Journal of Sustainable Energy Systems

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

Research Paper

Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method

Mahdi Gandomzadeh, Sara Mahmoudian Younesi, Abolghasem Mosayyebi, Majid Zandi*

Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 06 November 2022
Revised 07 December 2022
Accepted 21 December 2022

Keywords:
Energy storage
Scenario
Cross-Impact Balance method
Battery
Hydrogen
pumped-hydro storage
Iran

ABSTRACT

Scenario writing is a way to draw the future workspace. Different scenarios suggest different strategies that will have different applications. In the process of scenario writing, real options are found to decide what goals should be chosen and what the means to achieve those goals could be. This article has extracted the descriptors and modes that have been adapted to Iran's conditions after the discussion and exchange of opinions in the expert meetings. Next, the Cross-Impact Balance (CIB) was formed to evaluate the parameters relative to each other, and the simulation of descriptors and states was performed in the ScenarioWizard software. The results introduced 9 scenarios to achieve different goals in the state space. They followed 7 scenarios of technology development in the energy sector and two scenarios of technology development in the strategic sector of industry and mining. In the results, it was found that 8 descriptors were compatible in only one state and the remaining 5 descriptors found meaning in more than one compatible state. The development of distributed generation up to 15 thousand megawatts to expand the systems of combined heat and power, as well as use in areas far from the grid, and determining the penetration rate of renewable sources of 10 thousand megawatts in the country's electric energy network were among the important numerical states selected in the descriptors. Expanding international relations, attracting foreign capital, using domestic government credit resources such as the budget and credits of the National Development Fund of Iran, the development of targeted industrial knowledge-based companies according to the needs of the country and simultaneous attention to planning, infrastructural and operational parameters were considered important in the discussion of the resilience of the power grid from the selected non-numerical states At the end of the results, battery, hydrogen and pumped-hydro storage were selected as the preferred technologies.

Introduction

The development of energy storage technologies and systems is one of the implementation plans emphasized in many strategic development documents of the Islamic Republic of Iran. The foresight of the officials of this field in the implementation of the country's strategic plans leads to less dependence on fossil fuel sources, greater social welfare and increased competition in the energy market.

The development of energy storage technologies in the country will lead to the progress of various sectors such as transportation, information technology, industry and mining. In addition, progress in the energy sector will also be evident at a faster rate than other sectors. The main challenge with the penetration of a large percentage of renewable energies in the near future will be that policy and executive officials should choose which of the types of energy storage sources. A process that decision-makers in the energy field must identify solutions and determine the right path of

* Corresponding Author, Email: m_zandi@sbu.ac.ir

investment years before the maximum penetration of renewable energies.

For this purpose, one of the ways to explain the future paths for energy storage systems with a comprehensive review is to express the solutions in the form of scenarios.

After a general review of the studies regarding the external and internal status of energy storage technologies, it was concluded that a comprehensive review of the future of energy storage in Iran has not been done so far.

The results of scientific studies and review of upstream documents regarding energy storage made it clear that 5 general aspects are of interest in this issue. International relations, electricity industry, investment dimensions, technological approach and national challenges and passive defense constitute 5 general factors.

This article has been prepared considering the general aspects of the development of electrical energy storage in Iran with the aim of developing development scenarios for this purpose with the CIB analysis.

The salient features of this article include 3 items:

1. The characteristics that were used to determine the scenario in other studies were not compatible with the conditions of Iran. This article has proposed the descriptors and their modes according to the social, political and economic conditions of Iran.

2. According to the reviews of the authors of this work, a coherent structure of presenting the development scenario for the future of energy storage in Iran has not been provided so far.

3. For the first time in Iran, the parameters of the energy storage field in Iran have been evaluated with the CIB analysis and related scenarios are proposed.

Methodology

Possible stakeholders need to investigate the future of the presence of storage resources in the energy basket in the form of scenarios and the possibilities of using them in different situations. One of the reasons that this study has taken into account is the current situation in the country, which is a combination of foreign relations, the granting of hidden subsidies, and the impatience of production and consumption in the energy sector. With the process of paying attention to the explanations, this article has attempted to provide scenarios with the CIB analysis by covering all effective parameters in the future of electrical energy storage in Iran.

By studying valid scientific sources, the research team identified the electrical energy storage descriptions. Subsequently, using the knowledge of the team of elite members of the Shahid Beheshti University of Tehran's Energy Research Center, the descriptions classified the descriptions below:

Technological approaches:

1. Development of strategic technologies
2. Storage Strategy
3. Knowledge-Based Development

International Relations:

1. Foreign policy

Investment dimensions:

1. Foreign investment
2. The power of governmental investment
3. Crowd funding and Stock Exchange

National challenges and non-operating defense:

1. Resiliency of the power grid
2. The hidden energy subsidy
3. Energy security
4. Reducing environmental issues

Electrical Energy Network:

1. Penetration rate of renewable energy
2. The development of distributed generation and smart grid
3. Improvement the load duration curve

After holding numerous bilateral meetings and the presence of companies and policymakers in the field of electrical energy storage in elite sessions, states were measured and the CIB matrix was completed.

Extraction of Selected Scenarios

According to the evaluation performed by the elite group, the CIB matrix were completed. With the modeling in the ScenarioWizard software, the selected scenarios were obtained according to Table 1 with blue color.

Three scenarios have been selected from the nine scenarios in Table 1 In the comprehensive review of compatible scenarios, some of the features that were considered in the selection of the proposed items are:

The scenarios should be selected in a way to cover the development of strategic technologies in both the fields of energy and industry and mining

2. To take advantage of the potential of the main storage technologies to control the country's peak electric energy consumption in different periods of time.

3. The capacities of the production and knowledge-based sector should be used in the development of storage resources.

These three scenarios seem to be the best choices for the future considering the risks that exist for other scenarios.

Table 1. Selected scenarios for the development of electrical energy storage in Iran

<table>
<tr><th>Scenario 1</th><th>Scenario 2</th><th>Scenario 3</th><th>Scenario 4</th><th>Scenario 5</th><th>Scenario 6</th><th>Scenario 7</th><th>Scenario 8</th><th>Scenario 9</th></tr>
<tr><td colspan="6">Development of strategic technologies:
Energy sector</td><td colspan="2">Development of strategic technologies:
Industry and mining sector</td><td>Development of strategic technologies:
Energy sector</td></tr>
<tr><td colspan="2">Foreign investment:
Foreign direct investment is made.</td><td>Foreign investment:
In the form of multinational cooperation companies</td><td>Foreign investment:
Foreign direct investment is made.</td><td>Foreign investment:
In the form of multinational cooperation companies</td><td>Foreign investment:
Foreign direct investment is made.</td><td colspan="2">Foreign investment:
In the form of multinational cooperation companies</td><td>Foreign investment: In the form of multinational cooperation companies</td></tr>
<tr><td colspan="9">Foreign policy:
Development of foreign relations</td></tr>
<tr><td colspan="9">The power of governmental investment:
There should be no problem in allocating funds and credits of the National Development Fund.</td></tr>
<tr><td colspan="9">Crowd funding and Stock Exchange:
Movement in this direction should be accelerated.</td></tr>
<tr><td colspan="9">The development of distributed generation and smart grid:
The growth of distributed generation up to 15,000 megawatts will be accompanied by the expansion of cogeneration systems for use in off-grid areas. The development of smart networks in the electricity industry should also be pursued.</td></tr>
<tr><td colspan="9">Resiliency of the power grid:
Planning and infrastructural procedures and operation should be emphasized.</td></tr>
<tr><td colspan="8">The least environmental threats:
There is the least challenge in urban air pollution.</td><td>The least environmental threats:
The challenges of the country's water resources are in their least.</td></tr>
<tr><td colspan="9">Development of knowledge-based technology and innovation centers:
Development of purposeful industrial innovation centers.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Improvement the load duration curve:
Daily</td><td colspan="5">Improvement the load duration curve:
Monthly</td><td>Improvement the load duration curve:
Monthly</td></tr>
<tr><td colspan="9">Penetration rate of renewable energy:
To achieve 10,000 megawatts.</td></tr>
<tr><td colspan="9">Energy security:
The main criterion is the security of electricity supply.</td></tr>
<tr><td colspan="9">The hidden energy subsidy:
Do not pay subsidies on fuel and electricity.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Storage Strategy:
Hydrogen</td><td colspan="3">Storage Strategy:
Battery</td><td colspan="3">Storage Strategy:
Hydrogen</td><td>Storage Strategy:
Battery</td><td>Storage Strategy:
Pumped-Hydro Storage</td></tr>
</table>

The scenario of focusing on battery storage technology: the most important sources of pollution production in metropolises in Iran are power plants near the city, and gasoline and diesel vehicles. Due to the unbalance between the production and consumption of electric energy, it is suggested to use battery storage complexes and replace them with power plants around the cities. Also, one of the ways to solve the second part of the challenge is to increase the use of public electric vehicles and expand the use of electric cars. Electric and hybrid cars use the battery as a storage system. The use of these types of cars leads to a reduction in gasoline consumption and air pollution. On the other hand, benefiting from the storage system in these cars in the form of load response plans will make them participate in supplying the required power of the network during peak times. The two technologies of

lithium-ion and lead-acid batteries are the target of domestic and foreign investment for development. Lithium-ion battery technology, which is suitable for mobile storage, is limited in Iran, and foreign investment should be made in this field in order to commercialize and increase production. Unlike lithium-ion technology, lead-acid technology is available in the country and the production of this type of battery is cost-effective. This technology, which is conventional and economical to produce in the country, is suitable for use in large-scale fixed storage complexes in power plant applications.

The scenario of focusing on hydrogen storage technology: This scenario targets the aspect of transferring technology and diversifying the portfolio of storage resources. Since even in the best domestic conditions, the possibility of the public sector entering into the development of investing in the diversification of the storage portfolio is out of mind, a strong private sector, especially the industry and mining, can make this possible. In various fields, industries and mines interact the most with foreign companies. Therefore, in case of development of international communication and creation of multinational companies, it will be a great help to spread this technology in the country. Therefore, as long as the development of technology in industry and mining is set as a criterion, it is suggested to use hydrogen technology that can store on a scale of several weeks to several months with the aim of providing energy during very hot and very cold days of the year.

Scenario focusing on pumped-hydro storage technology: If there are minimal water stresses, the best option for storage is to use a pumped storage power plant. In general, pumped-storage power plants in their various technologies can be used in the side market of the power grid and support wind and solar farms in providing reliability and reducing the uncertainty of these resources. But it is added that due to the fact that there are losses in this method in both open loop and closed loop systems for sending water to ponds, its use in Iran depends on the absence of concerns in the field of electricity and water. Therefore, according to the hot and dry weather conditions with low rainfall, its use in Iran has a lower probability of occurrence.

Conclusion

This article deals with the challenge of electric energy storage in the country with a new and innovative perspective. This perspective has been implemented using CIB matrix and its compatible scenarios have been investigated. This type of analysis allows comprehensive policies to be proposed based on these scenarios for storage development and even if possible, there are no contradictory plans in them.

For this purpose, 5 basic areas in the development of electrical energy storage were extracted with the titles of international relations, investment dimensions, technological approach, national challenges and passive defense and the country's electrical energy network.

Then, with expert analysis by the research team and members of the Energy Research Center of Shahid Beheshti University, as well as a review of scientific research and policy, 13 descriptors were formulated, including Development of strategic technologies in the country, foreign investment, foreign policy, the power of investment from national resources, investment in the form of financial crowdfunding and stock exchange, development of distributed generation and smart grid, resilience of the power grid, the lowest environmental stresses, the development of knowledge-based technology and the development of innovation centers in the country, fixing the imbalance of the consumption curve, development of the penetration rate of renewable resources in the energy portfolio, energy security, hidden energy subsidy and main storage strategy.

Next, CIB matrix was formed and 9 scenarios were presented in the output by modeling in ScenarioWizard software. With peripheral analysis and considering potential and actual potentials in the country, 3 scenarios were proposed as the selected scenarios in the country. The development of battery storage was proposed as the first scenario. The reason for this choice was the development of the energy industry through the development of foreign and domestic investments. The second scenario was planned based on the development of hydrogen storage technology. Taking advantage of the process of peak load of the power grid on a monthly basis, providing energy needed by industries and completing the value chain were mentioned as the features of using this type of storage. The third scenario was regarding the development of pumped storage power plant technologies. This scenario had the possibility of success in the conditions of the lowest water tensions and with the entry of multinational companies.

