

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و شش، شماره یازده، بهمن ماه ۱۴۰۳ (۸۹-۷۳)

سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی در ایران

در افق ۱۴۳۰

بابک کاتب^۱

مجید عباسپور^{۲*}

abbpor@sharif.edu

زهرآ عابدی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۴

چکیده

زمینه و هدف: نیاز روزافزون کشورها به انرژی به ویژه برق، از یک سو و چالش‌های تأمین انرژی پایدار از سوی دیگر، جزو مهمترین موضوعات پیش روی کشورها می‌باشد. امروزه در دنیا یکی از روش‌های تعیین سهم فناوری‌های مختلف در تولید برق در سطوح ملی و منطقه‌ای، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی می‌باشد. از جمله مهمترین و مرسوم‌ترین مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی می‌توان به مدل‌های MARKAL، MESSAGE، LEAP، WASP و غیره اشاره کرد. استفاده از این مدل‌های شناخته شده برای برنامه‌ریزی تولید برق در سطوح مختلف، ترکیب بهینه فناوری‌های تولید برق را به ارمغان می‌آورد و سبد انرژی الکتریکی را با توجه به ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی به بهترین شکل ممکن فراهم می‌آورد. هدف این مطالعه تعیین سهم نیروگاه‌های مختلف در بازه زمانی بلندمدت تا سال ۱۴۳۰ با تاکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد برق تولیدی کشور می‌باشد.

روش بررسی: این مطالعه از نظر هدف کاربردی و از نظر جمع‌آوری آمار و اطلاعات اسنادی می‌باشد. برای دستیابی به هدف مطالعه، برنامه‌ریزی انرژی در ایران با افق زمانی ۱۴۳۰ با استفاده از مدل MESSAGE در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. در این مطالعه، برنامه‌ریزی انرژی در قالب سه سناریو مرجع، قیمت بالای سوخت و پایداری انرژی انجام پذیرفته است.

یافته‌ها: بررسی خروجی‌های مدل در قالب ۳ سناریو و ۵ بخش شامل: (۱) روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی، (۲) روند بهینه تولید برق، (۳) سهم فناوری‌های پاک در تولید برق، (۴) میزان مصرف سوخت و (۵) میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاکی از وضعیت بهتر شاخص‌ها در

۱- دانشجوی دکترای مدیریت محیط‌زیست- گرایش اقتصاد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. * (مسوول مکاتبات)

۳- استادیار گروه مدیریت محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سناریوی پایداری می‌باشد. مطابق یافته‌های این مطالعه، ظرفیت اسمی بهینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر (بادی، زیست توده و فتوولتائیک) در پایان سال ۱۴۳۰ به شرح زیر خواهد بود:

- سهم نیروگاه‌های بادی در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت به ترتیب حدود ۱۴، ۱۵/۷۸ و ۱۳/۵ درصد خواهد بود.
- سهم نیروگاه‌های زیست توده در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت به ترتیب حدود ۰/۳، ۳/۹۵ و ۳/۶ درصد خواهد بود.
- سهم نیروگاه‌های فتوولتائیک در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت به ترتیب حدود ۰/۸۲، ۶/۷۶ و ۵/۸۷ درصد خواهد بود.

بحث و نتیجه‌گیری: استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی، برای پیش‌بینی ترکیب بهینه منابع عرضه در آینده، مستلزم ورودی‌ها و مفروضات واقعی و به‌روز بوده و همچنین برنامه‌ریزی جامع و اجرای موثر آن را می‌طلبد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که براساس سناریوی پایداری در افق زمانی سال ۱۴۳۰، نیروگاه‌های گازی، هسته‌ای، بادی، زیست توده، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، دیزلی، آبی و غیره به ترتیب دارای اولویت می‌باشند و سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر مجموعاً به ۳۱/۳ درصد بالغ می‌گردد.

واژه های کلیدی: برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی، انرژی پایدار، سبد تولید برق ایران.

The share of renewable energies in the production of electrical energy in Iran in the horizon of 1430(2050)

Babak Kateb¹

Madjid Abbaspor^{2 *}

abbpor@sharif.edu

Zahra Abedi³

Date of Acceptance: June 30, 2024

Date of Submission: December 25, 2023

Abstract

Background and Objective: The increasing need for energy, especially electricity, on the one hand, and the challenges of sustainable energy on the other hand, are among the most important issues facing countries. One of the methods of determining the number of different technologies in electricity production at the national and regional levels in the world is one of the energy planning models. Among the most important and popular energy planning models, we can mention MARKAL, LEAP, MESSAGE, WASP, etc. models. The use of these well-known models for planning electricity production at different levels brings the optimal combination of electricity production technologies and provides the electric energy portfolio in the best possible way according to economic, social, environmental, etc. considerations. The purpose of this study is to determine the contribution of different power plants in the long-term period until 1430(2050), emphasizing renewable energy in the country's electricity production portfolio.

Material and Methodology: This study is applied in terms of purpose and documentary in terms of collecting data and information. To achieve the purpose of the study, energy planning in Iran was carried out with the time horizon of 1430(2050) using the MESSAGE model. In this study, energy planning has been done in the form of three, reference scenarios, energy sustainability and high fuel price.

Findings: Examining the outputs of the model in the form of 3 scenarios and 5 sections including: 1) the process of optimal development of power plant capacity, 2) the optimal process of electricity production, 3) the contribution of clean technologies in electricity production, 4) the amount of fuel consumption and 5) the amount of greenhouse gas emissions. It indicates the better condition of the indicators in the sustainability scenario. According to the findings of this study, the optimal nominal capacity of renewable power plants (wind, biomass and photovoltaic) at the end of 1430(2050) will be as follows:

- The share of wind power plants in the three reference scenarios, energy sustainability and high fuel price will be about 14, 15.78 and 13.5 percent, respectively.

1- Phd student in Environmental Management- Environmental Economics, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
*(Corresponding Author)

3- Assistant Professor, Department of Environmental Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

- The share of biomass power plants in the three reference scenarios, energy sustainability and high fuel price will be about 0.3, 3.95 and 3.6 percent, respectively.
- The share of photovoltaic power plants in the three reference scenarios, energy sustainability and high fuel price will be about 0.82, 6.76 and 5.87%, respectively.

Discussion and Conclusion: The use of electric energy supply planning models to predict the optimal combination of supply sources in the future requires real and up-to-date inputs and assumptions, as well as comprehensive planning and its effective implementation. The results of this study indicate that based on the sustainability scenario in the time horizon of 1430(2050), gas, nuclear, wind, biomass, photovoltaic, combined cycle, diesel, hydroelectric, etc. plants have priority, and the share of renewable power plants is 31.3% matures.

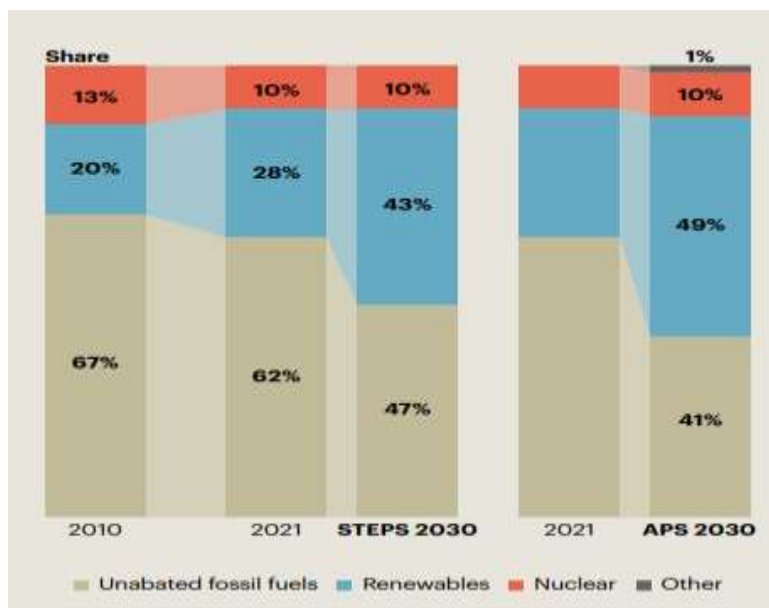
Keywords: electrical energy planning, sustainable energy, Iran's electricity production portfolio.

