



## انرژی خورشیدی و توسعه پایدار اقتصادی در ایران

علی حسین استادزاد<sup>1</sup>

1- استادیار، علوم اقتصادی، گروه مهندسی انرژی، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران

\* لار، کدپستی: 7431813115، [a.ostadzad@lar.ac.ir](mailto:a.ostadzad@lar.ac.ir)

### چکیده

در چارچوب تغییرات آب و هوایی، انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر، توسط کشورهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که مطالعات محدودی در مورد چگونگی دسترسی پایدار به انرژی وجود دارد، هدف اصلی این تحقیق بررسی نقش انرژی خورشیدی در دسترسی پایدار به انرژی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌باشد. در این مطالعه، عوامل مؤثر بر سیستم شامل چهار زیر سیستم شامل انرژی، اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست تعریف شده است. علاوه بر این، امنیت انرژی به عنوان در دسترس بودن عرضه انرژی کافی برای برآوردن تقاضای موجود تعریف می‌شود. پس از تعیین و تعریف نمودار علی حلقوی، نمودار جریان و اعتبارسنجی و شبیه‌سازی سیستم، سیاست‌های جداگانه به همراه خط‌مشی ترکیبی برای بهبود سیستم ارائه شده است. این سیاست‌ها شامل افزایش سرمایه‌گذاری در بخش انرژی تجدیدپذیر، افزایش تعرفه انرژی‌های تجدید ناپذیر و کاهش شدت انرژی است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که برای توسعه پایدار باید تمرکز دولت برافزایش سهم انرژی‌های تجدید پذیر در کل تولید انرژی باشد. از طرفی با گسترش صنعت انرژی خورشیدی، میزان اشتغال در این صنعت افزایش خواهد یافت. در نتیجه می‌توان با ارائه یک برنامه آموزشی دوساله برای کسب تجارب موردنیاز، تعداد متخصصان و کارکنان حرفه‌ای در این صنعت را افزایش داد.

**کلیدواژگان:** انرژی خورشیدی، توسعه پایداری، امنیت انرژی، پویایی سیستم، انرژی‌های تجدید پذیر.

## Solar energy and sustainable economic development in Iran

Ali Hossein Ostadzad<sup>1</sup>

1-Assistant professor, Department of Energy Engineering, Larestan University, Lar, Iran

\* P.O.B. 7431813115 Lar, Iran, [a.ostadzad@lar.ac.ir](mailto:a.ostadzad@lar.ac.ir)

Received: 26 Dec. 2023 Accepted: 25 May 2024

### Abstract

Solar energy as a renewable energy source has been considered by different countries in the framework of climate change. Since there are limited studies on how to have sustainable energy access, the main purpose of this research is to investigate the role of solar energy in sustainable energy access using the systems dynamics approach. In this study, four sub-systems of energy, economy, society and environment have been defined using the systems dynamics approach. Furthermore, energy security is defined as the availability of sufficient energy supply to encounter existing demand. After determining and defining the circular causal diagram, flow diagram, validation and simulation of the system, separate policies along with the combined policy are presented to improve the system. These policies include increasing investment in the renewable energy sector, increasing the subsidy of non-renewable energy and reducing energy intensity. The simulation results have shown that for sustainable development, the government should focus on increasing the share of renewable energy in the total energy production. On the other hand, with growth of the solar industry, the amount of employment in this industry will increase. As a result, it is possible to increase the number of specialists and professional employees in this industry by providing a two-year training program to gain the necessary experience.

**Keywords:** solar energy, sustainable development, energy security, system dynamics, renewable energies.

## 1- مقدمه

علاوه بر پایداری، امنیت انرژی که به در دسترس بودن منابع انرژی کافی و قابل اعتماد برای برآوردن تقاضای موجود اشاره دارد، تحلیل و پیش‌بینی می‌شود. به منظور ایجاد امنیت و استقلال انرژی، سیاست‌گذاران در تلاش هستند تا منابع انرژی داخلی را گسترش دهند. در این پژوهش، افزایش سهم انرژی‌های تجدید پذیر، تولید انرژی خورشیدی و اثرات آن بر پایداری و امنیت انرژی در ایران با روش پویایی‌های سیستم (SD) مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. با ارائه نمودار حلقه علی و مدل پویا و آزمایش اعتبار مدل، سیاست‌هایی برای داشتن رشد اقتصادی پایدار پیشنهاد شده است. یکی از عوامل مؤثر در سیاست‌های دولت حفظ زنجیره انرژی است. [6].

چشم‌انداز استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در کشور ایران از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده به گونه‌ای که در برنامه هفتم توسعه برنامه‌ریزی لازم در این زمینه انجام شده است (برای اطلاع بیشتر به گزارش "مسائل راهبردی بخش انرژی در برنامه هفتم توسعه (Y): توسعه انرژی تجدید پذیر" منتشر شده سال 1402 توسط موسسه مطالعات انرژی، صنعت و معدن مراجعه شود).

لذا با توجه به سیاست‌های جهانی توسعه این انرژی‌ها در کشور ما به منظور حل مشکلات و ایجاد اشتغال اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین می‌توان گفت توسعه استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر می‌تواند نقش بسزایی در افزایش درجه امنیت سیستم انرژی کشور ایفا نماید. دلیل دیگر توجه به توسعه انرژی‌های تجدید پذیر ضرورت تنوع‌بخشی به سبد انرژی کشور در راستای ارتقای امنیت انرژی است. موضوعی که با توجه به پیش‌بینی افزایش چشمگیر تقاضای انرژی در سال‌های آتی یکی از اولویت‌های بخش انرژی کشور قلمداد می‌گردد. برآورد می‌شود در سال 2035، تقاضای نهایی انرژی در ایران به میزان 301 میلیون تن معادل نفت برسد که این رقم دو برابر تقاضای فعلی انرژی خواهد بود. با این وصف، طبیعی است اتکای صرف به منابع نفت و گاز طبیعی یک خطای راهبردی است و لازم است تنوع‌بخشی به منابع انرژی در زمره اصلی‌ترین راهبردهای کشور قرار گیرد. جایگاه بی‌بدیل انرژی‌های نو در کاهش آلودگی هوا و مقابله با تغییرات اقلیمی از دیگر مواردی است که ورود به مباحث انرژی‌های پاک را ضروری می‌سازد. با دقت در اینکه بخش انرژی بیشترین تأثیر را برافزایش انتشار دی‌اکسید کربن دارد، ضرورت توسعه انرژی‌های تجدید پذیر برای کاهش خطرات ناشی از تغییرات آب و هوایی اهمیت دوچندان می‌یابد [1] و [7].

با توجه به بررسی صورت گرفته در قسمت پیشینه پژوهش، از آنجایی که مطالعات محدودی در مورد چگونگی دسترسی پایدار به انرژی وجود دارد، در تکمیل مطالعات انجام شده، هدف اصلی این تحقیق بررسی نقش انرژی خورشیدی در دسترسی پایدار به انرژی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای ایران می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، عوامل مؤثر بر سیستم شامل چهار زیر سیستم انرژی، اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست تعریف شده است. علاوه بر این، امنیت انرژی به عنوان در دسترس بودن عرضه انرژی کافی برای برآوردن تقاضای موجود تعریف شده است.

تولید انرژی خورشیدی در ایران این پتانسیل را دارد که نقش بسزایی در دستیابی به توسعه پایدار و رشد اقتصادی پایدار داشته باشد. ایران به عنوان کشوری با تابش مناسب خورشید، این فرصت را دارد که از این منبع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش کربن استفاده کند. برای دستیابی به توسعه پایدار و رشد اقتصادی پایدار از طریق تولید انرژی

مزیت‌های انرژی‌های تجدید پذیر و همچنین جهت‌گیری اقتصاد ایران در حرکت به سمت اقتصاد بدون نفت، اولویت‌بخشی به توسعه انرژی‌های تجدید پذیر را ضروری می‌سازد. «ظرفیت ویژه برای توسعه اقتصادی»، «ارتقا عرضه و امنیت انرژی» و «حفظ محیط‌زیست و کاهش آلودگی هوا» سه مزیت مهم انرژی‌های تجدید پذیر هستند. اولین ضرورت برای اهمیت یافتن انرژی‌های تجدیدپذیر پتانسیل قابل توجه این نوع انرژی برای توسعه اقتصادی بویژه در حوزه کسب‌وکار و اشتغال‌زایی است [1] و [2].

