Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 13, Issue 1, No. 28, Spring 2022
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.129313.1382

(Research Paper)

Greenhouse gas emission reduction model: an integrated approach of linear programming and system dynamics The case of Iranian power plants

Mahdi Nakhaeinejad *
Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir
Mehri Abbasi
Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran, me.abbasi1020@gmail.com
Yahya Zare Mehrjardi
Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, yzare@yazd.ac.ir
Abolfazl Asadi Zarch
Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran, abasadiz@gmail.com

Purpose: The world's electricity industry has faced numerous challenges, such as rising electricity demand and greenhouse emissions, declining fossil fuel reserves, economic conditions, and rising costs. Such challenges have forced managers to supply energy by replacing fossil fuels with renewable energy sources. The technology advancements and electronic equipment in the consumption sector have increased the need for electricity. Hence, electricity generation has become more significant due to the type of power plant. This study aims to prioritize electricity generation by allocating it to the consumption sector, to reduce greenhouse gas emissions.

Design/methodology/approach: In this study, a mathematical has been proposed to determine the amount of electricity production from power plants with different economic, technical, and environmental conditions. Then, the optimal electricity allocated to various sectors (as consumers), such as household, commercial, transportation, industry, and agriculture has been examined. By simulating and proposing a linear programming model, regarding the energy data in 2017, 10 types of the power plant and energy balance have been taken into consideration. Based on a mathematical model and by considering three decision-making variables, while observing the limitations and

* Corresponding author
2423-6950 / © 2022
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

requirements of the power plant, the amount of electricity generation has been determined. Then, the energy system in the consumption sector has been simulated by causal diagrams using the system dynamics approach.

Findings: The lack of fossil fuels and environmental pollution associated with energy development are challenging issues. Fossil fuel production and consumption contribute to global warming and acid rain. Therefore, one solution to protect the environment from the proliferation of energy waste and its consumption is the effective planning of energy systems. Findings indicated the role of proper planning and allocation for energy in the consumption sector, in reducing greenhouse gas emissions.

Research limitations/implications: The lack of comprehensive and accurate data on the application of renewable technologies to generate electricity in Iran is one of the main limitations of the empirical study. One of the limitations of the proposed model is the consideration of renewable and non-renewable sources, simultaneously. Electricity from renewable fuel has also been less noticed.

Practical implications: Based on the findings it is concluded that the mathematical model with more comprehensive indicators and the system dynamics model can play a significant role in reducing greenhouse gas emissions. Therefore, the following strategies can be used to reduce greenhouse gas emissions nationwide:

- The percentage of electricity generation from renewable energy sources should be increased and the use of fossil resources to generate electricity should be reduced, which is evident from the application of the mathematical function of the model.

- Electricity generation from power plants based on the specified priority will significantly reduce greenhouse gas emissions.

- According to the calculation of the environmental index, issuing construction permissions for coal and gas power plants should be prevented.

- The needs of the domestic and commercial sectors must be met through renewable energy sources.

Originality/value: In this study, mathematical planning and dynamic system were used to study technical, economic, and environmental conditions in the reduction of greenhouse gas emissions. Considering the existence of objective functions in the mathematical model and the optimal results obtained from the production of 10 hypothetical power plants in this study, it is implied that the optimal production in solar, wind, combined cycle, heater, water, and natural gas centers has potentials for capacity expansion.

Keywords: Greenhouse gas, Integer programming, Power plants, System Dynamics.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۳، شماره ۱، پیاپی ۲۸، بهار ۱۴۰۱
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱ ص ۵۱-۷۷
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.129313.1382

(مقالهٔ پژوهشی)

طراحی مدل برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی برق با استفاده از رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی خطی و پویایی‌شناسی سیستمی (مطالعهٔ موردی: نیروگاه‌های برق ایران)

مهدی نخعی نژاد*[۱]، مهری عباسی[۲]، یحیی زارع مهرجردی[۳]، ابوالفضل اسدی زارچی[۴]

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و هنر یزد، یزد، ایران، me.abbasi1020@gmail.com
۳- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، yzare@yazd.ac.ir
۴- دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و هنر یزد، یزد، ایران، abasadiz@gmail.com

چکیده: صنعت برق در جهان با چالش‌های بی‌شماری، نظیر افزایش تقاضا، انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، شرایط اقتصادی و افزایش هزینه مواجه شده است. این شرایط مدیران را به اتخاذ استراتژی‌هایی در تأمین انرژی، با جایگزینی سوخت فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر واداشته است. پیشرفت‌های تکنولوژی و تجهیزات الکترونیکی در بخش مصرف، نیاز به انرژی برق را افزایش‌داده و تولید برق را با توجه به نوع نیروگاه از اهمیت بیشتری برخوردار کرده است. هدف عمدهٔ این پژوهش، اولویت‌بندی نحوهٔ تولید برق و اختصاص به بخش مصرف، برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این تحقیق با استفاده از تکنیک‌های تحقیق در عملیات، به ارائهٔ مدل ریاضی برای مشخص‌کردن میزان تولید انرژی برق از نیروگاه‌های مختلف با شرایط اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی پرداخته است. سپس با پویایی‌شناسی سیستمی، تخصیص انرژی برق به بخش‌های مختلف شامل خانگی، تجاری، حمل‌ونقل، صنایع و کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی و ارائهٔ مدل برنامه‌ریزی خطی، از ۱۰نوع نیروگاه کشور و داده‌های ترازنامهٔ انرژی سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. در مدل ریاضی با در نظر گرفتن سه متغیر تصمیم‌گیری، ضمن رعایت محدودیت‌ها و الزامات نیروگاه، محاسبات برای میزان تولید برق انجام گرفته است. سپس با استفاده از دیاگرام‌های علی و معلولی در رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی، سیستم انرژی در بخش مصرف شبیه‌سازی شده است. نتایج پژوهش، برنامه‌ریزی و تخصیص مناسب را به‌منظور اختصاص انرژی در بخش مصرف، برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، برنامه‌ریزی عدد صحیح، نیروگاه‌های برق، پویایی‌شناسی سیستمی

* نویسنده مسئول

2423-6950 / © 2022
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

انرژی یکی از منابع محدود و ضروری برای انجام فعالیت‌های مختلف است و همواره نقش مهمی در توسعهٔ انسانی، اقتصادی و رفاه جوامع در دهه‌های اخیر داشته است. بیشتر فعالیت‌های روزمرهٔ انسان‌ها و سبک زندگی نوین بدون منابع انرژی ممکن نخواهد بود. نیاز جوامع امروزی به انرژی در بخش‌های صنعت، خدمات، مسکن، حمل‌ونقل روز به روز حال افزایش است و بدون حرارت و برق حاصل از احتراق سوخت، تمام فعالیت‌های اقتصادی محدود می‌شود. همان‌گونه که استانداردهای زندگی مردم در حال پیشرفت و اقتصاد در حال توسعه است، تقاضا برای برق زیاد می‌شود. با توجه به افزایش تقاضای به وجود آمده، زمانی که ظرفیت نیروگاه‌های برق موجود کافی نباشد، لازم است که نیروگاه‌های برق توسعه داده شود. منبع اصلی تولید انرژی الکتریسته در سراسر جهان، انرژی فسیلی است که عامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. به‌دلیل مشکلاتی که در چرخهٔ انرژی، زندگی انسان‌ها، مسائل زیست‌محیطی و طبیعت به وجود آمده است، انسان‌ها در تلاشند تا منابع غیرآلاینده را جایگزین منابع آلاینده کنند (صفاری، ۱۳۹۱). با توجه به پیش‌بینی‌های به عمل آمده، میزان مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۵ به مقدار ۵۷درصد افزایش می‌یابد. کاهش روزافزون منابع فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی به وجود آمده از سوخت‌های فسیلی، توجه بیشتر کشورهای پیشرفتهٔ جهان را به استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر جلب کرده است.

امروزه تأمین انرژی به یکی از مهم‌ترین مسائل تمامی جوامع تبدیل شده است. کاربرد انرژی در بخش‌های مختلف تجارت، صنعت، خانوار و ... آن‌چنان افزایش یافته است که هرگونه چالشی در حوزهٔ تأمین انرژی، خسارت جبران ناپذیری را به بخش‌های اقتصادی وارد می‌کند. با توجه به وضعیت آلودگی هوا و لزوم اتخاذ سیاست‌های مناسب برای کاهش آن و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران، جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود. ناپایداری منابع انرژی فسیلی و همچنین آثار خطرناک استفاده از این منابع بر محیط‌زیست، جایگزینی این منابع را با منابع تجدیدپذیر تقویت کرده است. منابع تجدیدپذیر پایدار است و خسارات بسیار کمتری به محیط‌زیست وارد می‌کند؛ اما هزینهٔ تولید انرژی از این منابع بالاتر از منابع فسیلی است. همچنین امکان برنامه‌ریزی بلندمدت برای استفاده از این منابع، بدون پیشرفت تکنولوژی در ذخیره‌سازی انرژی وجود ندارد. با بررسی موارد مطرح‌شده، ارائهٔ یک الگوی بهینهٔ تولید انرژی برق ضروری به نظر می‌رسد که متشکل از همهٔ منابع انرژی، فسیلی و تجدیدپذیر به میزان بهینه و هم‌زمان باشد. بنابراین در این مطالعه برای انواع نیروگاه‌های موجود، سه شاخص در نظر گرفته شده است که با استفاده از مدل ریاضی حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان تولید برای هر نیروگاه محاسبه می‌شود، سپس به‌وسیلهٔ پویایی‌شناسی سیستمی، میزان انرژی برق تولیدی نیروگاه برای بخش مصارف تعیین می‌شود. هدف مدل تلفیقی، ارائهٔ رویکردی برای بهینه‌سازی در اولویت‌بندی تولید و مصرف است. به‌طور کلی در این پژوهش با هدف تعیین درصد برداشت از منبع تولیدکنندهٔ برق، مهم‌ترین سوخت مولد برق شناسایی و با برنامه‌ریزی خطی، کاهش آلودگی محیط‌زیست نتیجه می‌شود.

در بخش بعدی پژوهش، پیشینهٔ پژوهش بررسی و سپس جدول مقایسه‌ای تدوین می‌شود و به شکاف تحقیقاتی پرداخته می‌شود. بخش سوم شامل مبانی نظری و روش پژوهش و شامل چندین زیربخش است، این بخش گام‌های انجام پژوهش و نحوهٔ مدل‌سازی و تعیین شاخص‌های اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی را با توجه به داده‌های

ترازنامهٔ انرژی نیرو معرفی می‌کند. در زیربخش دوم، مدل ریاضی ارائه و همچنین تابع هدف و محدودیت‌ها تشریح می‌شود. در بخش چهارم، نتایج مدل ریاضی و نمودارهای علی و معلولی تجزیه‌وتحلیل شده است. در بخش پنجم، بحث مطرح و درنهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادها دربارهٔ کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای در بخش تولید و مصرف بیان شده است.

۲- پیشینهٔ پژوهش

برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید برای تأمین تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، بخش عمدهٔ مطالعات برنامه‌ریزی انرژی را در بر می‌گیرد. برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید به‌سبب رخداد تجدید ساختار در صنعت برق، عمدتاً به معنای بررسی سیاست‌ها و تصمیمات است. در این میان بخش صنعت یکی از بخش‌های مهم تولیدکنندهٔ انرژی بوده و تلاش برای منطقی‌کردن مصرف انرژی و استفادهٔ بهینهٔ آن با توجه به محدودیت منابع، همواره درخور توجه سیاست‌گذاران بسیاری از کشورهای در حال توسعه و ازجمله ایران بوده است. اولین، اصلی‌ترین و مهم‌ترین بخش صنعت برق، بخش تولید است (آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۴). از سویی هزینه‌بربودن واحدهای تولیدی و از سوی دیگر، نقشی که این واحدها در تأمین برق به عهده دارند، ایجاب می‌کند که همواره احداث نیروگاه‌های جدید و استفاده از تکنولوژی نو صورت گیرد و برای اختصاص انرژی برق به بخش مصارف نیز حساسیت بیشتر، برنامه ریزی بهتر و روزآمدتری صورت گیرد.

