Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 12, Serial Number 48, Winter 2023, Pages 9-35 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.12.4.9

Power Industry's Life Cycle Simulation using Agent Based Modeling

Mohammad Farah Bakhsh[*], Mahmoud Modiri[**], Seyed Mohammad Ali Khatami Firozabadi[***], Alireza Pour Ebrahimi[****]

Abstract

In this paper we try to simulate the life cycle of the electricity industry using the agent-based simulation method. For this purpose, 5 Agents were mentioned and they were simulated by Anylogic software .Then, four scenarios were investigated with experts' opinions. In the first scenario, it is assumed that the attractiveness of gas power and combined has been reduced and the attractiveness of the other two power has been added, the result of this scenario is the increase in hydroelectric power production, which is not cost effective due to the lack of water resources for the country. In the second scenario, with the arrival of a new technology, the household consumer decreased by 40%, and hydro and steam power with a capacity of 40% were working in the power generation cycle, the result of this scenario is the reduction of fuel consumption and also the shortage of electricity produced relative to the electricity consumption. In the third scenario, it is assumed that the consumption rate of all consumer factors has decreased, which results in the lack of investor factor investment. the fourth scenario assumes that all consumers' consumption is constant, as well as keeping the attractiveness developed by the government steady. As a result, the capacity of electricity generation has increased, but we are still facing power shortages.

Keywords: Product Life Cycle; Simulation; Agent Based Simulation (ABMS); Optimization; Power Industry.

Received: Apr. 22, 2022; Accepted: Aug. 05, 2022.

* Ph.D student in Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
** Assistant Professor, Department of Industrial Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding Author).
Email: m_modiri@azad.ac.ir
*** Professor, Department of Industrial Management, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran.
**** Assistant Professor, Department of Industrial Management, Karaj Branch, Islamic Azad University, Alborz, Iran.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال دوازدهم، شماره ۴۸، زمستان ۱۴۰۱، ص‌ص ۹ – ۳۵ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.12.4.9

شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان

محمد فرح‌بخش*، محمود مدیری، سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی***، علیرضا پورابراهیمی*****

چکیده

در این پژوهش سعی می‌شود مدلی برای شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان ارائه شود، در این مدل، ۵ عامل استخراج شد و شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار Anylogic صورت پذیرفت. برای بهینه‌سازی مدل چهار سناریو با نظر خبرگان ارائه شد. در سناریوی نخست، جذابیت نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی کاهش یافت و بر جذابیت دو نیروگاه دیگر افزوده شد. نتیجه این سناریو افزایش تولید نیروگاه برق آبی است که با توجه به کمبود منابع آبی برای کشور به‌صرفه نیست. در سناریوی دوم با ورود یک فناوری جدید میزان مصرف، مصرف‌کننده خانگی ۴۰ درصد کاهش یافت و همچنین دو نیروگاه برق آبی و بخار با ظرفیت ۴۰ درصد در چرخه تولید فعال بودند. نتیجه این سناریو کاهش مصرف سوخت و همچنین کمبود برق تولیدی نسبت به برق مصرفی بود. در سناریوی سوم فرض شد که میزان مصرف همه عوامل مصرف‌کننده کاهش یافته که به عدم‌سرمایه‌گذاری عامل سرمایه‌گذار و مازاد برق تولیدی نسبت به مصرفی منجر شد. درنهایت در سناریوی چهارم فرض بر ثابت نگه‌داشتن میزان مصرف همه مصرف‌کننده‌ها و و ثابت نگه‌داشتن جذابیت‌های تدوین‌شده توسط دولت است که درنتیجه آن ظرفیت تولید برق افزایش یافته ؛ ولی باز هم کمبود برق وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: چرخه عمر محصول؛ شبیه‌سازی؛ شبیه‌سازی عامل‌بنیان (ABMS)؛ بهینه‌سازی ؛ صنعت برق.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴.

* دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

** استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

Email: m_modiri@azad.ac.ir

*** استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.

**** استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران.

۱. مقدمه

امروزه در بازار رقابتی، شرکت‌ها و سازمان‌ها به‌دنبال آن هستند تا با طراحی اثربخش و کارای عملیات سیستم، راه‌های جدیدی برای جلوگیری از اتلاف بیابند. به‌بیان‌دیگر به دنبال استفاده از روش‌ها و ابزارهایی برای بهینه‌سازی عوامل کلیدی سیستم هستند تا بدین‌وسیله اثربخشی را افزایش دند و بتوانند درصحنه رقابت دوام بیاورند. شبیه‌سازی رایانه‌ای اثربخش‌ترین ابزار برای طراحی و تحلیل سیستم‌ها است [۱۲]. با توجه به گسترش سطح فعالیت سازمان‌ها و با درنظرگرفتن محیط پویای امروزی، صنایع گوناگون ازجمله صنعت برق، برای افزایش سودآوری و بهره‌وری، کسب‌وکار خود را روی مهندسی، مونتاژ و ارائه خدمات به مشتریان متمرکز کرده‌اند.

امروزه شرکت‌ها به‌دنبال الگوهای جدید برای ایجاد ارزش از طریق گرایش مشتری، مدیریت سیستم و خدمات در چرخه عمر خود هستند. چرخه عمر عبارت است از: دوره‌ای که نخستین محصول وارد بازارشده تا زمانی که محصول از رده خارج می‌شود و سهم بازار خود را به سایر رقبا واگذار می‌کند. ازآنجاکه هدف اصلی شرکت‌ها کسب سود در بازار است؛ بنابراین مدیریت چرخه عمر و طراحی پایدار آن امری مهم و حیاتی خواهد بود. یک محصول در طول عمر خود از دوره‌های متفاوتی عبور خواهد کرد. از زمان تولد تا ورودش به بازار گرفته تا زمانی که تقریباً از بازار خارج می‌شود. بدیهی است که طی این دوره‌ها، نه‌تنها تقاضای مشتری تغییر می‌کند، بلکه توقع آن‌ها از کیفیت محصول نیز افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در زمان معرفی محصول به بازار مشتریان تقاضای کمتری دارند؛ ولی توقع آنان از کیفیت محصول بالا است. با توجه به مطالب مطرح‌شده می‌توان عنوان داشت که چرخه عمر محصول فرآیندی است که از زمان شروع فرآیند تولید، یعنی استخراج و آماده‌سازی منابع تا تولید و ارائه محصول به بازار را بررسی و تحلیل می‌کند [۶].

هر یک از مراحل چرخه عمر محصول، فرصت‌ها و تهدیدهای مختلفی را پیش روی یک شرکت قرار می‌دهد و به این ترتیب بر استراتژی آن شرکت و همچنین طرح‌های بازاریابی آن تأثیر خواهد گذاشت. با درک ویژگی‌های مراحل چرخه عمر، یک شرکت می‌تواند به شکل بهتری اهداف عملیاتی خود را تعیین و استراتژی‌ها و طرح‌های خود را طراحی کند [۷].

بر اساس پژوهش‌ها و مطالعات صورت‌گرفته، رویکرد چرخه عمر محصول و پارادایم شبیه‌سازی عامل‌بنیان هریک نوعی ابزار برای مدیریت سیستم هستند. هر دوی این ابزارها سعی در بررسی رابطه، تعامل و نحوه اثرگذاری عوامل بر یکدیگر را دارند.

با اینکه دو روش LC[1] و ABM[2] دو ابزار متفاوت هستند، ولی از نظر ریشه و بنیان عملکرد با یکدیگر شباهت‌هایی دارند [۷].

1. Life Cycle
2. Agent Based Modeling

چرخه عمر، تعامل بین عوامل موجود در زنجیره تأمین را بررسی می‌کند؛ درحالی‌که شبیه‌سازی عامل‌بنیان دید گسترده‌تری نسبت به سیستم دارد و تعامل و ارتباط بین همه عوامل در سیستم را موردبررسی قرار می‌دهد.

مدل‌سازی عامل بنیان یک رویکرد شبیه‌سازی است که مطالعه سیستم‌های پیچیده و پویایی را که از تعداد بالایی از عوامل (Agent) ناهمگن تشکیل شده است را تسهیل می‌کند که این سیستم‌ها را نمی‌توان از طریق سایر روش‌های شبیه‌سازی، تجزیه‌وتحلیل کرد. در مقایسه با سایر رویکردهای مدل‌سازی، شبیه‌سازی عامل‌بنیان روشی کامل‌تر است؛ به‌طوری‌که تا اوایل دهه ۲۰۰۰، صرفاً یک مفهوم علمی بدون کاربرد واقعی در نظر گرفته می‌شد. کاربرد این روش مدل‌سازی بین سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ توسط پژوهشگران آغاز شد و دلایل آن عبارت بودند از:

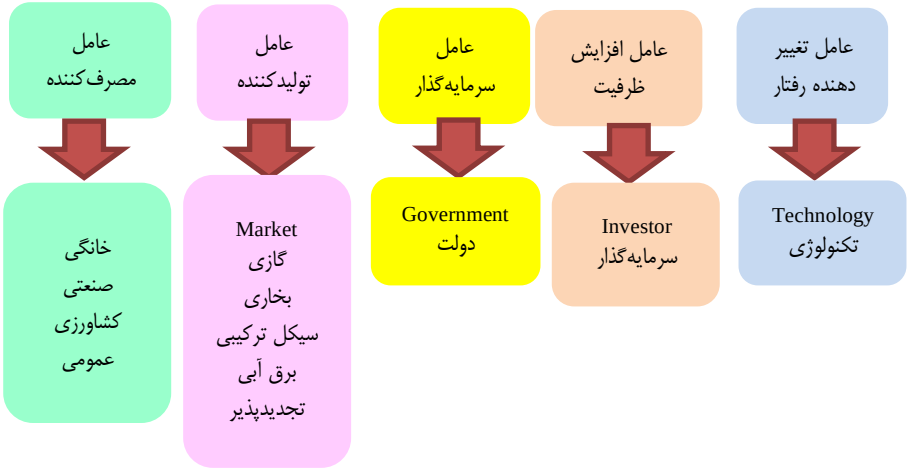
۱. احساس نیاز به اشراف با عمق بیشتر در رفتار سیستم‌ها که در دو روش قبلی میسر نبود؛

۲. توسعه و پیشرفت در تکنیک‌های مدل‌سازی برگرفته از علوم رایانه‌ای نظیر مدل‌سازی شی‌گرا و نمودارهای حالت UML.