بسیاری از کشورها با در نظر گرفتن سیاست‌های انرژی، در حال توسعه ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر خود می‌باشند تا به اهدافی مانند رشد اقتصادی، اشتغال و حفاظت از محیط‌زیست دست یابند. بدون انرژی، کشورها نمی‌توانند صنایع را گسترش داده و اداره کنند و به صورت یک اصل می‌توان بیان نمود که انرژی عامل اصلی تولید و رشد اقتصادی است. بنابراین، کشورها تمایل دارند به این بخش به‌عنوان یک موتور بالقوه برای رشد اقتصادی نگاه کنند. وابستگی به فروش نفت در کشورهایی مانند ایران که منابع انرژی زیادی دارند، باعث تأثیر مستقیم و غیر مستقیم بر اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست کشور شده است. ترویج بخش‌های انرژی غیر فسیلی مانند تولید انرژی از باد و خورشید را می‌توان راه دیگری برای تقویت توسعه اقتصادی، حتی برای کشورهایی که از ذخایر بزرگ نفت و گاز برخوردار هستند، در نظر گرفت. پیش‌بینی می‌شود، ساختار تولید برق تجدیدپذیر جهانی در سال 2050 شامل فتوولتائیک خورشیدی (69%) [2]، انرژی باد (18٪)، انرژی آبی (3٪) گیاهان (8٪) و زیست‌توده (2٪) خواهد بود [3].

در کشورهای صادر کننده مواد خام انرژی مانند ایران، منابع فراوان انرژی به‌عنوان نیروی محرکه اصلی برای تحولات اجتماعی-اقتصادی از نظر رشد جمعیت، صنعتی شدن، شهرنشینی، حمل‌ونقل و استانداردهای زندگی بوده است. با این حال، عدم توجه به محدودیت ذخایر طبیعی، ناامنی انرژی و مشکلات ناپایداری اقلیمی را برای کشورهای صادر کننده نفت و گاز به وجود آورده است تا جایی که در بسیاری از موارد، کشورها برای تأمین نیاز خود به انرژی مجبور به واردات انرژی شده‌اند.

به‌منظور به حداقل رساندن آسیب‌های محیط زیستی ناشی از استفاده از انرژی، یک سیاست ملی هوشمند باید بر جایگزین‌هایی مانند انرژی‌های تجدید پذیر متمرکز شود. هدف باید افزایش اتکا به منبع انرژی پایدار، قابل اعتماد، پاک و مقرون به‌صرفه باشد. هدف از این پژوهش بررسی نقش بالقوه انرژی‌های تجدید پذیر برای افزایش تنوع اقتصادی و پیامدهای پایداری با بررسی مزایای بالقوه استقرار انرژی‌های تجدید پذیر در سه جنبه پایداری شامل پایداری محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی است. تسریع انتقال به یک سیستم انرژی مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر، فرصتی منحصر به فرد برای دستیابی به اهداف آب و هوایی و درعین حال تقویت رشد اقتصادی، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و افزایش رفاه است. در این مطالعه، در میان انواع مختلف انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی خورشیدی با توجه به اینکه ایران دارای موقعیت جغرافیایی منحصر به فردی است که 90 درصد مساحت آن برای تولید انرژی خورشیدی (300 روز در سال) نور خورشید کافی دریافت می‌کند، در نظر گرفته شده است. به‌طور دقیق‌تر، ایران روزانه 520 وات در ساعت به ازای هر مترمربع تابش خورشیدی دریافت می‌کند [4] و [5].

بر سیاست دولت ایالات متحده داشته است. این مدل برای برنامه‌ریزی انرژی دولت و تجزیه و تحلیل سیاست های انرژی تدوین و گسترش یافته است [12]. دولت اندونزی نیز از یک الگوی انرژی با روش پویایی‌شناسی سیستم برای بررسی سیاست های انرژی استفاده نموده است. که در نتیجه تقاضای انرژی زیاد و نگرانی‌های توسعه پایدار سعی کرده است در ترکیب انرژی نهایی در رابطه با سهم انرژی‌های نو و تجدید پذیر هدفی ایجاد کند و برخی از سیاست‌ها را برای دستیابی به این هدف ارائه می‌دهد [13]. در مطالعه آل سریه<sup>1</sup> (2015) مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر بر انتخاب سیاست‌های انرژی تجدید پذیر در عمان شناسایی شده است. این متغیرها شامل امنیت ملی انرژی، کیفیت هوای محلی، رشد اقتصادی، ایجاد شغل، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و صرفه‌جویی در مصرف گاز می‌شود. بر این اساس، آن‌ها سیستم را با استفاده از سه مدل فرعی، یعنی مدل‌های فرعی اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی مدل‌سازی کردند [14].

ریکاردو ساودرا<sup>2</sup> و همکاران (2010) مطالعه‌ای جهت بسط چارچوب دینامیک سیستم اعمال شده بر روی زنجیره تأمین انرژی تجدید پذیر با در نظر گرفتن پایداری انجام داد. این پژوهش اهمیت مدل‌سازی سیستم را با توجه به بهبود درک زنجیره تأمین در انرژی‌های تجدید پذیر و توسعه روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی در سیستم‌های انرژی تجدید پذیر نشان داد [15]. کوریاما<sup>3</sup> 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 داده‌اند [16]. در کشور آمریکا کوهی سونگ<sup>4</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، مصرف خانوارهای آمریکایی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ را با استفاده از مقیاس، توزیع و تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی بررسی کرده‌اند، سپس به توسعه مدل نهاده و ستاده<sup>5</sup> چند منطقه توسعه یافته و بررسی دقیق هزینه‌های مصرف‌کننده ایالات متحده پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد اثر کربن سالانه خانواده‌های ایالات متحده از ۱۷/۷ به ۲۰/۶ گسترش یافته است و مقیاس، توزیع و تغییرات انتشار GHG جهانی ناشی از مصرف خانگی ایالات متحده است، بنابراین استفاده از انرژی تجدید پذیر توصیه می‌شود [17]. در بخش حمل‌ونقل اندونزی که در حال حاضر بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی تجدید ناپذیر اندونزی است، یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی حمل‌ونقل جاده‌ای توسط استیون<sup>6</sup> و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شده است. مدل آن‌ها دو هدف اصلی کاهش مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> را در نظر می‌گیرد. آن‌ها همچنین سناریوهای سیاستی را نیز تدوین کرده‌اند [18]. چن<sup>7</sup> 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 (ماکزیم تولید کل، مینیمم هزینه و مینیمم انتشار CO<sub>2</sub>) را در کار خود لحاظ کرده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد چه میزان نیروگاه‌های تجدیدپذیر افزایش یابد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در برداشته باشد [19].

کاماسچی<sup>8</sup> و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهش خود، مدلی برای عرضه و تقاضای گاز طبیعی برای ایتالیا طراحی کردند [20]. چی<sup>9</sup> و همکاران (۲۰۰۸) نیز مدلی برای صنعت گاز طبیعی انگلستان طراحی نمودند. در این مدل

خورشیدی، تعیین اهداف رشد سالانه بالاتر از حال حاضر برای ایران ضروری است. این اهداف باید بر اساس نیازهای انرژی کشور، منابع موجود و پیشرفت‌های فناوری در بخش انرژی خورشیدی باشد. هدف گذاری برای نرخ رشد سالانه حداقل 20 تا 25 درصد در تولید انرژی خورشیدی یک هدف واقعی برای ایران خواهد بود. این به کشور اجازه می‌دهد تا به تدریج سهم خود از انرژی‌های تجدیدپذیر را در ترکیب کلی انرژی خود افزایش دهد، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد، فرصت‌های شغلی جدیدی در بخش انرژی پاک ایجاد کند و امنیت انرژی را افزایش دهد. با تعیین اهداف رشد بلندپروازانه برای تولید انرژی خورشیدی، ایران می‌تواند راه را به سوی آینده‌ای پایدارتر هموار کند و در عین حال موجب رشد و شکوفایی اقتصادی شود. هدف/این تحقیق، بررسی این نظریه است که "رشد سالانه تولید انرژی خورشیدی در ایران چقدر باشد تا به توسعه پایدار و رشد اقتصادی ثابت دست یابیم؟" در ادامه پیشینه پژوهش در بخش دوم مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در قسمت سوم روش شناسی تحقیق و در بخش چهارم شبیه سازی با استفاده از روش پویایی‌های سیستم (بررسی نمودارهای علی-حلقوی و نمودارهای جریان) صورت پذیرفته است. در نهایت پس از اطمینان از صحت الگوی بسط داده شده به پیش بینی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر برای دستیابی به توسعه پایدار پرداخت شده است. در نهایت نتایج تحقیق و پیشنهادات برای بهبود سیستم ارائه گردیده است.