It seems that in the continuation of this research, the point of view of electrical energy storage (the subject of this article) can be extended to the point of view of energy storage by including the storage of all energy sources, including natural gas, to a more comprehensive approach in the country. In such comprehensive approaches, convergence in water and energy policies will be more reliable.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

سناریوهای توسعه برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در کشور ایران با روش ماتریس اثر متقابل

مهدی گندم‌زاده[۱]، سارا محمودیان یونسی[۱]، ابوالقاسم مسیبی[۲]، مجید زندی[۳]*

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

[۲] پژوهشگر، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

[۳] دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

کلیدواژه:

ذخیره‌سازی

سناریو

ماتریس اثر متقابل

باتری

تلمبهٔ ذخیره‌ای

هیدروژن

ایران

چکیده

سناریونویسی نوعی راه‌کار برای ترسیم فضای کاری آینده است. سناریوهای متفاوت استراتژی‌های متفاوتی را پیشنهاد می‌کنند که کاربردهای متفاوتی را به همراه خواهند داشت. در روند سناریونویسی، گزینه‌های واقعی برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه چه اهدافی باید انتخاب شوند و نیز ابزار مورد نیاز برای دستیابی به آن اهداف پیدا می‌شود. این مقاله با بررسی تلفیقی برنامه‌ریزی‌ها و بهره‌گیری از سناریوها برای ذخیره‌سازی انرژی در جهان، توصیف‌کننده‌ها و حالت‌هایی را استخراج کرده که پس از بحث و تبادل نظر در جلسه‌های خبرگی با شرایط ایران متناسب‌سازی شده‌اند. در ادامه ماتریس اثر متقابل برای ارزیابی پارامترها نسبت به یکدیگر تشکیل داده شد و شبیه‌سازی توصیف‌کننده‌ها و حالت‌ها در نرم‌افزار ScenarioWizard انجام پذیرفت. نتایج در قالب ۹ سناریو، مسیرهایی را برای رسیدن به اهداف متفاوت در فضای حالت معرفی کرد. ۷ سناریو توسعهٔ فناوری در بخش انرژی را دنبال کردند و ۲ سناریو توسعهٔ فناوری در بخش راهبردی صنعت و معدن را در پیش گرفتند. طبق نتایج این نکته به دست آمد که ۸ توصیف‌کننده فقط در یک حالت سازگار شدند و ۵ توصیف‌کنندهٔ باقی‌مانده در بیشتر از یک حالت سازگار معنا پیدا کردند. رشد منابع تولید پراکنده تا ۱۵ هزار مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت و همچنین، استفاده در مناطق دور از شبکه و تعیین ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر به میزان ۱۰ هزار مگاوات در شبکهٔ انرژی الکتریکی کشور از حالت‌های مهم کمی برگزیده‌شده در توصیف‌کننده‌ها بودند. گسترش روابط بین‌المللی، جذب سرمایهٔ خارجی، استفاده از منابع اعتباری دولتی داخل کشور مانند بودجه و اعتبارات صندوق ملی، توسعهٔ مراکز نوآوری صنعتی هدفمند مطابق با نیازهای کشور و توجه هم‌زمان به پارامترهای برنامه‌ریزی، زیرساختی و بهره‌برداری در بحث تاب‌آوری شبکهٔ برق از حالت‌های برگزیدهٔ کیفی حائز اهمیت عنوان شدند. در جمع‌بندی با توجه به سناریوهای استخراج‌شده، فناوری باتری، هیدروژن و ذخیره‌سازی تلمبهٔ ذخیره‌ای به عنوان فناوری‌های اصلی برگزیده شدند.

۱. مقدمه

توسعهٔ فناوری‌ها و سامانه‌های ذخیرهٔ انرژی یکی از برنامه‌های اجرایی مؤکد در بسیاری از سندهای توسعهٔ راهبردی جمهوری اسلامی ایران است. آینده‌نگری مسئولان این حوزه در اجرای برنامه‌های راهبردی کشور، وابستگی کمتر به منابع سوخت فسیلی، رفاه بیشتر اجتماعی و افزایش رقابت در بازار انرژی را به دنبال دارد.

توسعهٔ فناوری‌های ذخیرهٔ انرژی در کشور به پیشرفت بخش‌های مختلفی از جمله حمل‌ونقل، فناوری اطلاعات، صنعت و معدن منجر خواهد شد. علاوه بر آن، پیشرفت در

* نویسندهٔ مسئول

Email: m_zandi@sbu.ac.ir

بخش انرژی نیز با سرعت بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها مشهود خواهد بود. لی و ژائو منابع ذخیره‌ساز انرژی را دارای مزیت‌های عمده‌ای همچون کاهش گازهای گل‌خانه‌ای و کاهش آلودگی هوا در بخش محیط زیستی، دستیابی به قابلیت اطمینان بالا، بالا بردن امنیت انرژی، ارائهٔ خدمات جانبی به شبکهٔ برق و توسعهٔ سبد انرژی عنوان کرده‌اند [۱ و ۲]. با این‌وجود، گاهی بسیاری از موانع کلیدی مانند هزینهٔ زیاد، محدودیت جغرافیایی، آلودگی محیط زیستی، ارتقای فناوری و سازگاری با شبکه‌های انرژی را نام برد که همچنان مانع از کاربرد بیشتر ذخیره‌سازها می‌شود [۳]. غیر از موانع فنی، کاربرد منابع ذخیرهٔ انرژی به دلیل عدم به‌کارگیری حد بالای منابع انرژی‌های تجدیدپذیر پررنگ نشده است.

با توجه به اینکه ایران یکی از مناطق مستعد در توسعهٔ به‌کارگیری از انرژی‌های خورشیدی و بادی است و پژوهش‌های فراوانی این موضوع را با ذکر جزئیات مهندسی بررسی و اثبات کرده است [۴ و ۵]، مشکلی از نظر فنی در راستای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر وجود ندارد [۶]. آریانفر و همکاران مسئلهٔ پتانسیل‌سنجی در حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر را در دو بخش بادی و خورشیدی با روش فازی بررسی کرده‌اند [۴ و ۷]. قوانین و سیاست‌های داخلی نیز رشد ظرفیت منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را دنبال می‌کند [۸]. بنابراین، می‌توان بیان کرد که سیاست‌ها، قوانین و بررسی‌های علمی در زمینهٔ توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر هم‌سو شده است [۵ و ۹].

چالش اصلی ذخیره‌سازی انرژی، با نفوذ درصد زیادی از انرژی‌های تجدیدپذیر در آیندهٔ نزدیک آشکار خواهد شد که مسئولان سیاست‌گذاری و اجرایی باید کدام یک از انواع منابع ذخیرهٔ انرژی را انتخاب کنند. فرایندی که تصمیم‌گیرندگان حوزهٔ انرژی باید سال‌ها قبل از نفوذ حداکثری انرژی‌های تجدیدپذیر راه‌کارها را شناسایی کرده و مسیر درست سرمایه‌گذاری را مشخص کنند.

بنابراین، مدیریت توسعهٔ فناوری ذخیرهٔ انرژی باید از نظر تخصیص منطقی منابع و مزایای مکمل نیز مورد توجه کافی قرار گیرد تا در آینده کارایی کلی سیستم انرژی کشور بهبود پیدا کند و هزینه‌های بهره‌برداری و تأمین انرژی کاهش یابد. با توجه به اینکه گسترش منابع تجدیدپذیر با روند کنترل‌نشدنی در حال افزایش است، تأخیر در برنامه‌ریزی و ارائهٔ مسیر توسعهٔ فنی برای فناوری‌های ذخیره‌ساز منطقی به نظر نمی‌رسد [۱۰].

به همین‌منظور یکی از راه‌هایی که می‌توان با بررسی همه‌جانبه، مسیرهای آینده‌نگرانه برای سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی را تبیین کرد، بیان راه‌حل‌ها در قالب سناریوها است.

روش سناریونویسی به معنای سازمان‌دهی داده‌ها و احتمال‌های آتی در ترسیم و تصویرسازی آینده است. روش سناریونویسی به‌ویژه برای کمک به درک حوادثی مفید خواهد بود که به نظر می‌رسند ترکیبی ناهمگون از داده‌های غیرمرتبط وجود دارد.

در مبحث برنامه‌ریزی بر پایهٔ سناریو می‌توان آن را به صورت داستان‌های مربوط به آینده‌های ممکن و متعدد که یک دولت، سازمان یا شرکت احتمال دارد با آن‌ها مواجه خواهد شود، تعریف کرد. سناریوها به صورت نموداری و به صورت پویا و متحرک جریان تحول و پیدایش دنیای آینده را نمایش می‌دهند. درنتیجه، به‌کمک تصمیم‌گیری بر پایهٔ آینده و آزمون استراتژی‌های پیشنهادی در شرایط مختلفی که سناریوها معرفی می‌کنند، برای مواجهه با عدم قطعیت‌های آینده، آمادگی بیشتری کسب می‌شود.

در این حالت تصمیم‌های اتخاذشده در برابر بیشتر رویدادهای آینده که شاید برخی از آن‌ها دور از تصور باشند، انعطاف‌پذیری زیادی خواهند داشت [۱۱]. سناریو، پیش‌بینی قطعی و دقیق جهان آینده نیست، بلکه توصیفی از رویدادهای ممکن و چندگانه است که امکان وقوع آن‌ها در آینده وجود دارد. به بیان دیگر، سناریوها آمیزه‌ای از پیش‌بینی‌های تخیلی و در عین حال واقع‌گرایانه از رخدادهای احتمالی آینده هستند. با استفاده از سناریوها، می‌توان دربارهٔ آنچه که باید بعدها انجام شود، به طور جدی اندیشید [۱۲]. هدف از به‌کارگیری سناریوها در بحث ذخیره‌سازی انرژی، ایجاد فضایی از ممکن‌ها است که در آن کارایی سیاست‌های اتخاذشده در برابر چالش‌های موجود آینده آزمایش می‌شوند [۱۳].

برخی سناریوهایی که در مطالعات بین‌المللی برای سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی طرح‌ریزی شده‌اند، سطوح طبقه‌بندی سناریوها را در مقیاس شبکهٔ برق بیان کرده و سناریوها را در سه بخش تولید، انتقال و توزیع ارائه کرده‌اند. برخی دیگر با توجه به تقاضای فناوری ذخیره‌سازی انرژی، جابه‌جایی زمانی منابع ذخیره‌شده را مد نظر قرار داده‌اند.

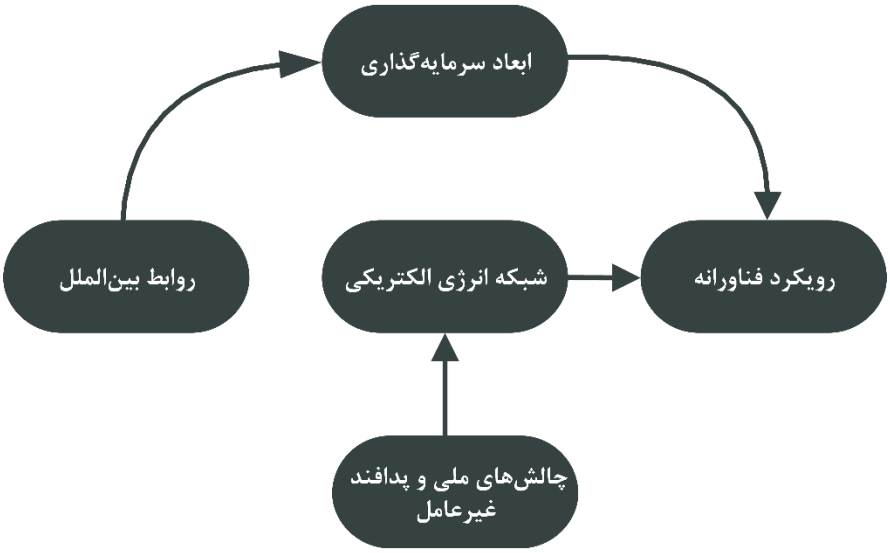
این شیوهٔ مطالعه به سناریوهایی برای بررسی فناوری ذخیره‌ساز برای زمان پر و تخلیه شدن طولانی‌مدت و در نظر گرفتن ظرفیت ذخیره‌سازی اختصاص دارد. بنابراین، فناوری‌هایی همچون چرخ طیار نمی‌توانند چنین نیازی را برآورده کنند [۱۴]. اما نیروگاه‌های تلمبهٔ ذخیره‌ای در این زمینه شرایط بهتری دارند. این نوع نیروگاه‌ها در سه نوع مختلف: سرعت ثابت، سرعت متغیر و سه‌گانه ساخته می‌شوند. واحدهای «سرعت ثابت» فقط قادر به پمپاژ آب در بلوک‌های قدرت غیرقابل تنظیم هستند. واحدهای تلمبهٔ ذخیره‌ای با «سرعت متغیر» برای استفاده از قابلیت تنظیم میزان پمپاژ آب به منظور ارائهٔ خدمات رگولاسیون به کار می‌روند. این ویژگی در نوع سرعت ثابت غیر قابل دستیابی است. فناوری «سه‌گانه» از یک واحد تلمبهٔ ذخیره‌ای تشکیل شده است که امکان انعطاف‌پذیری بالاتری از خود نشان می‌دهد. این نوع، همچنین کارایی را با استفاده از یک توربین و پمپ جداگانه در یک شافت به همراه ژنراتور بهبود می‌دهد [۱۵].