رشد سریع در قدرت پردازش در شبیه‌سازی عامل‌بنیان به سرعت پردازش و حافظه بیشتری نسبت به دو رقیب سنتی خود که شبیه‌سازی گسسته پیشامد و سیستم دینامیک است، نیاز دارد. برای این شیوه مدل‌سازی یک زبان شیوه استاندارد وجود ندارد و ساختار عامل‌بنیان بر پایه ویرایشگرهای گرافیکی یا دستورات مرتبط است که در نرم‌افزارهای مربوطه مانند Anylogic و Netlogo تعریف شده است [۱۷].

با مطالب عنوان‌شده در این پژوهش سعی شد تا چرخه عمر صنعت برق با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان مدل‌سازی شود. در این راستا ابتدا ابعاد مختلف چرخه عمر صنعت برق در کشور بررسی و سپس با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عامل‌بنیان، مدلی برای بررسی ابعاد مختلف این چرخه و راهکارهایی برای تأمین مگاوات ساعت برق مورد نیاز مصرف‌کنندگان این صنعت (خانگی، صنعتی، کشاورزی و عمومی) ارائه می‌شود.

در ادامه برای شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق و بررسی تعامل بین عوامل تأثیرگذار بر آن پنج عامل با بررسی این صنعت و نظرخواهی از خبرگان به شرح شکل ۱، ارائه شده است.



شکل ۱. عامل‌های شبیه‌سازی عامل‌بنیان

برای ساخت مدل شبیه‌سازی ابتدا اطلاعات مربوط به عامل تولیدکننده و عامل مصرف‌کننده از گزارش ۵۳ ساله صنعت برق استخراج و به‌عنوان داده اولیه در مدل شبیه‌سازی ساخته‌شده به کمک نرم‌افزار Anylogic وارد شد [۵].

برای شبیه‌سازی مدل باید اطلاعات استخراج‌شده که شامل مگاوات ساعت برق مصرفی عامل تولیدکننده که در چهار بخش صنعتی، خانگی، کشاورزی و عمومی است، بررسی و پس از اجرای مدل میزان کمبود برق مصرفی در مقابل برق تولیدی شناسایی می‌شود؛ سپس با توجه به آن راهکاری برای برطرف‌ساختن این معضل ارائه خواهد شد.

توجه به این نکته نیز قابل‌توجه است که برای تأمین کمبود برق مصرفی عامل مصرف‌کننده، عوامل دیگری نیز تأثیرگذار هستند. برای مثال، اگر بدون درنظرگرفتن تأثیرات آلودگی هوا و میزان مصرف سوخت‌های فسیلی، تولید برق در نیروگاه‌های فسیلی (سیکل ترکیبی و گازی) افزایش یابد، ممکن است مگاوات ساعت برق موردنیاز تأمین شود؛ ولی از طرف دیگر معضل دیگری برای کشور پدید می‌آید؛ بنابراین باید در جهت افزایش تولید برق نیروگاه‌های فعال در صنعت برق عواملی مانند آلودگی هوا، مصرف سوخت‌های فسیلی، کمبود منابع آبی، تعداد نیروگاه‌های دردسترس و غیره مدنظر قرار گیرد و با ارائه سناریوهای منتخب توسط خبرگان شرایط بررسی شود.

با توجه به مطالب عنوان‌شده، برای شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق با توجه به اینکه بخش اعظمی از نیروگاه‌های فعال تحت سیطره بخش دولتی هستند، نقش عامل سرمایه‌گذار به‌عنوان عامل تعیین‌کننده وضعیت برق تولیدی نسبت به سایر عوامل پررنگ‌تر در نظر گرفته می‌شود و می‌توان با اعمال تغییرات در این عامل، سناریوهای مختلفی را بررسی کرد.

طبق مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده در زمینه پیشینه چرخه عمر و شبیه‌سازی عامل‌بنیان می‌توان گفت که به کمک این دو ابزار می‌توان نحوه تعامل بین عوامل موجود در مدل و همچنین نحوه اثرگذاری آن‌ها بر یکدیگر را بررسی و شناسایی کرد.

با توجه مطالب عنوان‌شده، در ادامه مدل شبیه‌سازی واقع‌گرایانه چرخه عمر صنعت برق با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان مطالعه و ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زاپکو[1] (۲۰۲۱)، با استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌سازی عامل‌بنیان به ارزیابی وضعیت چرخه عمر به‌منظور ارزیابی قرارگیری پالایشگاه زیستی پرداخت. به عقیده وی استفاده از مدل‌سازی عامل-بنیان و ارزیابی پایداری چرخه عمر به‌عنوان بخشی از یک روش یکپارچه امکان ارزیابی بهینه اثرات احتمالی را فراهم می‌آورد [۱۷].

سولیس[2] و همکاران (۲۰۲۱)، مدل بهینه‌سازی چرخه عمر محصول چندهدفه یک پالایشگاه زیستی جلبکی یکپارچه را به کمک یک اقتصاد زیستی دورانی پایدار با درنظرگرفتن گردش مجدد منابع ارائه دادند. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جدید با تمرکز بر یک پالایشگاه زیستی جلبکی توسعه داده شد که به‌طور هم‌زمان هزینه و اثرات زیست‌محیطی را بهینه کرده، اصل بازیابی منابع و گردش مجدد را اتخاذ می‌کند و روش ارزیابی چرخه عمر را برای محاسبه مناسب اثرات زیست‌محیطی سیستم ترکیب می‌سازد [۱۵].

دیاز[3] و همکاران (۲۰۲۱)، پژوهشی با عنوان «توسعه پایدار محصول در اقتصاد دایره‌ای: پیامدهای مربوط به محصولات، بازیگران، پشتیبانی تصمیم‌گیری و مدیریت اطلاعات چرخه عمر محصول» انجام دادند. در این پژوهش، فرآیند توسعه پایدار محصول (SPD) که در آن حدود ۸۰ درصد از تأثیر کل محیط‌زیست یک محصول تعیین می‌شود، برای ترجمه استراتژی‌های R به نیازهای جدید محصول مورداستفاده قرار گرفت. این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای اتخاذ استراتژی R برای تصمیم‌گیری در توسعه پایدار محصول موردبررسی قرار گرفته است [۴].

راند[4] و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی و مطالعه «مدل‌سازی عامل‌بنیان انتشار بازار محصول جدید: مروری بر نقاط قوت و انتقادات» پرداختند. هدف از این پژوهش، تشویق پژوهشگران به توجه بیشتر به مدیریت نوآوری با رویکرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی عامل‌بنیان به‌عنوان شیوه‌ای برای دستیابی به بینش عمیق‌تر در مورد رفتار بازار و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر بود. نتایج مطالعه مروری پژوهش نشان می‌دهد که حوزه‌های مختلفی از انتشار بازار محصول جدید و مدیریت

1. Zupko
2. Solis
3. Diaz
4. Rand

نوآوری، در محدوده وسیع‌تری دردسترس است که برای تجزیه‌وتحلیل آن‌ها می‌توان از شبیه‌سازی و مدل‌سازی عامل‌بنیان بهره گرفت [۱۴].

کوک[1] و همکاران (۲۰۲۰)، پژوهشی با عنوان «رویکردی برای معیارهای پایداری و شبیه‌سازی داده‌های چرخه عمر محصول در انتخاب مفهوم» ارائه دادند. این پژوهش نشان داد که شرکت‌ها به شناسایی جنبه‌های پایداری مرتبط از طریق استراتژی، ارزیابی کمّی راه‌حل‌های جایگزین و ایجاد معاملات، مشغول هستند. این پژوهش نتایج یک مطالعه تجویزی با یک شرکت هوافضا را مطرح می‌دارد و رویکرد معیارهای پایداری و چرخه عمر محصول را برای شبیه‌سازی داده‌ها[2] ارائه می‌کند [۸].

املی[3] و همکاران (۲۰۱۹)، پژوهشی با عنوان، «یک مدل شبیه‌سازی بهینه‌سازی برای طراحی محصول پایدار و مدیریت کارآمد پایان عمر بر اساس مسئولیت تولیدکننده فردی» انجام دادند. در این پژوهش مسئله تصمیم‌گیری، به‌معنای انتخاب جایگزین طراحی و تعیین گزینه EOL برای خانواده‌ای از محصولات بر اساس مسئولیت تولیدکننده فردی در کل چرخه عمر با درنظرداشتن عدم‌قطعیت‌های احتمالی ادغام شده است [۱]

نیون[4] و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل شبیه‌سازی عامل‌بنیان از پریشانی مالی شرکت برای مراحل مختلف چرخه عمر محصول ارائه دادند. در این پژوهش یک مدل شبیه‌سازی عامل‌بنیان جدید برای شبیه‌سازی علل و فرآیندهای پریشانی مالی شرکت پیشنهاد شده است. چارچوب کلی مدل ارائه‌شده دربرگیرنده چهار عامل، محیط سازمانی، محصول، بانک و محیط کلان تدوین است. با بررسی علل مختلف درماندگی مالی در مراحل مختلف چرخه عمر شرکت، مدل شبیه‌سازی مطرح‌شده در چهار دوره چرخه عمر محصول که به‌ترتیب مربوط به مراحل شروع، رشد، بلوغ و چرخه عمر زوال هستند، اجرا شد؛ سپس مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و وضعیت واقعی در چهار بخش چرخه عمر محصول پیشنهادی صورت گرفت که این بررسی‌ها نشان داد مدل شبیه‌سازی پیشنهادی ابزاری امیدوارکننده برای تجزیه‌وتحلیل جامع علل و فرآیندهای پریشانی مالی است [۱۱].

پوه[5] و همکاران (۲۰۱۹)، مقاله‌ای با عنوان«بهینه‌سازی چرخه عمر محصول برای تولید دستکش پلاستیکی» منتشر کردند. در مقدمه مقاله بیان شده است که تولید دستکش‌های پلاستیکی ممکن است اثرات زیست‌محیطی نامطلوبی بر محیط‌زیست داشته باشد که ازجمله آن‌ها می‌توان به گرم‌شدن کره زمین، انتشار گازکربن، اسیدی‌شدن، تشکیل اُزون فتوشیمیایی اشاره کرد؛ بنابراین

1. Kwok
2. SCADS
3. Ameli
4. Niven
5. Poh5.

ارزیابی چرخه عمر محصول به‌عنوان یک ابزار مدیریتی برای ارزیابی کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده می‌شود. در این راستا در این مقاله برای بهینه‌سازی چرخه حیات برای به حداقل‌رساندن مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تعداد پنج سناریو در راستای بهبود فرآیند مطرح و بررسی شد [۱۳].