مقدمه

نمودند. این مهم تاثیر فراوانی در برنامه‌ریزی انرژی کشورها به ویژه در استراتژی‌های تولید انرژی الکتریکی در کشورهای جهان ایفا نموده است (۱). بر اساس گزارش چشم انداز انرژی جهان در سال ۲۰۲۲ که توسط آژانس بین المللی انرژی انتشار یافته است (۲)، ترکیب تولید انرژی الکتریکی تا سال ۲۰۳۰ از منابع انرژی کم آلاینده، به رهبری انرژی‌های تجدیدپذیر، در سناریوهای سیاست‌های بیان شده STEPS (Stated Policies Scenario) و APS (Announced Pledges Scenario) از سوخت‌های فسیلی پیشی خواهد گرفت و به دهه‌ها رشد استفاده از زغال سنگ برای تولید این انرژی پایان خواهد داد (۲، ۲۷۹).

دستیابی به انرژی الکتریکی پایدار یکی از الزامات رشد و توسعه اقتصادی کشورهای در حال توسعه قلمداد می‌شود. از یک سو منابع مختلف انرژی اولیه به همراه فناوری‌های متنوع تولید انرژی الکتریکی سناریوهای متعددی از سبد انرژی یاد شده را در پیش روی کشورها قرار داده است و از سوی دیگر محدودیت‌های منابع فسیلی و الزامات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از دیگر چالش‌های برنامه‌ریزی در این حوزه به شمار می‌روند. ابعاد مختلف تولید و مصرف انرژی الکتریکی در کشورهای مختلف مطرح می‌باشند که در این مطالعه سهم فناوری‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی با تاکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر، مورد توجه قرار گرفته است.

مطابق توافقنامه پاریس (The 21st Conference of the Parties or COP21) که در سال ۲۰۱۵ انتشار یافت، کشورهای شرکت کننده با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه زمانی مشخص و به نسبت معین شده موافقت خود را اعلام



نمودار ۱- تغییرات ترکیب تولید انرژی الکتریکی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ براساس سناریوهای (STEPS) و (APS)

Diagram 1. Changes in the composition of electric energy production during the years 2010 to 2030

based on (STEPS) and (APS) scenarios

Source: World Energy Outlook 2022, P. 279(2)

که در سال ۲۰۲۱ به ۲۸ درصد بالغ گردیده است. بر همین اساس سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سناریوی STEPS در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب به ۴۳ و ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت. در سناریوی APS در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب به ۴۹ و ۸۰ درصد و در سناریوی NZE (Net Zero Emission) به ۶۱ و ۸۸ درصد خواهد رسید. افزایش سهم قابل توجه انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش سهم منابع فسیلی در تولید انرژی الکتریکی در سال‌های آینده به عنوان فصل مشترک کلیه سناریوها به وضوح قابل مشاهده می‌باشد (۳، ۲۸۱).

همچنان که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل انرژی تولید جهان در سال ۲۰۱۰ معادل ۲۰ درصد بوده است که تا سال ۲۰۳۰ در سناریوی STEPS به ۴۳ درصد و در سناریوی APS به ۴۹ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین سهم تولید انرژی الکتریکی از منابع فسیلی در سال ۲۰۱۰ معادل ۶۷ درصد بوده است که تا سال ۲۰۳۰ در سناریوی STEPS به ۴۷ درصد و در سناریوی APS به ۴۱ درصد کاهش خواهد یافت. در این میان سهم تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه‌های هسته‌ای از ۱۳ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۱۰ درصد در هر دو سناریو در سال ۲۰۳۰ کاهش خواهد یافت (۲، ۲۷۹).

مطابق جدول ۱، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از عرضه انرژی الکتریکی در جهان در سال ۲۰۱۰ معادل ۲۰ درصد بوده است

جدول ۱- عرضه و تقاضای جهانی انرژی الکتریکی براساس سناریوها (TWh)

Table 1 . Global supply and demand of electric energy based on scenarios (TWh)

			STEPS		APS		NZE	
	۲۰۱۰	۲۰۲۱	۲۰۳۰	۲۰۵۰	۲۰۳۰	۲۰۵۰	۲۰۳۰	۲۰۵۰
Buildings	۹.۶۳۷	۱۲.۵۹۴	۱۵.۳۸۳	۲۱.۹۴۰	۱۴.۸۸۹	۱۹.۶۲۳	۱۳.۲۹۳	۱۵.۸۵۰
Industry	۷.۴۵۰	۱۰.۱۶۶	۱۲.۰۳۶	۱۵.۰۷۳	۱۲.۴۷۱	۱۸.۳۳۲	۱۳.۷۷۶	۲۱.۶۹۷
Transport	۲۹۵	۴۴۱	۱.۱۶۹	۳.۶۰۷	۱.۵۷۰	۷.۸۴۵	۲.۲۳۶	۱۰.۲۴۳
Hydrogen production	–	۲	۱۵۹	۶۶۳	۸۷۹	۵.۷۱۴	۲.۴۶۴	۱۱.۴۳۳
Global electricity demand	۱۸.۵۴۸	۲۴.۷۰۰	۳۰.۶۲۱	۴۳.۶۷۲	۳۱.۷۵۲	۵۳.۸۱۰	۳۳.۷۳۳	۶۲.۱۵۹
Unabated coal	۸.۶۷۰	۱۰.۲۰۱	۹.۰۴۴	۵.۸۹۲	۸.۰۷۶	۱.۵۸۰	۴.۶۶۶	۰
Unabated natural gas	۴.۸۵۵	۶.۵۵۲	۶.۸۴۸	۶.۶۵۸	۶.۱۰۰	۳.۵۷۷	۴.۹۷۷	۸۲
Unabated oil	۹۶۹	۶۸۲	۴۳۲	۳۱۲	۳۶۳	۱۷۵	۱۸۰	۳
Fossil fuels with CCUS	–	۱	۵	۱۳۳	۷۵	۱.۳۳۸	۲۸۲	۱.۳۱۷
Nuclear	۲.۷۵۶	۲.۷۷۶	۳.۳۵۱	۴.۲۶۰	۳.۵۴۷	۵.۱۰۳	۳.۸۹۶	۵.۸۱۰
Hydropower	۳.۴۴۹	۴.۳۲۷	۵.۰۷۸	۶.۸۰۹	۵.۲۱۳	۷.۵۴۳	۵.۷۲۵	۸.۲۵۱
Wind	۳۴۲	۱.۸۷۰	۴.۶۰۴	۱۰.۶۹۱	۵.۸۱۶	۱۷.۴۱۶	۷.۸۴۰	۲۳.۴۸۶
Solar PV	۳۲	۱۰.۰۳	۴۰.۱۱	۱۲.۱۱۸	۴.۸۳۸	۱۸.۷۶۱	۷.۵۵۱	۲۷.۰۰۶
Other renewables	۴۱۱	۸۵۹	۱.۳۸۰	۲.۸۳۳	۱.۷۰۷	۵.۱۵۳	۱.۹۴۸	۵.۷۶۲
Hydrogen and ammonia	–	–	۹	۴۴	۷۹	۵۶۷	۶۰۳	۱.۴۶۷
Global electricity supply	۲۱.۵۳۹	۲۸.۳۳۴	۳۴.۸۳۴	۴۹.۸۴۵	۳۵.۸۷۸	۶۱.۲۶۸	۳۷.۷۲۳	۷۳.۲۳۲
Renewables share	۲۰٪	۲۸٪	۴۳٪	۶۵٪	۴۹٪	۸۰٪	۶۱٪	۸۸٪

Notes: TWh= terawatt-hours; CCUS= carbon capture, utilisation and storage; PV= photovoltaics. STEPS= Stated Policies Scenario, APS= Announced Pledges Scenario; NZE= Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Electricity demand is defined as total gross electricity generated less own use generation, plus imports, less exports and transmission and distribution losses. Other sources are included in electricity supply.