در کشور ایران به‌دلیل هزینهٔ پایین سوخت نیروگاه‌های فسیلی (شکوری و علی‌اکبری‌ثانی، ۲۰۱۶)، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیهٔ کمتر نیروگاه‌های فسیلی نسبت‌به هزینهٔ اولیهٔ سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های تجدیدپذیر (موسویان و همکاران،۲۰۲۰) و پرداخت‌نکردن هزینه‌های آلایندگی، پایین‌بودن هزینهٔ تمام‌شدهٔ نیروگاه‌های فسیلی، ساخت نیروگاه‌های آن صرفهٔ اقتصادی دارد. به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح و دستیابی به ترکیب بهینهٔ نیروگاهی، در مطالعات مختلف در سطح بین المللی، توسعه و ارزیابی گزینه‌های مختلف نیروگاهی در کشورهای مختلف مدنظر قرار گفته است. علاوه بر اینها، مطالعات داخلی نیز برنامهٔ توسعهٔ بلندمدت بخش نیروگاهی کشور را پیشنهاد داده است. دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو، برنامهٔ توسعهٔ بهینهٔ بخش برق و انرژی‌های تجدیدپذیر را از سال ۱۳۸۳ تا سال ۱۴۰۸ ارائه کرده است. در این مطالعه از مدل جریان بهینهٔ انرژی آیفوم (مدل آیفوم، مدل ارزیابی تکنولوژی‌های مختلف بخش انرژی توسط انستیتوی انرژی فرانسه است) استفاده شده و نتایج آن از آثار متقابل بخش‌های نفت و فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی و زغال‌سنگ به دست آمده است. اثر تقاضای نهایی انرژی، بازارهای جهانی و شاخص‌های اقتصاد کلان به‌صورت برون‌زا در نظر گرفته شده است. نتایج پژوهش ارائهٔ یک برنامهٔ توسعهٔ ظرفیت ۲۵ساله و تعیین سهم بهینهٔ هریک از فناوری‌های تولید برق در افق مزبور است. آریانپور و شفیعی(۱۳۹۱) در پژوهشی، سهم بهینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر و آثار مثبت توسعهٔ آنها را بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تعیین کرده‌اند. آنها سرمایه‌گذاری در زمینهٔ توسعهٔ فناوری‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتاییک را در میان‌مدت و بلندمدت تشویق می‌کنند.

میزان هزینه‌های تولید و توانایی رقابت‌پذیری فناوری‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تولیدکنندهٔ برق، به شرایط هر کشور بستگی دارد. کرامر سوزان[1] (۲۰۱۵)، هزینهٔ سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر را بررسی می‌کند،

در مطالعهٔ انجام‌شده، هزینهٔ یارانه‌های سوخت فسیلی حدود ۱۰میلیون دلار در دقیقه در سطح جهان است که هزینه‌های بهداشتی و تخریب محیط‌زیست را شامل می‌شود و آثار آب‌وهوایی ثابت در قرن آینده را درخور توجه قرار نمی‌دهد.

کاظمی و همکاران (۱۳۹۹)، با مقایسهٔ هزینهٔ انرژی خروجی و هزینهٔ واحد انرژی تولیدی، قیمت‌های تمام شدهٔ برق تولیدی توسط نیروگاه‌های مختلف سیکل ترکیبی، بادی و فتوولتاییک را مقایسع کرده‌اند. پژوهشگران از روش تحلیلی_پوششی داده‌ها برای ارزیابی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و مقایسهٔ فناوری‌های تولید برق استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده است هزینهٔ تمام‌شدهٔ تولید برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر بیشتر است و تکنولوژی‌های تجدیدپذیر بیشترین انطباق را با معیارهای پایداری دارد. آستگیانو[۲] و همکارانش (۲۰۱۹) در کشورهای اروپایی، بازارهای انرژی تجدیدپذیر را مدیریت کرده‌اند، آنها آثار یارانه‌های انرژی تجدیدپذیر را بررسی کرده‌اند. در نتایج پژوهش، نقش استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر نسبت‌به انرژی تجدیدپذیر بسیار کم و ناچیز مطرح شده است.

برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید برق برای تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، بخش عمدهٔ مطالعات برنامه‌ریزی انرژی را در بر می‌گیرد. رشد مصرف روزافزون انرژی در جهان و خطر پایان‌پذیری در آیندهٔ نه چندان دور، کارشناسان انرژی را بر آن داشته است که با استفاده از عناصر طبیعی و ... به‌دنبال انرژیی باشند که ویژگی منحصربه‌فرد آن در تجدیدپذیری باشد. اسدی و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از اقتصاد مهندسی به ارزیابی اقتصادی رقابت‌پذیری برق زمین‌گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق پرداخته‌اند. آنها نیروگاه زمین‌گرمایی را با نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی بررسی کرده‌اند، همچنین به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز اشاره کرده و با ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی انرژی، تقاضای بار یک میکروشبکه را در افق زمانی بلندمدت و بدون استفاده از تجهیزات ذخیره‌کنندهٔ انرژی، برآورده کرده‌اند. یکی از نتایج پژوهش این است که یارانه‌های انرژی و توجه‌نکردن به خسارت آلاینده‌های نیروگاهی، مهم‌ترین عوامل توسعه‌نداشتن صنعت برق‌اند.

نظر به اینکه راهکارهای کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای تصمیم پیچیده‌ای است و از طرف دیگر تقاضای انرژی در سال‌های اخیر زیاد شده است، بنابراین ارزیابی زیست‌محیطی درخور توجه پژوهشگران قرار گرفته و مطالعاتی در راستای محیط‌زیست انجام شده است. چنا[۳] و همکاران (۲۰۱۵)، به طراحی یک رویکرد خطی و پارامتری مسائل برنامه‌ریزی خطی سه هدفه برای طراحی گسترش نیروگاه‌ها در چین پرداخته‌اند. آنها سه تابع هدف (ماکزیمم تولید کل، مینیمم هزینه و مینیمم انتشار co_2) را در کار خود لحاظ کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان داد چه میزان نیروگاه‌ها افزایش یابد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بر داشته باشد.

کوریاما[۴] و همکاران (۲۰۱۹) در ژاپن، هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای سال ۲۰۳۰ بررسی کرده‌اند. آنها رشد تولید ناخالص داخلی را بدون سناریوی هسته‌ای بر کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نشان می‌دهند. در کشور آمریکا کوهی سونگ[۵] و همکاران (۲۰۱۹)، مصرف خانوارهای آمریکایی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ را با استفاده از مقیاس، توزیع و تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی بررسی کردند، سپس به توسعهٔ مدل ورودی و خروجی چند منطقهٔ توسعه‌یافته و بررسی دقیق هزینه‌های مصرف‌کنندهٔ ایالات متحده پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد اثر کربن سالانهٔ خانواده‌های ایالات‌متحده از ۱۷/۷ به ۲۰/۶ گسترش یافته است و مقیاس، توزیع و تغییرات انتشار Ghg[۶] جهانی ناشی از مصرف خانگی ایالات‌متحده است؛ بنابراین استفاده از انرژی تجدیدپذیر توصیه می‌شود.

استیون[۷] و همکاران (۲۰۱۹) در بخش حمل‌ونقل اندونزی، که در حال حاضر بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ انرژی تجدیدناپذیر اندونزی است، یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی حمل‌ونقل جاده‌ای را ارائه کرده‌اند. مدل آنها دو هدف اصلی کاهش مصرف انرژی و انتشار CO_2 را در نظر می‌گیرد. آنها همچنین سناریوهای سیاستی را نیز تدوین کرده‌اند.

جدول۱- مروری بر پیشینهٔ گزیده‌ای از پژوهش‌ها دربارهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، برنامه‌ریزی خطی و پویایی‌شناسی سیستمی

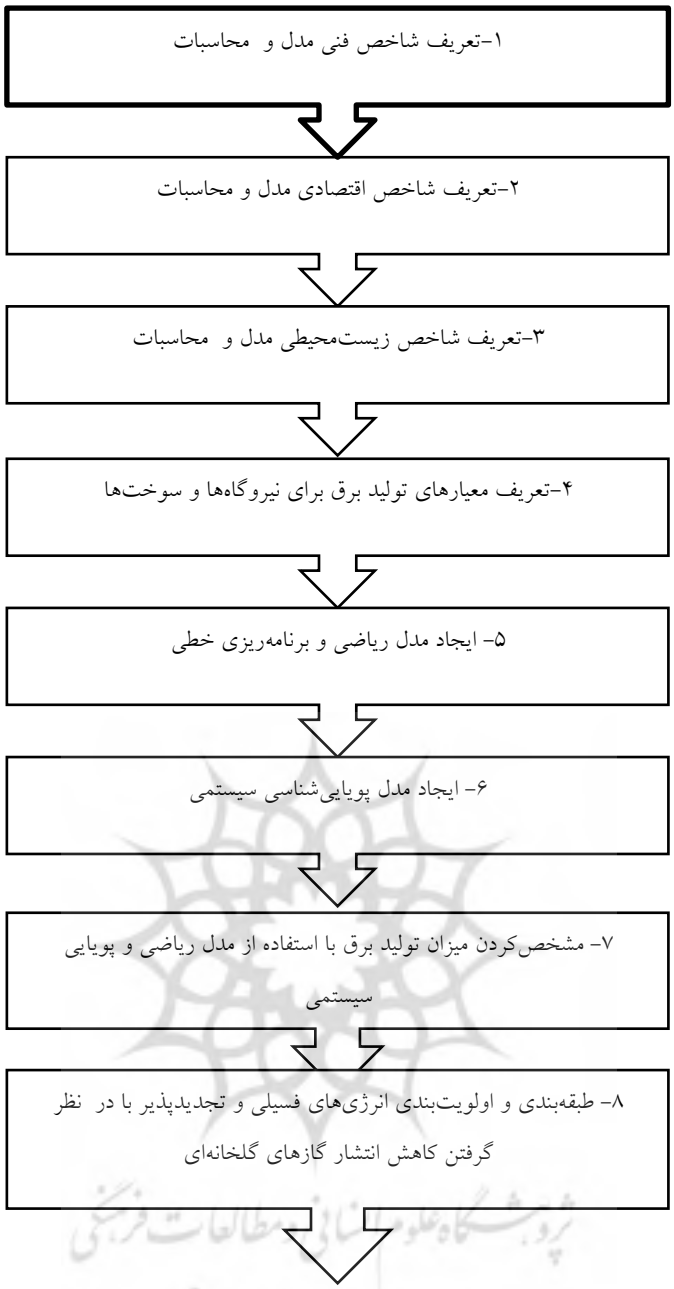
Table 1- An overview of a selection of research on renewable, non-renewable energy, linear programming, and systems dynamics

پژوهشگران	نوع انرژی	بخش تولید/ بخش مصرف	روش پژوهش	هدف پژوهش	نتایج
لین و اسمیت[۸] (۲۰۱۰)	تجدیدپذیر/ تجدید ناپذیر	مصرف	پویایی‌شناسی سیستمی	مشخص‌کردن میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	کاهش ۷۰درصدی کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای در بخش خانگی/ پژوهش مزبور به‌صورت کلی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را بدون نگاه بر محیط‌زیست و اقتصادی‌بودن بررسی کرده است.
بهمردی کلانتری و همکاران (۱۳۹۷)	تجدیدپذیر	مصرف	پویایی‌شناسی سیستمی	قیمت‌گذاری انرژی تجدیدپذیر	یارانه بالاترین اثر را برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر دارد./ متغیرها در این پژوهش به‌صورت کیفی است و باید تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری کلان صورت گیرد.
هاموند[۹] و همکاران (۲۰۲۰)	–	مصرف	مدل اتخاذ فن‌آوری رفتاری واقع‌گرایانه	مشخص‌کردن میزان مصرف در بخش حمل‌ونقل	اتخاذ سیاست‌هایی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل‌ونقل/ این مطالعه به‌دنبال سیاست‌گذاری و اتخاذ تصمیم و بررسی متغیرها به‌صورت درون‌زا است.
ینز[۱۰] و همکاران (۲۰۲۰)	–	تولید	پویایی‌شناسی سیستمی	مشخص‌کردن درصد کاهش	تعیین سناریوی کاهش میزان گاز گلخانه‌ای/ پژوهش با روش پویایی‌شناسی سیستمی به حذف تولید دی اکسید کربن است و دارای ارائهٔ راهکارهای مدیریتی است.
کوهی سونگ و همکاران (۲۰۱۹)	تجدیدپذیر/ تجدیدناپذیر	مصرف	مقایسه‌ای	مقیاس، توزیع و تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای	استفاده از انرژی تجدیدپذیر در بخش خانگی تشویق می‌شود. بخش‌های کشاورزی، صنعتی و تجاری و روابط هزینه و اقتصاد به‌صورت کلی در نما دیده نشده است.
سلطانی (۱۳۹۶)	تجدیدپذیر/ تجدیدناپذیر	تولید	تحلیل سلسله‌مراتبی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی	کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای	بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به تولید و مصرف انواع انرژی‌های فسیلی است. درواقع نقشهٔ راهی برای کشور در برنامه‌ریزی توسعهٔ پایدار است.
کاظمی و حسین‌زاده (۱۳۹۹)	تجدیدپذیر/ تجدیدناپذیر	تولید	تحلیل پوششی داده‌ها	تجزیه‌وتحلیل سیاست قیمت‌گذاری تولید برق	ارزیابی و مقایسهٔ فناوری‌های تولید برق/ سه شاخص اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برای ۴ نوع نیروگاه دیده شده است.
**پژوهش حاضر	تجدیدپذیر/ تجدیدناپذیر	تولید/ مصرف	پویایی‌شناسی/ برنامه‌ریزی ریاضی	کاهش میزان انتشار گاز گلخانه‌ای با میزان تولید و مصرف برق	مشخص‌کردن میزان تولید برق از هر نیروگاه و اختصاص‌دادن میزان خاص به بخش مصرف

همان‌گونه که از مرور پژوهش‌ها مشخص می‌شود، می‌توان دریافت که در بیشتر مدل‌هایی کـه تـاکنون در زمینـهٔ انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام شده است، بخش تولید و مصرف به‌صورت جداگانه بررسـی شـده اسـت. همچنـین بیشتر پژوهش‌های پیشین استفاده از یک نوع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را مطالعه کرده‌انـد. بنـابرتحقیقـات و بررسی‌های به عمل آمده توسط نویسندگان، چنین به نظر می‌رسد تاکنون پژوهشی انجام نشده است که شاخص‌های اثرگذار را برای تولید برق از تکنولوژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در ایران ارزیابی کرده باشد. در ایـن مطالعـه این‌گونه است که اولین‌بار بهینه‌یابی در انواع نیروگاه‌ها به‌طور هـم‌زمـان بـا توجـه بـه متغیرهـای فنـی، اقتصـادی و زیست‌محیطی انجام می‌گیرد. ارائهٔ مدل برای کاهش گازهای گلخانه‌ای مشخص می‌کند که برداشـت (تولیـد) از هـر نوع نیروگاه چه میزان باشد. همچنین انرژی‌های اثرگذار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش تولیـد و مصـرف به‌صورت کمی و کیفی، با توجه به محاسبات و مدل پویایی‌شناسی سیستمی به‌صورت کامل در این پژوهش بررسـی شده است. نظر به اینکه برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید برق یک مسئلهٔ پیچیده است، استفادهٔ مدل ریاضی و پویایی‌شناسـی سیستمی به‌صورت هم‌زمان، موجب نزدیکی بیشتر به دنیای واقعی و انعطاف‌پذیری مدل می‌شود.