مقاله‌های متعددی فناوری‌های ذخیره‌ساز انرژی را در مدل‌های سیستم انرژی یکپارچه معرفی کردند [۱۶ و ۱۸] اما این مقاله‌ها نتوانستند به طور جامع نقش‌های مختلف فناوری‌های ذخیره‌ساز انرژی را در آن‌ها تجزیه‌وتحلیل کنند. همچنین، بخش عمده‌ای از مطالعات در مورد انتخاب فناوری ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر حدس‌های ذهنی است [۱۹ و ۲۱]. اما مطالعهٔ برنامه‌ریزی بهینهٔ فناوری‌های ذخیره‌ساز مبنایی برای سنجش بیشتر این موضوع است که آیا این فناوری‌ها می‌توانند به‌تنهایی نیازهای شبکه را رفع کنند یا باید با حضور منابع تولید پراکنده عملکرد مناسبی از خود نشان دهند. رن نوعی مدل به منظور انتخاب فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی برای تصمیم‌گیرندگان پیشنهاد کرده، اما برای چهار نوع ذخیره‌سازی مورد مطالعه تلمبهٔ ذخیره‌ای، هوای فشرده، لیتیوم-یون و چرخ طیار تجزیه‌وتحلیل دقیقی عنوان نکرده است [۲۲].

همچنین، با توجه به منابع علمی معتبر، پژوهش‌های مرتبط با سناریوهای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر و آیندهٔ ذخیره‌سازی انرژی در ایران مطالعه شد. احمد حاجی‌نژاد و همکاران به بررسی نقش سناریوهای انرژی‌های تجدیدپذیر در پیش‌بینی انتشار دی‌اکسید کربن در ایران در چشم‌انداز ۲۰۳۰ پرداخته‌اند. در این مطالعه انتشار دی‌اکسید کربن ایران در سال ۲۰۳۰ به‌روش رگرسیون و تحت چند سناریو استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس اهداف قانون برنامهٔ پنج‌سالهٔ توسعهٔ اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی برای بررسی پایبندی ایران به توافقنامهٔ پاریس پیش‌بینی شده است. یافته‌های آن‌ها نشان داد ایران در سناریوی کنونی بعید است به تعهد خود در توافق پاریس عمل کند. سیاست‌گذاران در بخش انرژی ایران باید به این موضوع توجه بیشتری داشته باشند، اما دولت اهتمام خاصی در این زمینه ندارد [۲۳]. بهرامی و همکاران با استفاده از روش سناریونویسی به توسعهٔ مدلی مبتنی بر سناریو برای آیندهٔ انرژی ایران پرداختند [۲۴]. چهارسوق و همکاران به بررسی سناریوهای انرژی ایران در چشم‌انداز ۲۰ ساله پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش برنامه‌ریزی سناریو، چهار سناریو را در چشم‌انداز ۲۰۲۵ ایران از طریق ترکیبی از تغییر مصرف انرژی و تولید انرژی تجدیدپذیر مطرح کرده است. این چهار سناریو شامل مسیر سبز، استانداردسازی، انرژی‌های فسیلی و یارانه‌های غیر هدفمند است. سپس سناریوهای توسعه‌یافته با برنامهٔ دولت برای استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در ۱۰ درصد کل تولید برق در یک چشم‌انداز ۲۰ ساله مقایسه شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد استانداردسازی و انرژی فسیلی محتمل‌ترین سناریوها هستند. مسیر سبز، خوش‌بینانه‌ترین سناریو برای کشور مطرح شد که مؤید دستیابی به هدف تولید ۱۰ درصد از کل سهم برق از طریق انرژی‌های برق تا سال ۲۰۲۵ است و پرداخت غیرهدفمند یارانه، بدبینانه‌ترین و غیرمنتظره‌ترین سناریو برای کشور به شمار می‌رود [۲۵].

پس از بررسی کلی مطالعات در خصوص وضعیت خارجی و داخلی فناوری‌های ذخیره‌ساز انرژی، جمع‌بندی شد که تا کنون یک بررسی همه‌جانبه در خصوص آیندهٔ ذخیره‌سازی انرژی در ایران انجام نشده است.

نتایج بررسی‌های علمی و بررسی اسناد بالادستی در خصوص ذخیره‌سازی انرژی این موضوع را روشن ساخت که ۵ جنبهٔ کلی در این موضوع مورد توجه هستند. روابط بین‌الملل، صنعت برق، ابعاد سرمایه‌گذاری، رویکرد فناورانه و چالش‌های ملی و پدافند غیرعامل، این ۵ عامل کلی را تشکیل می‌دهند. نمای بلوک دیاگرامی حوزه‌های کلی توسعهٔ ذخیره‌سازی در ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. حوزه‌های کلی توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی در ایران

به همین منظور، این مقاله با در نظر گرفتن جنبه‌های کلی توسعهٔ ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در ایران با هدف تدوین سناریوهای توسعه برای این منظور با روش ماتریس اثر متقابل[1] نگارش شده است.

ویژگی‌های برجستهٔ این مقاله ۳ مورد را شامل می‌شود:

۱. مشخصه‌هایی که برای تعیین سناریو در سایر مطالعات به کار رفته بود، با شرایط کشور ایران همخوانی نداشت و این مقاله توصیف‌گرها و حالت‌های آن‌ها را مطابق با شرایط اجتماعی، سیاسی و اقتصادی ایران طرح کرده است.

۲. با بررسی‌های نویسندگان این اثر، یک ساختار منسجم ارائهٔ سناریوی توسعه برای آیندهٔ ذخیره‌سازی انرژی در ایران تا کنون ارائه نشده است.

۳. برای اولین‌بار در ایران پارامترهای حوزهٔ ذخیره‌سازی انرژی در ایران با روش ماتریس اثر متقابل مورد ارزیابی قرار گرفته و سناریوهایی مرتبط با آن‌ها پیشنهاد می‌شوند.

در ادامه این مقاله، در قسمت متدولوژی به توضیح روش ماتریس اثر متقابل، نرم‌افزار ScenarioWizard و تشریح روند تعیین مشخصه‌ها پرداخته خواهد شد. سپس، با تکمیل ماتریس اثر متقابل سناریوهای سازگارتر استخراج خواهد شد. پس از آن نیز تحلیل سناریوهای برگزیده و نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲. متدولوژی

۲. ۱. روش ماتریس اثر متقابل و نرم‌افزار ScenarioWizard

در مباحث آینده‌پژوهی شناسایی و تعریف متغیرها و روندهای مرتبط با موضوع مورد مطالعه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. همچنین، در پیش‌بینی وقوع یک متغیر علاوه بر احتمال‌های ابتدایی قضاوت‌شده، روابطی بین وقوع متغیرها وجود دارد که بی‌توجهی به آن توسط پژوهشگر، بخشی از داده‌های مهم و تأثیرگذار در تصمیم‌سازی را نادیده می‌گیرد. بنابراین، لازم است علاوه بر تبیین وقوع اولیه احتمال متغیرها و شناسایی نیروهای پیشران و روندها، میزان تأثیر متقابل میان متغیرها نیز توسط کارشناسان و خبرگان تعیین شود و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. الگوهای مختلف روش تحلیل اثرات متقابل، این تکنیک را به عنوان یک روش نامحدود برای تحلیل نتایج اکتشافی تبدیل کرده است. حتی در بعضی موارد، تحلیل و بررسی و تفکر دربارهٔ وقوع یک متغیر به موجب تأثیر متقابل و دیگر متغیرها ساده‌تر از فکر کردن به احتمال وقوع آن متغیر صرف‌نظر از تأثیر متقابل سایر متغیرها است [۲۲].

یکی از نرم‌افزارهای آینده‌نگری که به روش ماتریس اثر متقابل روش تحلیل همبستگی عمل می‌کند، ScenarioWizard است. این نرم‌افزار برای انجام تجزیه‌وتحلیل ماتریس اثر متقابل طراحی شده است که روشی برای تحلیل کیفی براساس سناریو است. ماتریس اثر

1. Cross Impact Balance (CIB)

متقابل ساخت سناریوهای کیفی را بر اساس شبکه‌های تأثیر کیفی، یعنی براساس دانش کیفی در مورد روابط تأثیر متقابل عناصر اصلی یک سیستم بیان می‌کند. شبکه‌های تأثیر کیفی به عنوان مفهوم توصیف سیستم در بسیاری از رشته‌ها، به عنوان مثال، اقتصاد، تجزیه‌وتحلیل سیاست انرژی، آینده‌نگری فناوری، تحقیق‌های نوآوری، علوم اجتماعی، علوم مدیریت و تجزیه‌وتحلیل مراقبت‌های بهداشتی استفاده می‌شود. ماتریس اثر متقابل رویکردی برای تجزیه‌وتحلیل چنین شبکه‌هایی و درک رفتار آن‌ها ارائه می‌دهد. ماتریس اثر متقابل و ScenarioWizard برای اولین‌بار در سال ۲۰۰۱ تهیه شده و از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ در واحد پژوهش‌های بین رشته‌ای در زمینهٔ مدیریت ریسک و توسعهٔ فناوری پایدار توسعه یافتند. در سال ۲۰۱۲، زمانی که واحد تحقیقات در مرکز تحقیقاتی تازه‌تأسیس مطالعات ریسک و نوآوری دانشگاه اشتوتگارت ادغام شد، سرپرستی روش ماتریس اثر متقابل به این سازمان منتقل شد. از سال ۲۰۰۱، این روش و نرم‌افزار در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده، آزمایش و بهبود قرار گرفته است [۲۶ و ۲۷].

رایج‌ترین شیوهٔ سناریونویسی براساس ماتریس اثر متقابل، در نرم‌افزار ScenarioWizard انجام می‌شود. سناریونویسی در نرم‌افزار ScenarioWizard، براساس ماتریس ساختار تحلیل، با شناسایی تأثیر مؤلفه‌ها، زیرمؤلفه‌ها و ترکیب آن‌ها انجام می‌شود. درنهایت، سازگارترین سناریوها را می‌توان از نتایج تجزیه‌وتحلیل نرم‌افزار ScenarioWizard تهیه کرد.

در روند استفاده از ماتریس اثر متقابل در این مقاله اثر وقوع حالت x از توصیف‌گر X بر روی حالت y از توصیف‌گر Yبه صورت نسبی مشخص می‌شود. این بررسی نسبی روی یک طیف عددی از ۳- تا ۳+ تقسیم شده که با توجه به داده‌های زیر تعریف شده است:

۳-: سازگاری مخالف شدید دارد.

صفر: بین دو حالت، ارتباطی از نظر سازگاری وجود ندارد.

۳+: سازگاری موافق شدید دارد.

۲. ۲. طبقه‌بندی توصیف‌کننده‌ها برای بهره‌گیری از ماتریس اثر متقابل

ذخیره‌سازی انرژی در سندهای بالادستی در قالب قانون‌ها و سیاست‌نامه‌های متعدد تکرار شده است. همچنین، برنامه‌های اجرایی و دستورالعمل‌های متفاوتی در خصوص پژوهش و سرمایه‌گذاری در حوزهٔ ذخیره‌سازی انرژی مطرح شده اما به دلیل مبهم بودن فضای پسابهره‌مندی از این فناوری، میل سرمایه‌گذاران نهادهای دولتی و خصوصی به تمرکز بر اجرای برنامه‌ها کم بوده است.

در اصل، ذی‌نفعان احتمالی ذخیره‌سازی نیاز به بررسی آینده‌نگرانه حضور منابع ذخیره‌ساز در سبد انرژی در قالب سناریوها و احتمال‌های بهره‌گیری یا عدم بهره‌گیری از آن‌ها در شرایط مختلف هستند. یکی از دلایلی که این پژوهش با جدیت آن را در بررسی‌ها لحاظ کرده، شرایط کنونی کشور است که تلفیقی از حالت‌های روابط خارجی، اعطای یارانهٔ پنهان و ناترازی در بخش انرژی است. با توجه به توضیح‌های بیان‌شده، این مقاله سعی کرده است با پوشش تمام پارامترهای مؤثر در آینده‌نگری ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ایران، سناریوهایی را با روش ماتریس اثر متقابل و استفاده از نرم‌افزار ScenarioWizard برای وارد کردن داده‌های سنجشی ارائه دهد.

با مطالعهٔ منابع معتبر علمی، توصیف‌کننده‌های فضای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی توسط تیم پژوهشی مشخص شد. در ادامه با بهره‌گیری از دانش تیم خبرگی اعضای مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی تهران، توصیف‌کننده‌ها مطابق شکل ۲ طبقه‌بندی شد.

پس از برگزاری جلسه‌های متعدد دوجانبه و حضور شرکت‌ها و سیاست‌گذاران در حوزهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در جلسه‌های خبرگی، حالت‌ها نسبت به هم مورد سنجش قرار گرفت و درایه‌های ماتریس اثر متقابل تکمیل شد.

