فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/سال بیست‌ویکم / شماره ۸۵/ تابستان ۱۴۰۴ / صفحات ۲۰۸-۱۷۱

نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران: یک رویکرد پویایی سیستمی

علی حسین استادزاد[1]
استادیار گروه مهندسی انرژی، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران
(a.ostadzad@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

چکیده

تأمین انرژی پایدار به یکی از چالش‌های اساسی کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. این پژوهش با هدف بررسی نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران، به این سوال پاسخ می‌دهد که دولت با چه سیاست‌هایی می‌تواند سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را تا سال ۱۴۳۰ به ۴۷ درصد (هدف تعیین شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی) برساند؟ در این راستا، از رویکرد پویایی‌های سیستم برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، وابستگی به منابع فسیلی و امنیت انرژی استفاده شده است. شش سناریو برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تعریف و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اتخاذ سیاست‌های مناسب و حمایت از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌توان به سهم ۴۷ درصدی از این منابع در تولید برق تا سال ۱۴۳۰ دست یافت. این پژوهش با ارائه یک مدل پویا، به سیاستگذاران کمک می‌کند تا با درک بهتر از اثرات متقابل عوامل مختلف، تصمیمات بهینه‌تری در زمینه انرژی اتخاذ کنند. با توجه به قوی ترین و خوشبینانه‌ترین حالت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر پیش‌بینی الگوی بسط داده شده توسط تحقیق نشان دهنده تولید ۴۷/۳۱ درصدی تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۱۴۳۰ می‌باشد.

طبقه‌بندی JEL: A23, B15, G23, R19.
کلیدواژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، مدل‌سازی پویایی‌های سیستم، امنیت انرژی، تقاضای انرژی

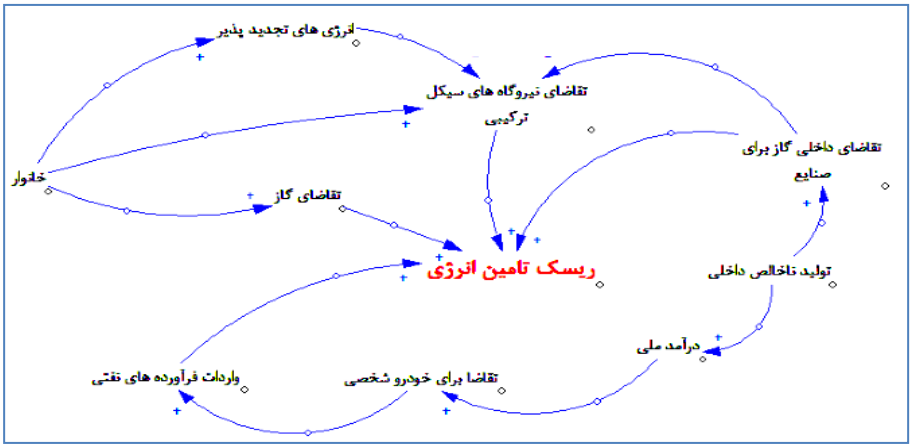
---

۱. نویسنده مسئول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۱- مقدمه

آژانس بین‌المللی انرژی(IEA)، امنیت انرژی را به عنوان "در دسترس بودن بی وقفه منابع انرژی با قیمت مقرون به صرفه" تعریف می‌کند (آیو[1]، ۲۰۲۰) . این تعریف ارتباط بین منابع طبیعی، توانایی دولت در تأمین انرژی، تقاضای انرژی و امنیت انرژی با تحولات اقتصادی و پایداری، تعادل عرضه و تقاضای انرژی و رابطه متقابل اجتماعی را نشان می‌دهد (حسین آباد[2]، ۲۰۱۸ و لونیسکو، ۲۰۲۲) . عدم دسترسی پایدار به انرژی در بلند مدت و کوتاه مدت تأثیراتی منفی بر تولید و مطلوبیت خانوار خواهد گذاشت، که این موضوع می‌تواند منجر به توزیع نامتوازن انرژی در کنار اثرات منفی اقتصادی شود (آکسون و دارتون[3]، ۲۰۲۱) . عناصر و شاخص‌های امنیت انرژی را به عنوان در دسترس بودن و دسترسی مقرون به صرفه طبقه‌بندی می‌شود. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک ماژول توسعه یافته برای ارزیابی ناامنی انرژی در ایران باتوجه به اجزای دسترسی به انرژی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار چهار عامل می‌تواند امنیت انرژی در ایران را تحت تأثیر قرار دهد: تقاضای خانگی گاز در فصل زمستان، واردات فرآورده‌های نفتی با وجود تحریم‌های اقتصادی و فشارهای بین‌المللی، تقاضای صنایع و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی برای گاز در زمستان.