## 2- پیشینه تحقیق

بخش انرژی اساساً یک سیستم پویا و پیچیده است، زیرا از اجزای زیادی با روابط علت و معلولی پیچیده تشکیل شده است. که این روابط علت و معلولی پیچیده از طریق حلقه‌های بازخورد متعدد ایجاد شده‌اند. این سیستم از منابع مختلف تأمین، استفاده پیچیده و مشارکت ذینفعان متعدد با اهداف و منافع مدیریتی متفاوت تشکیل شده است. علاوه بر این، سیستم‌های تولید انرژی تحت تأثیر عوامل داخلی متنوع (نوسانات تقاضا، تحولات سیاست انرژی و پایداری) و عوامل خارجی (بی‌ثباتی سیاسی، بلایای طبیعی و وابستگی به انرژی) قرار دارد. وجود این عوامل در کنار هم بدان معناست که برنامه ریزان انرژی باید در شرایط نامطمئن تصمیم بگیرند و بنابراین توسعه بخش انرژی با رویکرد پایداری با چالش‌های زیادی مواجه است [8]. به‌طور کلی، سیستم‌های انرژی شامل ویژگی‌های مرتبط با سیاست، مانند تعاملات بین‌المللی، توافق‌نامه‌های هماهنگی و تعاملی، قوانین نهادینه شده و طیف پیچیده و متنوعی از گروه‌های ذینفع است [9]. سیستم‌های انرژی، سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که اغلب با رفتار سیستم نامشخص همراه هستند [10]. مطالعات متعددی برای پرداختن به تغییرات آب‌وهوا، انرژی‌های تجدید پذیر و استفاده پایدار از منابع با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیستم به‌عنوان یک ابزار انجام شده است. در سطح کلان از رویکرد پویایی سیستم برای تدوین سیاست‌های عملی و در سطح خرد برای ارزیابی و اندازه‌گیری عوامل استفاده شده است [11].

مدل پویایی‌شناسی سیستم انرژی ایالات متحده (FOSSIL2)، در مورد عرضه و تقاضای انرژی نسبت به سایر آثار پویایی‌شناسی سیستم تأثیر زیادی

6. Setiawan  
7. Chen  
8. Comaschi  
9. Chi

1. Al-Sarhiah  
2. Ricardo Saavedra  
3. Kuriyama  
4. Kaihui, S  
5. Input Output Modelling

در مطالعه‌های محقر و نجف زاده (1396) مدل مبتنی بر پویایی سیستم برای توسعه ظرفیت تولید برق در کشور را ارائه دادند. در این پژوهش، شیوه عملکرد مدل بر انتخاب فناوری بر اساس تمایل به کمترین هزینه کلی تولید و عرضه واحد برق و پاسخگویی به تقاضای انرژی استوار است. افق 40 سال آینده برای مدل در نظر گرفته شده است تا همه تغییرات و پویایی حاکم بر سیستم واقعی بتواند خود را نشان دهد. مقایسه روندهای تقاضای برق، میزان عرضه سالانه برق به بخش تقاضا و انرژی الکتریکی تولیدی سالیانه و انطباق زیادی که میان آن‌ها وجود دارد، نشان‌دهنده سازگاری مدل با شرایط واقعی است [24]. از آنجایی که مطالعات محدودی در مورد چگونگی دسترسی پایدار به انرژی وجود دارد، در تکمیل مطالعات بررسی شده، هدف اصلی این تحقیق بررسی نقش انرژی خورشیدی در دسترسی پایدار به انرژی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای ایران می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، عوامل مؤثر بر سیستم شامل چهار زیر سیستم انرژی، اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست تعریف شده است. علاوه بر این، امنیت انرژی به‌عنوان در دسترس بودن عرضه انرژی کافی برای برآوردن تقاضای موجود تعریف شده است. در ادامه مبانی نظری تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

### 3- روش شناسی

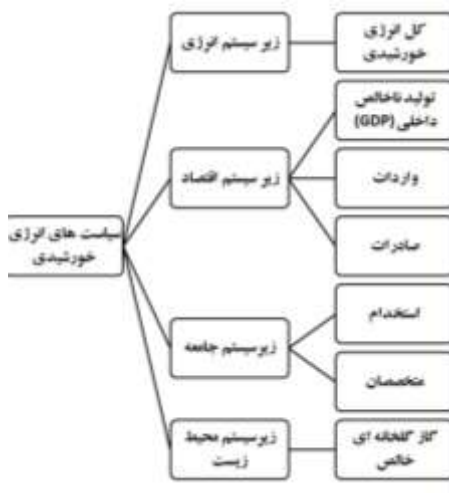
پویایی‌شناسی سیستم یک روش کارآمد برای توسعه و بررسی سیاستگذاری است. این مدل‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری بالا به‌عنوان روش‌شناسی این مطالعه انتخاب شده است. تجزیه و تحلیل ساختار سیستم (مدل) توسط سیاست‌ها درک رفتار سیستم را در طول زمان فراهم می‌کند [25]. در تعریفی دیگر پویایی‌شناسی سیستم یک رویکرد مدل‌سازی برای درک، تجسم و تجزیه و تحلیل سیستم‌های بازخورد پویا پیچیده است. با پویایی‌شناسی سیستم، می‌توان از ساختارهای ضروری استخراج شده از مکانیسم کار سیستم و توسعه استراتژی‌های مدیریت کارآمد بر اساس تجزیه و تحلیل ساختارهای بازخورد ذاتی سیستم، برای تسهیل درک سیستم استفاده کرد [26]. مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم به دلیل رویکرد درون‌زای آن برخلاف سایر مدل‌های انرژی کمی است، زیرا به تحلیلگر سیستم در درک ساختار سیستم و مدل‌سازی کمک کرده و بنابراین جنبه‌های اجتماعی را در ساختار مدل درون‌زا مشاهده و تعبیه می‌کند [27]. روش پویایی‌شناسی سیستم به دلیل ملاحظات ماندنی دنبال کردن تغییرات در طول زمان (دینامیک)، مشکلات پیچیدگی (هم پیچیدگی جزئیات و هم پیچیدگی پویا)، غیرخطی بودن و وجود سیستم بازخوردی به‌طور گسترده در مطالعات محیطی مورد استفاده قرار گرفته است [28].