۳-روش پژوهش

در این مقاله از داده‌های آماری و کتابخانه‌ای استفاده شده است؛ سپس برای کاهش انتشار گازهای گلخانـه‌ای بـه مدل برنامه‌ریزی ریاضی و پویایی‌شناسی سیستمی در دو بخش تولید و مصرف برق پرداخته شده است. همـان‌گونـه که اشاره شد، مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش به‌صورت برنامه‌ریزی خطی است. در ابتدا درصـد میـزان تولیـد برق در نیروگاه‌های متفاوت کشور با توجه به تعریف ضرایب فنی، اقتصادی و زیست‌محیطـی بـرای کـاهش انتشـار گازهای گلخانه‌ای محاسبه و سپس در بخش مصارف، اثر انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیـدناپـذیر بـر میـزان درصـد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی می‌شود. شکل (۱) مراحـل پـژوهش را نشـان مـی‌دهـد. بـرای مـدل‌سـازی ریاضی، اطلاعات مربوطه از ترازنامهٔ انرژی سال ۱۳۹۶ گردآوری شـده اسـت. مـدل ارائـه‌شـده بـا تعیـین هـدف و محدودیت‌ها و با در نظر گرفتن شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی تشکیل شده است. مدل تدوین‌شده سه معیار فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را برای هریک از منابع انرژی در نظر می‌گیرد و بعد محاسبات آنهـا را مقایسـه می‌کند؛ سپس خروجی در بخش تولید و متغیرهای اثرگذار در بخش مصرف شناسایی و با طراحی یک مدل حالت-جریان روابط بین متغیرهای حالت، جریان و پارامترها تحلیل می‌شود.



شکل ۱- گام‌های انجام پژوهش

Fig. 1- Research steps

۳-۱- تعریف شاخص‌ها

در این پژوهش ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است. در این مدل سه شاخص در نظر گرفته می‌شود که در ادامه هرکدام از این شاخص‌ها تشریح می‌شود.

۳-۱-۱- تعریف شاخص فنی مدل (TI^{11})

برای تعریف شاخص فنی در ابتدا، حداکثر پتانسیل قابل‌استحصال دربارهٔ هریک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول مدت یک‌سال در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- حداکثر پتانسیل قابل‌استحصال هریک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول یک‌سال

Table 2- Maximum recoverable potential of each renewable energy source during one year

منبع انرژی (نوع نیروگاه)	ژول در یک‌سال
فتوولتائیک	$5/7*10^{16}$
خورشیدی	$7/2*10^{19}$
بادی	$2/88*10^{17}$
آبی	$1/8*10^{17}$
زیست توده	$8/53*10^{16}$
زمین گرمایی	$4/07*10^{16}$

منبع: ترازنامه انرژی ۱۳۹۶

اما شرایط برای منابع فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر متفاوت است. منابع فسیلی محدود است و با مصرف بیشتر از حجم این منابع کاسته می‌شود. با وجود این، باید این منابع را نیز تحت شرایطی پایدار در نظر گرفت؛ با این فرض که اگر استفاده از منابع فسیلی محدود شود، می‌توان مدت‌زمان استفاده از این منابع را افزایش داد. برخی بر این باورند که پایداری مفهومی پانصدساله دارد. این بحث با مفهوم میزان مصرف ارتباط دارد؛ به این معنی که اگر ذخایر یک منبع تجدیدناپذیر به ۵۰۰ واحد تقسیم شود و عدد حاصل را میزان بیشینهٔ مصرف انرژی در یک‌سال نامید و در هر سال حداکثر از این میزان استفاده شود، می‌توان مطمئن بود که این منبع پایدار خواهد ماند. شاخص فنی (پایداری) به دست آمده، میزان بیشینهٔ مصرف برای یک دورهٔ زمانی معین از رابطهٔ (۱) به دست می‌آید (یارمحمدی ، ۱۳۹۵).

رابطهٔ (۱) **دورهٔ زمانی/ پتانسیل انرژی = میزان بیشینهٔ مصرف برای دورهٔ زمانی**

به عنوان مثال برای انرژی زغال‌سنگ خواهیم داشت:

$$\text{میزان بیشینهٔ مصرف برای دوره زمانی 7 ساله} = 2/5 * 10\text{^}21 \div 7 = 0/357 * 10\text{^}21$$

برای فراهم‌کردن امکان مقایسه‌ای منابع مختلف، باید به یک شاخص بدون ابعاد دست یافت. به‌منظور دست‌یابی به این شاخص، باید حداکثر انرژی برداشت‌شدنی از یک منبع انرژی به کل انرژی موردنیاز برای یک‌سال آن کشور تقسیم شود. شاخص مدنظر برای یک دورهٔ زمانی مشخص، از رابطهٔ (۲) به دست می‌آید. حداکثر میزان برداشت‌شدنی انرژی برای منابع تجدیدپذیر، همان حداکثر پتانسیل تکنیکی قابل‌استحصال است (یارمحمدی، ۱۳۹۵).

رابطهٔ (۲) **کل تقاضای انرژی/میزان بیشینهٔ مصرف= شاخص فنی**

اما شرایط برای منابع فسیلی متفاوت است. این منابع محدود است و با مصرف بیشتر از حجم این منابع کاسته می‌شود. با تعیین شاخص فنی برای هریک از منابع انرژی و مقایسهٔ آنها با یکدیگر در یک مدل برنامه‌ریزی خطی، امکان دستیابی به الگوی بهینهٔ مصرف انرژی فراهم می‌شود. دربارهٔ هریک از منابع انرژی، میزان شاخص فنی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳-شاخص فنی برای هریک از منابع انرژی

Table 3- Technical indicators for each of the energy sources

منبع انرژی (نوع نیروگاه)	پایداری (پتانسیل تکنیکی قابل‌استحصال)	شاخص کارایی (درصد)	پتانسیل انرژی	پتانسیل انرژی اصلاح‌شده	شاخص فنی
زغال‌سنگ		۴۵	۲/۵*۱۰^۲۱	۱/۱۳*۱۰^۲۲	۰/۰۳۷
گاز		۵۵	۵/۹*۱۰^۲۱	۳/۲۶*۱۰^۲۱	۰/۰۱۰
نفت		۳۵	۸/۱۱*۱۰^۲۱	۲/۸۴*۱۰^۲۱	۰/۰۰۹
چرخهٔ ترکیبی		۵۷	۷/۲۱*۱۰^۲۰	۴/۱۱*۲۰^۱۰	۰/۵۱
بادی	۳۷۹	۲۷	۲/۳۹*۱۰^۲۱	۱/۰۲*۱۰^۲۰	۰/۶۳
خورشیدی PV	۱۶۹۳	۱۵	۱/۶۹*۱۰^۲۱	۲/۵۳*۱۰^۲۰	۲/۸۲
خورشیدی حرارتی	۹۹۲	۳۳	۹/۹۲*۱۰^۲۰	۳/۲۷*۱۰^۲۰	۱/۶۵
زمین‌گرمایی	۴۵	۸۰	۴/۵*۱۰^۱۹	۳/۶*۱۰^۱۹	۰/۰۷۵
آبی	۵۰	۵۰	۵/۰*۱۰^۱۹	۲/۵*۱۰^۱۹	۰/۰۸۳
زیست توده	۵۵	۸۵	۵/۵*۱۰^۱۹	۴/۶۷*۱۰^۱۹	۰/۰۷۸

منبع: محاسبات براساس ترازنامهٔ انرژی ۱۳۹۶

محاسبهٔ مقادیر هریک از ستون‌های جدول (۳) به‌ترتیب از ستون دوم به شرح زیر است:

– پایداری (پتانسیل تکنیکی قابل‌استحصال): نهایت پتانسیل تکنیکی قابل‌استحصال از هریک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول مدت یک‌سال است.

– شاخص کارایی (درصد): ثابت کارآیی، بیانگر توان و کارایی یک مجموعهٔ تولید انرژی برای انتقال انرژی پایه به الکتریسته است که بر مبنای گزارش‌های مرکز مطالعات انرژی استخراج شده است.

– پتانسیل انرژی: منابع قابل‌استحصال.

– پتانسیل انرژی اصلاح‌شده: از ضرب ستون‌های ۳ (شاخص کارایی) و ۴ (پتانسیل انرژی) به دست می‌آید.

– شاخص فنی: از تقسیم ستون ۵ (پتانسیل انرژی اصلاح‌شده) به کل مصرف انرژی (براساس گزارش‌های مرکز مطالعات انرژی در سال ۲۰۱۲) محاسبه شده است. یکی دیگر از کاربردهای مهم شاخص فنی، ارائهٔ امکان محاسبهٔ میزان پایداری انرژی در یک کشور است. شاخص بیان‌شده این امکان را می‌دهد تا با بررسی و محاسبهٔ فنی برای همهٔ منابع انرژی، وضعیت فنی را بررسی کرد. اگر شاخص فنی بیشتر یا مساوی یک باشد، ازلحاظ تئوری از دیگر کشورها بی‌نیاز است؛ اما ممکن است به دلایل اقتصادی، سیاسی و یا دلایل دیگر اقدام به واردات انرژی کند.

۳-۱-۲- تعریف شاخص اقتصادی مدل (FI[۱۲])

واژۀ تولید ناخالص داخلی(GDP[۱۳]) یکی از پرکاربردترین واژه‌های عرصۀ اقتصاد عمومی است. معنای این واژه عبارت است از مجموع ارزش پولی کالاها و خدمات نهایی تولیدشده در یک‌سال مشخص، با استفاده از عوامل تولیدی که متعلق به شهروندان یک کشور است (سلطانی، ۱۳۹۶). منظور از کالاها و خدمات نهایی نیز آن دسته از کالاها یا خدماتی است که به مصرف‌کنندۀ نهایی فروخته می‌شود یا به هر طریق دیگر به دست او می‌رسد (سلطانی، ۱۳۹۶). برای تشکیل شاخص اقتصادی، ابتدا باید هزینۀ تولید در میزان انرژی سالیانۀ موردنیاز کشور ضرب شود، عدد به دست آمده بیانگر میزان سرمایۀ موردنیاز برای تأمین همۀ نیاز انرژی از یک منبع خاص است. برای به دست آوردن یک شاخص بدون ابعاد، باید عدد بیشینۀ سرمایۀ موردنیاز به GDP سالیانۀ کشور تقسیم شود که درنهایت شاخص اقتصادی به دست می‌آید. نتایج محاسبه در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- شاخص‌های اقتصادی برای منابع مختلف انرژی

Table 4- Economic indicators for different energy sources

منبع انرژی (نوع نیروگاه)	هزینۀ تولید الکتریسته	بیشینۀ سرمایۀ موردنیاز	شاخص اقتصادی
نفت	۱۱۹/۰۳	$2/23578*10^{11}$	0/212325
گاز	۹۰/۵۸۶	$1/70151*10^{11}$	0/161587
زغال‌سنگ	۹۰/۹۸	$1/70891*10^{11}$	0/16229
چرخۀ ترکیبی[۱۴]	۷۸/۲۵	$2/42354*10^{11}$	0/1232
سلول خورشیدی	۵۴۴/۸۲	$1/02335*10^{12}$	0/971846
خوشیدی حرارتی	۲۵۶/۷	$4/82169*10^{11}$	0/4579
بادی	۱۳۴/۳۵	$2/52354*10^{11}$	0/239653
آبی	۱۶۱/۰۴	$3/02487*10^{11}$	0/287262
زیست توده	۱۳۳/۹۱	$2/51528*10^{11}$	0/238868
زمین‌گرمایی	۱۲۸/۴۳	$2/41235*10^{11}$	0/229093

منبع: محاسبات براساس ترازنامۀ انرژی ۱۳۹۶

شاخص اقتصادی در جدول (۴) عددی بدون ابعاد است که از تقسیم عدد بیشینۀ سرمایۀ موردنیاز به تولید ناخالص داخلی به دست می‌آید و نشان‌دهندۀ هزینۀ نسبی هرکدام از منابع برای تولید انرژی الکتریسته است. بر این اساس شاخص اقتصادی، اطلاعاتی را در این باره در اختیار قرار می‌دهد که کدام منابع در تولید انرژی الکتریسته، هزینۀ ($/Mw.h) بیشتری خواهد داشت.