شکل ۱. نمونه‌ای از رابطه متقابل عناصر تأثیر گذار بر ریسک تأمین انرژی در اقتصاد ایران

(مرجع: یافته‌های تحقیق)

1. Ayoo
2. Hosseinabad
3. Axon & Darton

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

علاوه براین نگرانی‌هایی مانند محدودیت مخازن سوخت‌های فسیلی، افزایش تقاضای انرژی و بی ثباتی عرضه انرژی، دولت‌ها و سیاست‌گذاران به دنبال جایگزین هایی برای سوخت‌های فسیلی به منظور تثبیت امنیت انرژی می‌باشند (کالایر و همکاران[1]، ۲۰۲۱) . استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، با توجه به تنوع و استفاده نامحدود به عنوان یکی از جایگزین‌های سوخت‌های فسیلی جهت تأمین انرژی مورد نیاز کشورها معرفی شده است (آدوم و همکاران[2]، ۲۰۲۳) . به منظور اجرای موفق سیاست-های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، سناریوهای مختلفی توسط دولت‌ها باید به کار گرفته شود. از جمله این سیاست‌ها حمایت مالی از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد، که این موضوع امنیت انرژی را افزایش داده و انرژی را با قیمت پایین‌تر عرضه خواهد کرد (آینو و همکاران[3]، ۲۰۲۳) . با توجه به محدود بودن سطح منابع سوخت‌های فسیلی، الزامی است که دولت‌ها وابستگی به منابع محدود فسیلی را کاهش داده و سیاست-گذاری به منظور استفاده بیشتر از منابع جایگزین مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای کنند.

با این حال همواره محدودیت هایی برای تأمین انرژی در کشورهای توسعه یافته و درحال توسعه وجود دارد، که بیشتر ناشی از تغییرات آب و هوایی جهانی و افزایش تقاضای انرژی است. این موضوع باعث افزایش قیمت انرژی و افزایش رقابت برای بهره-برداری از انرژی شده است (کوبر و همکاران[4]، ۲۰۲۰) . ایران چهاردهمین مصرف کننده انرژی در جهان می‌باشد و با توجه به رشد تقاضای انرژی برای گاز طبیعی در سال ۱۴۱۲ روزانه به ۸۲۰ میلیار متر مکعب خواهد بود که استان تهران به عنوان اولین مصرف کننده در بخش مصرف نهایی در نظر گرفته شده است. این آمار با توجه به میزان سرمایه‌گذاری جهت توسعه پالایشگاه‌های گاز، نشان دهنده مواجعه با مشکلات در تأمین انرژی در آینده است.

با توجه به خلاء مطالعاتی موجود و همچنین اهمیت امنیت انرژی برای کشور ایران در این مطالعه با توجه به اهمیت موضوع امنیت تأمین عرضه انرژی به نقش غالب

1. Kalair et al.
2. Odoom et al.
3. Ainou et al.
4. Kober et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

انرژی‌های تجدیدپذیر در امنیت تأمین انرژی برای اقتصاد ایران با توجه به متغیرهای اقتصادی و پیش‌بینی تقاضای انرژی پرداخته شده است و تلاش شده است تا وابستگی کشور به منابع انرژی فسیلی مورد بررسی قرار گیرد، همچنین عوامل کمی و کیفی مختلف از نظر نمودار علی – حلقوی (CLD) و نمودار انباشت و جریان(SFD) که مدل پویایی‌های سیستم (SD) را ایجاد می‌کند مدل سازی شده است.

در ادامه پیشینه پژوهش در بخش دوم مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در قسمت سوم مبانی نظری و اهمیت موضوع امنیت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم روش شناسی تحقیق و در بخش پنجم شبیه‌سازی 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 پیش‌بینی امنیت انرژی با توجه به رشد انرژی‌های تجدیدپذیر در سناریوهای مختلف پرداخت شده است. در نهایت نتایج تحقیق و پیشنهادات برای بهبود امنیت انرژی ارائه گردیده است.