پویایی‌شناسی سیستم می‌تواند برای ترسیم دانش یا مدل ذهنی سیاست‌گذاران و سایر اطلاعات در مورد کسب‌وکار یا سیستم‌های اجتماعی مورد استفاده قرار گیرد که سپس می‌تواند به مدل‌ها و شبیه‌سازی‌ها تبدیل شود [29]. پویایی‌شناسی سیستم اساس تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند؛ بنابراین، می‌توان از طریق ایجاد، بحث و تسهیل تغییرات در مدل‌های ذهنی مربوطه تصمیم‌گیرندگان، به رویکردهای بهتری برای مدیریت سیستم دست یافت [30]. علاوه بر این، پویایی‌شناسی سیستم را می‌توان از طریق سه مرحله در فرآیند سیاست‌گذاری گنجانند: تجزیه و تحلیل، برنامه‌ریزی و کنترل. پیش‌بینی عملکرد مورد انتظار، پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان یک عنصر اساسی در مرحله کنترل

متغیرهای اصلی اکتشاف، تولید و مصرف در نظر گرفته شده است. باسی<sup>1</sup> (۲۰۰۶) مدلی برای منابع انرژی در آمریکا طراحی کرد. مدل وی شامل بخش‌های جامعه، اقتصاد، محیط‌زیست، ارتباطات و بازخوردهای آن‌ها با بخش انرژی است. نخعی نژاد و همکاران (1401) در مطالعه‌ای تحت عنوان «طراحی مدل برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش تولید انرژی برق با استفاده از رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی خطی و پویایی‌شناسی سیستمی (مطالعه موردی: نیروگاه‌های برق ایران) با استفاده از تکنیک‌های تحقیق در عملیات، به ارائه مدل ریاضی برای مشخص کردن میزان تولید انرژی برق از نیروگاه‌های مختلف با شرایط اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی پرداخته‌اند. سپس با پویایی‌شناسی سیستمی، تخصیص انرژی برق به بخش‌های مختلف شامل خانگی، تجاری، حمل‌ونقل، صنایع و کشاورزی به عنوان مصرف‌کننده بررسی شده است. برای شبیه‌سازی و ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی، از 10 نوع نیروگاه کشور و داده‌های ترازنامه انرژی سال 1396 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 نمودارهای 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 [21].

کاظمی و همکاران (۱۳۹۹)، با مقایسه هزینه انرژی نهایی و هزینه واحد انرژی تولیدی، قیمت‌های تمام‌شده برق تولیدی توسط نیروگاه‌های مختلف سیکل ترکیبی، بادی و فتوولتائیک را مقایسه کرده‌اند. پژوهشگران از روش تحلیلی-پوششی داده‌ها برای ارزیابی اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی و مقایسه فناوری‌های تولید برق استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده است هزینه تمام‌شده تولید برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر بیشتر است و تکنولوژی‌های تجدیدپذیر بیشترین انطباق را با معیارهای پایداری دارد [22]. رحیمی راد و همکاران (1397) در مطالعه‌ای به شناسایی و بررسی موانع گذار اجتماعی-فنی به سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک با تأکید بر رژیم برق فسیلی پرداختند. این پژوهش با ترکیب رویکردهای چند سطحی و نظام نوآوری فناوری، در پی شناسایی و بررسی موانع برآمده که رژیم اجتماعی-فنی برق فسیلی ایران در بستر تاریخی و فرهنگی خود موجبات عدم گذار به سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک را فراهم آورده‌اند. بدین منظور، در مرحله نخست ابتدا پس از مرور ادبیات، مصاحبه با خبرگان و سپس تحلیل مضمون داده‌های حاصله، موانع گذار با تأکید بر رژیم شناسایی شدند و سپس از تکنیک دلفی فازی جهت آزمون نتایج و خیره سنجی استفاده گردید که در نهایت 10 مانع در 4 دسته اقتصادی، نهادی، سیاسی و فنی طبقه‌بندی شدند که می‌توان به کنترل بازار توسط رژیم حاکم، به‌کارگیری استراتژی‌های گفتمانی، تنظیم مقررات و استانداردها در تثبیت رژیم حاکم، سرمایه‌گذاری عظیم در توزیع و استخراج نفت و گاز و ... اشاره کرد. در مرحله دوم نیز مصاحبه با خبرگان و استفاده از روش تحلیل و توسعه گزینه‌های استراتژیک (سودا) مشخص کرد که این موانع بیشترین تأثیر را بر کارکردهای تخصیص منابع، مشروعیت بخشی و جهت‌دهی به سیستم داشته‌اند. در نهایت نیز تعدادی سازوکار برای غلبه بر این موانع پیشنهاد گردیده است [23].

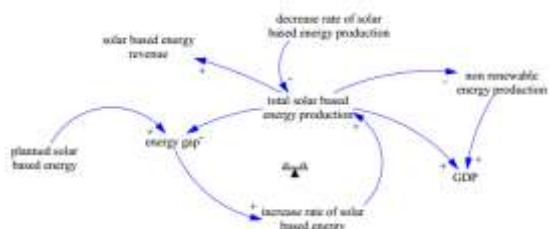
1. Bassi



شکل 1 چهارچوب مفهومی پژوهش

#### 4-1 نمودارهای علی حلقوی

همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، طرحی برای استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. بر این اساس، یک حلقه متعادل وجود دارد که در آن شکاف انرژی به عنوان تفاوت بین تولید انرژی خورشیدی برنامه ریزی شده و کل تولید انرژی خورشیدی تحقق یافته تعریف می شود. با کاهش میزان تولید انرژی خورشیدی، نرخ تولید انرژی خورشیدی کاهش و با افزایش میزان تولید انرژی خورشیدی، نرخ تولید انرژی خورشیدی افزایش می یابد. بر اساس شکل 2 کل تولید انرژی خورشیدی باعث افزایش درآمد انرژی خورشیدی و تولید ناخالص داخلی می شود و در عین حال شکاف انرژی و تولید انرژی های تجدید ناپذیر را کاهش می دهد.



شکل 2 نمودار علی حلقوی زیر سیستم انرژی

شکل 3 زیر سیستم جامعه را نشان می دهد که بر اشتغال و آموزش برای داشتن متخصصان بیشتر در صنعت انرژی خورشیدی تمرکز دارد. همان طور که مشخص است، یک طرح استخدام برگرفته از طرح انرژی خورشیدی وجود دارد. این طرح یک حلقه موازنه ایجاد می کند که در آن شکاف نیروی کار به عنوان تفاوت بین تعداد مورد نظر نیروی کار و اشتغال تعریف می شود. اشتغال بیشتر باعث افزایش سطح حرفه و کاهش بیشتر نرخ اشتغال می شود.

با انحرافات نشان دهنده نیاز به تجزیه و تحلیل بیشتر است. بنابراین، پویایی شناسی سیستم درک جامعی از کل سیستم و پاسخ های خط مشی مربوطه برای این مطالعه ارائه می دهد. در واقع، پویایی شناسی سیستم در بسیاری از رشته ها از جمله سیستم های اجتماعی-اقتصادی، سیستم های اکولوژیکی، سیستم های حمل و نقل و مدیریت محیط زیستی و ارزیابی سیاست (مانند مدیریت زباله جامد، مدیریت منابع آب، کاهش گازهای گلخانه ای (GHG)، ارزیابی پایدار و برنامه ریزی محیط زیستی) کاربرد پیدا کرده است. استرمن گام های فرایند مدل سازی را در 5 مرحله توصیف می کند<sup>1</sup>. مدل سازی فرایندی بازخوردی است و به صورت توالی خطی چند گام پشت سر هم نبوده، بلکه گام های فرآیند مدل سازی چندین بار تکرار می شوند.

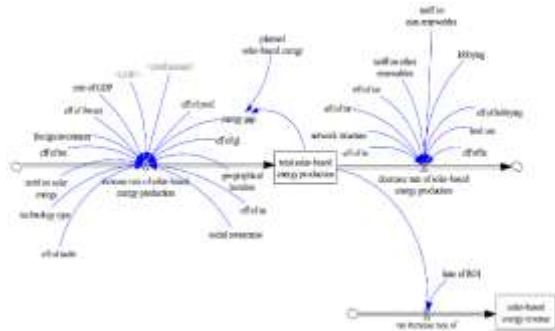
با توجه به اینکه در این پژوهش از رویکرد پویایی شناسی سیستم ها استفاده خواهد شد، در ابتدا مسئله و رفتار مرجع بیان خواهد شد. سپس متغیرهای کلیدی مسئله مشخص می گردد. در مرحله بعد، چگونگی ارتباط بین متغیرها در قالب نمودار علی معلولی مربوط تهیه شده و در ادامه، نمودار جریان بر مبنای نمودار علی معلولی توسعه خواهد یافت. سپس با شبیه سازی مدل با استفاده از نرم افزار ونسیم و اعتبارسنجی مدل، سناریوهای گوناگون تجزیه و تحلیل می گردند.