۳-۱-۳-تعریف شاخص زیست‌محیطی مدل (EEI[۱۵])

تولید الکتریسته از هر منبع انرژی آثار مخربی بر محیط‌زیست دارد که مهم‌ترین مشکل آن، آثار ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای است. در حقیقت هیچ منبع انرژی به‌طور کل بدون اثر نیست. آثار محیط به‌طور گسترده‌ای به چگونگی تولید انرژی و عملکردهای منظم انرژی‌های مرتبط و ساختارهای هزینه‌ای وابسته است. در این بخش فقط میزان تولید دی‌اکسیدکربن در کلیۀ مراحل ساخت تجهیزات، نصب و گسترش، اثر مخرب بر محیط‌زیست در نظر

گرفته می‌شود. فاکتور آلایندگی، میزان تولید گاز گلخانه‌ای را برای تولید یک کیلووات ساعت نشان می‌دهد. نتایج محاسبات در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- شاخص‌های زیست‌محیطی برای منابع مختلف انرژی

Table 5- Environmental indicators for different energy sources

منبع انرژی (نوع نیروگاه)	فاکتور آلایندگی (گرم کربن /کیلو وات ساعت)	عدد حجم آلایندگی	شاخص زیست‌محیطی
نفت	۲۰۴/۶۶	10^{14}* ۳/۸۴۴۲	۸/۷۱۷
گاز	۱۳۸	$3/50696*10^{14}$	۷/۹۵۲
زغال‌سنگ	۲۵۷/۶۶	$5/17782*10^{14}$	۱۱/۷۴۱
چرخهٔ ترکیبی	۱۰۳/۵۴۲	$2/20108*10^{13}$	۴/۳۲۵
سلول خورشیدی	۱۸/۶۵	$3/50309*10^{13}$	۰/۷۹۴
خوشیدی حرارتی	۱۸/۶۵	$3/50309*10^{13}$	۰/۷۹۴
بادی	۷/۰۶	$1/79414*10^{13}$	۰/۴۰۷
آبی	۱۹/۱	$3/58762*10^{13}$	۰/۸۱۴
زیست توده	۱۲/۵	$3/1766*10^{13}$	۰/۷۲۰
زمین‌گرمایی	۱۴/۳۲۵	$2/69071*10^{13}$	۰/۶۱۰

منبع: محاسبات براساس ترازنامهٔ انرژی ۱۳۹۶

برای دست‌یابی به شاخص مدنظر، ابتدا حجم دی‌اکسیدکربن تولیدی ناشی از یک منبع خاص برای تولید انرژی موردنیاز یک‌سال محاسبه می‌شود. به این منظور، عامل آلایندگی انرژی مدنظر باید در انرژی مصرفی کشور ضرب شود. در گام دوم باید محاسبه شود که این میزان آلایندگی چه میزان بر محیط‌زیست جهان تأثیرگذار است. به همین منظور اعداد حجم آلایندگی باید بر وزن اتمسفر تقسیم شود. شاخص زیست‌محیطی، اثر زیست‌محیطی تولید انرژی را از یک منبع بر محیط‌زیست نشان می‌دهد. هرچه عدد شاخص زیست‌محیطی بیشتر باشد، تولید انرژی از آن منبع آلودگی بیشتری برای محیط‌زیست به‌دنبال خواهد داشت. همچنان‌که از اعداد این جدول بر می‌آید، سوخت‌های فسیلی بیشترین آلودگی آلایندگی را ایجاد کرده است؛ در حالی که انرژی‌های تجدیدپذیر میزان آلایندگی بسیار کمتری به دنبال دارد و انرژی بادی نیز با اختصاص عدد ۰/۴۰۷ بهترین وضعیت را از این حیث دارد.

۳-۲- مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی

برنامه‌ریزی ریاضی، یکی از روش‌های بهینه‌سازی است. بهینه‌سازی، تخصیص منابع محدود به بهترین وضعیت ممکن است و برنامه‌ریزی خطی، یکی از زیرمجموعه‌های برنامه‌ریزی ریاضی است. پاسخی که از حل یک مسئلهٔ برنامه‌ریزی خطی به دست می‌آید معمولاً عبارت است از یک برنامه یا طرح مشخص که شامل مقادیر بهینهٔ فعالیت‌های انتخاب‌شده است. مدل‌هایی که براساس ارتباط خطی بین متغیرها ساخته می‌شوند، محدودیت‌هایی دارند. فرض کنید که یک کشور دارای منابع گوناگون تولید انرژی برق ازقبیل نفت، گاز، باد، خورشید و زیست‌توده است، سؤال اینجاست که از هرکدام از این منابع به چه میزان استفاده شود تا با حداقل کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای

به دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی دست یافت. مدل پیش رو این امکان را برای تصمیم‌گیران حوزهٔ انرژی فراهم می‌کند.

در حقیقت این مدل با وجود سه شاخص اقتصادی، فنی و آثار زیست‌محیطی برای هریک از منابع انرژی و مقایسهٔ آنها با یکدیگر در یک مدل برنامه‌ریزی خطی، امکان دست‌یابی به الگویی برای تولید انرژی برق را فراهم می‌کند.

رابطهٔ (۳)

$$Min\ z = \sum EEIi(Xj) + \sum \mathrm{FIi(Xj)}$$

$$ST:$$

$$\sum (Xj) = 1 = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$0 \le [Xj] \le [TIi]$$

$$EEIi \ge 0 \text{ و } FIi \ge 0 \text{ و } TIi \ge 0 \text{ و } Xj \ge 0$$

- **اندیس‌ها**

I: نوع نیروگاهی را تعیین می‌کند که منبع مدنظر برای تولید انرژی برق است. نیروگاه نوع ۱: نفت، نیروگاه نوع ۲: گاز، ... است (محدودهٔ i براساس جدول (۵)، ستون نوع نیروگاه i=1,2,.....10 است).

J: نشانگر نوع سوخت یا انرژی استفاده‌شدنی است (محدودهٔ j از جدول (۵)، ستون منبع انرژی j=1,2,.....10 است).

- **متغیرها و پارامترها**

X_j، درصد استفاده از انرژی jام در هر نیروگاه i ام را نشان می‌دهد.

T_i، شاخص فنی منبع انرژی iام است. نهایت پتانسیل تکنیکی قابل‌استحصال از هریک از منابع تجدیدپذیر در طول مدت یک‌سال در جدول (۲) نشان داده شده و منابع تجدیدناپذیر در جدول (۳) برای یک‌سال محاسبه شده است.

EEI_i، شاخص زیست‌محیطی منبع انرژی iام است. تولید الکتریسته از همهٔ منابع انرژی کم یا زیاد اثر مخربی بر محیط‌زیست خواهد داشت که مهم‌ترین این مشکلات، اثر ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای است؛ به همین دلیل از دیگر مضرات این منابع صرف‌نظر می‌کنیم و تنها میزان تولید دی‌اکسیدکربن را به‌عنوان شاخص مقایسهٔ تأثیر منابع انرژی بر محیط‌زیست بر خواهیم شمرد. در جدول (۵)، محاسبات برای انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر صورت گرفته است.

FI_i، شاخص اقتصادی منبع انرژی iام است. این شاخص نشان‌دهندهٔ هزینهٔ تأمین کل انرژی کشور از یک منبع خاص انرژی است که در جدول (۵) نشان داده شده است.

در این مقاله دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول، حداقل‌سازی میزان آلودگی محیط‌زیست بر اثر تولید انرژی و تابع هدف دوم، حداقل‌سازی میزان هزینهٔ تولید انرژی است. تابع هدف اول شاخص زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد که در جدول (۴) برای ۱۰ نوع نیروگاه محاسبه شده است. هدف این تابع، به

حداقل رساندن تولید گازهای گلخانه‌ای با مینیمم‌کردن مجموع تابع انتشار گاز گلخانه‌ای است. رابطهٔ (۴) این هدف را به زبان متنی بیان می‌کند.

رابطهٔ (۴) $Min\ (EEI = EEI$ * نفت X نفت EEI + * گاز X گاز EEI + * زغال‌سنگ X زغال‌سنگ EEI + * سلول خورشیدی X سلول خورشیدی EEI + * حرارتی خورشیدی X حرارتی خورشیدی EEI + * بادی X بادی EEI + * آبی X آبی EEI + * زیست توده X زیست توده EEI + * زمین‌گرمایی X زمین‌گرمایی EEI + *سیکل ترکیبی X سیکل ترکیبی)

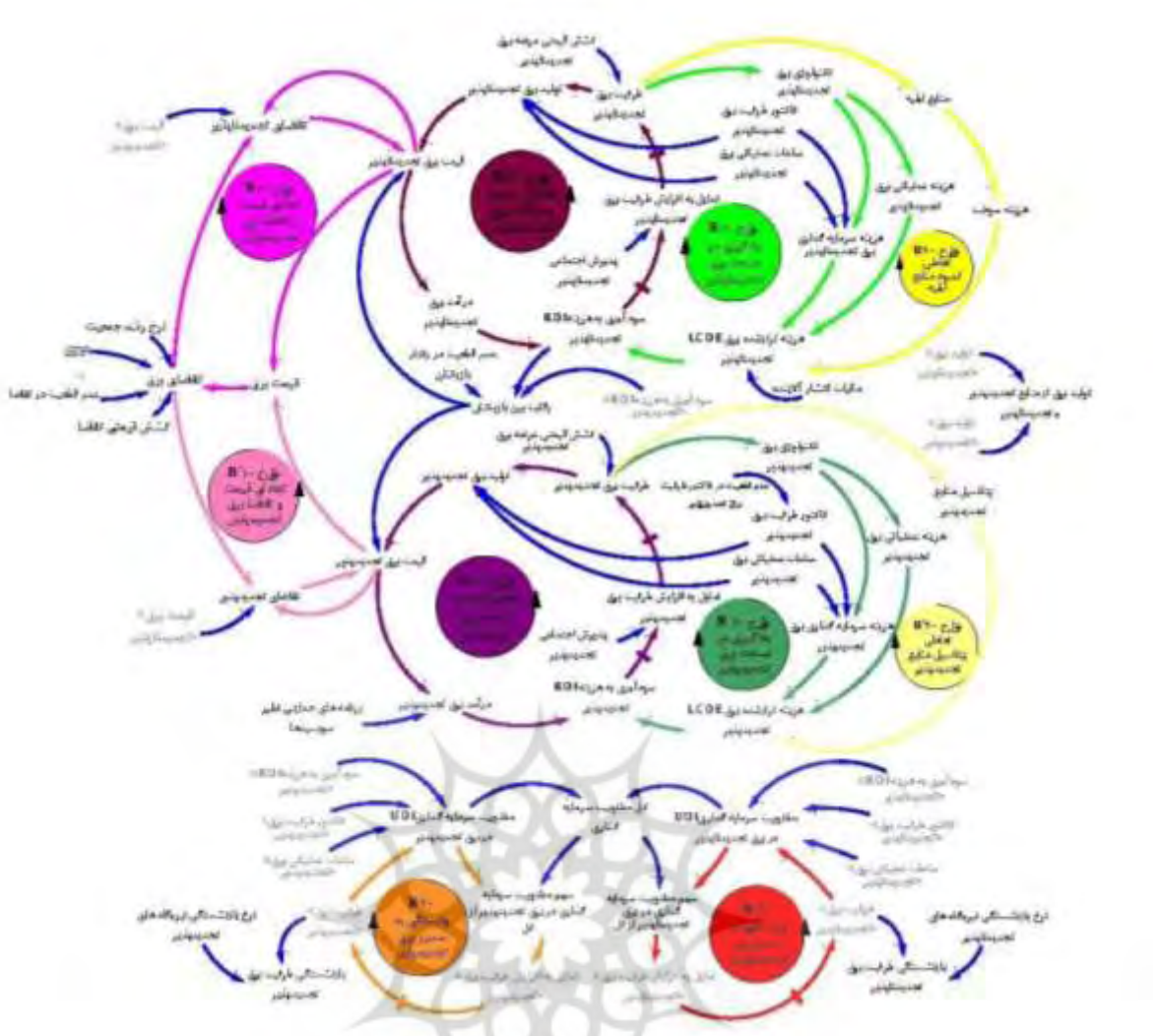
در تابع هدف دوم، به حداقل رساندن هزینهٔ تولید الکتریسته در نیروگاه‌های متفاوت مدنظر است. این تابع هدف به‌صورت رابطهٔ (۵) است.