لی[1] و همکاران (۲۰۱۵)، پژوهشی با عنوان «طراحی چرخه عمر محصول برای ایجاد ارزش پایدار: روش‌های توسعه پایدار محصول در زمینه مهندسی با ارزش بالا» ارائه دادند. این پژوهش با استفاده از رویکردهای مبتنی بر چرخه عمر همراه با روش‌های مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل ارزش پایدار، چارچوبی برای توسعه پایدار محصول در زمینه مهندسی با ارزش بالا ارائه می‌دهد. در این مطالعه یک مدل ارزش پایدار بر اساس درک ارزش از دیدگاه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مطرح شده است [۹]. والتر[2] و همکاران (۱۶)، در پژوهشی به بهینه‌سازی محصول ـ هزینه در مراحل اولیه چرخه عمر محصول پرداختند. این پژوهش نشان داد درحالی‌که مفاهیم نظری برای روش‌های هزینه‌یابی محصول در طول دهه‌ها تکامل یافته، ولی تأکید کمی بر ادغام آن‌ها در سیستم‌های اطلاعاتی مدرن شده است [۱۶].

ماندا[3] و همکاران (۲۰۱۶)، به مطالعه ایجاد ارزش با ارزیابی چرخه زندگی: روشی برای زمینه‌سازی استفاده از ارزیابی چرخه عمر در شرکت‌های شیمیایی برای ایجاد ارزش پایدار پرداختند. در این پژوهش بیان شد که فرصت‌های ایجاد ارزش شامل کاهش هزینه، کاهش ریسک، تمایز محصول و محصولات جدید برای رفع نیازهای ارضا نشده است. با این‌حال ارتباط جنبه‌های مختلف پایداری از یک شرکت به شرکت دیگر به نوع و حیطه فعالیت آن شرکت بستگی دارد [۱۰].

چائو[4] و همکاران (۲۰۱۵)، پژوهشی با عنوان «مروری بر ارزیابی چرخه زندگی، ارزیابی انرژی چرخه زندگی و ارزیابی انتشار کربن چرخه عمر در ساختمان‌ها» ارائه دادند. در این پژوهش مروری، سه جریان از مطالعات چرخه عمر مطرح شده است که اغلب برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ساخت‌وساز ساختمان با تمرکز عمده بر اینکه آیا می‌توان از آن‌ها برای تصمیم‌گیری استفاده کرد یا خیر، استفاده می‌شوند. این سه جریان عبارت‌اند از: ارزیابی چرخه حیات، ارزیابی انرژی چرخه حیات و ارزیابی انتشار کربن چرخه زندگی. آن‌ها با اهداف ارزیابی، روش‌شناسی و یافته‌هایشان مقایسه شدند [۳].

1. Li
2. Walter
3. Manda
4. Chau

پرسش‌های پژوهش

۱. چگونه می‌توان مدلی با رویکرد شبیه‌سازی عامل‌بنیان برای بررسی چرخه عمر صنعت برق ارائه داد تا بتواند کمبود مگاوات برق تولیدی نیروگاه‌های فعال این صنعت را مرتفع سازد؟

۲. چگونه می‌توان اعتبار مدل را اثبات کرد؟

۳. روش‌شناسی پژوهش

هدف از پژوهش حاضر ارائه مدل شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق به کمک پارادایم شبیه‌سازی عامل‌بنیان است. این پژوهش از نظر پیامد، از نوع کاربردی و از نظر هدف از نوع تحلیلی است. داده‌های این پژوهش بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی اطلاعات و اسناد نیروگاه‌های کشور (گازی، بخاری، سیکل ترکیبی، برق آبی و تجدید پذیر) جمع‌آوری شده است [۵]. جامعه موردمطالعه در پژوهش حاضر مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان صنعت برق در کشور ایران هستند که اطلاعات موردنیاز به شرح زیر از گزارش ۵۳ ساله صنعت برق استخراج‌شده است [۵]:

نخستین عامل موردبررسی در این پژوهش عامل مصرف‌کننده است (جدول ۱) که به چهار بخش مصرف‌کننده خانگی، مصرف‌کننده صنعتی، مصرف‌کننده کشاورزی و مصرف‌کننده عمومی (عمومی+روشنایی معابر+سایر) تقسیم‌بندی می‌شود. اطلاعات این عامل در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ به شرح جدول ۱، است.

جدول ۱. میزان مگاوات ساعت برق مصرفی عامل‌های مصرف‌کننده

سال	خانگی	عمومی	سایر	صنعتی	کشاورزی	روشنایی معابر	مجموع
۱۳۹۰	۵۶۷۷۴	۱۶۷۵۱	۱۲۶۶۴	۶۳۹۴۴	۳۰۰۲۰	۳۷۵۲	۱۸۳۹۵
۱۳۹۱	۶۱۳۵۱	۱۷۸۱۰	۱۲۵۹۹	۶۷۱۰۷	۳۱۶۶۷	۳۶۳۵	۱۹۴۱۴۹
۱۳۹۲	۶۴۳۷۹	۱۷۸۳۱	۱۳۳۷۷	۷۰۷۳۳	۳۳۱۰۳	۳۷۶۵	۲۰۳۱۸۸
۱۳۹۳	۷۱۱۶۳	۱۹۷۶۷	۱۵۴۰۴	۷۴۴۵۶	۳۵۱۸۸	۳۸۳۷	۲۱۹۸۱۵
۱۳۹۴	۷۶۱۰۳	۲۲۱۹۶	۱۶۶۸۰	۷۲۷۰۵	۳۶۰۸۹	۴۰۱۷	۲۲۷۷۹۰
۱۳۹۵	۷۸۳۷۸	۲۲۹۱۴	۱۷۶۲۰	۷۷۷۲۷	۳۶۲۲۲	۴۶۹۹	۲۳۷۵۶۰
۱۳۹۶	۸۳۴۰۳	۲۴۳۲۸	۱۸۶۸۱	۸۴۱۴۵	۳۹۳۷۹	۵۰۱۷	۲۵۴۹۵۳
۱۳۹۷	۸۵۰۹۹	۲۴۰۷۳	۱۸۹۹۰	۸۸۵۴۱	۳۸۰۳۳	۴۹۸۸	۲۵۹۷۲۴
۱۳۹۸	۸۸۵۰۰	۲۵۵۸۹	۲۰۱۴۳	۹۷۰۸۱	۳۸۷۶۴	۵۰۱۷	۲۷۵۰۹۴

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، برای مثال در سال ۱۳۹۰ سهم مصرف برق برای مشترکین خانگی ۳۰ درصد، برای مشترکین عمومی ۹ درصد، برای سایر مشترکین ۶ درصد، برای مشترکین

صنعتی ۳۴ درصد، برای مشترکین کشاورزی ۱۶ درصد و برای روشنایی معابر ۲ درصد است؛ بنابراین با توجه به اعداد محاسبه‌شده ازآنجاکه سهم مصرفی مشترکین عمومی، سایر و روشنایی معابر، درصد بسیار کمی است، برای سهولت محاسبه در مدل، این سه مشترک به‌صورت یکجا با عنوان «مشترک عمومی» در نظر گرفته می‌شود.

عامل بعدی شناسایی‌شده در چرخه عمر صنعت برق عامل تولیدکننده است که شامل نیروگاه‌های فعال در صنعت برق است که عبارت‌اند از: نیروگاه بخاری؛ نیروگاه گازی؛ نیروگاه سیکل ترکیبی؛ نیروگاه برق آبی و نیروگاه تجدید پذیر که اطلاعات استخراج‌شده از مگاوات برق اسمی و تولیدی این نیروگاه‌ها به شرح جدول ۲، است.

جدول ۲. ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور (مگاوات ساعت)

سال	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	برق آبی	تجدیدپذیر
۱۳۹۰	۱۵۸۲۲	۲۴۳۴۲	۱۴۷۸۰	۸۷۴۵	۱۱۱۶
۱۳۹۱	۱۵۸۳۰	۲۶۰۰۳	۱۵۷۴۴	۹۷۴۵	۱۱۸۱
۱۳۹۲	۱۵۸۳۰	۲۴۷۱۵	۱۷۸۵۰	۱۰۲۶۵	۱۱۵۲
۱۳۹۳	۱۵۸۳۰	۲۶۴۲۰	۱۸۴۹۴	۱۰۷۸۵	۱۱۴۰
۱۳۹۴	۱۵۸۳۰	۲۶۸۷۰	۱۸۴۹۴	۱۱۲۷۸	۱۱۴۰
۱۳۹۵	۱۵۸۳۰	۲۷۸۹۰	۱۹۴۷۰	۱۱۵۷۸	۱۱۳۰
۱۳۹۶	۱۵۸۲۹	۲۵۹۱۹	۲۳۱۶۶	۱۱۹۵۳	۱۱۲۷
۱۳۹۷	۱۵۸۲۹	۲۵۵۵۲	۲۴۹۹۶	۱۲۰۲۶	۱۱۲۷
۱۳۹۸	۱۵۸۲۹	۲۶۱۸۰	۲۷۱۳۰	۱۲۱۹۱	۱۱۱۹

منظور از ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها، میزان مگاوات برق تولیدی این نیروگاه‌ها در شرایط ایده‌آل است. توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که سه نوع نیروگاه بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به‌صورت مشترک توسط بخش دولتی و خصوصی اداره می‌شوند؛ ولی دو نیروگاه برق آبی و تجدیدپذیر فقط تحت سیطره بخش دولتی است که در این پژوهش برای سهولت کار مجموع مگاوات ساعت برق تولیدی این دو نیروگاه به‌عنوان ورودی در مدل قرار گرفت. در ادامه ظرفیت عملی نیروگاه‌ها در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳. ظرفیت عملی نیروگاه‌های کشور (مگاوات ساعت)