Source: World Energy Outlook 2022, P. 281(3)

۱۳/۶ و ۰/۱۶ درصد بوده است که سهم منابع یادشده در سال ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) به ترتیب به ۸۳/۷، ۱/۲، ۱۴/۳ و ۰/۸۶ درصد تغییر یافته است (۴، ۴۱). همچنین براساس آمار تولید ناویژه برق نیروگاه‌های کشور (۴)، در سال ۱۳۸۸ (۲۰۱۰)، سهم منابع فسیلی، اتمی، آبی و تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی، بازیافت حرارتی و بیوگازسوز) به ترتیب ۹۶/۶، ۰، ۳/۳ و ۰/۱ درصد بوده است که در سال ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) سهم منابع یادشده به ترتیب به ۹۱/۵، ۱/۶، ۶/۴ و ۰/۴۱ درصد تغییر یافته است (۴، ۵۰). همچنان که بیان شد، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر شامل، انرژی‌های بادی، خورشیدی، بازیافت حرارتی و بیوگازسوز از ظرفیت اسمی منصوبه در سبد انرژی کشور در سال ۱۳۹۹

لازم به ذکر است که گزارش ۲۰۲۳ آژانس بین‌المللی انرژی تحت عنوان چشم انداز انرژی جهان در سال ۲۰۲۳ (۳)، نیز به افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در سال‌های آینده تاکید دارد (۳، ۲۸۱). تولید انرژی الکتریکی در ایران عمدتاً بر مبنای فناوری‌های مبتنی بر استفاده از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر اندک بوده و روند توسعه آن طی سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی را نشان نمی‌دهد. بر اساس آمار ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور (۴)، در سال ۱۳۸۸ (۲۰۱۰)، سهم منابع فسیلی، اتمی، آبی و تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی، بازیافت حرارتی و بیوگازسوز) به ترتیب ۸۶/۲، ۰،

(۲۰۲۰) معادل ۸۶/۲ درصد بوده است که براساس آمار تولید ناویژه برق در کشور در همان سال، صرفاً ۰/۴۱ درصد از انرژی الکتریکی تولیدی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است. لذا روند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور طی دهه گذشته از روند قابل قبول و معنی‌داری برخوردار نبوده است (۳، ۴۱ و ۵۰). در سال‌های اخیر توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از ظرفیت ماده ۱۲ قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر و ارتقای نظام مالی کشور (مصوب مجلس شورای اسلامی به شماره ۱۰۰۷۷/۴۹۱ مورخه ۱۳۹۴/۰۲/۲۰) و اخذ مصوبه شورای اقتصاد جهت احداث ۴۰۰۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی (نامه ابلاغ مصوبه شورای اقتصاد توسط سازمان برنامه و بودجه کشور به شماره ۱۷۱۹۶ به تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۰)، سند توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کشور تا ۲۰ هزار مگاوات، روش‌های خودتأمینی صنایع بزرگ از طریق احداث نیروگاه تجدیدپذیر، احداث نیروگاه تجدیدپذیر جهت عرضه برق در تابلو سبز بورس انرژی، خرید تضمینی برق تجدیدپذیر با استفاده از ظرفیت ماده ۶۱ قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی (مصوب مجلس شورای اسلامی به شماره ۱۷۷۰ مورخه ۱۳۹۰/۰۱/۲۱) و ... از جمله اقدامات دولت در راستای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور قلمداد می‌شود.

هدف پژوهش حاضر تعیین سهم فناوری‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی در کشور یا برآورد سبد انرژی الکتریکی کشور در افق زمانی ۱۴۳۰ می‌باشد. سوال محوری این پژوهش، بر تعیین سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از تولید برق در ایران در افق زمانی بلندمدت استوار است. برای دستیابی به هدف پژوهش، بر اساس برآورد نیاز روزافزون کشور به انرژی الکتریکی، محدودیت‌های فناوری‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی، الزامات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و غیره با استفاده از نرم افزار MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)، سبد انرژی کشور در افق زمانی سال ۱۴۳۰ برآورد گردیده است.

برنامه‌ریزی انرژی عبارت است از تدوین سیاست‌ها و برنامه‌های بلندمدت در سطوح مختلف (محلی، ملی و یا جهانی) باهدف

استفاده بهینه از منابع موجود به‌منظور تأمین تقاضای انرژی با کمترین هزینه (شامل آثار جانبی از جمله تخریب محیط‌زیست در جهت اهداف توسعه پایدار). برنامه‌ریزی انرژی متأثر از رویکرد کلان اقتصادی (تمرکز در برنامه‌ریزی یا اتکای به‌نظام بازار) می‌تواند بسیار وسیع و یا محدود باشد. بررسی و مقایسه کشورهای مختلف نشان می‌دهد اختلاف اصلی، وجود یا فقدان سیستم برنامه‌ریزی انرژی نیست بلکه نوع نگاه و وسعت برنامه‌ریزی است. سابقه تاریخی نشان می‌دهد با حرکت کشورها به سمت توسعه‌یافتگی، برنامه‌ریزی انرژی از شکل اولیه خود فاصله گرفته و به سمت تشخیص و تدوین سیاست‌ها حرکت کرده است. در دوره‌ی پس از تجدید ساختار، نقش برنامه‌ریزی متمرکز به شکل وسیعی کاهش‌یافته و تخصیص بهینه منابع از طریق سازوکار بازار دنبال می‌شود. در دنیای جدید پس از تجدید ساختار، ابزارهای برنامه‌ریزی انرژی از دید حاکمیت عمدتاً باهدف بررسی و سنجش آثار سیاست‌ها و تصمیمات، مورد استفاده قرار می‌گیرند. انرژی از عواملی است که در اکثر فعالیت‌های اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امنیت ملی بسیاری از کشورهای جهان درگرو دسترسی مطمئن به انرژی است. در حال حاضر تقریباً تمام کشورهای توسعه‌یافته و بسیاری از کشورهای درحال توسعه از یک برنامه‌ریزی کلی برای مدیریت انرژی بهره‌مند هستند.

مدل‌های انرژی، ابزاری استاندارد برای برنامه‌ریزی‌های انرژی هستند. در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای فرموله کردن و اجرای راهبردهای برنامه‌ریزی انرژی انجام‌شده و مدل‌های انرژی مختلفی در جهان ارائه‌شده‌اند. برخی از این مدل‌ها در ایران نیز اجرا شده‌اند. مهمترین مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی در مطالعه‌ای تحت عنوان سند راهبردی جامع برنامه‌ریزی انرژی (۵) به طور کامل معرفی گردیده‌اند (۳-۴۱).