رابطهٔ (۵) $Min\ (FI = FI$ * نفت X نفت FI +* گاز X گاز FI +زغال * سنگ X زغال‌سنگ FI + * سلول خورشیدی X سلول خورشیدی FI + * حرارتی خورشیدی X حرارتی خورشیدی FI + * بادی X بادی FI + * آبی X آبی FI +* زیست توده X زیست توده FI + * زمین گرمایی X زمین‌گرمایی FI + *چرخهٔ ترکیبی X چرخهٔ ترکیبی)

در محدودیت اول، رابطهٔ (۳) جمع میزان برداشت‌های منابع در همهٔ نیروگاه یک در نظر گرفته شده است. به‌عبارت دیگر در این محدودیت، مجموع درصد انرژی‌های مصرفی مدنظر است که کل تقاضای کشور را تأمین کند و درنتیجه برابر ۱ (یک) در نظر گرفته شده است. در اولین محدودیت، Xها درصدی از شاخص فنی برای هریک از منابع انرژی‌اند. در محدودیت دوم، میزان برداشت هر منبع باید از میزان شاخص فنی آن منبع کمتر باشد. محدودیت موجود تضمین‌کنندهٔ این حقیقت است که میزان منابع تأمین‌شده از منبع انرژی j، کوچک‌تر یا مساوی میزان منابع در دسترس از منبع i باشد (یارمحمدی، ۱۳۹۵).

۳-۳- مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم

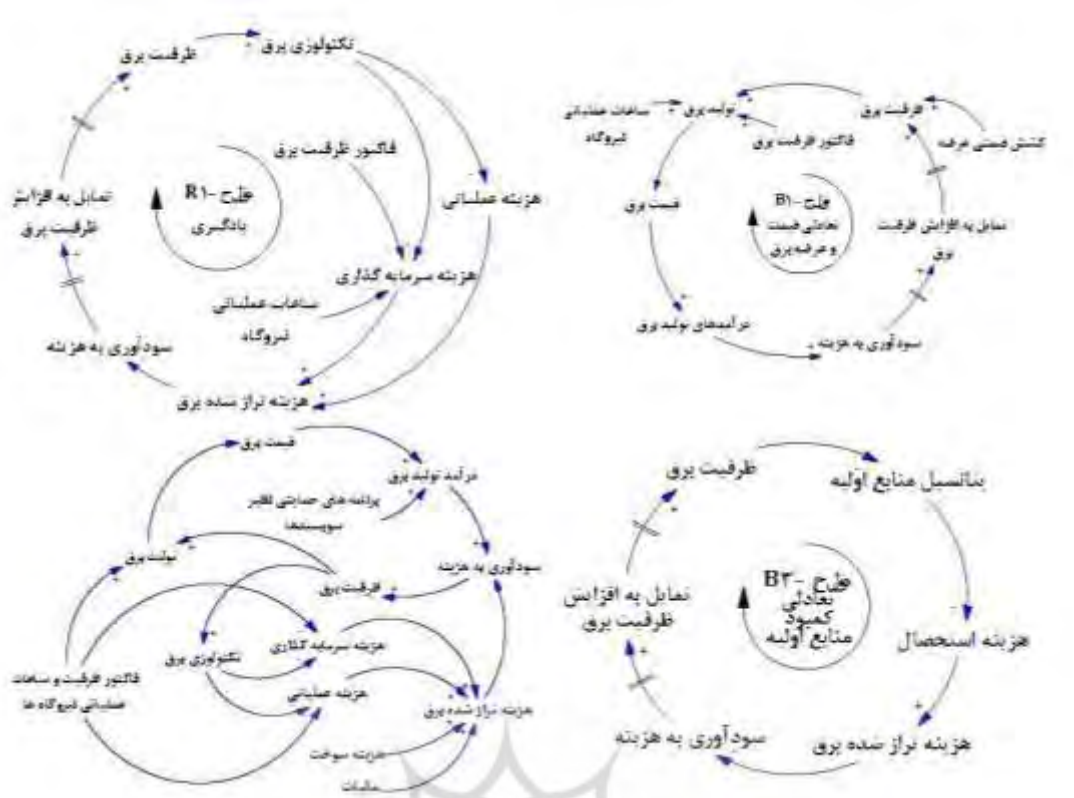
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد عمدهٔ تحقیقات انجام‌شده در حوزهٔ مصرف انرژی و هزینه‌های زیست‌محیطی، مخصوصاً در کشور ما مبتنی بر روش‌های اقتصادسنجی بوده است؛ اما روش پویایی‌شناسی سیستمی با توجه به جامعیت و نگرش سیستمی آن، در این رابطه سودمند است. با توجه به موضوع پژوهش و الگوی پویایی‌شناسی سیستم، متغیرهای متعددی در فرایند تولید، مصرف انرژی و هزینهٔ زیست‌محیطی مؤثرند. مدل پیشنهادی این پژوهش با استفاده از روابط علی و معلولی در سه بخش تقاضا، تولید و قیمت مدل‌سازی می‌شود که طبعاً روابط علی و معلولی مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌ها در بخش تولید است (شکل ۲).



شکل ۲- پویایی‌ها و حلقه‌های تأثیرگذار بر تولید انرژی برق از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

Fig. 2- Dynamics and loops affecting electricity generation from renewable and non-renewable sources

مدل مفهومی به دست آمده، دارای سه حلقهٔ اصلی تعادلی(B1, B2, B3)، اثر متقابل قیمت و تقاضا، اثر متقابل قیمت و عرضه، کمبود منابع اولیه و دو حلقهٔ اصلی تقویت‌کنندهٔ (R1، R2)، اثر یادگیری و وابستگی به مسیر ناشی از سودآوری نسبت‌به هزینهٔ تولید است که توسعهٔ برق را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان قیمت در یک بازار رقابتی را تعیین می‌کند. علاوه بر آن پذیرش اجتماعی و برنامه‌های حمایتی نیز در افزایش و یا کاهش آثار حلقه‌ها تأثیرگذارند (شکل ۳).



شکل ۳- پویایی‌ها و حلقه‌های تأثیرگذار بر تولید انرژی برق

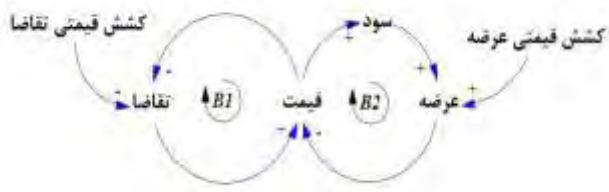
Fig. 3- Dynamics and loops affecting electricity generation

۳-۳-۱- وابستگی به مسیر

با وجود فواید انرژی‌های تجدیدپذیر و زیان نیروگاه‌های فسیلی، متأسفانه در کشور ما به نیروگاه‌های فسیلی افزوده می‌شود. در حلقهٔ (R2,R'2) شکل (۲) و شکل (۳)، از مفهوم سهم هر عامل نسبت‌به سهم باقی عامل‌ها استفاده شده است تا پدیدهٔ وابستگی به مسیر مدل‌سازی شود.

۳-۳-۲- عرضه، تقاضا و قیمت

با افزایش تولید برق از یک نوع نیروگاه، قیمت برق خریداری‌شده از آن کاهش می‌یابد و سود حاصل به‌سبب قیمت، کم و به‌واسطهٔ مقدار زیاد می‌شود، از طرفی دیگر با کاهش تولید یک نوع نیروگاه، قیمت پیشنهادی خریداری از آن بالا می‌رود و سود حاصل از آن به‌واسطهٔ قیمت، زیاد و به واسطهٔ مقدار، کم می‌شود (حلقهٔ (B2, B'2) شکل (۲)). تحلیل این بخش، خارج از محدودهٔ مدل تشخیص داده شد و فرض می‌شود که تغییرات تقاضا به‌صورت روند سالیان گذشته اتفاق می‌افتد. به علاوه تقاضای برق و کشش قیمتی آن به‌صورت درون‌زا تأثیر می‌گیرد. کشش قیمتی یک نوع برق بر تقاضای آن برق اثر منفی و کشش قیمتی کالاهای جانشین بر تقاضای صنعت برق اثر مثبت دارد. قیمت‌های کمتر، تقاضای صنعت برق را تحریک می‌کند و به‌سمت تقاضای بیشتر می‌برد و با افزایش تقاضا، قیمت افزایش می‌یابد (حلقهٔ (B1, B'1) شکل (۲)). رابطهٔ کلی بین عرضه، تقاضا و قیمت به‌صورت خلاصه در شکل (۴) آورده شده است که در شکل (۲) در حلقه‌های (B2, B'2) و (B1, B'1) با جزئیات بیشتر ترسیم شده است.



شکل ۴- قیمت و رابطهٔ آن با عرضه و تقاضا

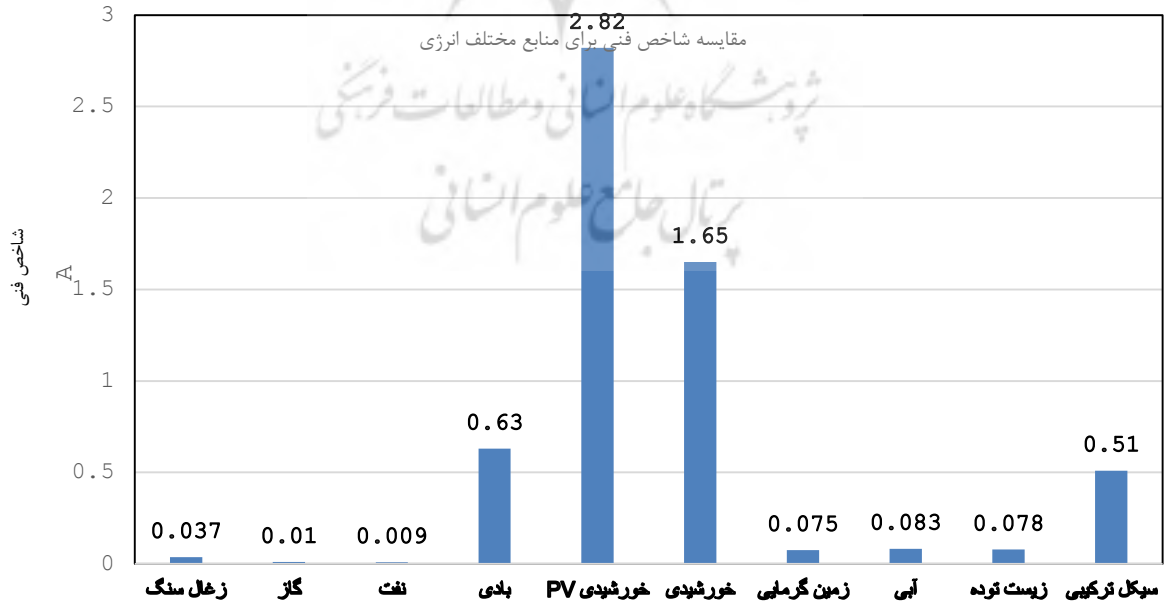
Fig. 4- Price and its relationship with supply and demand

۴- تجزیه‌وتحلیل نتایج (اعداد)

میزان درصد برداشت از هر نیروگاه به‌وسیلهٔ مدل معرفی‌شده در بخش تولید انرژی برق و با استفاده از نرم‌افزار گمز بهینه‌سازی شده است. برای ترسیم نمودار مقایسه‌ای در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) از نرم‌افزار اکسل استفاده شده است. همچنین در بخش مصارف انرژی برق از پویایی‌شناسی سیستمی میزان تقاضا، تولید و سرمایه‌گذاری نیروگاه‌ها در بازار برق ارائه شده است.

۴-۱- کاربرد شاخص پایداری(فنی) انرژی

کاربرد ابتدایی این شاخص آن است که امکان مقایسه از جدول (۳) بین منابع مختلف انرژی را فراهم می‌کند. نمودار شکل (۵) شاخص فنی را برای منابع مختلف انرژی موجود مقایسه کرده است. همان‌طور که از نمودار شکل (۵) مشخص است، انرژی خورشیدی فتوولتائیک فنی (پایدارترین) منبع انرژی و انرژی نفت، ناپایدارترین منبع انرژی است. به‌طور نمونه می‌توان بیان‌داشت برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، میزان برداشت از هر ۱۰ منبع (زغال‌سنگ، گاز، نفت، باد، خورشیدی، فتوولتاییک، زمین‌گرمایی، آبی، زیست توده، سیکل ترکیبی) در شاخص فنی، گاز کمترین اثر و فتوولتاییک بیشترین اثر را دارد.