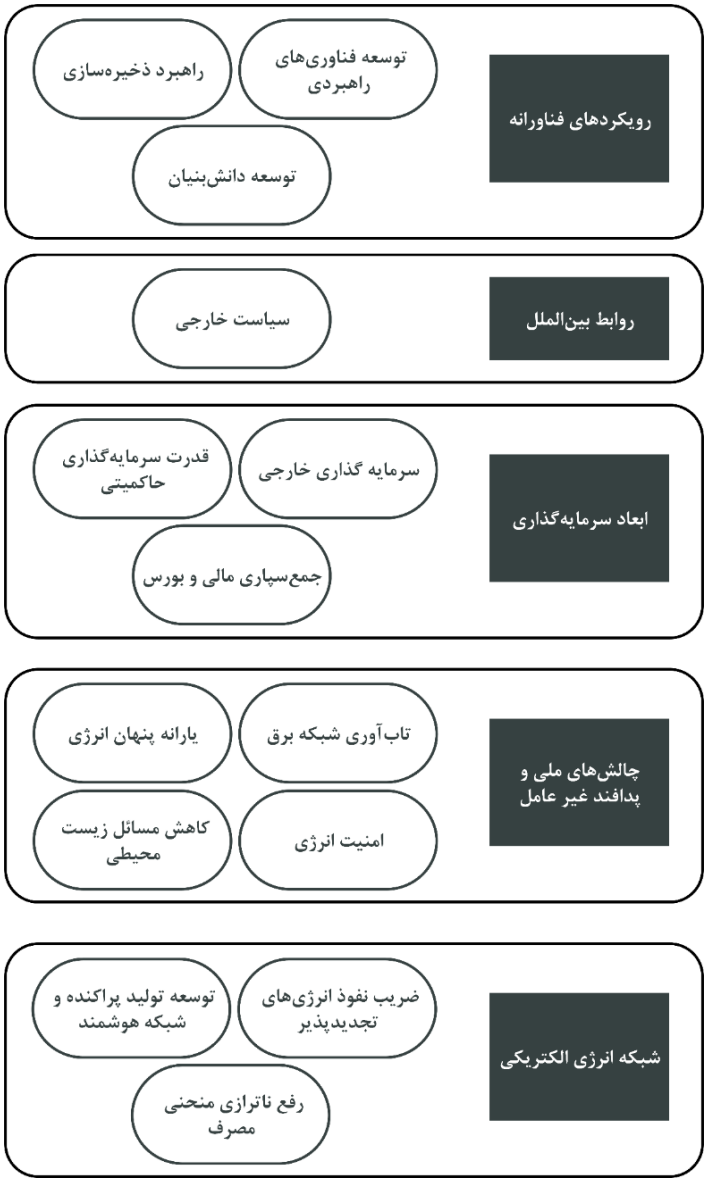
۲. ۳. تشریح توصیف‌کننده‌ها و حالت‌ها

پس از تعیین توصیف‌کننده‌های شکل ۲، حالت‌های مختلف برای هر توصیف‌کننده بررسی شد. با جمع‌بندی نظرهای مطرح‌شده توسط تیم پژوهشی، ۵۱ حالت برای ۱۴ توصیف‌کننده برگزیده شد.

۲. ۳. ۱. توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در کشور

حمل‌ونقل، انرژی، فناوری اطلاعات و صنعت و معدن، مهم‌ترین بخش‌های متأثر و اثرگذار در حوزهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هستند. گسترش فناوری‌های نوین در وسایل حمل‌ونقل الکتریکی، افزایش برخورداری از انرژی به

منظور امنیت پایدار تـأمین آن، نفـوذ شـبکه‌هـای هوشـمند اطلاعات در صنعت بـرق و تـأثیر آن در بهبـود کـارایی ایـن مجموعـه و همچنـین، توسـع، صـنایع ازجملـه حـوزهٔ ذخیره‌سازی انرژی از افق‌های توسعهٔ فناوری در کشور است. بنـابراین، حالـت‌هـای مـرتبط بـا توصـیف‌کننـده توسـعهٔ فناوری‌های راهبردی در کشور مطابق جدول ۱ انتخاب شد.



شکل ۲. توصیف‌کننده‌های طرح‌شده با توجه به حوزه‌های کلی توسعهٔ ذخیره‌سازی در ایران

جدول ۱. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در کشور

توصیف‌کننده	حالت‌ها
توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در کشور	توسعهٔ عمدهٔ بخش حمل‌ونقل توسعهٔ عمدهٔ بخش انرژی توسعهٔ عمدهٔ بخش فناوری اطلاعات توسعهٔ عمدهٔ بخش صنعت و معدن توسعهٔ فناوری‌های راهبردی انجام نشود.

۲. ۳. ۲. سرمایه‌گذاری خارجی

یکی از روش‌های سرمایه‌گذاری خارجی، وام‌های بین‌المللی است. این روش استقراض دولت‌ها از یکدیگر و از صندوق‌های مالی بین‌المللی توسعه در کشورهای هدف را به دنبال دارد. همچنین، هنگامی که چند شرکت، گروه یا حکومت برای دستیابی به هدفی مشخص در هم ترکیب شوند یا با هم همکاری کنند، امکان تجمیع فناوری و سرمایه‌گذاری در حوزه‌ای خاص را به عنوان نهادی چندملیتی تسریع خواهند بخشید. همچنین، در صورت مساعد بودن شرایط سیاسی، شفافیت اقتصادی و امنیت سرمایه‌گذاری، روش‌های جدید سرمایه‌گذاری افزون بر سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، نظیر تأمین مالی پروژه‌ای[1]، ترتیبات بیع متقابل[2] و انواع روش‌های ساخت، بهره‌برداری و واگذاری[3] رشد خواهد کرد. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ سرمایه‌گذاری خارجی مطابق جدول ۲ انتخاب شد.

۲. ۳. ۳. سیاست خارجی

افزایش تحریم‌ها و درنتیجه، افت سطح مناسبات بین‌المللی، باعث کاهش مراودات مالی، علمی و فنی می‌شود. همچنین، در صورتی که شرایط تحریم به نفع مردم تغییر کند، تهدید تحریم به فرصت تبدیل می‌شود. در این حالت، با اعطای تسهیلات و اختصاص بودجه می‌توان شرکت‌های خصوصی را در جهت رشد و توسعهٔ فناوری هدایت کرد. اگرچه در نگاهی متفاوت، تحریم می‌تواند زمینه‌ساز رشد شبکهٔ قاچاق کالا شود و از توسعهٔ فناوری در داخل و انتقال تکنولوژی به کشور جلوگیری کند. در صورتی که تحریم‌ها رفع شود ولی دولت بر مسائل دیگری تمرکز کند و از فرصت به‌وجودآمده بهره نبرد، در بهترین حالت توسعهٔ بازار وارداتی صورت خواهد پذیرفت. ایده‌آل‌ترین شرایط در حالت توسعهٔ روابط خارجی اتفاق می‌افتد. در این حالت، تحریم‌ها در کمترین مقدار ممکن است و دولت با ارائه قانون‌های حمایتی و اتخاذ سیاست‌های مناسب، رابطه با سایر کشورها را در جهت توسعهٔ کشور برنامه‌ریزی می‌کند. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ سیاست خارجی مطابق جدول ۳ انتخاب شد.

جدول ۲. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ سرمایه‌گذاری خارجی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
سرمایه‌گذاری خارجی	در قالب وام‌های بین‌المللی صورت پذیرد. در قالب شرکت‌های همکاری چندملیتی صورت پذیرد. سرمایه‌گذاری مستقیم صورت پذیرد. سرمایه‌گذاری خارجی انجام نشود.

جدول ۳. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ سیاست خارجی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
سیاست خارجی	تحریم رکود توسعهٔ روابط خارجی

۲. ۳. ۴. قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی

در شرایط کنونی، بودجهٔ صنعت برق کفایت لازم برای تأمین هزینه‌های توسعه و بهره‌برداری و همچنین، جبران یارانهٔ هنگفت مصرف انرژی الکتریکی را ندارد. با توجه به گزارش سازمان حسابرسی کل کشور، تا سال ۱۴۰۰ اختلاف بین هزینهٔ فروش برق و درآمدهای این صنعت به تراز منفی ۹۰ هزار میلیارد تومان رسیده است. وزیر نیرو این بدهی را باعث عدم اجرای تعهدات قانونی و حقوقی این وزارتخانه در قبال شرکت‌های خصوصی، صاحبان صنایع و تأمین‌کنندگان صنعت برق دانسته است. امکان تهاتر طلبکاران این حوزه با سایر نهادهای دولتی، انتشار اوراق و همچنین، اسناد خزانهٔ اسلامی ازجمله روش‌های پیشنهادی این وزارتخانه برای اجرای تعهدات مالی است. در صورتی که مطالبات نیروگاه‌های کشور و پیمانکاران این حوزه تسویه شود در اولین گام، کاهش ناترازی تولید و مصرف برق کنترل خواهد شد. این مهم باعث تسریع در روند تعمیرات نیروگاهی و همچنین، توسعهٔ صنعت برق خواهد شد. راه‌حل دیگری که دولت برای کاهش چالش‌ها و توسعهٔ صنعت برق می‌تواند بهره ببرد، استفاده از تسهیلات حمایتی صندوق توسعهٔ ملی است. ۳۰ درصد منابع حاصل از صادرات نفت خام، میعانات گازی، گاز و فرآورده‌های نفتی وارد این صندوق می‌شود. «اعطای تسهیلات به بخش‌های خصوصی، تعاونی و بنگاه‌های اقتصادی متعلق به مؤسسه‌های عمومی غیردولتی برای تولید و توسعهٔ سرمایه‌گذاری‌های دارای توجیه فنی، مالی و اقتصادی» از تکالیف صندوق توسعهٔ ملی است. با وجود

1. Project Financing
2. Buy Back
3. BOT

اینکه استفاده از منابع صندوق برای اعتبارات هزینه‌ای و تملک دارایی‌های سرمایه‌ای و بازپرداخت بدهی‌های دولت به هر شکل ممنوع است، اما سرمایه‌گذاران خصوصی خواهند توانست از منابع این صندوق جهت تأمین مالی پروژه‌های خود اقدام کنند. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی مطابق جدول ۴ انتخاب شد.

۲. ۳. ۵. سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس

یکی از روش‌های نوین در حوزهٔ تأمین مالی شرکت‌های کوچک و متوسط در کشور ایران عرضهٔ سهام آن‌ها در بورس است. شرکت‌های واحد شرایط سازمان بورس و اوراق بهادار با توجه به شیوه‌های عرضهٔ سهام، می‌توانند بخشی از سهام خود را در قالب بازارهای بورس و فرابورس به فروش برسانند. این روش بیشتر برای مواردی قبول خواهد شد که شرکت مورد نظر در حال بهره‌برداری بوده و تنها برای تأمین مالی طرح‌های توسعهٔ خود نیاز به منابع جدید داشته باشد. روش بعدی، صندوق‌های سرمایه‌گذاری‌های تحت نظارت سازمان بورس و اوراق بهادار هستند که از طرح‌های مختلف حمایت مالی می‌کنند. شرکت‌های تأمین سرمایه و صندوق‌های سرمایه‌گذاری جسورانه را می‌توان از این نوع نام برد. همچنین، در سال‌های اخیر شرکت‌هایی برای تأمین سرمایه از طریق جمع کردن سرمایه‌های خرد عمومی به وجود آمده‌اند. این شرکت‌ها با نظارت سازمان‌های مرتبط مالی و اقتصادی، سرمایه‌های خرد عمومی را در جهت تأمین مالی استارتاپ‌ها و کسب‌وکارهای نوپا مدیریت می‌کنند. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس مطابق جدول ۵ انتخاب شد.

جدول ۴. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی	امکان تأمین منابع و سرمایه‌گذاری از طریق بودجه و منابع صندوق توسعهٔ ملی میسر نباشد. بودجهٔ دولتی برای هزینه‌های شبکهٔ انرژی الکتریکی کفایت کند و منابع صندوق توسعهٔ ملی به طور محدود اختصاص داده شود. مشکلی در اختصاص بودجه و اعتبارات صندوق توسعهٔ ملی وجود نداشته باشد.

جدول ۵. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس

توصیف‌کننده	حالت‌ها
سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس	به‌ندرت انجام شود یا انجام نشود. با رغبت معمولی انجام شود. حرکت به این سمت با شتاب باشد.

۲. ۳. ۶. توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند

تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند دو مشخصهٔ نوپا در حوزهٔ تصمیم‌گیری توسعهٔ صنعت برق ایران هستند. به دلیل عدم سرمایه‌گذاری کافی در بخش تولید و توسعهٔ شبکهٔ برق کشور، بیش از ۱۵ درصد تقاضای بار الکتریکی کشور در فصل گرم تأمین نمی‌شود [۲۸]. یکی از راه‌هایی که سیاست‌گذاران این حوزه برای حل سریع مشکل به آن توجه کرده‌اند، استفاده از مولدهای گازسوز تولید پراکنده در نزدیکی مراکز مصرف و پست‌های پربار برق است. این مولدها که طبق قانون وزارت نیرو حداکثر تا توان ۲۵ مگاوات ظرفیت تولید برق دارند، قابلیت اتصال به پست‌های توزیع و فوق توزیع را داشته و ضمن تأمین بخشی از تقاضای محدوده‌های اطراف، از حوادث احتمالی پرباری خطوط و پست‌های اطراف نیز کم می‌کنند. استفاده از این مولدها در مجاورت مجتمع‌های تجاری، کارخانه‌ها و صنایع انرژی‌بر ضمن تأمین مصرف الکتریکی آن‌ها، برای تأمین بخشی از حرارت مجموعه نیز مؤثر خواهد بود. مرحلهٔ بعدی نگاه سیاست‌مداران صنعت برق بر گسترش شبکه‌های هوشمند در ایران است. طبق برنامهٔ اقدامات توسعه شبکهٔ هوشمند برق در ایران، «تا سال ۱۴۰۴، ایجاد

و توسعهٔ شبکهٔ هوشمند برق به عنوان شبکه‌ای امن، منعطف و پایدار که برق با کیفیت و با قابلیت اطمینان بالا را در اختیار تمام مشترکان و ذی‌نفعان قرار می‌دهد و ارتقای فناورانهٔ شبکهٔ برق کشور را با استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، سامانه‌های هوشمند مدیریت و نیز تکنولوژی‌های شبکهٔ قدرت به گونه‌ای فراهم می‌کند که موجب تعامل عناصر و بازیگران کل سیستم انرژی و نیز مدیریت بهینهٔ عرضه و تقاضا در بازار آزاد برق شود، در دستور کار قرار گرفته است. چنین شبکه‌ای با افزایش کارایی و قابلیت اطمینان سیستم برق و نیز ایجاد قابلیت یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، ضامن ارتقا و تثبیت جایگاه ایران به عنوان کشور اول منطقه در توسعه و پیاده‌سازی شبکهٔ هوشمند برق خواهد بود». اگرچه دستیابی به اهداف این برنامهٔ توسعه با توجه به شرایط کنونی دور از دسترس است، ولی در افق زمانی آینده، گسترش مولدهای تولید پراکنده و فناوری اطلاعات امکان تحقق‌بخشی از آن با هدف افزایش سطح مشاهده و کنترل‌پذیری در شبکهٔ برق میسر خواهد بود. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند مطابق جدول ۶ انتخاب شد.