۲- پیشینه پژوهش

به طور کلی بیش از ۲۰ سال است که مطالعات با تمرکز بر مدل سازی سیستم‌های پویا (SD) در زمینه سیستم‌های انرژی مورد بحث قرار گرفته است. در مدل SD تغییراتی که در بین متغیرهای تقاضای انرژی و امنیت عرضه انرژی وجود دارد و همچنین تأثیر سیاست‌های مختلف در زمینه انتقال انرژی قابل تجزیه و تحلیل است (سوبرامانیان و همکاران[1]، ۲۰۱۸) .

در مطالعات زیادی ساختار فیزیکی انرژی در سیستم‌های پویا برای ارزیابی قابلیت اطمینان منابع انرژی تجدیدپذیر در مناطق مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (امانوال و همکاران[2]، ۲۰۲۰) .

در مطالعات گروه دوم به تخمین تأثیر سیستم قیمت‌گذاری و شاخص‌های اقتصادی مانند تولید ناخالص داخلی(GDP) بر شاخص‌های انرژی تحت سناریوهای مختلف در حوزه انرژی پرداخته شده است (لین و رازا[3]، ۲۰۲۰) .

1. Subramanian et al.
2. Emmanuel et al.
3. Lin & Raza

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

در گروه سوم مطالعات محققان اثرات زیست محیطی CO_2 را ارزیابی کرده و انتشار و آلودگی صنعتی در سیستم‌های انرژی با استفاده از روکرد SD ارزیابی شده است (واو و همکاران[1]، ۲۰۲۱) . در این مطالعات مدل SD برای ارزیابی سناریوهای مختلف در کاهش CO2و بسیاری از سناریوهای دیگر ساخته شده است. اکثر این مطالعات بخش‌های خدماتی و حمل و نقل را به عنوان عوامل اصلی انتشارCO2 نشان می‌دهند و نتیجه می‌گیرند که توسعه شبکه‌های جاده‌ای و ظرفیت می‌تواند منجر به انتشار عمده CO2 در مناطق شهری شود (تانگ و همکاران[2]، ۲۰۲۰، وانگ و همکاران، ۲۰۲۴) .

تعدادی از مطالعات به منظور ارزیابی تأثیر سیاست‌های بخش انرژی بر امنیت عرضه انرژی از الگوهای SD استفاده نموده اند (راوار و همکاران[3]، ۲۰۲۰). . الگوهای SD به پیش‌بینی مدل‌های رفتاری قابل مشاهده یک سیستم انرژی تا بررسی ساختارهای سطح خرد اقتصادی کمک می‌کنند که این موضوع منجر به شناسایی سیاست‌های کلیدی انرژی در افزایش امنیت عرضه انرژی خواهد شد. در چارچوب سیاست‌های مختلف نرخ مصرف انرژی در طول زمان قابل شبیه‌سازی است، که این موضوع نقشه راه تصمیم گیرندگان به منظور اجرای سیاست‌های قابل اجرا در کاهش مصرف انرژی است.

در مطالعه (حسین آباد و موراگا[4]، ۲۰۲۰) از روش مدل سازیSD به منظور بررسی وابستگی به انرژی در کشور فنلاند استفاده شده است. در این مطالعات به منظور بررسی بهترین برنامه اقدام انرژی و صرفه جویی در هزینه تولید انرژی با استفاده از تعداد محدودی از انرژی‌های تجدیدپذیر از سناریوهای مختلف استفاده شده است. با این حال، آنها نقاط ضعف و قوت منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر و خطرات مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان ندادند و همچنین، مدل پیشنهادی آنها قادر به پوشش تمام منابع انرژی تجدیدپذیر نمی‌باشد، بنابراین برای سایر مطالعات موردی قابل استفاده نیست. در ادامه در جدول شماره (۱) تعدادی از مطالعات پیشین در زمینه تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر و امنیت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Wu et al.
2. Tang et al.
3. Ravar et al.
4. Hosseinabad & Moraga

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

جدول ۱. مطالعات پیشین در زمینه تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر و امنیت انرژی