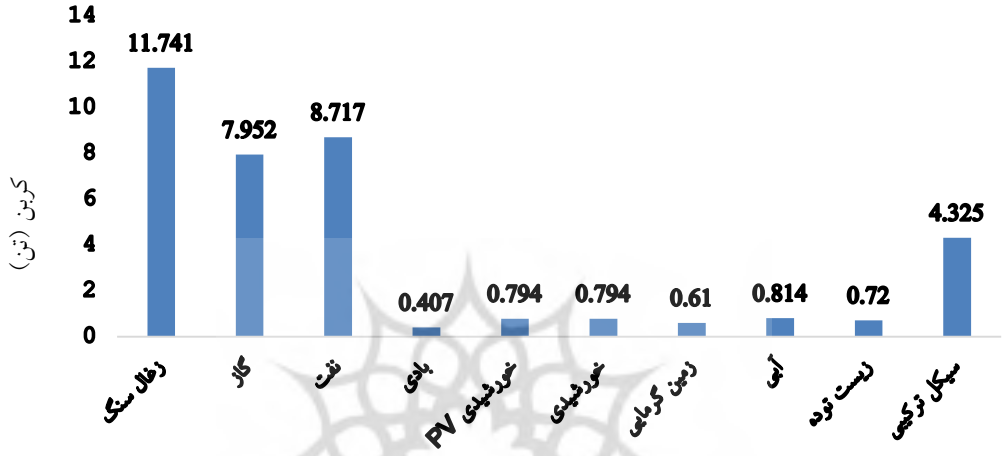


شکل ۵- مقایسهٔ شاخص فنی (پایداری) منابع مختلف انرژی

Fig. 5- Comparison of technical indicators (sustainability) of different energy sources

۴-۲- کاربرد شاخص زیست‌محیطی انرژی

همان‌طور که اشاره شد تولید الکتریسته از همهٔ منابع انرژی، کم یا زیاد اثر مخربی بر محیط‌زیست خواهد داشت که مهم‌ترین این مشکلات، آثار ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای است. آثار جانبی که به مرور زمان بر محیط‌زیست ایجاد می‌شود، بسیار مهم‌تر از عوامل دیگر است که متأسفانه به‌دلیل شفافیت‌نداشتن این پیامدها و طولانی‌بودن عواقب حاصل، تا به حال به آن توجه جدی نشده است. در نمودار شکل (۶) از جدول (۵)، فاکتور آلایندگی برای منابع مختلف انرژی مقایسه شده است. نمودار شکل (۶)، فاکتور آلایندگی میزان تولید گاز گلخانه‌ای را برای تولید یک کیلووات ساعت نشان می‌دهد. زغال‌سنگ بیشترین اثر را بر محیط‌زیست و انرژی بادی نیز کمترین اثر را بر محیط‌زیست دارد.

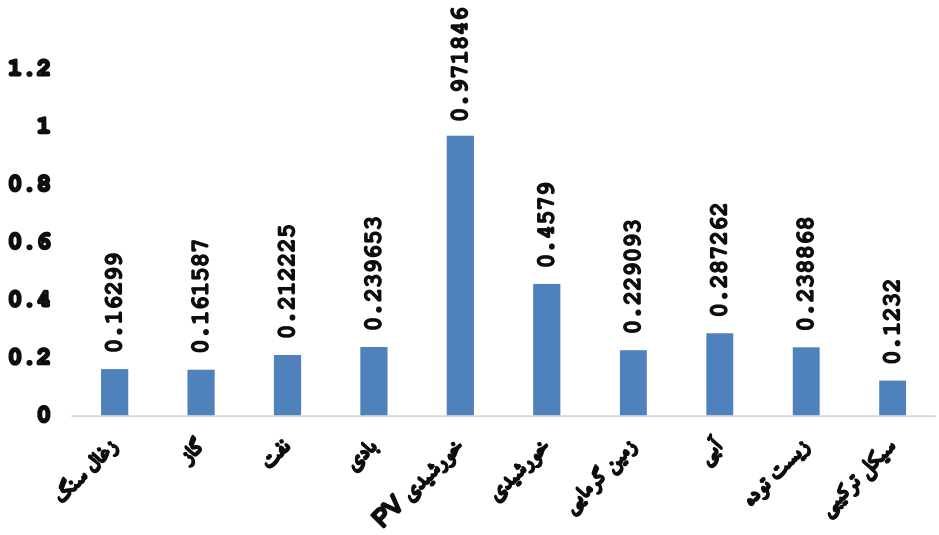


شکل۶- مقایسهٔ شاخص زیست‌محیطی منابع مختلف انرژی

Fig. 6- Comparison of environmental indicators of different energy sources

۴-۳- کاربرد شاخص اقتصادی انرژی

طبق نمودار شکل (۷)، داده‌های به دست آمده از جدول (۴) انرژی خورشیدی فتوولتائیک، گران‌ترین منبع تولید انرژی و انرژی گاز ارزان‌ترین منبع تولید انرژی است. با توجه به نتایج محاسباتی در نمودار شکل (۷)، با مقایسهٔ نمودارهای فوق امکان تصمیم‌گیری برای انتخاب نیروگاه‌های مدنظر، برای تولید انرژی الکتریکی به‌گونه‌ای فراهم می‌شود که بتوان الگوی بهینه ایجاد کرد؛ به این معنی که چه میزان از هر نیروگاهی برای تولید انرژی برق استفاده شود تا الگوی بهینهٔ تولید انرژی برق ایجاد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با صرفهٔ اقتصادی در نظر گرفته شود؛ بنابراین مدل برنامه‌ریزی خطی اجرا می‌شود تا میزان تولید برق و برداشت از هر نیروگاه برای کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای مشخص شود.



شکل ۷- مقایسهٔ شاخص اقتصادی منابع مختلف انرژی

Fig. 7- Comparison of economic indicators of different energy sources

در مدل ارائه‌شده، مقدار تابع هدف که نشان‌دهندهٔ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از نیروگاه‌هاست با شاخص اقتصادی و محیط‌زیستی ارتباط مستقیم دارد. میزان برداشت برق از هر نیروگاه فرضی باید کمتر از شاخص فنی آن نیروگاه باشد. بنابراین با تغییر الگوی تأمین انرژی، به‌منظور دست‌یابی به منابع انرژی ارزان و سازگار با محیط‌زیست، میزان آلودگی کاهش داده شده است. نتایج پژوهش دربارهٔ ۱۰ منبع مختلف انرژی برای ۱۰ نیروگاه فرضی ارائه شده است که دو شاخص اقتصادی و زیست‌محیطی نقش کلیدی را در حداقل‌سازی تابع هدف بر عهده دارند. این در حالی است که در نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، اثر شاخص اقتصادی نسبت‌به شاخص زیست‌محیطی بیشتر است و در انرژی‌های تجدیدپذیر این برتری به‌صورت معکوس است. بنابراین میزان برداشت در منابع تجدیدناپذیر نسبت‌به تجدیدپذیر کمتر است که نشان‌دهندهٔ اثر غالب شاخص محیط‌زیستی بر شاخص اقتصادی است. نگاهی به نتایج به دست آمده از اجرای مدل برنامه‌ریزی خطی نشان می‌دهد برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توان با ضریب ایجادشده توسط مدل، انرژی برق تولید کرد و انرژی پایدارتر را با تخریب زیست‌محیطی کمتر فراهم کرد.

۴-۴- انباشت جریان در بخش مصارف

در این مرحله باید برای هریک از متغیرها رابطهٔ ریاضی طراحی شود. این کار در نرم‌افزار ونسیم انجام شده است. معادلات به سه دستهٔ اساسی معادلات متغیرهای سطح، معادلات متغیرهای نرخ و معادلات متغیرهای کمکی تقسیم می‌شوند. معادلات سطح ابتدا، انباشت‌های درون سیستم را به‌صورت انتگرال‌گیری از خالص نرخ جریان آنها تعریف می‌کند. معادلات متغیرهای کمکی نیز با تابعی از ورودی‌ها ساخته می‌شوند. با تعریف ثابت‌ها و مقادیر اولیهٔ متغیرهای سطح، مدل شبیه‌سازی آمادهٔ اجراست. پس از کالیبراسیون پارامترها، با استفاده از Equation Level نرم‌افزار Vensim تمامی روابط در جدول و مدل انباشت جریان ارائه‌شده در پیوست (۱) و (۲) رویت‌شدنی است. مقادیر اختصاص داده شده از میانگین اطلاعات از سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ براساس ترازنامهٔ انرژی مطالعه‌شده، محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود در سناریوی پیشنهادی سعی شده است که درصد

تولید برق توسط نیروگاه‌هایی بیشتر شود که با انرژی تجدیدپذیر کار می‌کنند و انرژی‌های تجدیدناپذیر را کاهش داد و میزان تغییرات را بر متغیر سطح شاخص اقتصادی و زیست‌محیطی مشاهده کرد. با اجرای مدل برنامه‌ریزی ریاضی، مقادیر پایه[۱۶]، میزان برداشت یا تولید انرژی برق است. مقادیر شاخص‌های فنی و زیست‌محیطی برای مدت‌زمان یک‌سال از ترازنامهٔ انرژی در جداول (۳) و (۴) محاسبه شده است. در ستون مقادیر سناریو[۱۷] در یک سناریو، مدت‌زمان برای ۱۰۰ روز در نظر گرفته می‌شود و جدول (۶) درصد تولید برق را از هر نیروگاه نشان می‌دهد.

جدول ۶- درصد تولید برق از نیرگاه‌ها

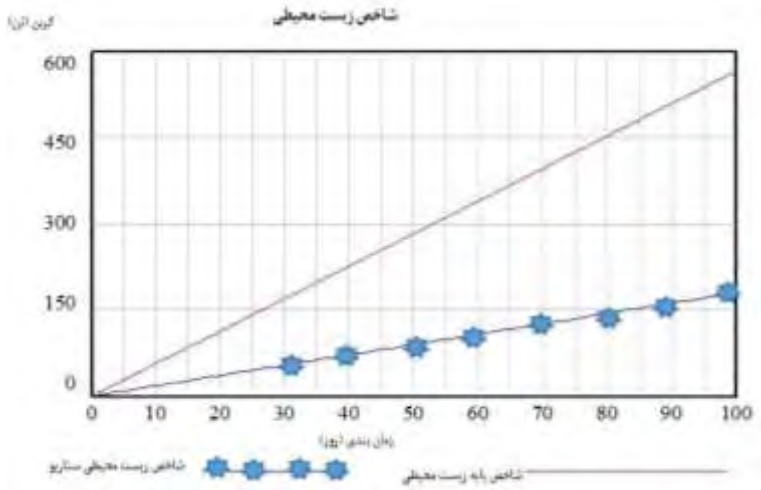
Table 6- Percentage of electricity generation from power plants

مقادیر سناریو	پایه (خروجی مدل ریاضی)
Xgas= 0/05	Xgas= 0/2
Xoil= 0/05	Xoil= 0/3
Xcoal= 0/03	Xcoal= 0/1
Xsolar cell= 0/15	Xsolar cell= 0/1
Xsolar thermal= 0/2	Xsolar thermal= 0/02
Xwind= 0/15	Xwind= 0/1
Xbiomass= 0/2	Xbiomass= 0/03
Xwater= 0/1	Xwater= 0/1
Xgeothermal= 0/07	Xgeothermal= 0/05

با توجه به تعیین دورهٔ زمانی ۱۰۰ روزه، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای به‌وضوح مشاهده می‌شود. در شکل (۸) ازلحاظ اقتصادی، تغییرات پایه به‌همراه تغییرات با توجه به جدول (۶)، وضعیت استراتژی مشاهده می‌شود.

شکل ۸- رفتار شاخص اقتصادی با اختصاص‌دادن بخش مصارف

Fig. 8- Behavior of the economic index by allocating the expenditure sector



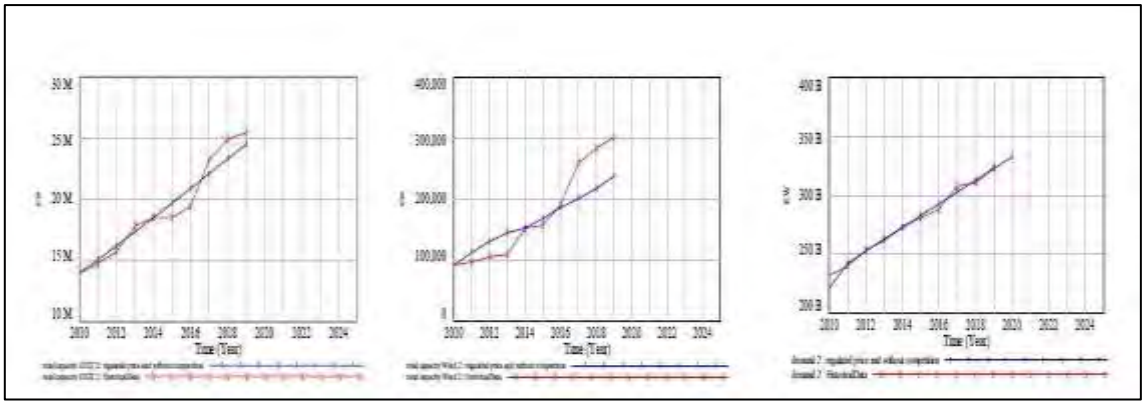
شکل ۹- رفتار شاخص زیست‌محیطی با اختصاص‌دادن بخش مصارف

Fig. 9- Behavior of the environmental index with the allocation of consumption

با توجه به سناریوی جدول (۶)، میزان تغییرات در شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده می‌شود. به هر حال افزایش تولید از انرژی‌های تجدیدپذیر به میزان کمتری شاخص اقتصادی را افزایش داده است، ولی در مبحث زیست‌محیطی کاهش بیشتری از انتشار گاز گلخانه‌ای را نمایان می‌کند. به عبارت دیگر نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد استفادهٔ بیشتر از نیروگاه‌هایی که با انرژی‌های تجدیدپذیر کار می‌کنند، گرچه هزینهٔ بیشتری دارد، ولی ازلحاظ شاخص‌های زیست‌محیطی کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای بیشتری را در بردارد. نتایج حل مدل نشان می‌دهد استراتژی استفاده از نیروگاه‌های چرخهٔ ترکیبی نسبت‌به نفت، گاز و زغال‌سنگ باصرفه‌تر ازلحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی است.