جدول ۶. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ توسعه تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند

توصیف‌کننده	حالت‌ها
توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند	تا ۲۵۰۰ مگاوات برای تأمین بار پایه تنها با به‌کارگیری مولدهای تولید پراکنده اقدام شود. تا ۵۰۰۰ مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت و استفاده در مناطق دور از شبکه استفاده شود. رشد تولید پراکنده تا ۱۵۰۰۰ مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با استفاده در مناطق دور از شبکه همراه شود. توسعهٔ شبکه‌های هوشمند در صنعت برق نیز پیگیری شود.

۲. ۳. ۷. تاب‌آوری شبکهٔ برق

تاب‌آوری قابلیت یک سیستم برای پیش‌بینی و مقاومت در مقابل تنش‌های خارجی، به عنوان بازگشت به حالت قبلی در اسرع وقت و سازگاری برای آمادگی بهتر برای پیشامدهای فاجعه‌بار آینده تعریف می‌شود. مشخصه‌های متفاوتی برای ارزیابی تاب‌آوری در سیستم مطرح می‌شوند. نخستین طبقه‌بندی، مشخصه‌های منطبق بر مشخصه کلی تاب‌آوری شامل مقاومت‌پذیری، انعطاف‌پذیری و بازیابی هستند. این عوامل برای ارزیابی رفتار سیستم در حالت‌های متفاوت عملکردی سیستم طرح شده‌اند. دستهٔ دیگری از مشخصه‌های تاب‌آوری بر پایهٔ معیارهای قابلیت اطمینان بیان شده‌اند که به ورود منابع کمکی از جمله سامانه‌های تجدیدپذیر و موتورهای رفت‌وبرگشتی برای تولید انرژی در شرایط اضطراری اشاره دارند. سومین دسته مشخصه‌های ارزیابی که زمان، توان و هزینه نام برده می‌شوند به بررسی عوامل اختلاف انرژی ازدست‌رفته یا حفظ‌شده، زمان بازگشت سیستم به حالت قبلی و هزینهٔ بازیابی اشاره دارند. دستهٔ بعدی مشخصه‌های استاتیک و دینامیک هستند. به این معنا که متغیرهای دینامیک آن بخشی از رفتار سیستم را که متغیر با زمان است در نظر می‌گیرند و متغیرهای استاتیک بخش دیگر که نامتغیر با زمان است را پوشش می‌دهند. آخرین مورد، بررسی احتمالات مشخصه‌هایی است که به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، عدم قطعیت میزان خرابی تجهیزات در این دسته است. رویکرد بهبود مشخصه‌های تاب‌آوری شامل رویه‌های برنامه‌ریزی و زیرساختی و رویه‌های بهره‌برداری است. در بخش اول مشارکت و نفوذ منابع مختلف انرژی به منظور پیشگیری از اتفاق‌های بعدی، طرح‌ریزی ریزشبکه‌ها داخل شبکه‌های قدرت و بهبود استحکام ساختار شبکه قرار می‌گیرد. همچنین، به‌کارگیری خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه، بازآرایی شبکه، بهره‌مندی از ذخیره‌سازی انرژی به صورت جابه‌جاشونده و امکان پاسخ‌گویی بار در بخش رویه‌های بهره‌برداری مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ تاب‌آوری شبکهٔ برق مطابق جدول ۷ انتخاب شد.

۲. ۳. ۸. کمترین تنش‌های زیست‌محیطی

در فضای بررسی تهدیدهای زیست‌محیطی سه حالت بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. آلودگی‌های ناشی از وسایل نقلیهٔ موتوری، ماشین‌آلات سبک و سنگین، نیروگاه‌ها و کارخانه‌های مجاور شهرها به یکی از چالش‌های

کلان‌شهرهای کشور تبدیل شده است. همچنین، تغییر اقلیم و خشک‌سالی‌های پیاپی باعث پدیدهٔ گسترش ریزگردها در هوا شده که با ورود باد از کشورهای همسایه تنفس ساکنان شهرهای کشور را با مشکل مواجه‌کرده است.

همچنین، کمبود بارش باعث شده است تا استفاده از آب پشت سدها و چاه‌های آب کشاورزی گسترش پیدا کند. این مورد علاوه بر افت سطح آب‌های زیرزمینی، افزایش مصرف برق به‌ویژه در ایام گرم سال را نیز به دنبال دارد. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ کمترین تنش‌های زیست‌محیطی مطابق جدول ۸ انتخاب شد.

۲. ۳. ۹. توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور

با وجود اینکه تحریم‌ها و عدم امکان تبادلات بین‌المللی برای صنایع مختلف ازجمله صنعت برق مشکل‌هایی را به وجود آورده است، واحدهای فناور و شرکت‌های دانش‌بنیان توانسته‌اند با ایجاد تعامل سه‌جانبه دانش‌بنیان-دانشگاه-صنعت برخی از مشاوره‌ها، موانع بهره‌برداری و تأمین تجهیزات صنعت برق را بررسی کنند و آن‌ها را با موفقیت پشت سر بگذارند. در صورتی که حمایت‌های مالی و تقنینی از سوی نهادهای دولتی و هلدینگ‌های بزرگ خصوصی انجام شود، این شرکت‌ها خواهند توانست در ادامه روند ارتباط با صنعت، محصولات خود را به طور انبوه تولید کنند و در جهت رشد صنایع و ارتقای زیرساخت‌ها قدم بردارند. در حالت ایده‌آل نیز حمایت دولتی و تسهیلات سرمایه‌گذاری از این شرکت‌ها باعث مراکز نوآوری صنعتی هدفمند در کشور خواهد شد که پیشرفت علمی را با توانمندی داخلی به پیشرفت صنعتی تبدیل خواهد کرد. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور مطابق جدول ۹ انتخاب شد.

جدول ۷. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ تاب‌آوری شبکهٔ برق

توصیف‌کننده	حالت‌ها
تاب‌آوری شبکهٔ برق	رویه‌های برنامه‌ریزی و زیرساختی مورد تأکید باشد.
	رویه‌های بهره‌برداری مورد تأکید باشد.
	رویه‌های برنامه‌ریزی و زیرساختی و بهره‌برداری توأمان مورد تأکید باشد.
	هیچ‌یک از رویه‌های یادشده مورد تأکید نباشد.

جدول ۸. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ کمترین تنش‌های زیست‌محیطی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
کمترین تنش‌های زیست‌محیطی	در زمینهٔ آلودگی هوای شهری کمترین چالش وجود داشته باشد.
	در حوزهٔ ریزگردها تهدیدهای زیست‌محیطی وجود نداشته باشد.
	تنش‌های حوزهٔ منابع آب کشور در کمترین حالت خود باشد.

جدول ۹. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور

توصیف‌کننده	حالت‌ها
توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور	حفظ روند فعلی
	حرکت دانش‌بنیان‌ها به سمت تولید انبوه محصول و خدمات
	توسعهٔ مراکز نوآوری صنعتی هدفمند

۲. ۳. ۱۰. رفع ناترازی منحنی مصرف

عدم تعادل مصرف در ساعت‌ها، روزها و ماه‌های مختلف سال مشکل‌هایی را برای تولیدکنندگان و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت به همراه داشته است. در ساعت‌های اولیهٔ روز با ورود بارهای الکتریکی تجاری، خانگی و برخی از صنایع افزایش تقاضا مشاهده می‌شود. این تقاضا در ساعت‌های نزدیک غروب به اوج خود می‌رسد و در نیمه‌شب در کمترین میزان خود به سر می‌برد. همچنین، تغییر میزان مصرف در روزهای متوالی یک ماه نیز ممکن است بر اثر تغییر شرایط آب‌وهوایی و دیگر حوادث

اعلام‌نشده در یک منطقه پدید آید. عدم یکنواختی مصرف در ماه‌های مختلف به‌ویژه فصل گرم نسبت به سایر ماه‌ها نیز یکی دیگر از مقیاس‌های بررسی ناترازی منحنی مصرف است. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کننده رفع ناترازی منحنی مصرف مطابق جدول ۱۰ انتخاب شد.

۲. ۳. ۱۱. توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی

امروزه با افزایش به‌کارگیری انواع تکنولوژی‌های نوین مانند منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت، چهرهٔ این سیستم‌ها دگرگون شده است. توجه به این نکته ضروری است که با اینکه استفاده از این منابع و سایر تکنولوژی‌های تولید پراکنده همچنان از نظر اقتصادی محل بحث است، اما جای تردید نیست که قیمت ساخت، نصب و نگه‌داری مولدهای تولید پراکنده بر پایهٔ منابع اولیهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های آینده همچنان کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، مسائل دیگری مانند آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش شدید سطح مصرف انرژی در جهان موجب شده است که کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی برای تأمین نیازهای خود در آینده، توجه ویژه‌ای داشته باشند.

این مطلب با نام «ضریب نفوذ» حضور منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه اهمیت پیدا می‌کند. هر مقدار ضریب نفوذ بیشتر باشد به این معناست که منابع انرژی‌های تجدیدپذیر توانسته‌اند به میزان بیشتری در تولید انرژی شبکه نقش داشته باشند. سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی که در تاریخ ۱۳۷۹/۱۱/۳ تأیید و ابلاغ شده است به ایجاد تنوع در منابع انرژی کشور، تلاش برای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین، تلاش برای کسب فناوری و دانش فنی انرژی‌های نو و ایجاد نیروگاه‌ها مانند بادی، خورشیدی، پیل‌های سوختی و زمین‌گرمایی در کشور اشاره دارد. در ماده ۵۰ قانون برنامه پنج‌ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی (۱۳۹۵) نیز آمده است که در پایان برنامه باید حداقل ۵ درصد از ظرفیت تولید برق کشور از منابع تجدیدپذیر باشد. آخرین وضعیت تولید برق کشور بیانگر آن است تنها حدود ۱ درصد ظرفیت برق کشور را نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر تشکیل می‌دهند که فاصلهٔ زیادی با مقدار مطلوب برنامهٔ ششم توسعه دارد. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ توسعه ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی مطابق جدول ۱۱ انتخاب شد.

جدول ۱۰. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ رفع ناترازی منحنی مصرف

توصیف‌کننده	حالت‌ها
رفع ناترازی منحنی مصرف	روزانه ماهانه فصلی

جدول ۱۱. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی	تا هزار مگاوات دست یافته شود. تا پنج هزار مگاوات دست یافته شود. تا ده هزار مگاوات دست یافته شود.

۲. ۳. ۱۲. امنیت انرژی

گسترش شبکهٔ گاز و برق در کشور با وجود افزایش قابلیت اطمینان تأمین انرژی در بخش‌های مختلف، یک ایجاد پنداشت اجتماعی برخورداری همیشگی از آن‌ها را در ذهن عموم مردم به وجود آورده و به طور کلی به مصرف بی‌رویه انرژی منجر شده است. همچنین، از طرفی امنیت در عرضهٔ انرژی باعث تقویت توان اقتصادی و بهبود امور معیشتی مردم شده است. چالش‌های بسیاری امنیت تأمین انرژی را تحت تأثیر قرار داده است. تغییر آب‌وهوایی، تهدیدهای محیط‌زیستی و مسائل اقتصادی کشورها هریک به شکلی امنیت تأمین انرژی از منابع مختلف را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در این میان، امنیت تأمین گاز جهت

مصرف در بخش‌های مختلف از جمله نیروگاهی، صنعتی، خانگی و تجاری از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و گاز طبیعی منبع اولیه تأمین انرژی در کشور محسوب می‌شود. برق و سوخت مایع نیز در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ امنیت انرژی مطابق جدول ۱۲ انتخاب شد.