بررسی پیشینه موضوع حاکی از تحقیقات متعدد در ارتباط با برنامه‌ریزی انرژی با استفاده از روش‌های مختلف و مدل‌های مربوطه در طی سال‌های مختلف و بازه زمانی بلندمدت معین می‌باشد. بررسی این مطالعات حاکی از آن است که تعیین سهم انرژی‌های مختلف در سبد انرژی کشورها از موضوعات روز و

چالش‌های مستمر کشورها می‌باشد. مطالعات داخلی بر اساس روش‌ها و مدل‌های مختلف عمدتاً در خصوص بررسی قیمت تمام شده تولید برق از فناوری‌های مختلف، بررسی مزیت نیروگاه‌های فسیلی و تجدیدپذیر، تعیین سهم انرژی‌های مختلف در سبد انرژی ایران، برنامه توسعه نیروگاه‌های کشور با اولویت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و انتشار کمتر کربن استوار است (۶، ۷ تا ۱۶).

مطالعات خارجی سال‌های اخیر نیز در ارتباط با موضوع به بررسی سهم و اولویت انرژی‌های تجدیدپذیر در برنامه توسعه انرژی در سطوح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی متمرکز است (۱۷، ۱۸ تا ۲۱).

روش بررسی

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۱ انجام گرفته و بر اساس هدف کاربردی و از نظر روش جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، اسنادی می‌باشد. از مدل MESSAGE برای تعیین ترکیب بهینه نیروگاه‌های تولید برق استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل با کمک گرفتن از نحوه گردآوری اطلاعات در مطالعات پیشین و بر اساس دوره زمانی مورد بررسی و مفروضات اصلی مدل، با توجه به متغیرهای اصلی با استفاده از منابع رسمی آماری کشور، از جمله: ترازنامه انرژی، آمارهای صنعت برق کشور، وزارت نیرو و سایر نهادهای حاکمیتی تولیدکننده آمار در حوزه انرژی الکتریکی به‌ویژه نیروگاه‌ها، گردآوری آمار و اطلاعات مورد نیاز انجام شد.

مدل MESSAGE توسط نرم افزاری که به همین نام توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تهیه و توسعه یافته است، انجام می‌پذیرد. استفاده از این مدل برای کشورهای عضو آژانس رایگان می‌باشد. مفاهیم و فروض به کار رفته در اجرای این مدل براساس مطالعه منظور و همکاران ۱۳۹۳ انجام گرفته است.

در این پژوهش، سه سناریو مرجع، قیمت بالای سوخت و پایداری انرژی تعریف شده است. روند توسعه فناوری، نرخ رشد اقتصادی، نرخ رشد جمعیت، سهم بخش‌های اقتصادی از تولید ناخالص داخلی، میزان تقاضای نهایی برق و سطح مبادلات برق (واردات و صادرات) در هر سه سناریو یکسان فرض شده است.

سناریوی مرجع، ادامه روند کنونی بوده و در آن قیمت سوخت-های فسیلی با افزایش ۲٫۵ درصدی نسبت به قیمت‌های حال حاضر بین‌المللی در نظر گرفته شده است. همچنین در این سناریو، شاخص شدت انرژی ادامه روند موجود خواهد بود و اقدامات و راهکارهای جدیدی توسط بخش‌های مصرف‌کننده انرژی برق در جهت بهبود و اصلاح الگوی مصرف انرژی برق و صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف برق انجام خواهد شد. در سناریوی پایداری انرژی، مصرف کنندگان بخش‌های مختلف برای صرفه‌جویی در مصرف برق اهتمام جدی خواهند داشت. بهبود راندمان تجهیزات مصرف‌کننده انرژی، بهره‌برداری مناسب از تجهیزات، رعایت دمای آسایش و رعایت استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان سازی از جمله اقداماتی است که در این سناریو مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در این سناریو ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، آبی، زمین گرمایی، زیست توده) افزایش می‌یابد تا به نوعی از منابع فسیلی کمتر استفاده شود و برای نسل‌های آینده نیز مشکل ایجاد نشود و هم به حفظ محیط‌زیست کمک حداکثری نمود.

یافته‌ها

در این قسمت نتایج اجرای مدل MESSAGE جهت برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی در ایران ارائه می‌شود. ترکیب بهینه نیروگاه‌های برق در کشور در افق زمانی ۱۴۳۰ در قالب سناریوها و مفروضات مطرح شده، به عنوان اصلی‌ترین خروجی اجرای مدل می‌باشد. با عنایت به منحصر به فرد بودن نرم افزار یاد شده در سطح بین‌المللی و از سوی دیگر استفاده از آمارهای رسمی کشور به عنوان ورودی‌های نرم افزار، صحت سنجی نتایج به دست آمده به سهولت امکان پذیر می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل در ۵ بخش شامل: روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی، روند بهینه تولید برق، سهم بهینه فناوری‌ها در تولید، میزان مصرف سوخت، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به شرح زیر تحلیل شده است.

روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی

ظرفیت نصب شده در ابتدای دوره (سال ۱۳۹۷) معادل ۸۰۳۱۳ مگاوات معادل ۸۰ گیگاوات می‌باشد که با رشدی معادل ۳/۰۴ درصد در سال در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع به ۲۴۳۹۵۰ مگاوات یا ۲۴۴ گیگاوات خواهد رسید که این رقم بر اساس سناریوی پایداری انرژی به میزان ۶۶۶۱۰ مگاوات یا ۶۶ گیگاوات کاهش یافته و در پایان دوره با رشد سالانه‌ای معادل ۲/۱۱ درصد به ۱۷۷۳۴۰ مگاوات یا ۱۷۷ گیگاوات خواهد رسید. همچنین در سناریوی قیمت بالای سوخت ظرفیت نصب شده با رشد سالانه‌ای معادل ۲/۷۵ درصد به ۲۲۱۳۰۰ مگاوات یا ۲۲۱ گیگاوات کاهش یافته است.

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

مجموع نیروگاه‌های حرارتی رایج کشور نظیر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری و گازی در ابتدای دوره حدود ۸۰/۷۲ درصد ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که این سهم در سناریوی پایداری انرژی حدود ۸۸ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت ۸۰ درصد در افق مطالعه از یک روند صعودی برخوردار بوده و در سال ۱۴۳۰ بر اساس سناریوی مرجع تنها ۶۶ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاهی در کشور به این گونه نیروگاه‌ها اختصاص داده خواهد شد و بر اساس

سناریوی پایداری انرژی، نزدیک به ۵۱/۸۷ درصد از نیروگاه‌ها به نیروگاه‌های حرارتی فوق و در سناریوی قیمت بالای سوخت نزدیک به ۵۹/۴۲ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاهی به نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) اختصاص یافته است. مهمترین دلیل این افت حذف تدریجی نیروگاه‌های بخاری به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در مقایسه با سایر نیروگاه‌های حرارتی و راندمان نسبتاً پایین آنها در کنار افزایش قیمت سوخت می‌باشد. اما نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل راندمان بالا و هزینه نسبتاً پائین در مقایسه با سایر گزینه‌های نیروگاهی، در افق مطالعه تقریباً بدون رقیب باقی خواهند ماند.

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

در سناریوی مرجع نیروگاه‌های بادی از سال ۱۴۱۰ به بعد، نیروگاه‌های فتوولتائیک و زیست‌توده از سال ۱۴۲۰ به بعد با رشد فزاینده‌ای روبه‌رو خواهند شد. سهم نیروگاه‌های بادی در سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت در پایان سال ۱۴۳۰ به ترتیب حدود ۱۴، ۱۵/۷۸ و ۱۳/۵ درصد خواهد بود. اما میزان رشد سالانه نیروگاه‌های بادی در سناریوی مرجع ۴۶ درصد، در سناریوی

پایداری انرژی ۷۰ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت ۴۰/۳ درصد بوده است که کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی بعد از سال ۱۴۱۰ در هر سه سناریو از رشد قابل توجهی برخوردار می‌شود به طوری که نصب و راه‌اندازی بیش از حدود ۳۰ هزار مگاوات توربین بادی در افق مطالعه در هر سه سناریو پیشنهاد می‌شود. این موضوع به دلیل بازنشتی نیروگاه‌های فسیلی موجود و جایگزینی آنها با نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیرآبی نظیر بادی است.