سال	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	برق آبی	تجدیدپذیر
۱۳۹۰	۱۵۳۲۳	۱۹۹۱۱	۱۲۱۶۶	۸۷۴۵	۱۱۱۶
۱۳۹۱	۱۵۳۱۲	۲۱۲۰۴	۱۲۹۹۸	۹۷۴۵	۱۱۸۱
۱۳۹۲	۱۵۳۱۵	۲۰۰۴۸	۱۴۸۱۴	۱۰۲۶۵	۱۱۵۲
۱۳۹۳	۱۵۲۵۲	۲۱۳۶۸	۱۵۱۰۵	۱۰۷۸۵	۱۱۴۰
۱۳۹۴	۱۵۲۱۰	۲۱۶۳۰	۱۵۱۱۲	۱۱۲۸۷	۱۱۴۰
۱۳۹۵	۱۵۲۱۰	۲۲۴۴۷	۱۵۸۵۷	۱۱۵۸۷	۱۱۳۰
۱۳۹۶	۱۴۸۹۲	۲۰۸۷۶	۱۸۸۲۸	۱۱۹۵۳	۱۱۲۷
۱۳۹۷	۱۴۸۵۲	۲۰۷۷۲	۲۰۲۶۵	۱۲۰۲۶	۱۱۲۷
۱۳۹۸	۱۴۸۹۲	۲۱۳۶۲	۲۲۰۶۷	۱۲۱۹۲	۱۱۱۹

منظور از ظرفیت عملی تولیدی نیروگاه‌ها درواقع میزان مگاوات برق تولیدی است که در اختیار مصرف‌کنندگان (خانگی، صنعتی، کشاورزی و بخش عمومی) قرار گرفته است. به‌بیان‌دیگر منظور از ظرفیت عملی، میزان مگاوات برق تولیدی محقق‌شده در طول یک سال است. حالت بهینه تولید برق در نیروگاه‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که ظرفیت اسمی با ظرفیت عملی برابر باشد که این امر در نیروگاه‌های برق آبی و سیکل ترکیبی محقق شده است؛ ولی در مورد سه نیروگاه دیگر بخاری، گازی و سیکل ترکیبی هنوز اختلاف بین ظرفیت اسمی و عملی وجود دارد؛ برای ورود اطلاعات به مدل شبیه‌سازی‌شده به کمک نرم‌افزار Anylogic انحراف بین ظرفیت اسمی و عملی از طریق تابع توزیع مثلثی محاسبه می‌شود (جدول ۴).

جدول ۴. درصد مقدار مگاوات برق تولیدی تحقق‌یافته اسمی به عملی

سال	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	برق آبی	تجدیدپذیر
۱۳۹۰	۰/۹۶۸۴۶۲	۰/۸۱۷۹۶۹	۰/۸۲۳۱۳۹	۱	۱
۱۳۹۱	۰/۹۶۷۲۷۷	۰/۸۱۵۴۴۴	۰/۸۲۵۵۸۴	۱	۱
۱۳۹۲	۰/۹۶۷۴۶۷	۰/۸۱۱۱۶۷	۰/۸۲۹۹۱۶	۱	۱
۱۳۹۳	۰/۹۶۳۴۸۷	۰/۸۰۸۷۸۱	۰/۸۱۶۷۵۱	۱	۱
۱۳۹۴	۰/۹۶۰۸۳۴	۰/۸۰۴۹۸۷	۰/۸۱۷۱۳	۱	۱
۱۳۹۵	۰/۹۶۰۸۳۴	۰/۸۰۴۸۴	۰/۸۱۴۴۳۲	۱	۱
۱۳۹۶	۰/۹۴۰۸۰۵	۰/۸۰۵۴۳۲	۰/۸۱۲۷۴۳	۱	۱
۱۳۹۷	۰/۹۴۰۸۰۵	۰/۸۱۲۹۳	۰/۸۱۰۷۳	۱	۱
۱۳۹۸	۰/۹۴۰۸۰۵	۰/۸۱۵۹۶۶	۰/۸۱۳۳۸	۱/۰۰۰۸۲	۱

ازآنجاکه در مبحث چرخه عمر صنعت برق مسئله آلودگی محیطی و تأثیرات ناشی از آن نیز حائز اهمیت است، در این پژوهش میزان کربن تولیدی از این نیروگاه‌ها نیز مدنظر قرار خواهد گرفت؛ بدین معنا که در زمان ورود عامل سرمایه‌گذار به مدل و انتخاب نیروگاه برای تأمین برق، میزان کربن تولیدی آن نیروگاه و عوامل زیست‌محیطی هم مدنظر قرار می‌گیرد (جدول ۵).

جدول ۵. میزان سوخت مصرفی نیروگاه‌ها در صنعت برق

سال	سوخت مایع (Liquid) لیتر (Lit)		سوخت گازی (Gas) مترمکعب (M^3)	مجموع سوخت مایع (Lit)	مجموع سوخت گازی (M^3)	مگاوات برق تولیدی
	گازوئیل	نفت کوره	گاز			
۱۳۹۰	۹۴۰۶	۱۲۰۱۹	۳۸۹۰۱	۲۱۴۲۵	۳۸۹۰۱	۲۷۹۴۰/۵۶
۱۳۹۱	۷۷۶۸	۱۴۴۵۰	۴۰۶۹۲	۲۲۲۱۸	۴۰۶۹۲	۲۹۷۸۲/۶۸
۱۳۹۲	۱۲۱۸۶	۱۱۲۶۳	۳۶۶۴۸	۲۳۴۴۹	۳۶۶۴۸	۲۹۸۲۵/۲۴
۱۳۹۳	۸۸۷۱	۱۰۲۷۳	۵۰۱۷۲	۱۹۱۴۴	۵۰۱۷۲	۳۱۳۳۷/۳
۱۳۹۴	۶۰۸۳	۶۹۴۶	۵۸۴۲۴	۱۳۰۲۹	۵۸۴۲۴	۳۱۶۰۳/۹۲
۱۳۹۵	۵۸۶۸	۴۴۸۳	۶۱۷۸۲	۱۰۳۵۱	۶۱۷۸۲	۳۲۹۱۲/۶۲
۱۳۹۶	۴۸۴۱	۳۶۸۶	۶۹۳۸۲	۸۵۲۷	۶۹۳۸۲	۳۳۳۰۲/۴۸
۱۳۹۷	۵۹۷۰	۳۴۵۱	۶۷۳۵۵	۹۴۲۱	۶۷۳۵۵	۳۴۱۴۶/۹
۱۳۹۸	۱۰۲۵۳	۵۳۹۸	۶۰۲۴۳	۱۵۶۵۱	۶۰۲۳۴	۳۵۹۲۶/۲۲

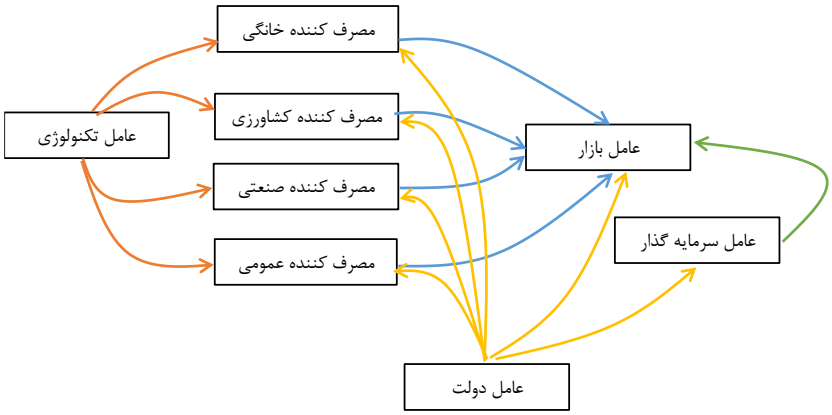
عامل سرمایه‌گذار، شخصی است که در بخش خصوصی تمایل به تأمین و سرمایه‌گذاری کمبود مگاوات برق تولیدی در سطح کشور دارد.

عامل فناوری می‌تواند به‌عنوان افزاینده یا کاهنده میزان مگاوات برق مصرفی در میان چهار مصرف‌کننده در نظر گرفته شود؛ به‌طوری‌که با ورود یک فناوری جدید مانند کولرهای گازی، می‌تواند میزان مصرف برق افزایش یا با ورود فناوری لامپ‌های کم‌مصرف میزان مصرف برق کاهش پیدا کند؛ بنابراین این عامل می‌تواند هم کاهنده و هم افزاینده میزان مصرف در سطح کشور در نظر گرفته شود.

عامل دولت، نقش سیاست‌گذار را در سطح جامع بازی می‌کند؛ به‌نحوی‌که بر روی سرمایه‌گذار و همچنین عامل بازار (تأسیس نیروگاه) و همچنین مصرف‌کنندگان (خانگی، صنعتی، کشاورزی و عمومی) تأثیرگذار است.

عامل دولت بر اساس سیاست‌هایی که تدوین می‌کند می‌تواند بر همه عوامل، به‌جز عامل فناوری، اثرگذار باشد. برای مثال، دولت با افزایش یا کاهش قیمت هر کیلووات ساعت برق می‌تواند بر عامل مصرف‌کننده تأثیرگذار باشد و تا حدی میزان مصرف را افزایش یا کاهش دهد.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در زمینه عامل‌های موردبررسی و میزان و نوع تأثیر هر یک از آن‌ها در شبیه‌سازی چرخه عمر صنعت برق مدل شکل ۲، ارائه شده است.