#### 4-2 مدل سازی

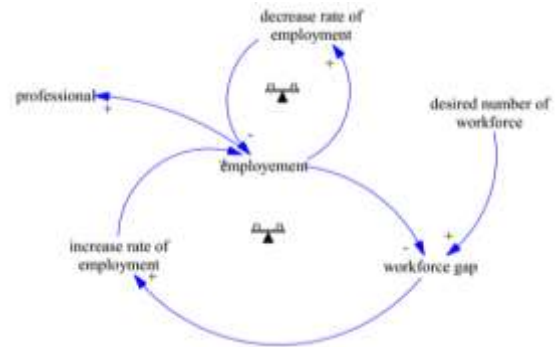
در این بخش در ابتدا به چارچوب مفهومی مدل خواهیم پرداخت. سپس نمودار علی حلقوی و نمودار جریان الگو تشریح خواهند شد. در نهایت به آزمون مدل و شبیه سازی آن خواهیم پرداخت. در این مطالعه مدل با استفاده از روش پویایی شناسی سیستم و بر اساس مرور ادبیات توسعه داده شده است. با توجه به شکل 1، زیر سیستم های مدل اولیه در انتخاب سیاست های مناسب که نقش بالقوه ای در ارتقای تولید انرژی خورشیدی، تولید ناخالص داخلی و امنیت انرژی دارند، مهم هستند. این زیر سیستم های فرعی به چهار دسته طبقه بندی می شوند. زیر سیستم انرژی که روند تولید انرژی خورشیدی و درآمد انرژی مبتنی بر خورشید را نشان می دهد، زیر سیستم اقتصاد با تمرکز بر تولید ناخالص داخلی، واردات، صادرات و تقاضای انرژی، زیر سیستم جامعه با تمرکز بر اشتغال و متخصصان، زیر سیستم محیط زیست با تمرکز بر انتشار گازهای گلخانه ای.

هدف این تحقیق، بررسی این نظریه است که "رشد سالانه تولید انرژی خورشیدی در ایران چقدر باشد تا به توسعه پایدار و رشد اقتصادی ثابت دست یابیم؟" در ادامه نمودارهای علی حلقوی برای 4 زیر بخش فرض شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ابتدا به نمودار علی حلقوی زیر سیستم انرژی خواهیم پرداخت.

1. تشریح دقیق مسئله (تعیین محدوده مدل)، فرموله سازی فرضیه ی پویا، فرموله سازی یک مدل شبیه سازی، آزمون، طراحی و ارزیابی سیاست



شکل 5 نمودار جریان زیر سیستم انرژی

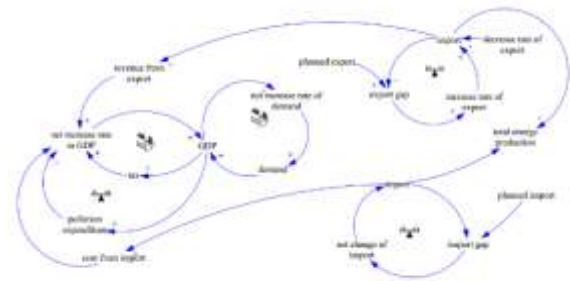


شکل 3 نمودار علی حلقوی زیرسیستم جامعه

جدول 1 متغیرهای مهم زیر سیستم انرژی

نام متغیر	شرح متغیر	نوع متغیر	فرمول/مقدار
rate of GDP	نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	ثابت	7/8
GDP	تولید ناخالص داخلی	سایه	-
professional	متخصصان	سایه	-
planned solar based energy	انرژی خورشیدی برنامه‌ریزی شده	ثابت	2600
energy gap	شکاف انرژی	کمکی	planned solar based energy-total solar based energy production eff of invest+eff of gl+eff of prof+eff of sa+eff of tech+eff of tse+energy gap+foreign investment+GDP+geographical location+professional+rate of GDP+social awareness+tarrif on solar energy+technology type
increase rate of solar based energy production	نرخ افزایش تولید انرژی خورشیدی	جریان	eff of lobby+eff of lu+eff of ns+eff of tnr+land use+lobbying+network structure+tarrif on non renewables+tarrif on other renewables
total solar based energy production	کل تولید انرژی خورشیدی	کمکی	INTEG (increase rate of solar based energy production-decrease rate of solar based energy production,120)
solar based energy revenue	درآمد حاصل از انرژی خورشیدی	سطح	INTEG (net increase rate of solar based energy revenue,120000)
net increase rate of solar based energy revenue	نرخ افزایش خالص درآمد انرژی خورشیدی	جریان	total solar based energy production/time for ROI
time for ROI	زمان بازگشت سرمایه	ثابت	5 سال

بر اساس شکل 4، برنامه‌هایی برای صادرات و واردات برق وجود دارد. با توجه به این طرح‌ها، یک حلقه متعادل‌کننده برای صادرات و یک حلقه متعادل‌کننده دیگر برای واردات وجود دارد. شکاف صادراتی با تفاوت بین صادرات برنامه‌ریزی شده و صادرات واقعی تعیین می‌شود. برعکس، شکاف واردات به عنوان تفاوت بین واردات برنامه‌ریزی شده و واردات واقعی تعریف می‌شود. کل تولید انرژی با واردات افزایش یافته، اما با صادرات کاهش می‌یابد. صادرات باعث ایجاد درآمد می‌شود که این موضوع منجر به افزایش تولید ناخالص داخلی خواهد شد. اما واردات هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و باعث کاهش تولید ناخالص داخلی می‌شود. روابط بین تقاضا و تولید ناخالص داخلی یک حلقه تقویت‌کننده را تعریف می‌کند. به عبارت دیگر، افزایش تولید ناخالص داخلی باعث افزایش تقاضا می‌شود و بالعکس. سهمی از تولید ناخالص داخلی برای کاهش آلودگی در نظر گرفته شده است که باعث کاهش تولید ناخالص داخلی در یک حلقه متعادل می‌شود.

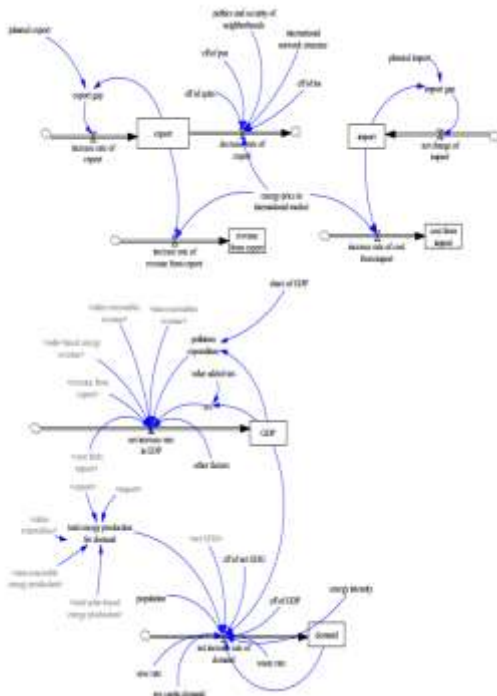


شکل 4 نمودار علی حلقوی زیر سیستم اقتصاد

#### 2-4 نمودارهای جریان

نمودار جریان زیر سیستم انرژی از دو متغیر سطح شامل «تولید کل انرژی خورشیدی» و «درآمد انرژی خورشیدی» تشکیل شده است که در شکل 5 نشان داده شده است. از طرفی در جدول (1) متغیرهای مهم زیر سیستم انرژی ارائه شده است.

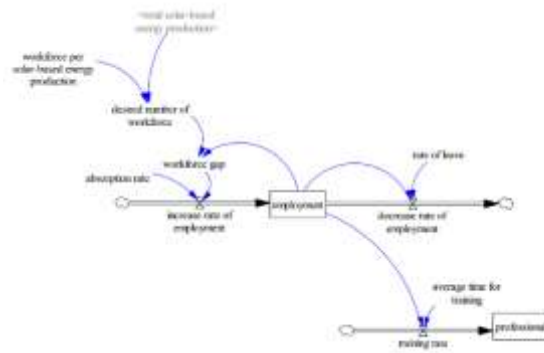
نمودار جریان زیر سیستم جامعه از دو متغیر سطح شامل «استخدام» و «متخصصان» تشکیل شده است که در شکل 6 قابل مشاهده است. در جدول (2)، متغیرهای مهم زیر سیستم جامعه ارائه شده است.