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

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

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

نیروگاه‌های هسته‌ای در سناریوی مرجع تا سال ۱۴۱۰ و در دو سناریوی پایداری انرژی و قیمت بالای سوخت تا سال ۱۴۲۰ سهم اندکی را به خود اختصاص داده‌اند. به طوری که در سناریوی مرجع تا سال ۱۴۱۰ تنها ۱۰۲۰ مگاوات ساعت یعنی همان ظرفیت موجود سال پایه باقی مانده است ولی در ادامه با یک روند افزایشی در پایان دوره به ۱۵ هزار مگاوات خواهد رسید. در سناریوی پایداری انرژی و سناریوی قیمت بالای سوخت تا سال ۱۴۰۵ همان ظرفیت سال پایه (هزار مگاوات) باقی می‌ماند، تا سال ۱۴۲۰ ظرفیت به ۳ هزار مگاوات و در ادامه تا پایان دوره ۲۰ هزار مگاوات به ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای اختصاص داده شده است. دلیل اصلی این مسئله، مفروضات مربوط به هزینه‌های تولید برق هسته‌ای، به ویژه بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آنها می‌باشد که رقابت‌پذیری آنها را در مقایسه با سایر فناوری‌های جایگزین کاهش

داده است. از این رو تا سال ۱۴۱۰ به جز تولید برق از نیروگاه‌های هسته‌ای موجود (واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر) احداث ظرفیت جدیدی در مدل پیشنهاد نشده است ولی از حدود سال ۱۴۱۰ فاز دوم و سوم نیروگاه بوشهر افتتاح خواهند شد. اما ظرفیت‌های جدید دیگری نیز قابل پیش‌بینی است که در این سناریو تا سال ۱۴۳۰ حدود ۱۴/۸ درصد رشد خواهد داشت که معادل ۲۰ هزار مگاوات ظرفیت نصب پیش‌بینی شده است. اما در دو سناریوی دیگر از سال ۱۴۲۰ به بعد (سه دوره آخر)، این نوع نیروگاه‌ها رقابت‌پذیری قابل ملاحظه‌ای پیدا نموده، به نحوی که تا سال ۱۴۳۰ ایجاد ۲۰ هزار مگاوات نیروگاه هسته‌ای در هر دو سناریو توسط مدل پیشنهاد می‌گردد. پیشنهاد مدل برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای عملاً به اواخر دوره برنامه‌ریزی مرتبط می‌شود. دلیل این امر هم کاهش قابل توجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آن تا سال ۱۴۲۰ (۳۶ هزار دلار بر کیلووات) و همچنین افزایش تدریجی قیمت سوخت‌های فسیلی و بویژه گاز طبیعی (حدود ۴۰ سنت بر متر مکعب) است.

همچنین بر اساس نتایج تحلیل مدل می‌توان گفت، سایر نیروگاه‌ها سهم چندانی در بخش نیروگاهی نخواهند داشت و با رشد اندکی روبه‌رو خواهند شد.

روند بهینه تولید برق

در سناریوی مرجع، با وجود خروج نیروگاه‌های توربین بخار از سبد تولید برق کشور، در بلندمدت سایر نیروگاه‌های فسیلی (توربین گازی، سیکل ترکیبی و دیزلی) مجموعاً حدود ۵۶ درصد (۵۵/۷۵) برق کشور را تولید می‌نمایند (سیکل ترکیبی ۷/۴۷ درصد، توربین گاز ۴۵/۸۲ و دیزلی ۲/۴۶ درصد). این در حالی است که در سناریوی پایداری انرژی، نیروگاه‌های فسیلی در بلند مدت مجموعاً حدود ۴۰ درصد (۴۰/۳۶) برق کشور را تولید می‌نمایند (سیکل ترکیبی ۲۹/۵۱ درصد، توربین گاز ۷/۱۸ و دیزلی ۳/۶۷ درصد). همچنین در سناریوی قیمت بالای سوخت، نیروگاه‌های فسیلی در بلندمدت مجموعاً حدود ۳۹ درصد (۳۹/۱۳) برق کشور را تولید می‌نمایند (سیکل ترکیبی ۲۸/۳۳ درصد، توربین گاز ۷/۳۵ و دیزلی ۳/۴۵ درصد).

است که سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید در سال ۱۴۳۰ در سناریوی مرجع ۱۲ درصد، در سناریوی پایداری انرژی حدود ۱۹ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۱۸ درصد خواهد بود که تفاوت تقاضای انرژی در سه سناریو منجر به آن می‌شود تا با وجود ظرفیت یکسان، سهم آنها در تولید متفاوت باشد.

همچنین نیروگاه‌های تجدیدپذیر شامل توربین‌های بادی، سلول‌های فتوولتائیک و زیست‌توده سهم قابل توجهی در تولید برق کشور به خود اختصاص خواهند داد. مقایسه سهم این نوع نیروگاه‌ها در تولید حاکی از آن است که سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر در تولید در سال ۱۴۳۰ در سناریوی مرجع ۲۶ درصد، در سناریوی پایداری انرژی حدود ۳۱ درصد و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۳۵ درصد خواهد بود. از آن جایی که نیروگاه‌های تجدیدپذیر ضریب دسترسی پائین‌تری در مقایسه با انواع فسیلی و هسته‌ای دارند، با وجود ظرفیت-سازی قابل ملاحظه، سهم کمتری در تولید خواهند داشت.

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، ظرفیت پیشنهادی برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای تا سال ۱۴۳۰ در هر سه سناریو یکسان خواهد بود (حدود ۲۰ هزار مگاوات). اما روند بهینه تولید برق در سناریوی مرجع به وسیله انواع فناوری‌های نیروگاهی هسته‌ای در پایان برنامه (سال ۱۴۳۰) حدود ۱۲ درصد (۱۲/۲۹) از سهم تولید برق را به خود اختصاص خواهد داد. در سناریوی پایداری انرژی حدود ۱۹ درصد (۱۸/۹۶) و در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۱۸ درصد (۱۷/۸۴) از تولید برق را به خود اختصاص خواهد داد.

سهم سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر از جمله توربین‌های بادی، سلول‌های فتوولتائیک و زیست‌توده در پایان دوره ۳۰ سال (سال ۱۴۳۰) در سناریوی مرجع حدود ۲۶ درصد (۲۶/۵۵)، در سناریوی پایداری حدود ۳۱ درصد (۳۱/۳۴)، در سناریوی قیمت بالای سوخت حدود ۳۵ درصد (۳۴/۷۸) از تولید برق را به خود اختصاص داده‌اند.