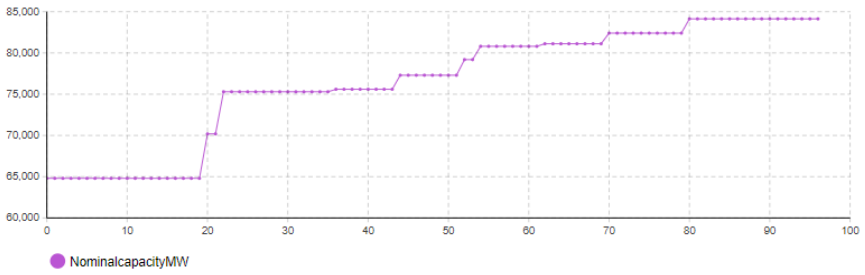


شکل ۲. شبیه‌سازی صنعت برق

شیوه عملکرد مدل ارائه‌شده به این صورت است که عامل مصرف‌کننده درخواست انرژی خود را به عامل بازار (Market) ارسال می‌کند و عامل بازار با توجه به تعداد نیروگاه‌های فعال، برق را تولید و در اختیار عامل مصرف‌کننده قرار می‌دهد. در قسمت دیگری از مدل، عامل دولت بر همه عامل‌های موجود در مدل تأثیر می‌گذارد؛ چراکه بر اساس دستورالعمل صادره از دولت میزان برق تولیدی نیروگاه‌ها محاسبه شده و یا نیروگاهی وارد چرخه تولید شده یا از آن خارج می‌شود؛ علاوه‌براین دولت با دستورالعمل‌ها و قوانین صادره می‌تواند بر میزان مصرف، مصرف‌کنندگان در بخش‌های مختلف تأثیر بگذارد؛ از طرف دیگر با توجه به این مهم که اطلاعات استخراج‌شده از صنعت برق، بین میزان مگاوات ساعت برق تولیدی و مگاوات ساعت برق مصرفی در بخش‌های مختلف همواره اختلاف وجود دارد؛ بدین معنا که میزان برق تولیدی با ظرفیت اسمی مقایسه شده و اختلاف بین این دو مقدار نشان‌دهنده کمبود برق مورد نیاز است. در این وضعیت عامل سرمایه‌گذار وارد می‌شود و سعی در جبران کمبود برق تولیدی از طریق سرمایه‌گذاری بر روی نیروگاه‌های در چرخه تولید را دارد. حال‌آنکه سرمایه‌گذار برای ورود به چرخه و انتخاب نحوه تأمین برق از طریق سرمایه‌گذاری در راه‌اندازی نیروگاه‌های: بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، برق آبی و تجدید پذیر باید سیاست‌ها و دستورالعمل‌های ابلاغی از سمت دولت را نیز مدنظر قرار دهد؛ بنابراین عامل دولت بر همه هفت عامل موجود در مدل تأثیرگذار خواهد بود. آخرین عاملی که در این مدل مطرح شده، عامل فناوری است. عامل فناوری می‌تواند بر میزان برق مصرفی، مصرف‌کنندگان در بخش‌های مختلف تأثیر مثبت یا منفی داشته باشد.

برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی ارائه‌شده از پارادایم شبیه‌سازی مونت‌کارلو با هسته عدد تصادفی استفاده شد. به کمک این شبیه‌سازی دو مقدار جذابیت ایجادشده توسط دولت برای انتخاب نیروگاه و درصد احتمال سرمایه‌گذاری سرمایه‌گذار به‌منظور تأمین مگاوات برق موردنیاز کالیبره (استاندارد) شد. برای این منظور مدل ارائه‌شده ۱۰۰ بار با مقادیر مختلف تصادفی اجرا شد و درنهایت مقادیری به‌دست آمد که با ورود اطلاعات سال ۱۳۹۰ به‌عنوان مقادیر اولیه پس از ۸ سال (۹۶ ماه) اجرای مدل، نتایج حاصل در زمینه میزان مگاوات برق تولیدی اسمی، سوخت مصرفی (Liquid Fuel و Gas Fuel) و ظرفیت اسمی نیروگاه‌های گازی، بخاری، سیکل ترکیبی، برق آبی و تجدیدپذیر به مقادیر موجود در سال ۱۳۹۸ برگرفته از گزارش ۵۳ ساله وزارت نیرو همگرا شدند [۵].

می‌توانیم نتیجه گرفت مدلی که ۸ سال شبیه‌سازی را به‌صورت درست و نزدیک به واقعیت انجام داده، یک مدل واقع‌گرایانه است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این مدل می‌تواند نتایج مربوط به ۱۰ تا ۲۰ سال آینده را نیز درست و نزدیک به واقعیت پیش‌بینی کند. از طرفی توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که مدل اجراشده در نرم‌افزار Anylogic تعداد ۱۰۰ بار با هسته عدد تصادفی شبیه‌سازی شده است. از طرف دیگر اطلاعات عنوان‌شده در ادامه در نتیجه میانگین ۱۰۰ بار اجرای مدل با هسته عدد تصادفی مختلف است.



شکل ۳. ظرفیت اسمی اجرا مدل به مدت ۹۶ ماه

طبق شکل ۳، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور در بازه زمانی ۸ سال شبیه‌سازی چیزی حدود ۸۳ هزار مگاوات شده است؛ حال‌آنکه نتایج حاصل از گزارش ۵۳ساله «وزارت نیرو» میزان مجموع ظرفیت اسمی تا سال ۱۳۹۸ را ۸۲،۴۴۹ مگاوات عنوان کرده است.

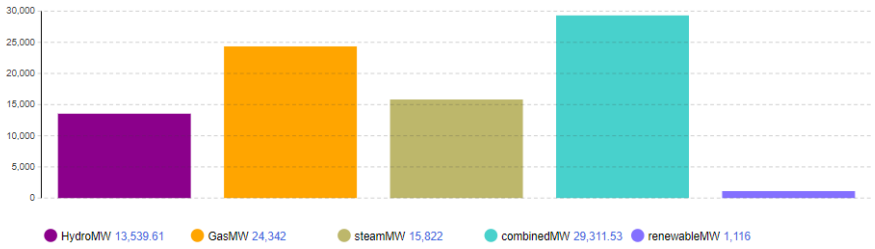
در شکل ۴، ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها به تفکیک در ۹۶ ماه اجرای مدل قابل‌مشاهده است. نتایج حاکی از این است که میزان مگاوات برق تولیدی نیروگاه برق آبی[1] در این اجرا معادل

1. Hydro

۱۳،۵۳۹ مگاوات، برق تولیدی نیروگاه گازی[1] معادل ۲۴،۳۴۲ مگاوات، برق تولیدی نیروگاه بخاری[2] معادل ۱۵،۸۲۲ مگاوات، برق تولیدی نیروگاه سیکل ترکیبی[3] معادل ۲۹،۳۱۱ مگاوات و برق تولیدی نیروگاه تجدید پذیر[4] معادل ۱،۱۱۶ مگاوات است.

طبق اطلاعات استخراج‌شده از گزارش ۵۳ساله «وزارت نیرو»، میزان ظرفیت اسمی نیروگاه‌های یادشده به‌ترتیب عبارت است از:

نیروگاه برق آبی معادل ۱۲،۱۹۱ مگاوات؛ نیروگاه گازی معادل ۲۶،۱۸۰ مگاوات؛ نیروگاه بخاری معادل ۱۵،۸۲۹ مگاوات؛ نیروگاه سیکل ترکیبی معادل ۲۷،۱۳۰ مگاوات و نیروگاه تجدیدپذیر معادل ۱،۱۱۹ مگاوات است.



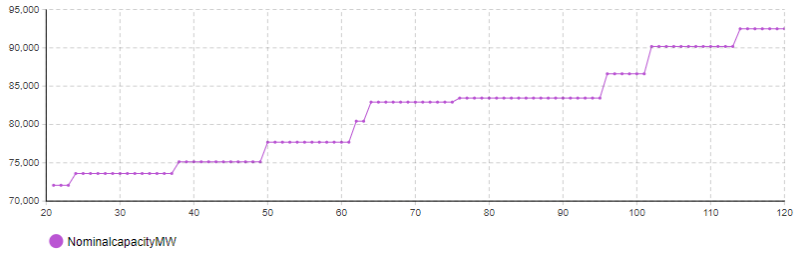
شکل ۴. ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها در ۹۶ ماه اجرای مدل

بر اساس شکل ۴، می‌توان نتیجه گرفت در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ میزان مگاوات برق مصرفی عامل‌های مصرف‌کننده خانگی، صنعتی، کشاورزی و عمومی به میزان تقریبی ۳۰ درصد افزایش یافته است و این نمودار نشان‌دهنده کمبود مگاوات برق تولیدی درج‌شده در فهرست ماهیانه Statics، Power Supply Status است.

مطالب عنوان‌شده نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل شبیه‌سازی ارائه‌شده است. حال برای بررسی وضعیت کمبود، مگاوات برق تولیدی نسبت به میزان تولید مدل ارائه‌شده به مدت ۱۰ سال (۱۲۰ ماه) اجرا شد (برای استخراج نتایج، عامل فناوری برای ارائه سناریوهای گوناگون وارد مدل شد) که نتایج زیر به‌دست آمد:

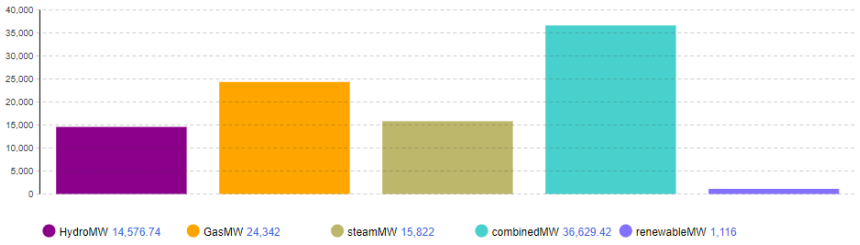
پس از اجزای مدل به در بازه زمانی ۱۰ساله (۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰) میزان ظرفیت اسمی مگاوات تولیدی برق نیروگاه‌ها به ۹۲،۰۰۰ مگاوات رسیده است که نسبت به بازه ۹۶ ماهه به میزان ۱۰،۰۰۰ مگاوات افزایش ظرفیت اسمی داشته است (شکل ۵).

1. Gas
2. Steam
3. Combined
4. Renewable



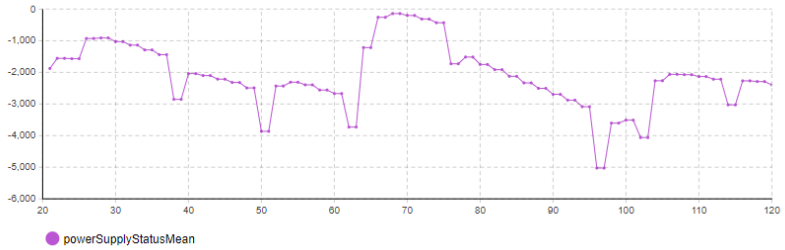
شکل ۵. ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها در ۱۲۰ ماه اجرای مدل

نسبت به بازه زمانی ۹۶ماهه، ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که ظرفیت نیروگاه برق آبی به ۱۴،۵۷۶ مگاوات و نیروگاه سیکل ترکیبی به ۳۶،۶۲۹ مگاوات رسیده است؛ بدین معنا که سیاست دولت به این بوده که برای تأمین برق بیشتر از ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی و سیکل ترکیبی استفاده شود. نتیجه این سیاست این می‌شود که به‌دلیل افزایش ظرفیت نیروگاه برق آبی در میزان مصرف سوخت تا اندازه‌ای صرفه‌جویی صورت می‌پذیرد و به‌دلیل اینکه هم‌زمان با نیروگاه برق آبی ظرفیت نیروگاه سیکل ترکیبی نیز افزایش یافته، میزان کربن منتشرشده تغییری نکرده است.