۲. ۳. ۱۳. یارانهٔ پنهان انرژی

در سال ۲۰۲۰ ایران با پرداخت ۳۰ میلیارد دلار یارانه انرژی بالاتر از چین و عربستان در رتبهٔ اول تخصیص یارانه انرژی در جهان قرار گرفته بود که از این میان بیش از ۱۲ میلیارد دلار یارانه به انرژی برق اختصاص داشت [۲۹]. در صورتی که یارانهٔ انرژی الکتریکی پرداخت نشود، صنایع پرمصرف که به برق متکی هستند متضرر خواهند شد، چراکه پیش‌تر، هزینهٔ قبض آن‌ها درصد کمی از کل هزینه‌ها را به خود اختصاص داده بود. سوخت نیز به عنوان منبع اولیه در برخی بخش‌ها به‌ویژه حمل‌ونقل و نیروگاه مطرح است. در صورتی که یارانهٔ سوخت کاهش یابد، صنعت حمل‌ونقل به دنبال عرضهٔ خودروهای باکیفیت و با بازدهی بالا خواهد بود. علاوه بر آن، کاهش یارانهٔ سوخت یک محرک برای کنار گذاشتن نیروگاه‌های فرسوده است که می‌تواند زمینه‌ساز توسعهٔ روش‌های جایگزین تولید برق تلقی شود. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ یارانهٔ پنهان انرژی مطابق جدول ۱۳ انتخاب شد.

۲. ۳. ۱۴. راهبرد ذخیره‌سازی اصلی

این مقاله با هدف بیان سناریوهای توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ایران با روش اثر ماتریس متقابل تهیه شده است. برای این منظور، توصیف‌کننده‌های ۱۳ گانه در کنار توصیف‌کننده پایه پژوهش قرار می‌گیرد. حالت‌های ذخیره‌سازی از جمله هوای فشرده، چرخ طیار، تلمبهٔ ذخیره‌ای، هیدروژن و باتری به عنوان فناوری ذخیره‌سازی اصلی با سایر حالت‌ها در توصیف‌کننده‌های مختلف سنجیده می‌شوند. بنابراین، حالت‌های مرتبط با توصیف‌کنندهٔ راهبرد ذخیره‌سازی اصلی مطابق جدول ۱۴ انتخاب شد.

جدول ۱۲. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ امنیت انرژی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
امنیت انرژی	معیار اصلی امنیت تأمین گاز باشد. معیار اصلی امنیت تأمین برق باشد. معیار اصلی امنیت تأمین سوخت مایع باشد. امنیت تمام منابع انرژی به عنوان معیار مطرح باشد.

جدول ۱۳. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ یارانهٔ پنهان انرژی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
یارانهٔ پنهان انرژی	در سوخت و الکتریسیتهٔ یارانه پرداخت نشود. در سوخت و الکتریسیتهٔ یارانه پرداخت شود. تنها در الکتریسیتهٔ یارانه پرداخت شود. تنها در سوخت یارانه پرداخت شود.

جدول ۱۴. حالت‌های توصیف‌کنندهٔ راهبرد ذخیره‌سازی اصلی

توصیف‌کننده	حالت‌ها
راهبرد ذخیره‌سازی اصلی	هوای فشرده چرخ طیار تلمبهٔ ذخیره‌ای هیدروژن باتری هیچ‌یک

۳. نتایج استخراج سناریوهای برگزیده

با توجه به ارزیابی انجام‌شده توسط گروه خبرگی، تکمیل ماتریس اثر ماتریس متقابل و مدل‌سازی در نرم‌افزار ScenarioWizard، سناریوهای برگزیده مطابق جدول ۱۵ به دست آمد.

در ۷ سناریو، توسعهٔ فناوری بخش انرژی پیشنهاد شده است و دو سناریو دیگر توسعهٔ فناوری در بخش صنعت و معدن را شامل می‌شود. مهم‌ترین روش‌های سرمایه‌گذاری خارجی پیشنهادشده، سرمایه‌گذاری در قالب شرکت‌های چندملیتی و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی است.

نتایج شبیه‌سازی توسعهٔ روابط خارجی را همراه با سرمایه‌گذاری داخلی از محل منابع دولتی و خصوصی انتخاب کرده است. همچنین در این مسیر رشد تولید پراکنده تا ۱۵ هزار مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با استفاده در مناطق دور از شبکه انتخاب شده که توسعهٔ شبکه‌های هوشمند در صنعت برق را نیز می‌طلبد.

در بخش تاب‌آوری شبکهٔ برق، هر دو رویه‌های برنامه‌ریزی و زیرساختی و بهره‌برداری توأمان مورد تأکید گرفته و برای تهدیدهای زیست‌محیطی، کمترین آلودگی هوای شهری و کمترین تنش آبی در کشور را مد نظر قرارداده است. همچنین، برای توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور، توسعهٔ مراکز نوآوری صنعتی هدفمند و در خصوص رفع ناترازی منحنی مصرف، برطرف کردن اختلاف مصرف در مقیاس روزانه و ماهانه را برگزیده است.

در این مسیر با معیار تأمین امنیت برق، ۱۰ هزار مگاوات به منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی اضافه شده و در شرایطی که یارانه‌ای برای سوخت و الکتریسیته پرداخت نشود، فناوری‌های ذخیره‌سازی باتری، هیدروژن و تلمبهٔ ذخیره‌ای به عنوان راه‌کارهای برگزیده انتخاب شده است.

۳. ۱. توصیف‌گرهای با یک حالت سازگار

توصیف‌گرهایی که در این قسمت به آن‌ها پرداخته می‌شود حتماً باید در حالت مشخص شده باشند. این توصیف‌گرها هیچ حالت دیگری برایشان متصور نیست و فقط یک حالت هستند.

۳. ۱. ۱. سیاست خارجی: فناوری‌های مرتبط با ذخیرهٔ انرژی و شرکت‌های مطرح در زمینهٔ مشاوره، طراحی و اجرای مجتمع‌های ذخیره‌سازی اغلب در کشورهای توسعه‌یافته مستقر هستند. بدون شک بهره‌گیری از آن‌ها به ارتباطات دولت‌ها، افزایش قراردادهای دوجانبه و توسعهٔ روابط بین‌المللی در تمام زمینه‌ها نیازمند است.

۳. ۱. ۲. قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی: ریسک سرمایه‌گذاری در ایران به دلیل شرایط خاص سیاسی-اقتصادی بالا است و از طرفی، ذخیره‌سازی انرژی بخشی پرهزینه در صنعت برق است. با این شرایط، سرمایه‌گذاران خارجی به شرطی حاضر به همکاری می‌شوند که قسمتی از منابع را حاکمیت یا دولت تأمین کند. به همین دلیل، باید اعتبارات دولتی از محل ردیف بودجه یا منابع صندوق توسعهٔ ملی به این موضوع اختصاص یابد.

۳. ۱. ۳. سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس: شرکت‌هایی در بورس به منظور تأمین انرژی الکتریکی مراکز مختلف صنعتی و تجاری توسط بخش خصوصی به‌ویژه در جنوب کشور فعال هستند. همچنین، بورس یک بستر عمومی برای تأمین سرمایهٔ شرکت‌ها است که در زمینهٔ تأمین انرژی الکتریکی و ذخیره‌سازی آن اقدام کنند. از طرفی، وزارت نیرو هم در بخش تأمین برق برای مناطق دور از شبکه به صورت برگزاری مناقصه از بخش خصوصی بهره می‌گیرد. جمع‌سپاری مالی نیز به عنوان یک بحث نوپا که در سال‌های اخیر در تأمین مالی برخی پروژه‌های نیروگاهی نقش داشته است، این بار در زمینهٔ ذخیره‌سازی می‌تواند مفید باشد. بنابراین، با افق تأمین مالی از عموم مردم و در پایلوت‌های مقیاس کوچک، باید به سمتی حرکت شود که خصوصی‌سازی به صورت جمع‌سپاری و بورس رو به رشد باشد.

جدول ۱۵. سناریوهای برگزیده برای توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ایران

<table>
<tr><th>سناریوی ۱</th><th>سناریوی ۲</th><th>سناریوی ۳</th><th>سناریوی ۴</th><th>سناریوی ۵</th><th>سناریوی ۶</th><th>سناریوی ۷</th><th>سناریوی ۸</th><th>سناریوی ۹</th></tr>
<tr><td colspan="5">توسعهٔ فناوری‌های راهبردی:
در بخش انرژی</td><td colspan="2">توسعهٔ فناوری‌های راهبردی:
در بخش صنعت و معدن</td><td>توسعهٔ فناوری‌های راهبردی:
در بخش انرژی</td></tr>
<tr><td colspan="2">سرمایه‌گذاری خارجی:
سرمایه‌گذاری مستقیم صورت پذیرد</td><td>سرمایه‌گذاری خارجی:
در قالب شرکت‌های همکاری چندملیتی صورت پذیرد</td><td>سرمایه‌گذاری خارجی:
سرمایه‌گذاری مستقیم صورت پذیرد</td><td>سرمایه‌گذاری خارجی:
در قالب شرکت‌های همکاری چندملیتی صورت پذیرد</td><td>سرمایه‌گذاری خارجی:
سرمایه‌گذاری مستقیم صورت پذیرد</td><td colspan="2">سرمایه‌گذاری خارجی:
در قالب شرکت‌های همکاری چندملیتی صورت پذیرد</td><td>سرمایه‌گذاری خارجی:
در قالب شرکت‌های همکاری چندملیتی صورت پذیرد</td></tr>
<tr><td colspan="9">سیاست خارجی:
توسعهٔ روابط خارجی</td></tr>
<tr><td colspan="9">قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی:
مشکلی در اختصاص بودجه و اعتبارات صندوق توسعهٔ ملی وجود نداشته باشد</td></tr>
<tr><td colspan="9">سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس:
حرکت به این سمت با شتاب باشد</td></tr>
<tr><td colspan="9">توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند:
رشد تولید پراکنده تا ۱۵ هزار مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با استفاده در مناطق دور از شبکه همراه شود. توسعهٔ شبکه‌های هوشمند در صنعت برق نیز پیگیری شود.</td></tr>
<tr><td colspan="9">تاب‌آوری شبکهٔ برق:
رویه‌های برنامه‌ریزی و زیرساختی و بهره‌برداری توأمان مورد تأکید باشد</td></tr>
<tr><td colspan="8">کمترین تهدیدهای زیست‌محیطی:
در زمینهٔ آلودگی هوای شهری کمترین چالش وجود داشته باشد.</td><td>کمترین تهدیدهای زیست‌محیطی:
تنش‌های حوزهٔ منابع آب کشور در کمترین حالت خود باشد.</td></tr>
<tr><td colspan="9">توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور:
توسعهٔ مراکز نوآوری صنعتی هدفمند</td></tr>
<tr><td colspan="4">رفع ناترازی منحنی مصرف:
روزانه</td><td colspan="4">رفع ناترازی منحنی مصرف:
ماهانه</td><td>رفع ناترازی منحنی مصرف:
ماهانه</td></tr>
<tr><td colspan="9">توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی:
تا ۱۰ هزار مگاوات دست یافته شود</td></tr>
<tr><td colspan="9">امنیت انرژی:
معیار اصلی امنیت تأمین برق باشد</td></tr>
<tr><td colspan="9">یارانهٔ پنهان انرژی:
در سوخت و الکتریسیته یارانه پرداخت نشود</td></tr>
<tr><td colspan="2">راهبرد ذخیره‌سازی اصلی:
هیدروژن</td><td colspan="2">راهبرد ذخیره‌سازی اصلی:
باتری</td><td colspan="3">راهبرد ذخیره‌سازی اصلی:
هیدروژن</td><td>راهبرد ذخیره‌سازی اصلی:
تلمبهٔ ذخیره‌ای</td></tr>
</table>

۳. ۱. ۴. توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند و توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی: حرکت به سمت توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده الزام می‌کند توسعهٔ ذخیره‌سازی در سطح بالا اتفاق بیفتد. در شرایط کنونی تأمین برق در شبکهٔ سراسری با مشکل مواجه است. شرکت‌های بسیاری برای افزایش سطح تولید یا گسترش خط تولید محصول، نیاز به انرژی الکتریکی بیشتری دارند. از طرفی، مجتمع‌های تجاری و سایر بخش‌های خصوصی نیز با مشکل‌های مشابهی در کاهش ساعت‌های بهره‌مندی از انرژی الکتریکی روبه‌رو هستند. یکی از راه‌هایی که صنعت برق پیش روی این مصرف‌کنندگان الکتریسیته قرار داده است، تعامل مالی و اداری چند مجموعه برای تأمین برق مجموعه به صورت استفاده از مولدهای تولید پراکندهٔ حرارتی و احداث نیروگاه تجدیدپذیر است. همچنین، انعقاد قرارداد برای تولید ۱۰ هزار مگاوات برق تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به منظور افزایش ضریب نفوذ این انرژی‌ها در شبکهٔ برق مورد توجه سیاست‌گذاران انرژی ایران قرار گرفته است. بنابراین، توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی و توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند در بالاترین مقدار خود رخ خواهد داد.