شکل 7 نمودار جریان زیر سیستم اقتصاد

جدول 3 متغیرهای مهم زیر سیستم اقتصاد

فرمول/مقدار	نوع متغیر	شرح متغیر	نام متغیر
INTEG (net increase rate of demand,900)	سطح	تقاضا	demand
1/2	ثابت	اثر گازهای گلخانه‌ای خالص	eff of net GHG
	سایه	گازهای گلخانه‌ای خالص	net GHG
2	ثابت	شدت انرژی	energy intensity
eff of epim+eff of ins+eff of psn+energy price in international market+international network structure+politics and security of neighborhoods planned export-export	جریان	نرخ کاهش صادرات	decrease rate of export
INTEG (net increase rate in GDP,2)	سطح	تولید ناخالص داخلی	GDP
-	جریان	نرخ افزایش خالص تولید ناخالص داخلی	net increase rate in GDP
planned import-import	کمکی	شکاف وارداتی	import gap
90	ثابت	تولید انرژی‌های تجدید ناپذیر	non renewable energy production

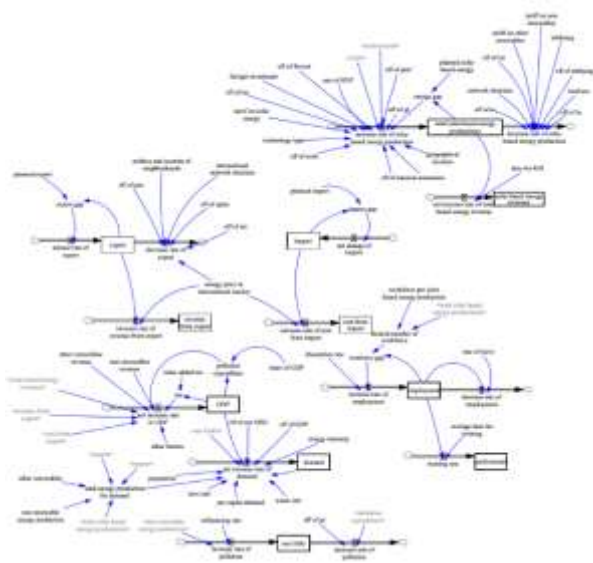


شکل 6 نمودار جریان زیر سیستم جامعه

جدول 2 متغیرهای مهم زیر سیستم جامعه

فرمول/مقدار	نوع متغیر	شرح متغیر	نام متغیر
0/02	ثابت	نرخ جذب	absorption rate
32	ثابت	میانگین زمان برای آموزش	average time for training
workforce gap*absorption rate	جریان	نرخ افزایش استخدام	increase rate of employment
employment*rate of leave	جریان	نرخ کاهش استخدام	decrease rate of employment
INTEG (training rate,448)	سطح	متخصصان	professional
12	ثابت	نرخ خروج	rate of leave
average time for training*employment	کمکی	نرخ آموزش	training rate
desired number of workforce-employment	کمکی	شکاف نیروی کار	workforce gap
	سایه	کل تولید انرژی خورشیدی	Total solar based energy production

نمودار جریان زیر سیستم اقتصاد از شش متغیر سطح شامل «صادرات»، «واردات»، «درآمد صادرات»، «هزینه واردات»، «تولید ناخالص داخلی» و «تقاضا» تشکیل شده است که در شکل 7 قابل مشاهده است. در ادامه همچنین متغیرهای مهم زیر سیستم اقتصاد در جدول (3) ارائه شده است.



شکل 9 نمودار جریان مدل اصلی

0/39	ثابت	تقاضای سرانه	per capita demand population
70000000	ثابت	جمعیت	revenue from export
INTEG (increase rate of revenue from export,1400)	سطح	درآمد حاصل از صادرات	share of GDP
0/17	ثابت	سهم تولید ناخالص داخلی	tax
value added tax*GDP	کمکی	مالیات	total energy production for demand
export+import+non renewable energy production+other renewables+total solar based energy productionn	کمکی	کل تولید انرژی برای تقاضا	Total solar based energy production Total energy production for demand
-	سایه	کل تولید انرژی خورشیدی	
export+import+non renewable energy production+other renewables+total solar based energy productionn	کمکی	کل تولید انرژی برای تقاضا	

### 5- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی و پیش بینی برای بخش های اقتصادی، انرژی، زیست محیطی و تولید انرژی های تجدید پذیر برای ایران مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

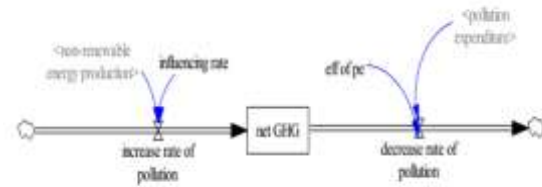
نمودارهای جریان نمایش بصری فرآیندها و تعاملات درون یک سیستم هستند، در حالی که نتایج شبیه سازی داده های کمی را در مورد رفتار سیستم تحت شرایط مختلف ارائه می دهد.

همبستگی بین نمودارهای جریان ترسیم شده و نتایج شبیه سازی می تواند به اعتبارسنجی مدل مورد استفاده در شبیه سازی کمک کند. اگر نتایج شبیه سازی با نتایج مورد انتظار بر اساس نمودار جریان مطابقت داشته باشد، نشان می دهد که مدل به طور دقیق سیستم را نشان می دهد.

به طور کلی، یک همبستگی قوی بین نمودارهای جریان ترسیم شده و نتایج شبیه سازی می تواند اعتماد به قابلیت اطمینان مدل شبیه سازی و توانایی آن برای پیش بینی دقیق رفتار سیستم را فراهم کند. با توجه به داده های اقتصاد ایران (جدول 1-3) الگوی بسط داده شده در این تحقیق برای ایران کالیبره و نتایج بدست آمده در سناریوهای مختلف در زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل 10، نمودار شبیه سازی شده برای تولید کل انرژی خورشیدی را نشان می دهد. طبق این نمودار برای داشتن رشد اقتصادی ثابت 7/8 درصدی و ثبات و پایداری اقتصادی، همچنین تامین پایدار انرژی مورد تقاضا در صنعت و جامعه تولید کل انرژی خورشیدی به تدریج در دوره 1401-1411 در حدود 35 درصد در سال باید افزایش یابد. به گونه ای که بر اساس پیش بینی الگو مقدار تولید برق از انرژی خورشیدی حدودا 170 مگا وات در سال 1401 به حدود 800 مگاوات در سال 1411 خواهد رسید.

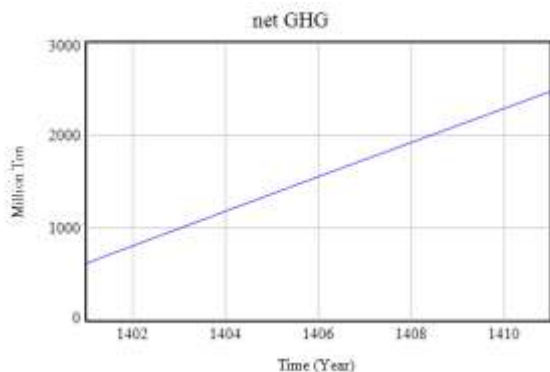
نمودار جریان زیر سیستم محیط زیست از یک متغیر سطح شامل «گازهای گلخانه ای خالص» تشکیل شده است که در شکل 8 قابل مشاهده است. در جدول (4)، متغیرهای مهم زیر سیستم محیط زیست ارائه شده است. همچنین شکل 9، نمودار جریان مدل اصلی را نشان می دهد.