شکل ۶. مگاوات برق تولیدی اسمی به تفکیک نیروگاه‌ها در ۱۲۰ ماه اجرای مدل

در بازه اجرایی ۱۲۰ ماهه مدل میزان کمبود ظرفیت تولیدی مگاوات برق کاهش یافته است؛ به این معنا که تفاوت بین مگاوات برق تولیدی و میزان مصرف، عامل‌های مصرف‌کننده کمتر شده و از ۳۰ به ۲۰ درصد رسیده است.

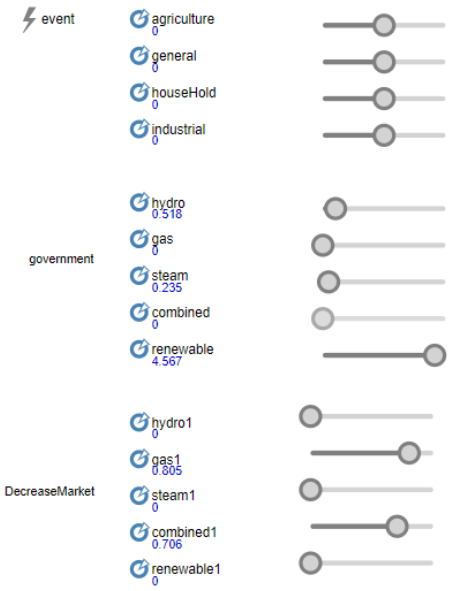


شکل ۷. افزایش میزان مصرف در ۱۲۰ ماه اجرای مدل

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

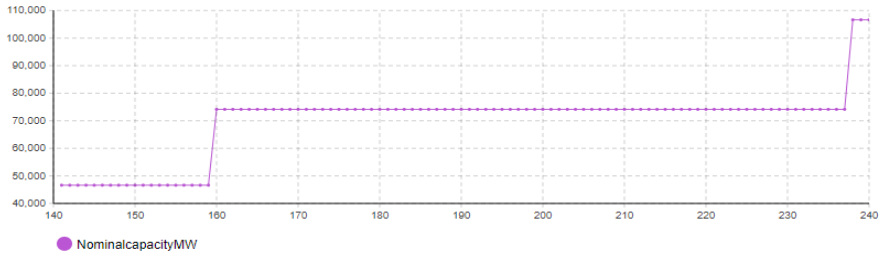
در این بخش با توجه به نظرات تعدادی سناریو با تغییر در عوامل تأثیرگذار در چرخه عمر صنعت برق بررسی می‌شود و در هر سناریو میزان مگاوات برق تولیدی با مگاوات برق موردنیاز در صنعت برق مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. ازآنجاکه مدل شبیه‌سازی ارائه‌شده یک مدل واقع‌گرایانه است، نتایج ارائه‌شده به واقعیت نزدیک است و قابلیت اتکای بالایی دارند.

سناریوی نخست: درصورتی‌که دولت میزان جذابیت نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی را کاهش دهد و بر جذابیت نیروگاه تجدیدپذیر، بخاری و برق آبی بیفزاید و همچنین ۸۰ درصد از نیروگاه‌های گازی و ۷۰ درصد از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را از چرخه تولید برق خارج شود، نتایج شکل ۸، حاصل می‌شود.



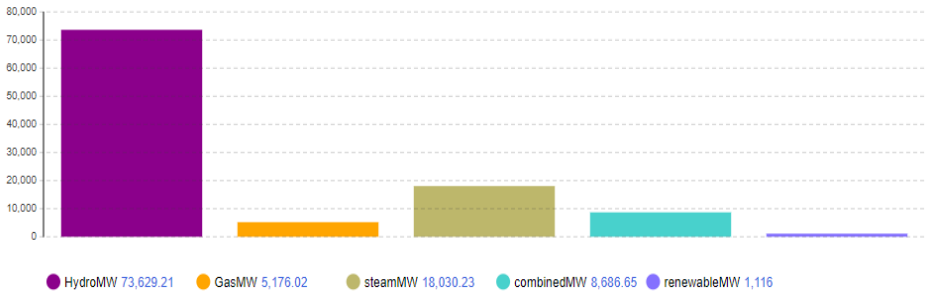
شکل ۸. نمای سناریو اول در نرم‌افزار Anylogic

با توجه به شکل ۸، می‌توان نتیجه گرفت که پس از ۲۰ سال (۲۴۰ ماه) اجرای مدل میزان ظرفیت اسمی به رقم ۱۰۰،۰۰۰ مگاوات رسیده است که این جهش افزایشی یک بار در سال ۱۴۰۳ و بار دیگر در سال ۱۳۰۹ روی داده است و در بازه زمانی بین سال ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۹ میزان ظرفیت اسمی ثابت (منظور از ثابت‌بودن ظرفیت این است که سرمایه‌گذاری توسط سرمایه‌گذار صورت نپذیرفته است) بوده است (دو بار سرمایه‌گذاری برای تأمین کمبود مگاوات برق تولیدی نسبت به مگاوات مصرفی صورت پذیرفته است).



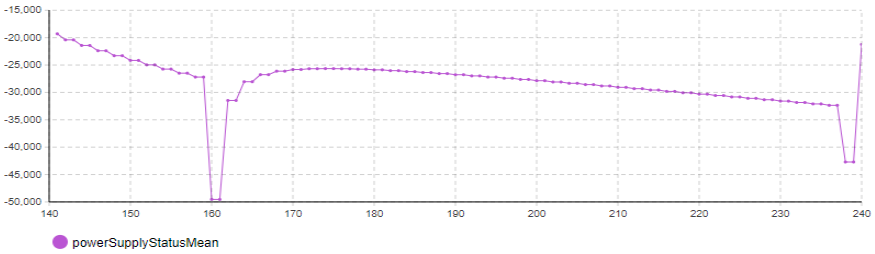
شکل ۹. ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها سناریوی ۱

با توجه به تغییرات اعمال‌شده در سناریوی نخست، نتایج نشان می‌دهد که با درنظرگرفتن جذابیت‌هایی که دولت برای سرمایه‌گذار ایجاد کرده، ظرفیت نیروگاه برق آبی به طرز چشمگیری افزایش یافته است و در مقابل ظرفیت دو نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی به‌دلیل جلوگیری از آلودگی هوا و انتشار کربن به‌شدت کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۰. تغییر در روند ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها در سناریوی ۱

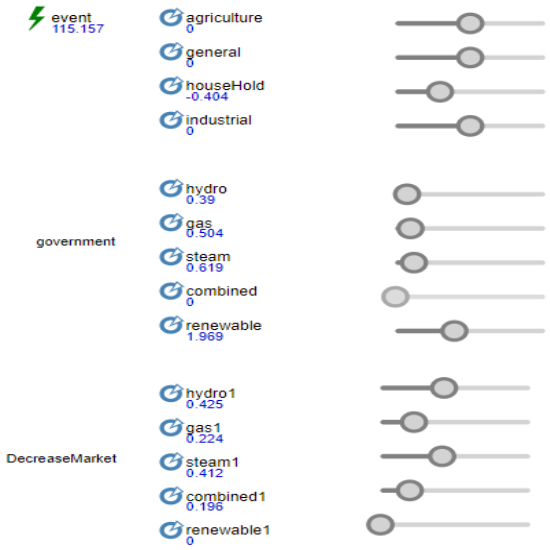
با توجه به نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در صورتی که همچنان بخش اعظمی از نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی از چرخه تولید خارج شوند، کمبود شدید مگاوات برق تولیدی در مقابل مگاوات برق موردنیاز عامل‌های مصرف‌کننده رخ خواهد داد.



شکل ۱۱. کمبود مگاوات برق تولیدی نسبت به برق مصرفی سناریوی ۱

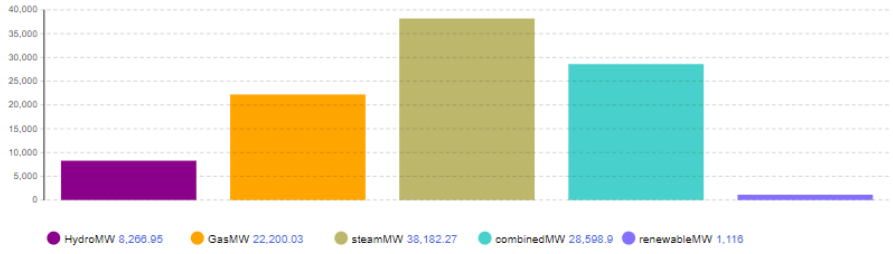
بنابراین با اعمال این سناریو قطعاً در آینده قطعی‌های فراوان و مشکلات زیادی در زمینه تولید برق با درنظرگرفتن کمبود منابع آبی رخ خواهد داد؛ درنتیجه اگر قرار است تمرکز دولت بر روی گسترش نیروگاه‌های تجدیدپذیر باشد، باید به‌نوعی برای دیگر نیروگاه‌ها برنامه‌ریزی انجام شود که میزان سوخت مصرفی کاهش یابد؛ ولی کمبود بسیار زیاد مگاوات برق برای عامل‌های مصرف‌کننده ایجاد نشود.

سناریوی دوم: فناوری وارد بازار شود که میزان مصرف بخش خانگی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد. در این سناریو میزان جذابیت‌های مختلفی از سمت دولت برای سرمایه‌گذار اعمال شده که در آن ملاحظات زیست‌محیطی هم لحاظ شده است؛ علاوه‌براین با درنظرگرفتن کمبود منابع آبی فرض شد حدود ۴۰ درصد نیروگاه‌های برق آبی و بخاری در چرخه تولید نقش‌آفرینی می‌کنند.



