA (International Renewable Energy Agency) (2015). http://www.irena.org/document downloads/publications/irena_water_energy_food_nexus_2015.pdf.
23. Kang , J.,& Wei , Y., & Liu , L., & Han , R., &Yu , B., & Wang , J. (2020). Energy systems for climate change mitigation: A systematic review. *Applied Energy, 263*. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114602
24. Kaygusuz, k. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1116-1126. doi:10.1016/j.rser.2011.11.013

25. Kelly , P., & Adger , W. (2000). Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation. *Climatic Change* , 47, 325-352. doi:10.1023/A:1005627828199
26. Keyhanpour, M., Mousavi Jahormi, S., & Ebrahimi, H. (September 2021). Dynamic analysis of sustainable management of water resources based on correlation of water-food-energy resources. *Iranian Irrigation and Drainage Journal*, 15(3), 567-581.[In Persian]
27. Liani, Q.,& Bakhshudeh, M. (2018).Water security in the Kowsar dam catchment under climate change conditions: application of the dynamic system method. *Agricultural Economics*, 13(1),47-72. [In Persian]
28. Mei , H., & Li , Y., & Suo , C., & Ma , Y., & Lv , J. (2020). Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. *Applied Energy*, 262. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114568
29. Nakhainejad, M., Abbasi, M., Zare Mehrjoui, Y., & Asadi Zarchi, A. (2003). Designing a model to reduce greenhouse gas emissions in the electricity sector using the integrated approach of linear programming and system dynamics (case study: Iran's power plants)). *Production and Operations Management*, 13(1), 51-77. doi:10.22108/jpom.2022.129313.1382. (In Persian)
30. Perera, A., Nik, V., Chen, D., Scartezzini, J.-L., & Hong, T. (2020, February 17). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5, 150-159. doi:10.1038/s41560-020-0558-0
31. R Albrecht, T., Crootof, A., & A Scott, C. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13(043002). doi:10.1088/1748-9326/aaa9c6/meta
32. Rasul, G., & Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682-702. doi:10.1080/14693062.2015.1029865
33. Ravestein, P., Schrier, G., Haarsma, R., Scheele, R., & Broek, M. (2018, December). Vulnerability of European intermittent renewable energy supply to climate change and climate variability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 497-508. doi:10.1016/j.rser.2018.08.057
34. REN21. Renewables 2010: global status report. 2010.
35. REN 21. Renewables 2014 global status report. Paris; 2014.
36. REN 21. Renewables 2022: global-futures-report . https://www.ren21.net/2022-renewables / global-futures-report
37. Report of the National Meteorological Organization (2022), report of the reference secretariat of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Risks of climate change and possible consequences for governments.[In Persian]
38. Sayadi, M., Soltani, A., & Mohadi, S. (Autumn 2018). Presenting a conceptual model of water-energy-food nexus dynamics in Iran: a systemic approach. *Environmental and Natural Resources Economics Quarterly*, third year, number 6, pages 79-104.[In Persian]
39. Solaun, K., & Cerda, E. (2019, December). Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116(109415), 1-16. doi:10.1016/j.rser.2019.109415
40. Soleimani Paytaq, M., & Arman Mehr, M. (2018). Examining the role of economic policies on the use of new energy in Iran's power plants (case study: subsidy, pricing and cost policies). *Financial and Economic Policy Quarterly*, 7(28), 35-59.[In Persian]
41. Sterman, J. (2000): Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. The first volume. (Translator. Korosh, B. Banafsheh, R. Laleh, M. Parisa, A. Marzieh, & F. Hassan,) Tehran: Organization for the study and compilation of humanities books of universities (Samt).[In Persian]
42. Streimikiene, D., Balezentis , T., Alisauskaite-Seskiene , I., Stankuniene, G., & Simanaviciene, Z. (2019). A Review of Willingness to Pay Studies for Climate Change Mitigation in the Energy Sector. *energies*, 12(8). doi:10.3390/en12081481
43. World Bank (2012) Turn down the heat: why a 4°C warmer world must be avoided. World Bank, Washington.
44. World Bank (2013) Turn down the heat: climate extremes, regional impacts, and the case for resilience. World Bank, Washington.
45. World Meteorological Organisation (WMO)(2022). https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate
46. Yalew, S., van Vliet, M., Gernaat, D., & Ludwig, F. (2020, August 3). Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *nature energy*, 5, 794-802. doi:10.1038/s41560-020-0664-z