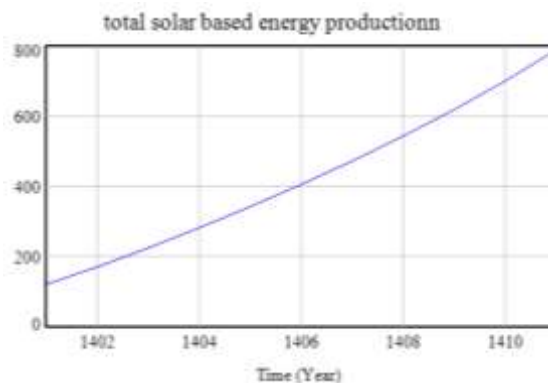
شکل 8 نمودار جریان زیر سیستم محیط زیست

جدول 4 متغیرهای مهم زیر سیستم محیط زیست

نام متغیر	شرح متغیر	نوع متغیر	فرمول/مقدار
eff of pe	اثر هزینه های آلودگی	ثابت	2/1
non renewable energy production pollution expenditure	تولید انرژی های تجدید ناپذیر	ثابت	90
net GHG	هزینه های آلودگی گازهای گلخانه ای خالص	کمکی	share of GDP*GDP
increase rate of pollution	نرخ افزایش آلودگی	سطح	INTEG (increase rate of pollution-decrease rate of pollution,30)
decrease rate of pollution	نرخ کاهش آلودگی	جریان	influencing rate*non renewable energy production
influencing rate	نرخ تأثیرگذار	جریان	eff of pe*pollution expenditure
		ثابت	2/4

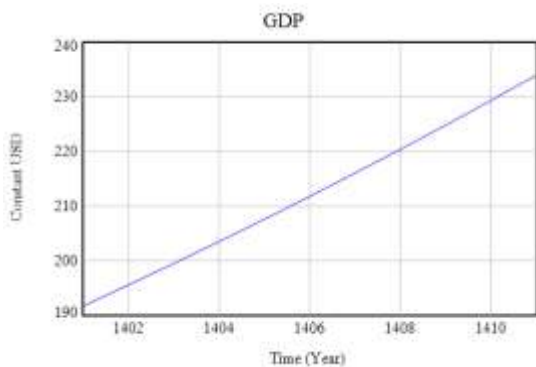


شکل 12 نمودار شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای خالص



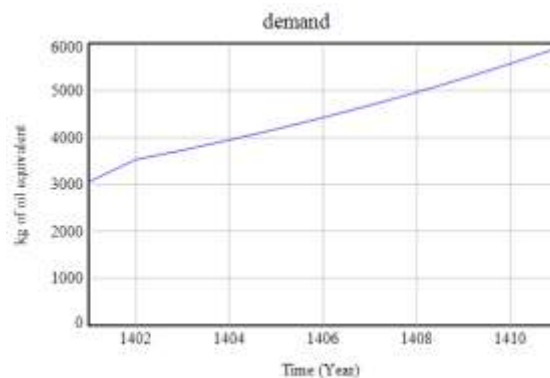
شکل 10 نمودار شبیه‌سازی تولید کل انرژی خورشیدی

شکل 13، نمودار شبیه‌سازی تولید ناخالص داخلی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار در صورت تامین انرژی مورد نیاز و توسعه استفاده از انرژی خورشیدی (رشد سالانه 35 درصدی تولید) می‌توان دریافت تولید ناخالص داخلی طی دوره 1401-1411 در سال رشد ثابت و پایدار حدود 7/8 درصدی را تجربه خواهد کرد.



شکل 13 نمودار شبیه‌سازی تولید ناخالص داخلی

شکل 11، نمودار شبیه‌سازی کل تولید انرژی برای تقاضا را نشان می‌دهد. طبق این نمودار می‌توان دریافت کل تولید انرژی برای تقاضا طی دوره 1401-1411، به طور متوسط 8/9 درصد در سال افزایش خواهد یافت. یک راه برای تامین انرژی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت.



شکل 11 کل تولید انرژی برای تقاضا

#### 6- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک تحقیق نظام‌مند انجام شده است، تا نقش انرژی خورشیدی در دسترسی پایدار و توسعه پایدار اقتصادی را برای اقتصاد ایران ارزیابی کند. بنابراین یک نمودار بازخوری علت و معلولی و یک نمودار جریان معرفی شده تا رابطه بین عوامل پویای انرژی خورشیدی در دسترسی پایدار را مشخص کند. نتایج نشان می‌دهد که تولید کل انرژی خورشیدی به تدریج در دوره 1401-1411 در حدود 35 درصد در سال باید افزایش یابد تا اولاً در تامین انرژی مورد نیاز صنایع و جامعه پایداری حفظ گردد، در ثانی رشد اقتصادی ثابت 8/7 درصدی را در اقتصاد تجربه نماییم. این در حالی است که کل تولید و تقاضای انرژی برای تقاضا طی دوره 1401-1411، افزایش 8/9 درصدی در سال را تجربه خواهد کرد. از طرفی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای خالص طی دوره 1401-1411، رشد سالانه 15/7 درصدی را خواهیم داشت. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان دریافت به‌کارگیری برنامه‌های عملیاتی انرژی برای نصب ظرفیت‌های انرژی‌های تجدید پذیر نه تنها باعث کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی می‌گردد، بلکه باعث صرفه‌جویی در واردات انرژی و هزینه‌های آن در بلند مدت نیز می‌شود و خود زمینه‌ای برای خودکفایی ملی

شکل 12، نمودار شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای خالص را نشان می‌دهد. طبق این نمودار می‌توان دریافت گازهای گلخانه‌ای خالص طی دوره 1401-1411، به طور متوسط دارای رشد سالانه 15/7 درصدی خواهد بود. با توجه به این پیش بینی کشور ایران به طور حتم در آینده ای نه چندان دور با مشکلات زیست محیطی روبرو خواهد شد که سیاست گذار باید از هم اکنون سیاست‌های لازم برای مقابله با این مشکل را اتخاذ نماید.

به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور کاهش اثرات زیست محیطی و ارتقای پایداری بلندمدت است.

#### 7- مراجع

- [1] S. Agrawal and R. Soni, *Renewable energy: Sources, importance and prospects for sustainable future*, Energy: Crises, Challenges and Solutions, Wiley Online Library, pp. 131-150, 2021.
- [2] S. Koochi-Fayegh and M. A. Rosen, A review of renewable energy options, applications, facilitating technologies and recent developments, *European Journal of Sustainable Development Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 138, 2020.
- [3] C. Gu et al., System dynamics modelling of urbanization under energy constraints in China, *Scientific reports*, Vol. 10, No. 1, pp. 9956, 2020.
- [4] F. Atabi, Renewable energy in Iran: Challenges and opportunities for sustainable development, *International Journal of Environmental Science & Technology*, Vol. 1, pp. 69-80, 2004.
- [5] S. Kumar and K. Rathore, Renewable Energy for Sustainable Development Goal of Clean and Affordable Energy, *International Journal of Materials Manufacturing and Sustainable Technologies*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-15, 2023.
- [6] B. W. Ang, W. L. Choong, and T. S. Ng, Energy security: Definitions, dimensions and indexes, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 42, pp. 1077-1093, 2015.
- [7] S. Kazemifard, L. Naji, and F. Afshar Taromi, Review on Renewable Energy Sources Role in Sustainable Development, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 4, No. 1, pp. 34-43, 2017. (in Persian)
- [8] M. Laimon, T. Mai, S. Goh, and T. Yusaf, Energy sector development: System dynamics analysis, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 134, 2019.
- [9] F. R. Arroyo M and L. J. Miguel, The role of renewable energies for the sustainable energy governance and environmental policies for the mitigation of climate change in Ecuador, *Energies*, Vol. 13, No. 15, pp. 3883, 2020.
- [10] M. Mutungi, C. Mbohwa, and V. P. Kommula, System dynamics approaches to energy policy modelling and simulation, *Energy Procedia*, Vol. 141, pp. 532-539, 2017.
- [11] A. Brent, M. Mokheseng, B. Amigun, H. Tazvinga, and J. Musango, Systems dynamics modelling to assess the sustainability of renewable energy technologies in developing countries, *WIT Trans. Ecol. Environ.*, Vol. 143, pp. 13-24, 2011.
- [12] R. F. Naill, A system dynamics model for national energy policy planning, *System Dynamics Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-19, 1992.
- [13] A. Hidayatno, R. Dhamayanti, and A. R. Destyanto, Model conceptualization for policy analysis in renewable energy development in Indonesia by using system dynamics, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 54-58, 2019.
- [14] A. Al-Sarihia, M. Contestabile, and J. A. Chernia, *Renewable energy policy evaluation using a system dynamics approach: the case of Oman*, 33rd International Conference of the System Dynamics Society, 2015.
- [15] C. H. d. O. Fontes and F. G. M. Freires, Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 247-259, 2018.
- [16] A. Kuriyama, K. Tamura, and T. Kuramochi, Can Japan enhance its 2030 greenhouse gas emission reduction targets? Assessment of economic and energy-related assumptions in Japan's NDC, *Energy Policy*, Vol. 130, pp. 328-340, 2019.
- [17] Z. G. Al-Kofahi, A. Mahdavian, and A. Oloufa, System dynamics modeling approach to quantify change orders impact on labor productivity 1: principles and model development comparative study, *International journal of construction management*, Vol. 22, No. 7, pp. 1355-1366, 2022.
- [18] I. Setiawan, *System dynamics modeling of Indonesia road transportation energy demand and scenario analysis to achieve national energy policy target*, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 546, No. 5, 2019.
- [19] F. Chen, G. Huang, and Y. Fan, A linearization and parameterization approach to tri-objective linear programming