۴-۴-۱- اعتبارسنجی[۱۸]

اعتبارسنجی راهکاری برای اطمینان نسبت‌به درستی و سودمندی یک مدل است. طراحی یک مدل با هدف بررسی مشکلات و رفع آنها در زمینه‌های متفاوت است و مدل طراحی‌شده به‌منظور تطابق با واقعیت سنجش می‌شود. یکی از آزمون‌ها برای اعتبارسنجی، مقایسهٔ نتایج خروجی مدل با رفتار مشاهده‌شدهٔ مسئله (آزمون تکرار رفتار[۱۹]) و ارزیابی ساختار[۲۰] است. آزمون تکرار رفتار، بررسی خروجی‌های مدل را ازطریق مقایسهٔ داده‌های تولیدی از مدل با داده‌های تاریخی دارد. در این آزمون روند داده‌ای تولیدشدهٔ مدل با داده‌های تاریخی مطابقت داده می‌شود. به دلیل اینکه هریک از ابزارهای آماری در جهت مقایسهٔ داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی، محاسن و معایبی در بررسی‌های آماری دارد، در این آزمون نخست داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی ترسیم شده است. هدف از این آزمون مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی برای اطمینان از صحت عملکرد رفتار الگو است. به عبارت دیگر در این حالت رفتار شبیه‌سازی‌شده برای الگو بازتولید می‌شود تا با داده‌های واقعی مقایسه شود. به این منظور مقدار شبیه‌سازی‌شده با مقدار واقعی در شکل (۱۰) ترسیم شده است. نمودار اطلاعات واقعی و نتایج شبیه‌سازی در سه قسمت نشان می‌دهد رفتار متغیرهای بررسی‌شده، شبیه‌سازی و اختلاف کمی بین میزان شبیه‌سازی‌شده و واقعی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- داده‌های تاریخی و مقادیر شبیه‌سازی

Fig. 10- Historical data and simulation values

همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود، رفتار متغیرهای بررسی‌شده به‌خوبی شبیه‌سازی شده است که نشان‌دهندهٔ اعتبار نتایج به دست آمده در این پژوهش است. آزمون ارزیابی ساختار با هدف پاسخگویی به دو سؤال زیر انجام شده است:

۱- آیا ساختار مدل با دانش موجود دربارهٔ ساختار سیستم واقعی در تناقض نیست؟

۲- آیا مرتبط‌ترین ساختارهای سیستم‌های واقعی مدل‌سازی شده‌اند؟

از آنجایی که روابط ایجادشده در مدل براساس نظرهای خبرگان بوده است، ساختار مدل از این نظر تأیید شده است. علاوه بر آن حلقه‌های تعادلی و تقویت‌کننده در شکل های (۲) و (۳) همگی براساس نظرخبرگان این صنعت پایه‌ریزی شده و کارشناسان برق تجدیدپذیر نیز آن را تأیید کرده‌اند.

۵- بحث، پیشنهادها و محدودیت‌ها

تولید برق به‌عنوان نیروی محرکه، در بیشتر فعالیت‌های تولیدی و خدماتی جایگاه ویژه‌ای دارد. رشد روزافزون جمعیت، وابستگی به انرژی و به تبع آن رشد مصرف انرژی، به‌ویژه انرژی‌های فسیلی موجب افزایش مشکلات زیست‌محیطی شده است. دست‌یابی به مدل بهینهٔ تولید انرژی، تعریف نقشهٔ جامع تولید انرژی و دسترسی به منابع انرژی پایدار اقتصادی و منطبق با محیط‌زیست، در شرایط امروز کشور به یک ضرورت تبدیل شده است. نتایج حاصل از پژوهش با توجه به اهداف اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی پژوهش، بیشتر رویکرد زیست‌محیطی دارد. با تغییر استراتژی تولید برق از سوخت‌های فسیلی به تجدیدپذیر، میزان کاهش گازهای گلخانه‌ای در هر دو بخش تولید و مصرف حداقل می‌شود. با توجه به وضعیت موجود منابع انرژی، هزینه‌های تولید هریک از منابع و همچنین آثار زیست‌محیطی آنها برای تولید الکتریسته، لازم است میزان تولید از هر منبع (نیروگاه‌ها) را طبقه‌بندی کرد. این موضوع به توازن بین تأمین انرژی و مصرف کمک و منابع انرژی و فناوری‌ها را در چهارچوب کلی یکپارچه می‌کند و درنتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای میسر می‌شود. صرفه‌جویی انرژی معادل کاهش تولید در نیروگاه‌هاست و درنتیجه کاهش CO_2 از سوخت‌های نیروگاه‌ها حاصل می‌شود. از آنجایی که بخش انرژی حدود ۶۰درصد از انتشارات گازهای گلخانه‌ای را در جهان تولید می‌کند، درنتیجه یک تغییر و تحول در تولید و مصرف انرژی امری ضروری به نظر می‌رسد. شیوه‌های جاری در عرضه و مصرف انرژی به‌طور وضوح به‌لحاظ اقتصادی، محیطی و فنی

مناسب نیست؛ بنابراین باید از تکنولوژی‌هایی استفاده کرد که در آن، همراه با عرضه و مصرف انرژی میزان انتشار کربن کاهش یابد. بنابراین چنانچه برای تولید برق از ۱۰ منبع درصد مشخصی با توجه به مدل ریاضی برداشت شود، کاهش انتشار گازگلخانه‌ای رخ می‌دهد و هدف پژوهش محقق می‌شود. در نگاهی گذرا به چندین نمونه از تفاوت و شباهت‌های نتایج پژوهش با پژوهش‌های انجام‌شده در جدول (۷) پرداخته شده است.

جدول ۷- بحث در نتایج پژوهش‌ها

Table 7- Discussion on research results

پژوهشگر/ سال	هدف پژوهش	نتایج پژوهش	شباهت‌ها	تفاوت‌ها و نتایج پژوهش جدید
سلطانی (۱۳۹۶)	کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای	تدوین نقشه‌راهی در برنامه‌ریزی توسعهٔ پایدار در بخش انرژی‌های فسیلی انجام شد.	پارامترهای محیط‌زیست، انرژی تجدیدناپذیر و اقتصاد/ بخش تولید و مصرف	مشخص‌کردن میزان تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر/ اولویت‌بندی در میزان تولید و مصرف مشخص است.
کاظمی و حسین زاده (۱۳۹۹)	تجزیه‌وتحلیل سیاست قیمت‌گذاری تولید برق	قیمت‌گذاری برای ۴ نوع نیروگاه با رویکرد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای صورت گرفت.	شاخص‌های شاخص اقتصادی، زیست‌محیطی/ انتشار گازهای گلخانه‌ای	شاخص‌های فنی و اقتصادی و زیست‌محیطی برای ۱۰ نوع نیروگاه مدل‌سازی و اولویت‌بندی به‌همراه میزان درصد تولید و مصرف برق مشخص شده است.
بهمردی کلانتری (۱۳۹۷)	تعیین عوامل اثرگذار بر استفاده از انرژی تجدیدپذیر	یارانه بالاترین اثر را برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر دارد.	راهکارهای تشویقی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	شاخص فنی و زیست‌محیطی به‌صورت کمی وکیفی نمایان است. درصد برداشت تولید برق از انواع نیروگاه با اثرگذاری مشخص است.
اسدی و همکاران (۱۳۹۵)	ارزیابی اقتصادی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	یارانه‌های انرژی و توجه‌نکردن به خسارت آلاینده‌های نیروگاهی، مهم‌ترین عوامل توسعه‌نیافتن صنعت برق است.	ارائهٔ مدل برنامه‌ریزی انرژی/ نیروگاه زمین‌گرمایی، نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی/ شاخص اقتصادی/ انتشارگازهای گلخانه‌ای	انواع انرژی تجدیدپذیر/ انواع انرژی تجدیدناپذیر/ مشخص‌کردن میزان تولید از هر نوع نیروگاه/ مدل ریاضی کمی/ مدل پویایی به‌صورت کیفی و کمی/ شاخص فنی و زیست‌محیطی نمایان است.
آریانپور و شفیعی (۱۳۹۱)	تعیین سهم بهینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر و آثار مثبت توسعه بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای	سرمایه‌گذاری در زمینهٔ توسعهٔ فناوری‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتاییک ثابت شد.	مشخص‌کردن میزان تولید انرژی تجدیدپذیر/ بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای	در نظر گرفتن قیمت/ تقاضا/ تولید/ انواع انرژی تجدیدپذیر/ انواع انرژی تجدیدناپذیر/بخش تولید و مصرف بررسی شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته و ملاحظهٔ جدول (۷)، می‌توان بیان داشت که مدل ریاضی با شاخص‌های جامع‌تر و مدل پویایی‌شناسی سیستمی، نقش علمی در کاهش انتشارگازهای گلخانه‌ای و طبقه‌بندی میزان تولید انرژی برق دارد. بنابراین با توجه به اجرای دو مدل و شکل‌های (۸) و (۹) راهبردهای زیر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح کشور به کار برده می‌شود:

۱. درصد تولید انرژی برق از منابع انرژی تجدیدپذیر باید بیشتر شود و استفاده از منابع فسیلی برای تولید انرژی برق کاهش یابد که این نتیجه از اجرای تابع ریاضی مدل نمایان است.

۲. براساس مدل پویایی‌شناسی سیستمی، فرهنگ‌سازی و افزایش آگاهی برای استفاده از منابع تجدیدپذیر و کاهش بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی پیشنهاد می‌شود.

۳. در مجموع می‌توان گفت با افزایش سهم منابع تجدیدپذیر و کاهش آلاینده‌های ناشی از آن، می‌توان به یک سیستم عرضهٔ بهینه رسید، درواقع با همان میزان هزینه در وضع موجود، میزان آلایندگی ناشی از تولید برق را کاهش داد.

۴. تولید انرژی برق از نیروگاه‌های تولید برق براساس اولویت مشخص‌شده به میزان چشمگیری از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کاسته خواهد شد (شکل(۶) و (۷)).

۵. نیاز بخش خانگی و تجاری ازطریق انرژی‌های تجدیدپذیر باید تأمین شود (جدول (۶)).

۶. با توجه به اینکه کشور ایران ازنظر میزان دریافت انرژی خورشیدی و متوسط ساعات آفتابی سالانه بیش از ۲۱۰۰ساعت است؛ بنابراین توصیه می‌شود که تصمیم‌گیرندگان، برنامه‌ریزی‌های لازم را برای اجرای پروژه‌ها و سیاست‌های حمایتی قیمتی و اجازهٔ صدور مجوز به سرمایه‌گذاران در این بخش اعمال کنند (مدل ریاضی شاخص اقتصادی). بنابراین علاوه بر توسعهٔ نیروگاه‌های برق‌آبی به توسعهٔ نیروگاه خورشیدی هم پرداخت و آن را در مناطق کویری کشور گسترش داد.

۷. با توجه به محاسبهٔ شاخص زیست‌محیطی و نمودار شکل (۵)، باید از صدور مجوز ساخت نیروگاه‌های زغال‌سنگ و گازی جلوگیری کرد.

۸. ظرفیت انرژی‌های خورشیدی، زیست‌توده و بادی با توجه به محاسبهٔ شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی نمودارهای (۶) و (۷) باید فزایش یابد.

یکی از محدودیت‌های مدل ارائه‌شده در این تحقیق، در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به‌صورت هم‌زمان است؛ بنابراین در ادامه پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آتی، تکنیک ارائه‌شده در این تحقیق برای منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به‌صورت جداگانه انجام شود، سپس براساس میزان تولید برق از هر منبع به بخش چهارگانهٔ مصرف، میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی شود. به‌علاوه مجموع هزینه‌های توسعهٔ انرژی تجدیدپذیر با دیگر منابع همراه با تحلیل حساسیت مدل و تحلیل ریسک مقایسه شود تا قوت و ضعف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نشان داده شود. شاخص‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق از دیگر محدودیت‌های این تحقیق است که پیشنهاد می‌شود شاخص‌های دیگری به بخش ریاضی و پویایی‌شناسی سیستمی اضافه و مدل اجرا شود تا میزان تولید انرژی برق از هر نیروگاه مشخص و سناریوهای مختلف تجزیه‌وتحلیل شود.