۳. ۱. ۵. تاب‌آوری شبکهٔ برق: طبق نتایج شبیه‌سازی تاب‌آوری در بهترین حالت اتفاق می‌افتد. شبکهٔ برق ایران با تنوع سبد تأمین انرژی نیاز به توجه افزون‌تر به بحث تاب‌آوری دارد. این موضوع به دلیل تغییر گسترده‌ای که در شبکهٔ قدرت در حال انجام است، اهمیت پیدا می‌کند. انعطاف‌پذیری نیز به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در شبکهٔ برق ایران که در زیرمجموعه تاب‌آوری مطرح می‌شود، حائز اهمیت خواهد بود. بنابراین، شبکه باید از تغییر جدیدی که به واسطهٔ ورود منابع تجدیدپذیر، مولدهای تولید پراکنده و سامانه‌های ذخیره‌سازی به وجود آمده است، پشتیبانی کند.

۳. ۱. ۶. توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور: فناوری‌های ذخیره‌سازی در تمام نسل‌های خود بین‌رشته‌ای بوده و در مرز دانش حرکت کرده‌اند. یک سیستم ذخیره‌سازی حاصل همکاری چند رشتهٔ برق، انرژی، مکانیک، عمران، مواد و متالوژی، نانو، کامپیوتر و صنایع است. این سیستم پیچیده هنگامی که با این وسعت بخواهد توسعه پیدا کند، کار یک یا چند شرکت دانش‌بنیان نیست. بنابراین، باید این موضوع در یک مرکز نوآوری بررسی شود تا روی زنجیرهٔ ارزش آن پژوهش انجام شود. همچنین، به دلیل اینکه موضوع ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ در کشور توسعه پیدا خواهد کرد، مراکز نوآوری در کشور باید رویکرد صنعتی محور داشته باشند و فقط مرکز نوآوری دانشگاهی نباشند.

۳. ۱. ۷. امنیت انرژی: با توجه به اینکه در تحلیل انجام شده، عملکرد منابع ذخیره‌ساز در بخش تولید الکتریکی مد نظر بوده است، امنیت الکتریکی حداکثری برگزیده شده است.

۳. ۱. ۸. یارانهٔ پنهان انرژی: تنها حالت پیشنهادی برای این قسمت عدم پرداخت یارانه در سوخت و الکتریسیته است. هنگامی که صنعت ذخیره‌سازی بخواهد به سمت خصوصی محور شدن و ورود سرمایهٔ خارجی حرکت کند، باید یارانهٔ پنهان را حذف کند. با این کار نرخ بازگشت برای سرمایه‌گذاران منطقی شده و جذابیت سرمایه‌گذاری برای تأمین مالی توسط بخش خصوصی بیشتر می‌شود.

۳. ۲. توصیف‌گرهای با بیش از یک حالت سازگار

توصیف‌گرهایی که در این قسمت به آن‌ها پرداخته می‌شود برای سناریوهای بیان‌شده در چند حالت مختلف انتخاب شده است.

۳. ۲. ۱. کمترین چالش‌های زیست‌محیطی: در بخش زیست‌محیطی دو رویکرد مورد نظر قرار می‌گیرد. اگر درگیری‌ها در حوزهٔ آلودگی شهری در پایین‌ترین سطح خود باشد، طیف وسیعی از سناریوهای مختلف مورد توجه خواهد بود. در این حالت می‌توان از باتری، هیدروژن و فناوری تلمبهٔ ذخیره‌ای استفاده کرد. همچنین، در صورتی که تنش‌های آبی در کمترین حالت ممکن باشد، ذخیره‌سازی تلمبهٔ ذخیره‌ای می‌تواند در دستور کار قرار گیرد.

۳. ۲. ۲. توسعهٔ فناوری‌های راهبردی: سناریوهای توسعهٔ فناوری راهبردی در صورتی که بخواهد در بخش صنعت و معدن مورد تأکید باشد، راه‌کارهای بهینهٔ ذخیره‌سازی تنها هیدروژن و باتری خواهد بود. اما اگر توسعهٔ فناوری راهبردی در بخش انرژی مطرح باشد، تنوع

بیشتری در راه‌کارها وجود خواهد داشت و فناوری ذخیره‌سازی تلمبهٔ ذخیره‌ای نیز به عنوان یک منبع ذخیره‌سازی عنوان می‌شود.

۳. ۲. ۳. سرمایه‌گذاری خارجی: در صورتی که توسعهٔ فناوری در بخش صنعت و معدن در اولویت باشد، به دلیل اینکه وجود شرکای خارجی در فناوری هیدروژن و باتری حایز اهمیت است، شرکت‌های چندملیتی هم در فناوری و هم در سرمایه‌گذاری مناسب‌ترین گزینه پیشنهاد شده است. در غیر این‌صورت، تنوع بیشتری وجود خواهد داشت.

۳. ۲. ۴. ناترازی منحنی مصرف: در کشور ایران نیروگاه سیاه‌بیشه به عنوان یک نمونهٔ موفق برای پیک‌سایی روزانه به شمار می‌رود. همچنین، با گسترش فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت حضور این منابع در شبکهٔ سراسری، مشکل‌هایی را متوجه بهره‌برداران سیستم خواهد کرد. به همین دلیل، در مواردی از نیروگاه‌های تلمبهٔ ذخیره‌ای برای پایدارسازی توان حاصل‌شده از مزارع انرژی بادی و خورشیدی بهره گرفته می‌شود.

۳. ۲. ۵. فناوری ذخیره‌سازی اصلی: فناوری ذخیره‌سازی باتری برای استفاده‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت استفاده می‌شود. این نوع ذخیره‌سازی با توجه به فناوری‌های مختلفی که در خود جای داده است، در کاربردهای مختلف مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در ایرانِ آینده، باتری نسبت به هیدروژن، به‌مراتب در دسترس‌تر خواهد بود و جایگاه بهتری نسبت آن خواهد داشت. هیدروژن از فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی در بهره‌برداری میان‌مدت و طولانی‌مدت است و می‌تواند در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گیرد. نیروگاه‌های تلمبهٔ ذخیره‌ای یکی از ابزارهای کاربردی در صنعت برق است و در صورت کاهش تنش‌های آبی می‌تواند از منابع مهم ذخیره‌سازی به شمار رود.

۳. ۳. سناریوهای برگزیده

از ۹ سناریو در جدول ۱۵، سه سناریو انتخاب شده است. در بررسی همه‌جانبهٔ سناریوهای سازگار برخی از ویژگی‌هایی که در انتخاب موارد پیشنهادی مد نظر قرار گرفت، شامل موارد زیر است.

۱. سناریوها به نحوی انتخاب شوند تا توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در هر دو زمینهٔ انرژی و صنعت و معدن را پوشش دهند.

۲. از پتانسیل فناوری‌های ذخیره‌سازی اصلی برای کنترل پیک مصرف انرژی الکتریکی کشور در بازه‌های مختلف زمانی بهره گرفته شود.

۳. از ظرفیت‌های بخش تولید و دانش‌بنیان در توسعهٔ منابع ذخیره‌ساز استفاده شود.

به نظر می‌رسد این سه سناریو برای آینده با توجه به ریسک‌هایی که برای سناریوهای دیگر وجود دارد، بهترین انتخاب‌ها باشد.

۳. ۳. ۱. سناریو تمرکز بر فناوری ذخیره‌سازی باتری: سناریوی پیشنهادی اول در فضای حالت خود توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در بخش انرژی، سرمایه‌گذاری در قالب شرکت‌های چندملیتی، رفع ناترازی تولید و مصرف به صورت روزانه و شرایط کاهش آلودگی هوای شهری را به همراه دارد. علاوه بر این، عوامل که ناشی از توصیف‌کننده‌های با چند حالت سازگار بودند، توصیف‌کننده‌های با یک حالت سازگار نیز برقرار هستند. با این توصیف‌ها، یکی از چالش‌هایی که در کشور ایران سال‌به‌سال گسترده‌تر می‌شود، آلودگی هوای کلان‌شهرها است. مهم‌ترین منابع تولید آلودگی، نیروگاه‌های مجاور شهر و وسایل نقلیهٔ بنزینی و گازوئیلی است. با توجه به ناترازی تولید و مصرف انرژی الکتریکی، بهره‌برداری از مجتمع‌های ذخیره‌سازی باتری و جایگزینی آن با نیروگاه‌های اطراف شهرها پیشنهاد می‌شود. همچنین، یکی از راه‌هایی که برای حل قسمت دوم چالش مطرح شده است، افزایش استفاده از وسایل نقلیهٔ عمومی الکتریکی و گسترش به‌کارگیری خودروهای برقی است. خودروهای برقی و هیبریدی از باتری به عنوان سامانهٔ ذخیره‌ساز استفاده می‌کنند. استفاده از این نوع خودروها کاهش مصرف بنزین و کمتر شدن آلودگی هوا را به دنبال دارد. از طرف دیگر، بهره‌مندی از سامانهٔ ذخیره‌سازی در این خودروها در قالب طرح‌های پاسخ‌گویی بار باعث مشارکت آن‌ها در تأمین توان مورد نیاز شبکه در زمان پیک خواهد شد. دو فناوری باتری‌های لیتیوم-یون و سرب-اسید برای توسعهٔ هدف سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی هستند. فناوری باتری لیتیوم-یون که متناسب ذخیره‌سازی متحرک است، در کشور ایران محدود است و باید سرمایه‌گذاری خارجی در این حوزه به منظور تجاری‌سازی و افزایش تولید صورت پذیرد. به خلاف فناوری لیتیوم-

یون، فناوری سرب-اسید در کشور موجود بوده و تولید این نوع باتری به‌صرفه است. این فناوری که تولید آن در کشور متعارف و اقتصادی است، متناسب استفاده در مجتمع‌های ذخیره‌سازی ثابت مقیاس بزرگ در کاربرد نیروگاهی است.

۳. ۳. ۲. سناریو تمرکز بر فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن: حالت‌های سازگار این سناریو شامل توسعهٔ فناوری‌های راهبردی بخش صنعت و معدن، سرمایه‌گذاری در قالب شرکت‌های چندملیتی، رفع ناترازی منحنی مصرف در مقیاس ماهانه و ذخیره‌سازی در حوزهٔ فناوری هیدروژن را شامل می‌شود. در کنار این حالت‌ها، حالت‌های مطلق سازگار از دیگر توصیف‌کننده‌ها نیز قرار دارد. در حالت کلی، این سناریو جنبهٔ انتقال تکنولوژی و متنوع ساختن سبد منابع ذخیره‌ساز را هدف قرار داده است. از آنجا که در بهترین شرایط داخلی نیز احتمال ورود بخش دولتی به توسعهٔ سرمایه‌گذاری در تنوع‌بخشی به سبد ذخیره‌سازی دور از ذهن است، بخش خصوصی قدرتمند به‌ویژه صنعت و معدن می‌تواند این امکان را میسر می‌سازد. در زمینه‌های مختلف، صنایع و معادن بیشترین تعامل را با شرکت‌های خارجی دارند. بنابراین، در صورت توسعهٔ ارتباطات بین‌المللی و ایجاد شرکت‌های چندملیتی به گسترش این فناوری در کشور کمک شایانی خواهد شد. بنابراین، مادامی که توسعهٔ فناوری در صنعت و معدن ملاک قرار گرفته باشد، استفاده از فناوری هیدروژن که بتواند ذخیره‌سازی را در مقیاس چند هفته تا چند ماه با هدف تأمین انرژی در ایام خیلی گرم و خیلی سرد سال انجام دهد، پیشنهاد می‌شود.

۳. ۳. ۳. سناریو تمرکز بر فناوری ذخیره‌سازی تلمبهٔ ذخیره‌ای: فضای حالت این سناریو توسعهٔ فناوری راهبردی در زمینهٔ انرژی، سرمایه‌گذاری خارجی به شکل شرکت‌های چندملیتی، رفع ناترازی ماهانه منحنی مصرف، کمترین تنش‌ها در حوزهٔ منابع آبی و به‌کارگیری ذخیره‌سازهای تلمبهٔ ذخیره‌ای را به همراه دارد. همچنین، شرایط توصیف‌کننده‌های با یک حالت سازگار از جمله توسعهٔ روابط خارجی، عدم محدودیت در سرمایه‌گذاری دولتی و رغبت بخش خصوصی در کنار تولید پراکنده نیز برقرار است. با این شرایط، در صورتی که کمترین تنش‌های آبی وجود داشته باشد، بهترین گزینه برای ذخیره‌سازی، استفاده از نیروگاه تلمبهٔ ذخیره‌ای است. در حالت کلی، نیروگاه‌های تلمبهٔ ذخیره‌ای در فناوری‌های مختلف خود می‌توانند در بازار جانبی شبکهٔ برق مورد استفاده قرار گیرند و پشتیبان مزارع بادی و خورشیدی در تأمین قابلیت اطمینان و کاهش عدم قطعیت این منابع قرار گیرند. اما به دلیل اینکه در این روش هم در سیستم‌های حلقه باز و هم حلقه بسته، برای ارسال آب به حوضچه‌ها تلفات وجود دارد، به‌کارگیری آن در کشور ایران منوط به نبود نگرانی‌هایی در حوزهٔ برق و آب است. بنابراین، با توجه به شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک همراه با بارش‌های کم، به‌کارگیری آن در کشور ایران احتمال وقوع پایین‌تری دارد.