مطالعه	خلاصه مقاله	نتایج و روش تحقیق
(گالاگان و فریگیریو[1]، ۲۰۲۳)	در این مقاله، نویسندگان تأثیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در چارچوب امنیت بین‌المللی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش وابستگی متمایز به تجارت فعلی منابع فسیلی، کاهش نفرین منابع کشورهای صادرکننده انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تعدیل خطرات مرتبط با تغییرات آب و هوایی می‌توانند سهم مثبتی در امنیت بین‌المللی انرژی داشته باشند.	✓ انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش وابستگی به منابع فسیلی به امنیت انرژی کمک می‌کنند. ✓ انرژی‌های تجدیدپذیر «نفرین منابع» کشورهای صادرکننده انرژی را کاهش می‌دهند. ✓ بررسی تأثیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر امنیت بین‌المللی انرژی
(احمد و همکاران[2]، ۲۰۱۸)	در این مقاله، روند فعلی رشد انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهانی و به ویژه در کشور هند و همچنین مسائل زیست محیطی با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد فن‌آوری، پتانسیل، آینده و دامنه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه با مطالعه موردی کشور هند مورد بحث قرار گرفته است.	✓ انرژی تجدیدپذیر برای امنیت انرژی و تغییرات آب و هوایی بسیار مهم است. ✓ هند اهداف بلند مدت برای رشد انرژی‌های تجدیدپذیر برنامه‌ریزی کرده است. ✓ این مقاله به بررسی فن‌آوری اشکال مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد، برق آبی، انرژی خورشیدی، انرژی زیست توده و انرژی زمین گرمایی پرداخته است. ✓ مروری بر فن آوری، پتانسیل‌های آینده و دامنه‌های این منابع انرژی تجدیدپذیر، به ویژه با مطالعه موردی کشور هند ارائه شده است.
(سوتنیک و همکاران[3]، ۲۰۲۱)	در این مقاله، به بررسی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه بهره‌وری انرژی بر امنیت انرژی برای اقتصادهای نوظهور پرداخته شده است. روش‌شناسی ارزیابی امنیت انرژی با شاخص ابهام‌زدایی بار مالی انرژی‌های تجدیدپذیر بر بودجه دولت، شاخص ابهام‌زدایی انرژی، شاخص فقر انرژی خانوارها، شاخص توسعه ظرفیت توازن حجم تولید برق و شاخص نوسانات انرژی پیشنهاد دادند.	✓ ارزیابی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی بر امنیت انرژی. ✓ شاخص‌های پیشنهادی برای ارزیابی جامع امنیت انرژی بر اساس آخرین چالش‌های موجود. ✓ شاخص ابهام‌زدایی بار مالی انرژی‌های تجدیدپذیر

1. **Galagan & Frigerio**
2. **Ahmad et al.**
3. **Sotnyk et al.**

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

مطالعه	خلاصه مقاله	نتایج و روش تحقیق
(مالیک[1]، ۲۰۲۰)	در این مقاله دغدغه اقتصادی- اجتماعی امنیت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است و منابع انرژی تجدیدپذیر محبوبیت بیشتری کسب می‌کنند. اما منابع انرژی متعارف به تدریج تخلیه و روند کاهشی را تجربه خواهند کرد.	✓ منابع انرژی تجدیدپذیر در طول زمان محبوبیت را برای امنیت انرژی کسب می‌کنند. ✓ بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید پایدار برق
(بردیشیوا و ایکونیکووا[2] ، ۲۰۲۱)	در این مقاله، نویسندگان با استفاده از داده‌های انرژی و جریان پولی ۲۰۰۰-۲۰۱۸ سازمان ملل متحد و تجارت کالاهای سازمان ملل متحد و آژانس بین‌المللی انرژی، الگوهای جدید و درک پیامدهای امنیت انرژی، تکامل شبکه بین‌المللی جریان انرژی را مورد بررسی قرار دادند.	✓ تغییرات منابع انرژی بر الگوهای تجارت سوخت‌های فسیلی تأثیر می‌گذارد ✓ انتقال انرژی بر جریانات بین‌المللی انرژی و امنیت تأثیر می‌گذارد ✓ تحلیل داده‌های تجارت کالا سازمان ملل متحد و آژانس بینالمللی انرژی ✓ تست خصوصیات دنیای کوچک برای درک انتشار فن آوری‌های جدید
(باهگات، ۲۰۰۸)	در این مقاله، نویسندگان تنوع ترکیبی انرژی را به عنوان یک استراتژی برای افزایش امنیت انرژی بررسی می‌کنند و دریافتند که اگرچه گاز طبیعی، زغال سنگ، انرژی هسته‌ای و انرژی زیستی سهم قابل توجهی در ترکیب انرژی جهانی دارند، نفت احتمالا منبع اصلی انرژی باقی خواهد ماند.	✓ نفت همچنان منبع غالب سوخت خواهد بود. ✓ تنوع سازی ترکیب انرژی برای امنیت انرژی مهم است. ✓ تنوع سازی مخلوط انرژی ✓ ارتقای امنیت انرژی از طریق راهبردهای مختلف
(تقی زاده و همکاران[3]، ۲۰۲۱)	امنیت انرژی، مفهومی چند بعدی که شامل مفهوم در دسترس بودن منابع، دسترسی، پذیرش زیست محیطی و مقرون به صرفه بودن هزینه است، همانطور که در این مقاله ذکر شد به طور گسترده مورد بحث قرار گرفته است. اما، این مفهوم هنوز در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار نگرفته است.	✓ امنیت انرژی برای رشد اقتصادی بسیار مهم است. ✓ انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به امنیت انرژی کمک کند. ✓ تجزیه و تحلیل امنیت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و روابط رشد اقتصادی. ✓ ابعاد مورد بحث: در دسترس بودن منابع، دسترسی، پذیرش زیست محیطی و مقرون به صرفه بودن هزینه.