سهم فناوری‌های پاک در تولید برق

سهم فناوری‌های پاک در تولید برق در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه سهم این نوع نیروگاه‌ها در تولید حاکی از آن

جدول ۲- سهم فناوری‌های پاک در تولید برق (درصد)

Table 2. Share of clean technologies in electricity production (percentage)

سناریو	نوع نیروگاه	۱۴۰۰	۱۴۰۵	۱۴۱۰	۱۴۱۵	۱۴۲۰	۱۴۲۵	۱۴۳۰
مرجع	تجدیدپذیر	۲/۱۹	۳/۴۵	۱۰/۳	۱۲/۴	۱۷/۱	۲۳/۰	۲۶/۵
	هسته‌ای	۱/۳۷	۱/۱۵	۱/۸	۷/۵	۹/۹	۱۰/۰	۱۲/۳
پایداری انرژی	تجدیدپذیر	۲/۴۷	۳/۳۲	۴/۵	۶/۹	۱۹/۸	۲۶/۴	۳۱/۳
	هسته‌ای	۱/۳۷	۱/۱۹	۱/۱	۱/۰	۶/۵	۱۱/۹	۱۸/۹
قیمت بالای سوخت	تجدیدپذیر	۳/۳۳	۴/۱۱	۵/۵	۸/۳	۲۰/۷	۲۵/۶	۳۴/۸
	هسته‌ای	۱/۶۷	۱/۴۵	۱/۳	۱/۲	۷/۸	۱۲/۹	۱۷/۸

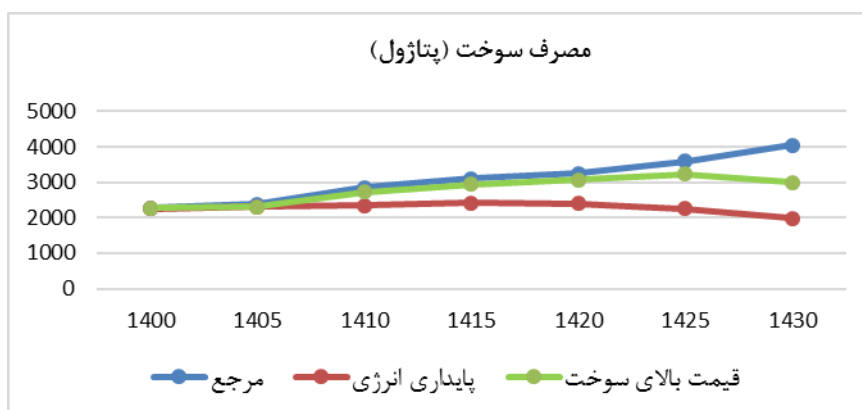
میزان مصرف سوخت

سناریوی قیمت بالای سوخت به حدود ۳۰۰۰ پتاژول خواهد رسید. این نتیجه نشان می‌دهد در سناریوی پایداری انرژی، میزان مصرف سوخت کاهشی خواهد شد و در سناریوی قیمت بالای سوخت روند افزایشی خیلی کمی را دنبال می‌کند و در دوره‌های پایانی روند آن سیر نزولی به خود خواهد گرفت.

نتایج مدل نشان می‌دهد با ادامه روند کنونی در سناریوی مرجع، میزان مصرف سوخت تا حدود دو برابر افزایش خواهد یافت و در سال ۱۴۳۰ میزان مصرف سوخت به حدود ۴۰۵۰ پتاژول خواهد رسید. مطابق نمودار ۲، این میزان مصرف سوخت در سناریوی پایداری انرژی به حدود ۱۹۹۰ پتاژول و در

در دراز مدت به کاهش میزان مصرف سوخت منجر می‌شود.

نتیجه این که با افزایش و به‌کارگیری نیروگاه‌های تجدیدپذیر در طول برنامه، مصرف حامل‌های انرژی کاهش خواهد یافت و



نمودار ۲- میزان مصرف سوخت در سناریوهای مختلف

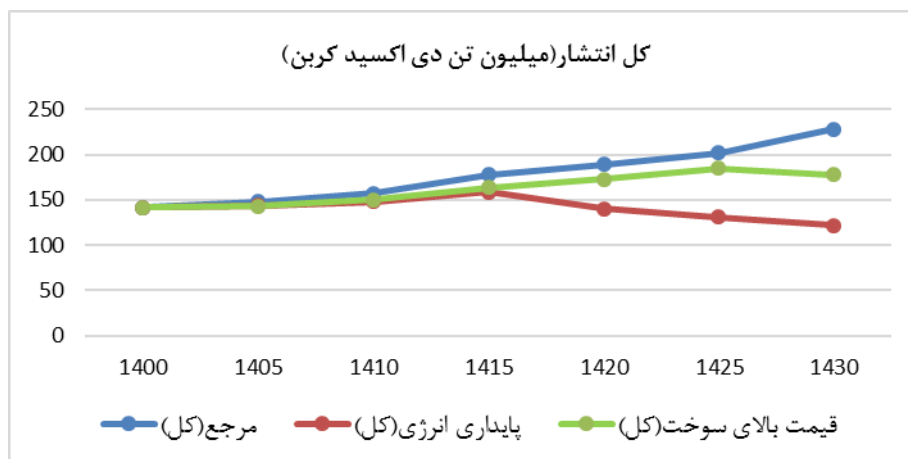
Diagram 2. The amount of fuel consumption in different scenarios

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

دیگر به خاطر کم اثر شدن و در نهایت حذف محدودیت مصرف گاز طبیعی و به تبع آن کاهش سهم فرآورده‌های نفتی در تامین سوخت نیروگاهی است. از سال ۱۴۲۰ به بعد پس از آن که راندمان نیروگاه‌های مزبور به سقف میزان خود رسیدند، تغییر محسوسی در این روند ملاحظه نمی‌شود، اما انتشار دی اکسید کربن در دو سناریوی دیگر بعد از سال ۱۴۲۰ با شتاب بیشتری کاهش می‌یابد، که بیانگر نقش فناوری‌های تجدیدپذیر در کاهش انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی است.

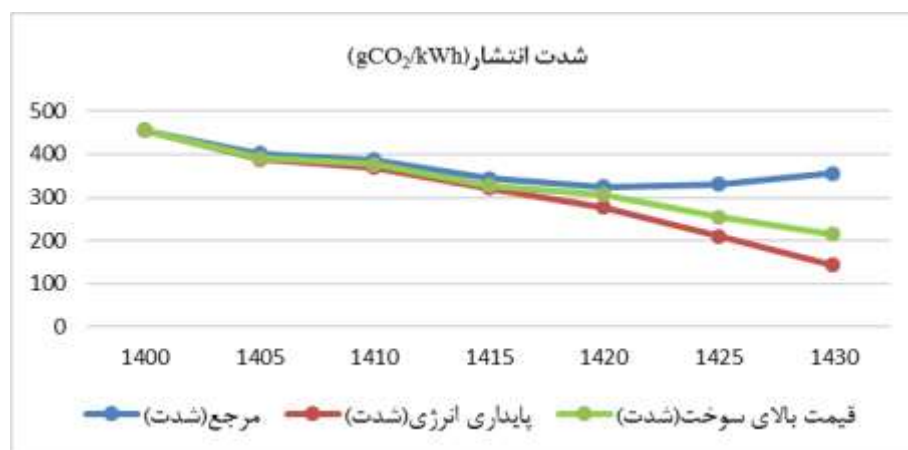
میزان انتشار دی اکسید کربن و متوسط انتشار آن به ازای هر واحد برق تولیدی در نمودارهای شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است. میزان کل انتشار دی اکسید کربن در سناریوی مرجع در پایان دوره مورد بررسی از حدود ۱۴۲ به ۲۲۸ میلیون تن افزایش یافته است. در سناریوی قیمت بالای سوخت نیز روند صعودی افزایش گازها قابل مشاهده است، اما در آخرین دوره، یعنی از ۱۴۲۵ به بعد روند کاهشی به خود خواهد گرفت. در سناریوی پایداری انرژی میزان تولید گازها تا سال ۱۴۱۵ روندی نسبتاً ثابت دارد و سپس کاهشی خواهد شد.