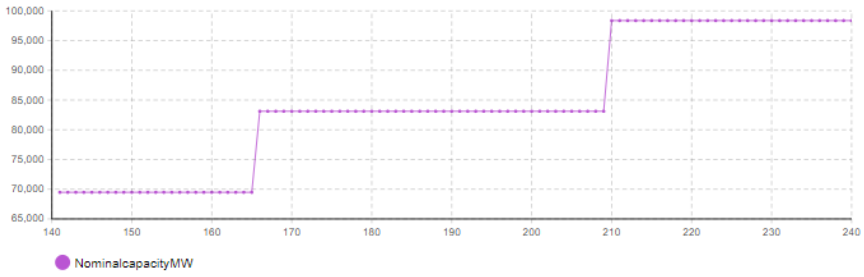
شکل ۱۲. نمای سناریوی ۲ در محیط نرم‌افزار Anylogic

تأثیرات این سناریو در شکل ۱۲، در مگاوات برق تولیدی نیروگاه‌ها قابل‌رؤیت است؛ به‌طوری‌که بر اساس تغییرات اعمال‌شده در این سناریو، نیروگاه بخاری بیشترین میزان تولید برق را شامل حال خود کرده است.



شکل ۱۳. ظرفیت تولیدی نیروگاه‌ها سناریوی ۲

میزان ظرفیت اسمی حاصل‌شده در سال ۱۴۱۰ با توجه به سناریوی سوم به شرح شکل ۱۴، است.

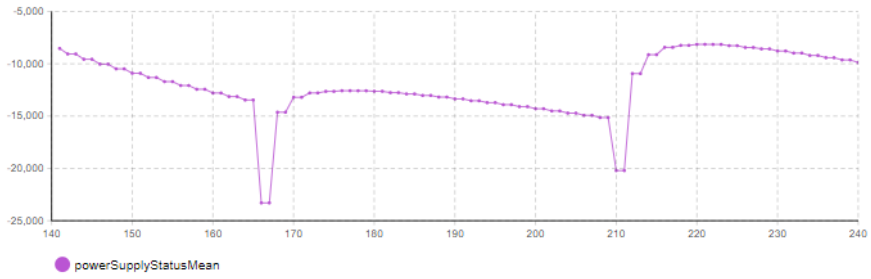


شکل ۱۴. ظرفیت اسمی سناریو ۲

با توجه به شکل ۱۴، در دو مقطع افزایش ظرفیت اتفاق افتاده که این افزایش بار نخست در سال ۱۴۰۳ و بار دوم در سال ۱۴۰۷ رخ داده و پس از آن روند تولید مگاوات ظرفیت اسمی ثابت در نظر گفته شده است (دو بار سرمایه‌گذاری برای افزایش ظرفیت مگاوات برق تولیدی صورت پذیرفته است).

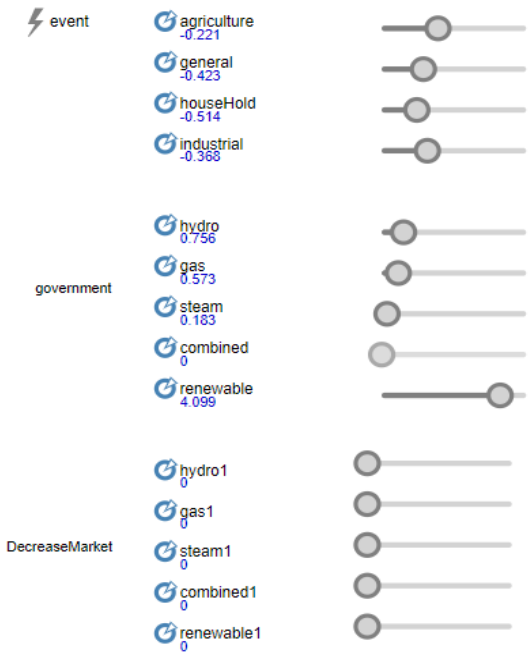
توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که نسبت به دو سناریوی قبلی میزان مگاوات برق اسمی تا سال ۱۴۱۰ بسیار کمتر بوده است.

در این سناریو با اینکه میزان مگاوات برق مصرفی بخش خانگی ۴۰ درصد کاهش یافته است، باز هم کمبود مگاوات برق تولیدی در مقابل مگاوات برق مصرفی وجود دارد و نیار به سرمایه‌گذاری سرمایه‌گذار با توجه به جذابیت‌های تدوین‌شده توسط دولت است.



شکل ۱۵. کمبود مگاوات تولیدی نسبت به مگاوات مصرفی سناریوی ۲

سناریوی سوم: فناوری وارد بازار شود که به کاهش مصرف همه عامل‌های مصرف‌کننده منجر شود.

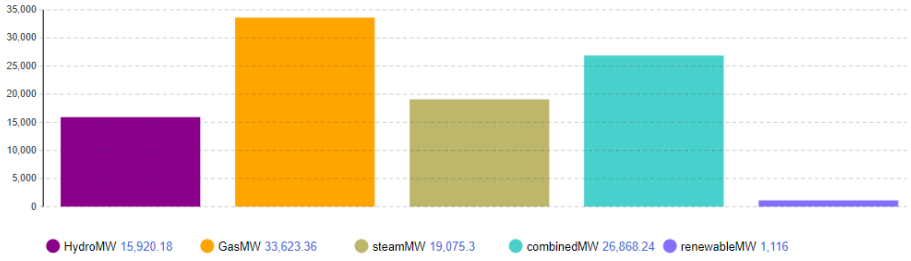


شکل ۱۶: نمای سناریوی سوم در محیط نرم‌افزار Anylogic

در این سناریو فرض بر این است که میزان مگاوات مصرفی هر چهار عامل مصرف‌کننده کاهش یابد؛ به‌طوری‌که مصرف‌کننده خانگی با ۵۰ درصد کاهش مصرف، مصرف‌کننده صنعتی با ۳۶ درصد کاهش، مصرف‌کننده کشاورزی با ۲۲ درصد کاهش و مصرف‌کننده بخش عمومی با ۴۲ درصد کاهش مگاوات برق مصرفی روبه‌رو است. در بخش عامل دولت جذابیت ایجادشده برای نیروگاه تجدیدپذیر ۴ واحد، نیروگاه برق آبی ۰/۷۵، نیروگاه گازی ۰/۵۷، نیروگاه سیکل ترکیبی صفر و نیروگاه بخاری ۰/۱۸ برای سرمایه‌گذاری داشته باشد؛ همچنین در نظر گرفته شده باشد که همه نیروگاه‌ها با ظرفیت کامل در چرخه تولید برق حضورداشته باشند. نتایج حاصل از این سناریو به شرح زیر است:

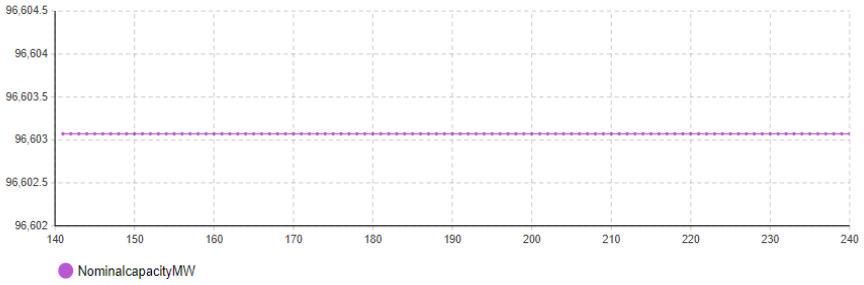
بر اساس شکل ۱۷، میزان مگاوات برق تولیدی نیروگاه برق آبی ۱۵،۹۲۰ مگاوات، نیروگاه گازی ۳۳،۶۲۳ مگاوات، نیروگاه بخاری ۱۹،۰۷۵ مگاوات، نیروگاه سیکل ترکیبی ۲۶،۸۶۸ مگاوات و نیروگاه تجدیدپذیر ۱،۱۱۶ مگاوات بوده است. با توجه به اینکه بخش اعظمی از مگاوات برق

تولیدی توسط دو نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی بوده است، افزایش سوخت و انتشار گاز کربن مشهود خواهد بود.



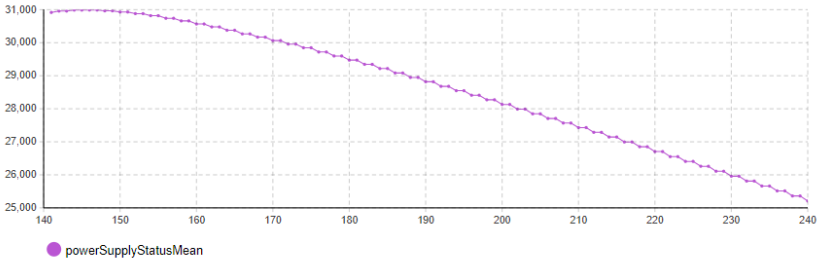
شکل ۱۷. ظرفیت مگاوات برق تولیدی نیروگاه‌ها سناریوی ۳

مقدار ظرفیت اسمی از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ مقدار ثابت ۹۶۶۰۳ مگاوات باقی مانده است و این بازه ۱۰ساله بین سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ نشان می‌دهد هیچ‌گونه سرمایه‌گذاری برای افزایش مگاوات برق تولیدی صورت نگرفته است.



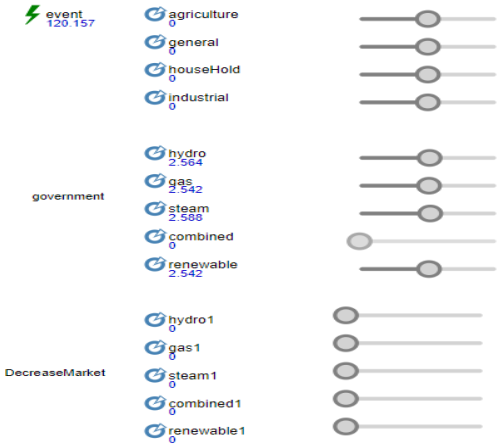
شکل ۱۸. ظرفیت اسمی سناریوی ۳

آخرین نتیجه‌ای که از این سناریو می‌توان گرفت این است که با توجه به کاهش مگاوات برق مصرفی عامل‌های مصرف‌کننده و با درنظر گرفتن ۹۶۶۰۳ مگاوات ظرفیت اسمی در این بازه ۲۰ساله، برخلاف سناریوهای قبل با مازاد مگاوات برق مصرفی در مقابل مگاوات برق تولیدی روبه‌رو هستیم.