1. Malik
2. Berdysheva & Ikonnikova
3. Taghizadeh-Hesary et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

مطالعه	خلاصه مقاله	نتایج و روش تحقیق
(گوکگوز و گوورسین[1]، ۲۰۱۸)	در این مقاله، نویسندگان ابتدا به طور تجربی اثر جایگزینی انرژی تجدیدپذیر بر واردات انرژی تأیید کردند، سپس عملکرد کشورهای منتخب اتحادیه اروپا در بهره وری انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ با چشم انداز امنیت انرژی مورد بررسی قرار داده شده است.	✓ متوسط کارایی کشورهای منتخب اتحادیه اروپا در حال افزایش است. ✓ تغییرات تکنولوژیکی محرک اصلی رشد بهره وری است. ✓ تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها (Spector et al.) برای معیار کارایی ✓ شاخص مالمکویست-لوئنبرگر برای تجزیه و تحلیل رشد بهره وری

در مطالعه مغانی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی چالش‌ها و فرصت‌های انرژی در ایران پرداخته است، اما تمرکز اصلی آن بر گاز طبیعی و انرژی خورشیدی بوده است. در حالی که این دو منبع، به ویژه گاز طبیعی، نقش مهمی در سبد انرژی ایران ایفا می‌کنند، پرداختن صرف به آنها نمی‌تواند تصویر کاملی از وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور ارائه دهد. پژوهش حاضر با رویکردی جامع‌تر، به بررسی نقش *انواع* انرژی‌های تجدیدپذیر، شامل انرژی خورشیدی، باد، زیست‌توده، آبی و زمین‌گرمایی، در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران می‌پردازد. این رویکرد جامع‌تر، امکان تحلیل دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران و نقش آنها در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تحقق امنیت انرژی را فراهم می‌کند.

(فتاحی زاده & اندرخورد, ۲۰۲۵) مطالعه فتاحی زاده و اندرخورد (۱۴۰۳) به بررسی راهبردها و سیاست‌های ایران در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش آنها در امنیت انرژی پرداخته است. این مطالعه با استفاده از روش مدلسازی عقلانی-مفهومی، به شناسایی تهدیدها و فرصت‌های ناشی از گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران پرداخته و نشان داده است که بیشترین توجه در سیاستگزاری‌های کلان و اسناد بالادستی ایران به شاخص‌های قیمت و شدت مصرف انرژی و کمترین توجه به شاخص‌های مقبولیت و ثبات سیاسی و تا حدی شاخص استمرار تولید بوده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران، از مطالعه فتاحی زاده و اندرخورد (۱۴۰۳) و سایر مطالعات پیشین

1. Gökgöz & Güvercin

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

متمایز می‌شود. در حالی که مطالعه فتاحی زاده و اندرخورد (۱۴۰۳) به بررسی راهبردها و سیاست‌های ایران در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته است، پژوهش حاضر به طور خاص به بررسی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر امنیت انرژی در ایران می‌پردازد. علاوه بر این، پژوهش حاضر از رویکرد پویایی‌های سیستم برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین عوامل مختلف مؤثر بر امنیت انرژی استفاده می‌کند، که این امر امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر اثرات متقابل عوامل مختلف بر یکدیگر را فراهم می‌کند.