متوسط میزان انتشار دی اکسید کربن در بدترین شرایط یعنی سناریوی مرجع با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. این روند از یک سو ناشی از افزایش راندمان نیروگاه‌های فسیلی رایج و از سوی



نمودار ۳- کل انتشار دی اکسید کربن در سناریوهای مختلف

Diagram 3. Total carbon dioxide emissions in different scenarios

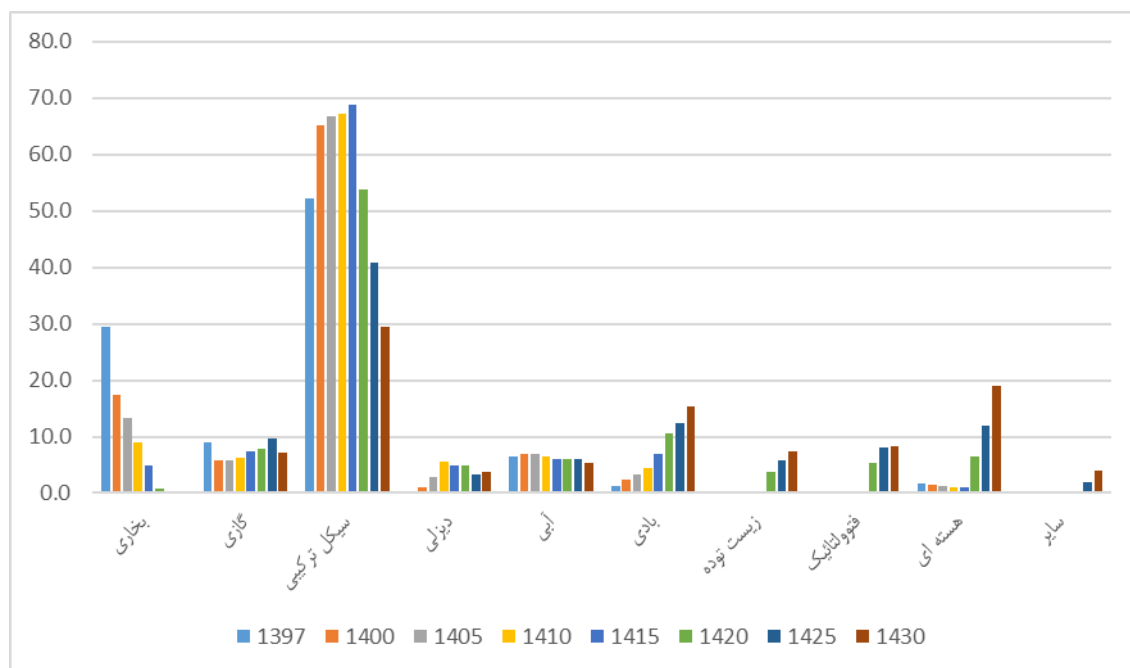


نمودار ۴- متوسط شدت انتشار دی اکسید کربن در سناریوهای مختلف

Diagram 4. Average intensity of carbon dioxide emission in different scenarios

بیشتر شده است، ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای افزایش یافته است، سهم نیروگاه‌های فسیلی نظیر نیروگاه‌های بخار کاهش یافته است. نمودار ۱۱ سهم نیروگاه‌های مختلف را در تولید برق در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۳۰ براساس سناریوی پایداری نشان می‌دهد.

بنابراین بر اساس ۵ بخش بررسی شده و در نظر گرفتن ملاحظات محیط‌زیستی، در مجموع سناریوی پایداری بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی ترکیب مناسب‌تری را برای تولید برق کشور در افق برنامه نشان می‌دهد، به طوری که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، سوخت کمتری برای تولید برق استفاده می‌شود، سهم فناوری‌های پاک در تولید برق



نمودار ۵- سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید برق در ایران طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۳۰

Diagram 5. The share of different power plants in the production of electricity in Iran during the years 1397 to 1430

با تاکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر در افق ۱۴۳۰ ارائه نماید. این پژوهش با هدف برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی پایدار به تفکیک سهم انواع نیروگاه‌های تولید برق در ایران انجام گرفته است. به منظور پیشنهاد ترکیب بهینه بلندمدت نیروگاه‌های برق در ایران، مدل MESSAGE به علت سازگاری آن با ملاحظات محیط‌زیستی، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید و پیش‌بینی ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور در افق ۱۴۳۰ با استفاده از این مدل و در قالب ۳ سناریو انجام پذیرفت. نتایج حاصل از اجرای مدل در قالب ۳ سناریو و در ۵ بخش روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی، روند بهینه تولید برق، سهم بهینه فناوری‌ها در تولید، میزان مصرف سوخت، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج به دست آمده در این مطالعه در مقایسه با نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین مشابه، علاوه بر این که بازه زمانی تا افق ۱۴۳۰ را پوشش می‌دهد، به جایگاه و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی الکتریکی آینده کشور تاکید دارد و از اعمال ملاحظات محیط زیستی (که از قابلیت‌های نرم افزار مورد

همچنان که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، در سال ۱۴۳۰ مطابق سناریوی پایداری سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر مجموعاً به ۳۱/۳ درصد بالغ می‌گردد که در این میان سهم نیروگاه‌های بادی ۱۵/۴ درصد، زیست توده ۷/۵ درصد و فتوولتائیک ۸/۴ درصد خواهد شد. همچنین نتایج این مطالعه حاکی از آن است که سهم نیروگاه‌های برقابی، دیزلی و گازی تغییر چندانی نداشته و همچنان سهم هر کدام از آنها از تولید برق کمتر از ۱۰ درصد خواهد بود. در سال ۱۴۳۰ سهم نیروگاه‌های بخار به صفر خواهد رسید و نیروگاه‌های تجدیدپذیر (تا ۳۱ درصد) و هسته‌ای (تا ۱۹ درصد) بالغ خواهد گردید. در ضمن نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با ۲۹/۵ درصد همچنان بیشترین سهم را از تولید برق در سال پایانی دوره مورد بررسی به خود اختصاص خواهد داد.

بحث و نتیجه‌گیری

دستیابی به انرژی پایدار در هر کشور جهت تأمین نیازهای بشر برای انرژی و تداوم رشد و توسعه اقتصادی از ضروری‌ترین موضوعات پیش روی دولتمردان است. در این راستا پژوهش حاضر تلاش نمود تا ترکیب بهینه نیروگاه‌هایی برق در آینده را

ورود آنها به مدل وجود ندارد، از جمله چالش‌ها و محدودیت‌های مدل‌های پیش‌بینی این‌چنینی می‌باشند.

مدل‌های برنامه‌ریزی عرضه انرژی الکتریکی ابزاری برای پیش‌بینی ترکیب بهینه منابع عرضه در آینده می‌باشند. تحقق خروجی این مدل‌ها مستلزم برنامه‌ریزی جامع، اجرای موثر، دانش فنی، تامین منابع مورد نیاز و ... می‌باشد.

در ارتباط با برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر شامل، نیروگاه‌های بادی، زیست توده، فتوولتائیک، زمین گرمایی لازم است توجه کافی به آمایش سرزمین، تکنولوژی‌ها، امکانات و محدودیت‌ها مدنظر قرار گیرند.

در ارتباط با نیروگاه‌های هسته‌ای علاوه بر برنامه‌ریزی دقیق، اجرای موثر برنامه‌های مصوب، تامین منابع مورد نیاز (با توجه به هزینه بالای اولیه احداث این نیروگاه‌ها)، محدودیت‌های علمی و فنی، فضای بین‌المللی و کلاً شرایط خاص توسعه این فناوری، در تحقق اهداف تعیین شده از اهمیت وافر برخوردار است.