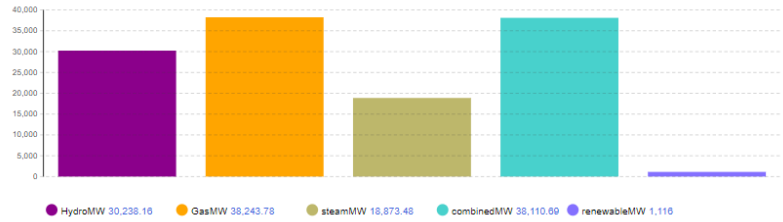
شکل ۱۹. تفاوت بین مگاوات برق تولیدی و مگاوات برق مصرفی سناریوی ۳

سناریوی چهارم: فرض می‌شود ورود عامل فناوری به مدل، میزان مگاوات برق مصرفی عامل‌های مصرف‌کننده را تغییر ندهد و فقط به تغییر جذابیت‌های عامل دولت منجر شود؛ به‌طوری‌که جذابیت همه عوامل یکسان در نظر گرفته شود.



شکل ۲۰. نمای سناریوی چهارم در محیط نرم‌افزار Anylogic

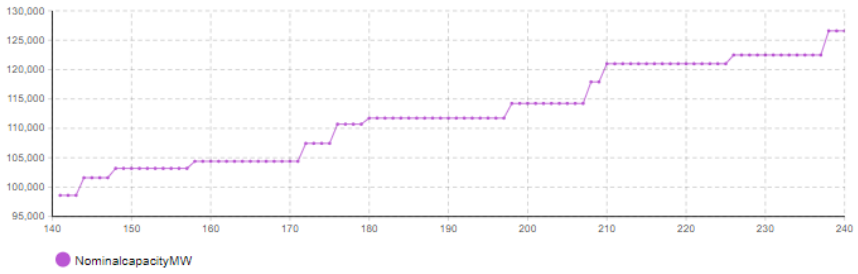
در این سناریو بر اساس شکل ۲۰، تنها جذابیت‌های تعیین‌شده توسط عامل دولت برای سرمایه‌گذار دست‌خوش تغییر شدند؛ به‌طوری‌که همگی نمرات جذابیت در حدود ۲/۵ قرار گرفتند. نتایج این سناریو به شرح زیر است:



شکل ۲۱. ظرفیت تولیدی نیروگاه‌ها سناریوی ۴

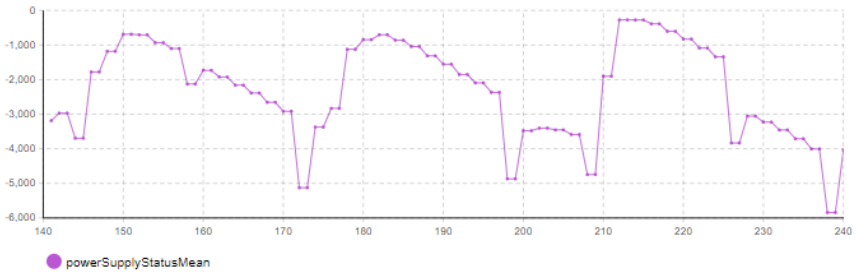
با توجه به سناریوی اعمال‌شده در بازه ۲۰ساله میزان مگاوات برق تولیدی نیروگاه برق آبی ۳۰،۲۳۸ مگاوات، نیروگاه گازی ۳۸،۲۴۳ مگاوات، نیروگاه بخاری ۱۸،۸۷۳ مگاوات، نیروگاه سیکل ترکیبی ۳۸،۱۱۰ مگاوات و نیروگاه تجدیدپذیر ۱،۱۱۶ مگاوات بوده است که از شکل ۲۱ می‌توان برداشت کرد که بیشتر مگاوات برق تولیدی توسط دو نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی در این ۲۰ سال تأمین خواهد شد.

همان‌طور که در شکل ۲۲، مشاهده می‌شود، میزان ظرفیت اسمی در بازه زمانی سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ سیر صعودی داشته و سرمایه‌گذاری‌های زیادی نیز در جهت تأمین کمبود مگاوات برق تولیدی در مقابل مگاوات برق مصرفی صورت پذیرفته است که این مسئله را می‌توان ناشی از تقریباً برابر درنظرگرفتن ضریب جذابیت اعمال‌شده توسط دولت در این بازه زمانی در نظر گرفت.



شکل ۲۲. ظرفیت اسمی سناریوی ۴

آخرین دستاوردی که این تغییرات بر اجرای مدل شبیه‌سازی در بازه ۲۰ساله داشته، این است که میزان مگاوات برق تولیدی نسبت به مگاوات برق مصرفی در بازه سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ همواره به‌صورت کمبود (مقدار منفی) بوده و تأمین کمبود مگاوات برق تولیدی به کمک سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده توسط عامل سرمایه‌گذار ضروری است.



شکل ۲۳. تفاوت بین مگاوات برق تولیدی با مگاوات برق مصرفی سناریوی ۴

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به مدل شبیه‌سازی ارائه‌شده از چرخه عمر صنعت برق در کشور با کمک پارادایم شبیه‌سازی عامل‌بنیان، تعداد چهار سناریو با درنظرگرفتن شرایط مختلف بررسی شد که با توجه به مشاهدات به‌دست‌آمده با توجه به وضعیت آب‌وهوایی کشور و کمبود منابع آبی و همچنین درصد بالای آلودگی هوا در شهرهای صنعتی و با توجه به تعداد نیروگاه‌های فعال در صنعت برق همواره کمبود مگاوات برق تولیدی نسبت به مگاوات برق مصرفی عامل مصرف‌کننده وجود خواهد داشت؛ به استثنای سناریوی آخر (چهارم) در بقیه موارد این کمبود مشهود است؛ بنابراین با توجه به نتایج بهتر است دولت برای مدیریت این کمبود برق و تأثیرات جبران‌ناپذیر آن تغییراتی در جذابیت‌های ایجادشده از سمت خودش ایجاد کند تا سرمایه‌گذاران بیشتری وارد بازار شوند و در جهت تأمین مگاوات برق موردنیاز با سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های خصوصی تلاش کنند. علاوه‌براین اگر دولت بخشی از دو نیروگاه برق آبی و تجدید پذیر را نیز همانند سه نیروگاه دیگر به‌صورت اشتراکی در اختیار بخش خصوصی قرار دهد، سرمایه‌گذاران به سرمایه‌گذاری در این نیروگاه‌ها روی می‌آورند که این مسئله به تأمین بخشی از مگاوات برق موردنیاز و علاوه بر آن صرفه‌جویی در مصرف سوخت فسیلی و همچنین کاهش آلودگی هوا منجر می‌شود.

منابع

1. Ameli, M., Mansour, S., & Ahmadi-Javid, A. (2019). A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility. *Resources, Conservation and Recycling, 140,* 246-258.
2. Azar, A., mashayekhi, M., Amiri, M., Safari, H., (2021). Modeling Steel Supply Chain and Estimating Its Consumption through ABM Methodology. *The Jornal of Industrial management Perspective, 11(1),* 33-52.(In Persian)
3. Chau, C.K., Leung, T., & Ng, W. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Applied energy, 143,* 395-413.
4. Diaz, A., Schoggl, J., Reyes, T., Baumgartner, R. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption, 26,* 1031-1045.
5. Energy, M.o., (2021). 53 years of Iran's electricity industry in the mirror of statistics (1346-1398). January 2021, Tavanir specialized parent company. p. 46.
6. Guinée, J.B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The international journal of life cycle assessment, 7(5),* 311-313.
7. Khodaparastan, A.S.N.J.M. (2021). Designing an Integrated Method for Increasing Quality of Product through Its Lifetime by Taguchi Design of Experiments and PAF Model (The Case of Entekhab Industrial Group). *The Journal of Industrial management Perspective, 11(4),* 37-57.(In Persian)
8. Kwok, S.Y., Schulte, J., & Hallstedt, S. (2020). Approach for sustainability criteria and product life-cycle data simulation in concept selection. *in Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference.* Cambridge University Press.
9. Li, J., Tao, F., Cheng, Y., Zhao, L,. (2015). Big data in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81(1),* 667-684.
10. Manda, B.K., Bosch, H., Karanam, S., Beers, H., Bosman, H., Rietveld, E., Worrell, E., Patel, M., (2016). Value creation with life cycle assessment: an approach to contextualize the application of life cycle assessment in chemical companies to create sustainable value. *Journal of Cleaner Production, 126,* 337-351.
11. Niven, T. & Kao, H.-Y. (2019). Probing neural network comprehension of natural language arguments. arXiv preprint arXiv:1907.07355.
12. Pishvaee, E.B& Sahebi, H. (2016). A Simulation-based Optimization Model for Integration of Cash and Material-Flow Planning within a Supply Chain. *The Journal of Industrial management Perspective, 6(1),* 31-51(In Persian).
13. Poh, G.K., Chew, I.M. & Tan, J. (2019). Life cycle optimization for synthetic rubber glove manufacturing. *Chemical Engineering & Technology, 42(9),* 1771-1779.
14. Rand, W. & Stummer, C. (2021). Agent-based modeling of new product market diffusion: an overview of strengths and criticisms. *Annals of Operations Research, 305(1),* 425-447.
15. Solis, C.M.A., San Juan, J.L., Mayol, A.P., Sy, C.L., Ubando, A.T., Culaba, A.B.,. (2021). A multi-objective life cycle optimization model of an integrated algal

biorefinery toward a sustainable circular bioeconomy considering resource recirculation. *Energies*, *14(5)*, 1416.
16. Walter, M., Leyh, C., & Strahringer, S. (2017). Knocking on industry's door: needs in product-cost optimization in the early product life cycle stages. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, *(13)*,43-60.
17. Zupko, R. (2021). Application of agent-based modeling and life cycle sustainability assessment to evaluate biorefinery placement. *Biomass and Bioenergy*, *144*, 105916.