۳. ۴. ریسک‌ها

۳. ۴. ۱. سناریو تمرکز بر فناوری ذخیره‌سازی باتری: در حوزهٔ فناوری باتری‌های لیتیوم-یون کشور ایران وابسته خواهد بود. اگر برنامه‌ریزی‌ها در جهت حرکت به سمت ترند جهانی باشد، نبود منابع طبیعی لازم در این فناوری ازجمله نیکل، کبالت و لیتیوم از چالش‌های پیش رو خواهد بود.

۳. ۴. ۲. سناریوی تمرکز بر فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن: ذخیره‌سازی هیدروژن در جهان به بلوغ نرسیده است، در صورتی که توسعهٔ آن در دنیا با مشکل مواجه شود، سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در ایران نیز با سرنوشت مبهمی مواجه خواهد شد.

۳. ۴. ۳. سناریوی تمرکز روی فناوری ذخیره‌سازی تلمبهٔ ذخیره‌ای: با توجه به شرایط آب‌وهوایی سال‌های اخیر ایران و خشک‌سالی‌های پی‌درپی احتمال عدم موفقیت این سناریو در آینده وجود دارد.

۴. نتیجه‌گیری

این مقاله با یک دید جدید و نوآورانه به چالش ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در کشور پرداخته است. این دیدگاه با استفاده از تحلیل ماتریس اثر متقابل پیاده‌سازی شده و سناریوهای سازگار آن مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع تحلیل باعث می‌شود تا سیاست‌های جامعی بر مبنای این سناریوها برای توسعهٔ ذخیره‌سازی پیشنهاد شود و تا حد امکان در آن‌ها برنامه‌های متناقضی وجود نداشته باشد.

به همین‌منظور، ۵ حوزهٔ اساسی در توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی با عنوان‌های روابط بین‌الملل، ابعاد سرمایه‌گذاری، رویکرد فناورانه، چالش‌های ملی و پدافند غیرعامل و شبکهٔ انرژی الکتریکی کشور استخراج شد.

سپس، با تحلیل خبرگی توسط تیم پژوهش و اعضای مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی و همچنین، مرور پژوهش‌های علمی و سیاست‌گذاری، ۱۳ توصیف‌کننده تدوین شد. این توصیف‌کننده‌ها شامل توسعهٔ فناوری‌های راهبردی در کشور، سرمایه‌گذاری خارجی، سیاست خارجی، قدرت سرمایه‌گذاری حاکمیتی از منابع ملی، سرمایه‌گذاری به صورت جمع‌سپاری مالی و بورس، توسعهٔ تولید پراکنده و شبکهٔ هوشمند، تاب‌آوری شبکهٔ برق، کمترین تنش‌های زیست‌محیطی، توسعهٔ دانش‌بنیان فناوری و توسعهٔ مراکز نوآوری در کشور، رفع ناترازی منحنی مصرف، توسعهٔ ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر در سبد انرژی، امنیت انرژی، یارانهٔ پنهان انرژی و راهبرد ذخیره‌سازی اصلی است.

در نتایج این نکته به دست آمد که ۸ توصیف‌کننده فقط در یک حالت سازگار شدند و ۵ توصیف‌کنندهٔ باقی‌مانده در بیشتر از یک حالت سازگار معنا پیدا کردند. با توجه به اینکه ابتدا حوزه‌های کلی توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ایران در ۵ گروه دسته‌بندی شده بود، نتایج توصیف‌کننده‌های هریک از این ۵ گروه مطابق زیر است:

۱. در گروه توصیف‌کننده‌های مربوط به شبکهٔ انرژی الکتریکی، رشد منابع تولید پراکنده تا ۱۵ هزار مگاوات برای گسترش سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت و همچنین، استفاده در مناطق دور از شبکه به دست آمد. همچنین، ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر به میزان ۱۰ هزار مگاوات در شبکهٔ انرژی الکتریکی کشور تعیین شد. کاهش ناترازی منحنی مصرف نیز در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه انتخاب شد.

۲. در گروه توصیف‌کننده‌های مربوط به ابعاد سرمایه‌گذاری و روابط بین‌الملل، استفاده از منابع اعتباری دولتی داخل کشور از قبیل بودجه و اعتبارات صندوق ملی به مقدار نیاز موردتوجه بود. در این حوزه جذب سرمایه‌گذاری خارجی نیز به روش‌های گوناگون میسر و سرمایه‌گذاری داخلی به روش‌های غیردولتی نیز در حالت رشد و شتاب انتخاب شد.

۳. در گروه توصیف‌کننده مربوط به روابط بین‌الملل، سیاست خارجی در مسیر تعامل و گسترش روابط بین‌المللی قرار گرفت.

۴. در گروه توصیف‌کننده‌های حوزهٔ چالش‌های ملی و پدافند غیرعامل، توجه هم‌زمان به پارامترهای برنامه‌ریزی، زیرساختی و بهره‌برداری در بحث تاب‌آوری شبکهٔ برق مورد تأکید قرار گرفت. در این گروه کمترین تنش‌های حوزهٔ آب و آلودگی هوا به عنوان حالت‌های برگزیده برای استخراج سناریو انتخاب شد. امنیت تأمین انرژی الکتریکی به عنوان اولویت مطرح و یارانه‌های پنهان انرژی در تمام بخش‌ها به طور حداقل انتخاب شد.

۵. در گروه توصیف‌کننده‌های توسعه‌ای و فناورانه، توسعهٔ مراکز نوآوری صنعتی هدفمند مطابق با نیازهای کشور در حوزهٔ دانش‌بنیان برگزیده شد. همچنین، بخش‌های انرژی و صنعت و معدن برای تمرکز رشد و توسعهٔ فناوری انتخاب شدند.

در ادامه ماتریس اثر متقابل تشکیل شد و با مدل‌سازی در نرم‌افزار ScenarioWizard، ۹ سناریو در خروجی ارائه شد. با تحلیل‌های پیرامونی و در نظر گرفتن پتانسیل‌های بالقوه و بالفعل در کشور ایران، ۳ سناریو به عنوان سناریوهای برگزیده در کشور پیشنهاد شد. توسعهٔ ذخیره‌سازی به وسیلهٔ باتری به عنوان سناریوی اول مطرح شد. دلیل این انتخاب، توسعهٔ صنعت انرژی به وسیلهٔ توسعهٔ سرمایه‌گذاری‌های خارجی و داخلی بود. سناریوی دوم بر پایهٔ توسعهٔ فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن طرح‌ریزی شد. بهره‌گیری در روند پیک‌سایی بار شبکهٔ برق به صورت ماهانه، تأمین انرژی مورد نیاز صنایع و تکمیل زنجیرهٔ ارزش از ویژگی‌های به‌کارگیری این نوع ذخیره‌ساز عنوان شد. سومین سناریو در خصوص توسعهٔ فناوری‌های مربوط به نیروگاه‌های تلمبهٔ ذخیره‌ای بود. این سناریو در شرایط کمترین تنش‌های آبی و با ورود شرکت‌های چندملیتی امکان موفقیت داشت.

به نظر می‌رسد که در ادامهٔ این پژوهش می‌توان دیدگاه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی (موضوع مقالهٔ حاضر) را به دیدگاه ذخیره‌سازی انرژی با لحاظ کردن ذخیره‌سازی کلیهٔ منابع انرژی ازجمله گاز طبیعی به رویکرد جامع‌تری در کشور تعمیم داد. در رویکردهای جامع این‌چنینی هم‌گرایی در سیاست‌های آب و انرژی به شکل قابل‌اطمینان‌تری بروز خواهد یافت.

۶. منابع

[1].N. Li and K. W. Hedman, "Economic Assessment of Energy Storage in Systems with High Levels of Renewable Resources," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 6, no. 3, pp. 1103–1111, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2329881.

[2].D. Zhao, H. Wang, J. Huang, and X. Lin, "Storage or no storage: Duopoly competition between renewable energy suppliers in a local energy market," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 38, no. 1, pp. 31–47, 2020, doi: 10.1109/JSAC.2019.2951970.

[3].M. S. Guney and Y. Tepe, "Classification and assessment of energy storage systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 75, no. February, pp. 1187–1197, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.102.

[4].A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, and M. Zandi, "Multicriteria wind potential assessment using fuzzy logic in decision making: A case study of Iran," Wind Energy, vol. 24, no. 12, pp. 1443–1465, 2021, doi: 10.1002/we.2640.

[5].A. Gholami et al., "Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling," Sol. Energy, vol. 252, pp. 176–194, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.039.

[6].H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and A. Gholami, "A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software," Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff., vol. 44, no. 3, pp. 6709–6736, 2022.

[7].A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, S. Shahroozi, M. Zandi, and A. Khosravi, "Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran," Sustain. Energy Technol. Assessments, vol. 42, p. 100877, 2020.

[8].M. Rezvani, A. Gholami, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, and M. Zandi, "A review of the factors affecting the utilization of solar photovoltaic panels," in 2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C), 2022, pp. 62–69.

[9].A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. G. Ghoachani, and M. Gholami, "A fast and precise double-diode model for predicting photovoltaic panel electrical behavior in variable environmental conditions," Int. J. Ambient Energy, vol. 0, no. 0, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1080/01430750.2023.2173290.

[10]. T. M. I. Mahlia, T. J. Saktisahdan, A. Jannifar, M. H. Hasan, and H. S. C. Matseelar, "A review of available methods and development on energy storage; Technology update," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 33, pp. 532–545, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.068.

[11]. A. Atinagar, A. Alizadeh, V. Vahidi Motlagh, and A. Nazemi, Scenario planning or planning based on scenarios. Tehran: Atinegar, 2008.

[12]. S. Khazaei and P. Abdol Rahim, A step-by-step guide to strategic futures research: an overview of approaches and methods. Tehran: Ministry of Defense information and future research center, 2008.

[13]. M. Sadeghi and H. Mirshojaeian Hosseini, "Energy supply planning in Iran by using fuzzy linear programming approach (regarding uncertainties of investment costs)," Energy Policy, vol. 34, no. 9, pp. 993–1003, 2006, doi: 10.1016/j.enpol.2004.09.005.

[14]. L. Miller and R. Carriveau, "A review of energy storage financing—Learning from and partnering with the renewable energy industry," J. Energy Storage, vol. 19, no. May, pp. 311–319, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.08.007.

[15]. National Hydropower Association (NHA), "Challenges and Opportunities For New Pumped Storage Development," vol. 6, no. 5, p. 33, 2013, [Online]. Available: http://www.hydro.org/wp-content/uploads/2014/01/NHA_PumpedStorage_071212b12.pdf.

[16]. P. Zhao, P. Wang, W. Xu, S. Zhang, J. Wang, and Y. Dai, "The survey of the combined heat and compressed air energy storage (CH-CAES) system with dual power levels turbomachinery configuration for wind power peak shaving based spectral analysis," Energy, vol. 215, no. Ii, p. 109181, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119167.

[17]. B. Luo, D. Ye, and L. Wang, "Recent Progress on Integrated Energy Conversion and Storage Systems," Adv. Sci., vol. 4, no. 9, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1002/advs.201700104.

[18]. M. S. Nazir et al., "Optimization configuration of energy storage capacity based on the microgrid reliable output power," J. Energy Storage, vol. 32, no. July, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101866.

[19]. J. P. Deane, E. J. McKeogh, and B. P.. Gallachoir, "Derivation of intertemporal targets for large pumped hydro energy storage with stochastic optimization," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 2147–2155, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2236111.

[20]. B. Dursun and B. Alboyaci, “The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey’s electric energy demand,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 7, pp. 1979–1988, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.030.

[21]. M. Raju and S. K. Khaitan, “System simulation of compressed hydrogen storage based residential wind hybrid power systems,” J. Power Sources, vol. 210, pp. 303–320, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.050.

[22]. J. Ren, “Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: A novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach,” Renew. Energy, vol. 121, pp. 666–676, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.087.

[23]. A. Hajinezhad and P. Servati, “Role of renewable energy scenarios in carbon dioxide emissions forecasting in Iran in Outlook 2030,” Int. J. Ambient Energy, vol. 43, no. 1, pp. 6502–6510, Dec. 2022, doi: 10.1080/01430750.2021.1999320.

[24]. M. Bahrami and P. Abbaszadeh, “Development a scenario-based model for Iran′s energy future,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 62, pp. 963–970, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.053.

[25]. S. K. Chaharsooghi, M. Rezaei, and M. Alipour, “Iran’s energy scenarios on a 20-year vision,” Int. J. Environ. Sci. Technol., vol. 12, no. 11, pp. 3701–3718, Nov. 2015, doi: 10.1007/s13762-015-0829-7.

[26]. W. Weimer-Jehle, “Constructing consistent scenarios using cross-impact balance analysis,” Stuttgart Res. Cent. Interdiscip. Risk Innov. Stud. Univ. Stuttgart Seidenstr, vol. 36, p. 70174, 2016.

[27]. W. Weimer-Jehle, “Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis,” Technol. Forecast. Soc. Change, vol. 73, no. 4, pp. 334–361, 2006, doi: 10.1016/j.techfore.2005.06.005.

[28]. Tavanir, “Strategic report of the electricity industry of Iran’s electricity generation, transmission and distribution parent company,” Tehran, 2022.

[29]. M. Kang, “Energy Subsidies in the Middle East: Balancing Social Safety Nets and Climate Change,” 2022.