References

1. United Nations (UN). 2015. PARIS AGREEMENT.
2. International Energy Agency (IEA). 2022. World Energy Outlook 2022. See information in: <https://www.iea.org>
3. International Energy Agency (IEA). 2023. World Energy Outlook 2023. See information in: <https://www.iea.org>
4. Ministry of Energy of Iran. 2022. Overview of 33 years of the country's energy (1367-99). Deputy of Electricity and Energy Affairs, Planning and Macroeconomics of Electricity and Energy. (In Persian)
5. Heydari, K. 2015. Strategic Document of Comprehensive Energy Planning of the Country. Niro Research Institute, Tavanir Company. (In Persian)

استفاده می‌باشد) در پیش‌بینی ترکیب بهینه نیروگاه‌ها در آینده کشور بهره گرفته است.

در مجموع سناریوی پایداری بر اساس ملاحظات محیط‌زیستی ترکیب مناسب‌تری را برای تولید برق کشور در افق ۱۴۳۰ نشان می‌دهد، به طوری که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، سوخت کمتری برای تولید برق استفاده می‌شود، سهم فناوری‌های پاک در تولید برق بیشتر شده است، ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای افزایش یافته است، سهم نیروگاه‌های فسیلی نظیر نیروگاه‌های بخار کاهش یافته است.

بر اساس سناریوی پایداری، نیروگاه‌های گازی، هسته‌ای، بادی، زیست توده، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، دیزلی، آبی و ... به ترتیب دارای اولویت می‌باشند این بدین معنی است که در صورت برنامه‌ریزی و اجرای کامل مفروضات مدل، انتظار می‌رود در سال ۱۴۳۰، ترکیب نیروگاه‌های تولید برق در کشور به قرار فوق باشد. در سناریوی پایداری انرژی در سال ۱۴۳۰ سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر مجموعاً به ۳۱/۳ درصد بالغ می‌گردد که در این میان سهم نیروگاه‌های بادی ۱۵/۴ درصد، زیست توده ۷/۵ درصد و فتوولتائیک ۸/۴ درصد خواهد شد. سهم نیروگاه‌های برقابی، دیزلی و گازی تغییر چندانی نداشته و همچنان سهم هر کدام از آنها از تولید برق کمتر از ۱۰ درصد باقی می‌ماند و سهم نیروگاه‌های بخار به صفر خواهد رسید. همچنین نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با ۲۹/۵ درصد همچنان بیشترین سهم را از تولید برق در سال پایانی دوره مورد بررسی به خود اختصاص خواهد داد و نیروگاه‌های هسته‌ای (تا ۱۹ درصد) افزایش خواهد یافت.

در ارتباط با خروجی‌های مدل و ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور موارد زیر را می‌توان مطرح نمود:

پیش‌بینی ترکیب بهینه نیروگاه‌های برق در کشور بر اساس هر مدلی مبتنی بر ورودی‌ها و مفروضات مدل می‌باشد. لذا هر چه ورودی‌ها و مفروضات واقعی و به روز تر باشند، می‌توان انتظار داشت خروجی مناسب‌تر و قابل دستیابی را شاهد بود.

متغیرهای برونزا که خارج از مدل تعیین می‌شوند و یا عوامل کلان ملهم از فضای سیاسی و بین‌المللی کشورها که امکان

- Number 14, Spring 2014, pp. 191-215. (In Persian)
12. Sadeghi, Z., Rezaei Jafari, M., Ghasminejad, A. 2019. Investigation of renewable power plants using hierarchical analysis, TOPSIS and VIKOR. *Environmental Sciences and Technologies*, Volume 22, Number 8., pp. 43-58. (In Persian)
13. Manzoor, D., Fermad, M., Arianpour, V., Shafiei, E. 2013. Evaluation of the optimal combination of power plants in the country in terms of environmental costs. *Environmental Science*, Volume 40, Number 2, Summer 2013, pp. 415-430. (In Persian)
14. Asgharizadeh, E., Mehrgan, M., Shakuri, H., Modares Yazdi, M., Taghizadeh Yazdi, M. 2016. Mathematical model for developing the capacity of power plants considering distributed production units and with the aim of carbon dioxide control. *Industrial Management*, Volume 9, Number 4, Winter 2016, pp. 587-608. (In Persian)
15. Jangavar, H., Noorollahi, Y., Yousefi, H. 2018. Investigation of the feasibility of achieving the goals of reducing greenhouse gas emissions through the production of electricity from renewable sources in Iran. *Renewable and New Energy Quarterly*, year 6, no. 2, Winter 2018, pp. 62-70. (In Persian)
16. Aryanpur, V., Atabaki, M., Marzband, M., Siani, P. 2019. An over view of energy planning in Iran and transition pathways towards sustainable electricity supply sector. *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 112, September 2019, PP. 58-74.
6. Shakuri Ganjavi, H., Kazemi, A., Abdulapour, S., Guldansaz, S. 2019. Economic, social and environmental evaluation of electricity production from renewable and gas technologies. *Iranian Energy Quarterly*, Volume 23, No. 3, Fall 2019, pp. 33-70. (In Persian)
7. Khodaparast Pirsaraei, Y. 2019. Strategies for diversifying the country's energy portfolio through the development of solar power plants. *Tadbir Ekhtaz Magazine*, Volume 8, Number 10, December 2019, pp. 15-24. (In Persian)
8. Mousaviyan Hejazi, S., Shakuri Ganjavi, H. 2015. The share of new energies in the energy portfolio and strategies to increase its share in order to achieve a resilient economy. *Defense Economics Quarterly*, year 1, number 1, autumn 2015, pp. 91 -135. (In Persian)
9. Mohammadi Shahiordi, S., Mirghfour, S., Naser Sadrabadi, A. 2022. Designing a comprehensive model of the regional portfolio of renewable energies in Iran with a focus on dry areas. *Khosh Bom Scientific Journal*, Volume 12, Number 1, Spring and the summer of 1401, pp. 171-187. (In Persian)
10. Shakeswari, E., Yousefi, H., Shahorn, E. 2017. The share of solar energy in the world's energy basket in 2030. *Renewable and New Energy Quarterly*, Year 5, Number 2, Winter 2017, pp. 116- 121. (In Persian)
11. Manzoor, D., Rahimi, A. 2014. Prioritization of production of power plants in Iran using multi-indicator decision-making models. *Journal of Energy Economics of Iran*, Year 4,

- Reviews, Vol. 45, January 2023, 101042.
20. Otsuki, T., Komiyama, R., Fujii, Y., Nakamura, H. 2023. Temporally detailed modelling and analysis of global net zero energy systems focusing on variable renewable energy. *Energy and Climate Change*, Vol. 4, December 2023, 100108.
21. Kong, L., Tan, X., Gu, B., Yan, H. 2023. Significance of achieving carbon neutrality by 2060 on China's energy transition pathway: A multi-model comparison analysis. *Advances in Climate Change Research*, Vol. 14, Issue 1, February 2023, PP. 32-42.
17. Muhammad Amir, R., Khatri, K. L., Rafique, K., Shahid, M., Khoso, F., Waseer, T. 2022. Long term optimal energy planning and policy formulation for Pakistan. *International Energy Journal*, Vol. 22, June 2022, PP. 123-134.
18. Gebremeskel, D. H., Ahlgren, E. O., Beyene, G. B. 2023. Long-term electricity supply modelling in the context of developing countries: The OSeMOSYS-LEAP soft-linking approach for Ethiopia. *Energy Strategy Reviews*, Vol. 45, January 2023, 101045.
19. Das, A., Saini, V., Parikh, K., Parikh, J., Ghosh, P., Tot, M. 2023. Pathways to net zero emissions for the Indian power sector. *Energy Strategy*