و اشتغال‌زایی را فراهم خواهد کرد. توسعه انرژی‌های تجدید پذیر منافع اقتصادی و اجتماعی مختلفی را برای کشور به همراه دارد.

در زمینه اشتغال‌زایی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر نیز مهم است، وضعیت اشتغال‌زایی این سیستم‌ها، به علت ماهیت نوین آن‌ها بیش از اشتغال‌زایی ناشی از توسعه استفاده از سوخت‌های فسیلی بوده به‌طوری‌که استفاده از این سیستم‌ها به‌صورت بومی و محلی نیز میسر می‌باشد. مطابق با بررسی‌های انجام‌شده فرآیند نصب، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری از انرژی‌های تجدید پذیر، عمدتاً در مناطق روستایی و محروم تحقق می‌یابد لذا با توجه به اینکه چنین مناطقی از نرخ بیکاری بیشتری برخوردارند و کاربرد این سیستم‌ها می‌تواند در تثبیت جمعیت ساکن در این مناطق مفید واقع شوند لذا تأثیر به‌سزایی در کاهش میزان محرومیت این مناطق و افزایش رشد و بهره‌وری کشور خواهد داشت. با این حال با توجه به هزینه‌بر بودن و بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدید پذیر باینکه پتانسیل‌ها و منابع انرژی‌های تجدید پذیر در کشور ایران موجود است، استفاده از این منابع و تکنولوژی‌های مربوطه و سرمایه‌گذاری بر این انرژی‌ها با توجه به نتایج حاصله رشد چشم‌گیری نداشته است و رشد مصرف سوخت‌های فسیلی همچنان ادامه دارد. این نشان‌دهنده آن است که باید اهمیت و زمان بیشتری صرف بررسی این انرژی‌ها و سیاست‌گذاری کشور در زمینه سرمایه‌گذاری و نصب ظرفیت‌های تجدید پذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی گردد. در ادامه پیشنهادهایی برای بهبود سیستم استفاده از انرژی‌های خورشیدی ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از الگوی بسط داده شده و بر اساس مدل شبیه‌سازی شده و فروض این تحقیق، با دو برابر شدن سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های خورشیدی، میزان تولید انرژی مبتنی بر خورشید نسبت به سطح برنامه‌ریزی‌شده افزایش می‌یابد. در نتیجه این سیاست، تولید انرژی خورشیدی افزایش خواهد یافت. همچنین بر اساس سناریو دیگر بررسی شده در این تحقیق، با دو برابر شدن تعرفه انرژی‌های تجدیدناپذیر، درآمدهای مربوطه دو برابر می‌شود و این افزایش تأثیر بسیار کمی بر تولید ناخالص داخلی خواهد داشت. بنابراین، دو برابر شدن تعرفه انرژی‌های تجدیدناپذیر ممکن است منجر به افزایش درآمد دولت شود، اما ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های انرژی برای مصرف‌کنندگان نیز گردد. تأثیر اندک بر تولید ناخالص داخلی نشان می‌دهد که اگرچه این سیاست ممکن است درآمد اضافی برای دولت ایجاد کند ولی تأثیر قابل توجهی بر رشد کلی اقتصادی نخواهد داشت.

به طور کلی، هر دو سیاست پیامدهای خاص خود را دارند، اما سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی احتمالاً منافع بلندمدت بیشتری هم برای محیط زیست و هم برای اقتصاد خواهد داشت. افزایش در تولید انرژی خورشیدی به کاهش تقاضای سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند و به آینده انرژی پاک‌تر و پایدارتر نیز منجر خواهد شد. علاوه بر این، رشد بخش انرژی خورشیدی باعث ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و تحریک رشد اقتصادی در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر خواهد شد. بنابراین در این تحقیق سناریو اول یعنی سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی توصیه می‌شود. این موضوع نه تنها به تغییرات آب و هوایی منجر خواهد شد، بلکه نوآوری و پیشرفت فناوری در بخش انرژی پاک را نیز ارتقا می‌دهد. این سیاست برای حرکت در جهت یک سیستم انرژی پایدارتر و آگاهانه برای حفظ محیط زیست است. همچنین نشان‌دهنده تغییر

- problems for power generation expansion planning, *Energy*, Vol. 87, pp. 240-250, 2015.
- [20] C. Comaschi, E. Di Giulio, and E. Sormani, *Natural gas demand and supply in Italy*, in The 2007 International Conference of the System Dynamics Society and 50th Anniversary Celebration, 2007.
- [21] M. Nakhaeinejad, M. Abbasi, Y. ZareMehrerdy, and A. Asadi Zarch, Greenhouse gas emission reduction model: an integrated approach of linear programming and system dynamics The case of Iranian power plants, *Research in Production and Operations Management*, Vol. 13, No. 1, pp. 51-77, 2022. (in Persian)
- [22] A. Kazemi, S. Abdolapour, and S.-M.-R. Goldansaz, Economic, Social and Environmental Assessment of Electricity Generation from Renewable and Gas Technologies, *Iranian Journal of Energy*, Vol. 23, No. 3, pp. 7-33, 2020. (in Persian)
- [23] Z. rahimi rad, m. yahyazadefar, t. miremadi, and m. madhoshi, Identification and Analysis of Social-Technical Transition Barriers to Photovoltaic Solar Systems Focusing on Fossil Fuel Regime, *Journal of Technology Development Management*, Vol. 6, No. 2, pp. 49-77, 2018. (in Persian)
- [24] A. Mohaghar and K. Najafzadeh, A System Dynamics Model for Enhancing Capacity of Electricity Generation in Iran, *Management and Development Process*, Applicable Vol. 30, No. 2, pp. 145-172, 2017. (in Persian)
- [25] B. M. Sokame *et al.*, A system dynamics model for pests and natural enemies interactions, *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1401, 2021.
- [26] S. Park, B.-J. Kim, and S.-Y. Jung, Simulation methods of a system dynamics model for efficient operations and planning of capacity expansion of activated-sludge wastewater treatment plants, *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 1289-1295, 2014.
- [27] A. Gravelsins *et al.*, Modelling energy production flexibility: system dynamics approach, *Energy Procedia*, Vol. 147, pp. 503-509, 2018.
- [28] W. Rusiawan, P. Tjiptoherijanto, E. Suganda, and L. Darmajanti, System dynamics modeling for urban economic growth and CO2 emission: a case study of Jakarta, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 28, pp. 330-340, 2015.
- [29] J. D. Morecroft, System dynamics and microworlds for policymakers, *European journal of operational research*, Vol. 35, No. 3, pp. 301-320, 1988.
- [30] D. C. Lane, Should system dynamics be described as a 'hard' or 'deterministic' systems approach?, *Systems research and behavioral science: the official journal of the international federation for systems research*, Vol. 17, No. 1, pp. 3-22, 2000.