با توجه به مطالب ارائه‌شده، توسعهٔ فناوری‌های انرژی پاک و تجدیدپذیر یک ضرورت انکارناشدنی از جنبه‌های اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی است. بدون شک دست‌یابی به این ضرورت در گرو زمینه‌سازی و ایجاد ملزومات بسیاری است. دانش فنی، تکنولوژی و فناوری استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در داخل کشور باید هرچه سریع‌تر توسعه یابد و رفع محدودیت‌ها در این زمینه انجام شود.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روزافزون در قیمت منابع فسیلی، استفاده از این منابع به‌عنوان منابع سوختی جذابیت خود را از دست می‌دهد. همچنین افزایش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و پدیدهٔ گازهای گلخانه‌ای در کنار امنیت پایین انرژی این منابع، تأمین انرژی با استفاده از این منابع را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند. در این میان استفاده از تکنولوژی‌های جدید و پاک تولید انرژی برق، علاوه بر اینکه جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی در بسیاری از موارد به شمار می‌روند، در فعالیت‌های دیگری با ارزش افزودهٔ بالاتر استفاده می‌شوند. در این مطالعه جایگاه نیروگاه‌های مختلف با استفاده از معیارهای شناسایی‌شده و سه معیار اصلی اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی به‌عنوان معیارهای اصلی تحلیل شدند.

در محاسبات شاخص فنی همان‌طور که از نمودار شکل (۵) مشخص است، انرژی خورشیدی فتوولتائیک فنی (پایدارترین) منبع انرژی و انرژی نفت ناپایدارترین منبع انرژی است. برای نمونه می‌توان بیان داشت، برای کاهش گازهای گلخانه‌ای میزان برداشت از هر ۱۰ منبع (زغال‌سنگ، گاز، نفت، باد، خورشیدی، فتوولتاییک، زمین‌گرمایی، آبی، زیست توده، سیکل ترکیبی) در شاخص فنی نفت، کمترین اثر و فتوولتاییک بیشترین اثر را دارد. این رتبه‌بندی به‌وضوح نشان می‌دهد انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت توسعهٔ فناوری‌های تولید برق کشور قرارگرفته‌اند و نیاز کشور را به انرژی مرتفع می‌کنند. به عبارتی دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر فراوان و قابل‌اعتمادند و در صورتی که به‌طور صحیح توسعه یابند، به‌عنوان منابع انرژی پایدار نقش مهمی در رسیدن به اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. در محاسبات شاخص زیست‌محیطی با توجه به نمودار شکل (۶) زغال‌سنگ، نفت و گاز به‌ترتیب، آلایندگی بالاتری را ایجاد می‌کنند. دلیل اصلی تأکید بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، علاوه بر کمک به حل معضلات زیست‌محیطی و جلوگیری از هدررفتن سوخت‌های فسیلی، حفاظت از منابع طبیعی برای نسل‌های آینده است که بدون شک انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به سادگی فناوریشان نقش مهمی را دارند. بنابراین انرژی‌های تجدیدپذیر، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

References

- Aryanpur, V., & Shafiei, M. (2013). Optimal Deployment of Renewable Electricity Technologies in Iran and Their implications for Emissions Reductions. *Energy*, 91: 11. (In Persian).
- Asadi, F., Karim, M. H., & Fashari, M. (2016). Geothermal competitiveness in comparison with conventional electricity generation methods in Iran. *Iranian Journal of Energy Economics*, 15- 27. (In Persian).
- Astegiano, P., Fermi, F., & Martino, A. (2019). Investigating the impact of e_bike on model share and greenhouse emissions: a system dynamic approach. *Transportation Research Procedia*, 37, 163-170.
- Behmardi Kalantari, R., Tofighi, A., & Shafia, M. (2018). Designing a model for pricing biogas technology in Iran with a system dynamics approach. *Scientific Research Quarterly*, 4, 29-53. (In Persian).
- Chena, F., Huang, G., & Fana, Y. (2015). A linearization and parameterization approach to tri-objective linear programming problems for power generation expansion planning Energy. *Energy*, 87, 240-250.

- Hammond, W., Axsen, J., & Kjeang, E. (2020). How to slash greenhouse gas emissions in the freight sector: Policy insights from a technology-adoption model of Canada. *Energy*, 137, 111093.

- Kazemi, A., Shakuri Ganjavi, H., Abdullahpour, S., & Goldansaz, M. (2020). Economic, Social and Environmental Assessment of Electricity Generation from Renewable and Gas Technologies. *Iranian Energy Scientific-Extension Quarterly*, 23(3), 7-33. (In Persian).

- Kaihui, S., Shen, Qu., Morteza, T., Sai, Li., & Ming, Xu. (2019). Scale, distribution and variations of global greenhouse gas emissions driven by U.S. households. *Environment International*, 133, 105-137.

- Kuriyama, A., Tamura, K., & Kuramochi, T. (2019). Can Japan enhance its 2030 greenhouse gas emission reduction targets? Assessment of economic and energy-related assumptions in Japan's NDC. *Energy Policy*, 130, 328-340.

-Kramer, S. (2015). A Closer Look at Fossil and Renewable Energy Subsides. *Conference Renewable Energy in World.*

- Lean, H.H. & Smyth, R. (2010). Multivariate Granger Causality Between Electricity Generation Exports and GDP in Malaysia. *Energy*, 35, 3640-3648.

- Mousavian, M., Shakouri, H., Mashayekhi, A.N., & Kazemi, A. (2020). Does the short-term boost of renewable energies guarantee their stable long-term growth? Assessment of the dynamics of feed-in tariff policy. *Renewable energy*, 159, 1252–1268. (In Persian).

- Saffari, B. (2013). Optimal Electricity Supply using Multi-Stage Interval Stochastic Programming (Iran). *PhD Thesis University of Isfahan Department of Economics*. (In Persian).

-Setiawan, I.C., Indarto., & Deendarlianto. (2019). System Dynamics Modeling of Indonesia Road Transportation Energy Demand and Scenario Analysis to achieve National Energy Policy Target. *Materials Science and Engineering* , 546, 052070.

- Soltani, M. (2017). Development of a Model for Development Planning Emphasizing on Environment, Energy and Economy Based on Analytical Hierarchy process and Fuzzy Goal Programming. *MSc Thesis University of Qom.* (In Persian).

-Shakouri G, H., & Aliakbarisani, S. (2016). At what valuation of sustainability can weabandon fossil fuels? A comprehensive multistage decision support model for electricity planning. *Energy*, 107, 60–77. (In Persian).

-Yarmohammad, M.H. (2014). Provide energy resource management model. *Energy Studies Mining Industry*. (In Persian).

- Yáñez, E., Ramírez, A., Núñez-López, V., Castillo, E., & Faaij, A. (2020). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 94,* 102938.

پیوست ۱

جدول معادلات نمودار حالت و جریان

Table of equations of state and flow diagrams

CO2 generated by agricultural sector= 34309.6 Units: Ton/day	EEI= INTEG (Increase rate of EEI, 0)
CO2 generated by household, commercial, and general consumers= 382205 Units: Ton/day	EEIbiomass = 0.72
CO2 generated by industrial consumers= 258800 Units: Ton/day	EEIcoal= 11.741
CO2 generated by refinary sector= 41246.6 Units: Ton/day	EEIconsumer= 365.10
CO2 generated by transportation sector= 406740 Units: Ton/day	EEIgas = 7.952
Conversion factor of generated co2 by consumers= 476742 Units: **undefined※※	EEIgeothermal= 0.61
FI= INTEG (Increase rate of FI, 0)	EEIoil= 8.717
FIbiomass= 0.238868	EEIsolar cells= 0.794
FIcoal= 0.16229	EEIsolar thermal=0.794
FIconsumers= 365.08	EEIwater= 0.814
FIconsumers= 365.08	EEIwind= 0.407
FIconsumers= 365.08	FIsolar cells= 0.971846
FIconsumers= 365.08	FIsolar thermal= 0.4579
FIconsumers= 365.08	FIwater =0.287262
FIgas= 0.161587	FIwind=0.239653
FIgeothermal= 0.229093	
FIoil= 0.212325	

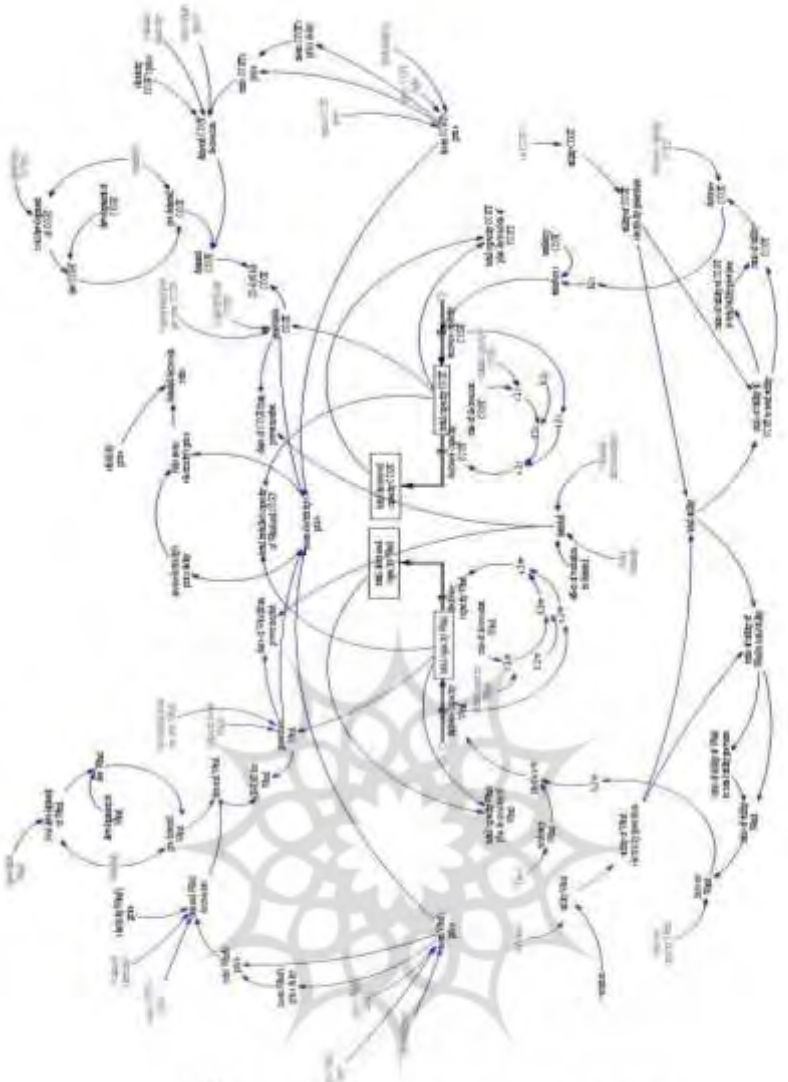
Increase rate of EEI= EEIbiomass*Xbiomass+EEIcoal*Xcoal+EEIgas*Xgas+EEIgeothermal*Xgeothermal+EEIoil※Xoil+EEIsolar cells*Xsolar cells+EEIsolar thermal※Xsolar thermal+EEIwater*Xwater+EEIwind*Xwind+Percentage of carbon production by consumer sector※EEIconsumers

Increase rate of FI= FIbiomass*Xbiomass+FIcoal*Xcoal+FIgas*Xgas+FIgeothermal*Xgeothermal+FIoil※Xoil+FIsolar cells*Xsolar cells+FIsolar thermal※Xsolar thermal+FIwater*Xwater+FIwind*Xwind+Percentage of carbon production by consumer sector※FIconsumers

Percentage of carbon production by consumer sector=Total CO2 generated by consumers/(100*Conversion factor of generated co2 by consumers)

Xbiomass=0.03	Xcoal=0.1
Xgas=0.2	Xgeothermal0.05=
Xoil=0.3	Xsolar cell=0.1
Xsolar thermal= 0.02	Xwater=0.1
Xwind= 0.1	

پیوست ۲



مدل انباشت جریان

Flow accumulation model

[1]- Kramer, susan
[2]- Paola Astegiano
[3]- Chena
[4]- Kuriyama
[5]- Kaihui Song
[6]- Greenhouse Gases
[7]- Setiawan
[8]- Lean and Smyth
[9]- Hammond
[10]- Yanez
[11]- Technical Index
[12]- Financial Index
[13]- Gross Domestic Product
[14]- Combined Cycle
[15]- Environment Energy Index
[16] - Base
[17]- Scenario
[18]- Calibration
[19]- Reproduction
[20]- Structure Assessment