مطالعه استادزاد (۱۴۰۳) به بررسی نقش انرژی خورشیدی در توسعه پایدار اقتصادی در ایران پرداخته است. این مطالعه با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به بررسی عوامل مؤثر بر سیستم انرژی، اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست پرداخته و نشان داده است که برای توسعه پایدار، دولت باید بر افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در کل تولید انرژی تمرکز کند. پژوهش حاضر با تمرکز بر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران، از مطالعه استادزاد (۱۴۰۳) و سایر مطالعات پیشین متمایز می‌شود. در حالی که مطالعه استادزاد (۱۴۰۳) به بررسی نقش انرژی خورشیدی در توسعه پایدار اقتصادی پرداخته است، پژوهش حاضر به طور خاص به بررسی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر امنیت انرژی در ایران می‌پردازد. علاوه بر این، پژوهش حاضر از رویکرد پویایی‌های سیستم برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین عوامل مختلف مؤثر بر امنیت انرژی استفاده می‌کند، که این امر امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر اثرات متقابل عوامل مختلف بر یکدیگر را فراهم می‌کند.

در مطالعه «اروپا و معضل امنیت انرژی؛ محدودیت و راهبردها» (رضوی، ۱۴۰۰)، نویسنده به بررسی چالش‌های امنیتی انرژی در اروپا و راهبردهای اتخاذ شده برای مقابله با این چالش‌ها می‌پردازد. در این مطالعه، وابستگی روزافزون کشورهای اروپایی به واردات انرژی، به ویژه نفت و گاز، به عنوان یک عامل تهدید کننده برای امنیت انرژی این منطقه مورد تاکید قرار گرفته است. نویسنده با اشاره به نقش روسیه به عنوان یکی از تامین کنندگان اصلی انرژی اروپا، به تحلیل تاثیر تحریم‌های بین‌المللی و تنش‌های سیاسی بر امنیت عرضه انرژی در این منطقه می‌پردازد. مطالعه رضوی (۱۴۰۰) به بررسی چالش‌های امنیتی انرژی در اروپا و راهبردهای اتخاذ شده برای مقابله با این چالش‌ها می‌پردازد، در حالی که در این مطالعه بر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران متمرکز است. به عبارت دیگر، مطالعه رضوی (۱۴۰۰) یک دیدگاه منطقه‌ای (اروپا) و کلان (امنیت انرژی به طور کلی) دارد، در حالی که در این مطالعه یک دیدگاه ملی (ایران) و خاص (انرژی‌های تجدیدپذیر) را دنبال می‌کند. علاوه بر این، مطالعه رضوی (۱۴۰۰) بیشتر بر چالش‌های مربوط به وابستگی به واردات انرژی و نقش عوامل سیاسی و اقتصادی در امنیت عرضه انرژی تمرکز دارد. در مقابل، در این مطالعه به بررسی نقش انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک راهکار برای کاهش این وابستگی و دستیابی به امنیت انرژی پایدار می‌پردازد. بنابراین، در این مطالعه می‌تواند به عنوان یک مطالعه موردی در زمینه چگونگی پرداختن به چالش‌های امنیتی انرژی که در مطالعه رضوی (۱۴۰۰) مطرح شده‌اند، در نظر گرفته شود.

با وجود مطالعات گسترده در زمینه انرژی و سیستم‌های پویا، تحقیق حاضر با تمرکز بر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران و ارائه یک مدل پویای جامع که به طور خاص به بررسی روابط متقابل بین مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، وابستگی به منابع فسیلی و امنیت انرژی در ایران می‌پردازد، از مطالعات پیشین متمایز می‌شود. در حالی که برخی مطالعات (مانند حسین آباد و موراگ، ۲۰۲۰ و) به بررسی وابستگی به انرژی در کشورهای دیگر پرداخته‌اند، این تحقیق به طور خاص به شرایط اقتصادی و انرژی ایران می‌پردازد و با ارائه شش سناریو برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، راهکارهای عملی برای تحقق اهداف امنیت انرژی در ایران را ارائه می‌دهد .علاوه بر این، مدل پیشنهادی در این تحقیق قادر به پوشش تمامی منابع انرژی تجدیدپذیر است و می‌تواند به عنوان یک الگوی جامع برای سایر مطالعات موردی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد. در تعدادی از مطالعات به منظور توسعه سیستم‌های انرژی مدل‌های SD ایجاد شده است. ولی تحقیقات در استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان سیاست‌های کاهش وابستگی انرژی از منابع فسیلی محدود می‌باشد. با این حال مقالات در زمینه بررسی تأثیر منابع انرژی تجدیدپذیر در افزایش امنیت تأمین انرژی و کاهش وابستگی انرژی بسیار محدود است. هدف از این تحقیق پوشش این شکاف تحقیقاتی به گونه‌ای است که تقاضای انرژی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه و برای ایران کالیبره گردد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

برتری مدل سازیSD در پیش‌بینی تقاضای انرژی در مقایسه با مدل رگرسیونی مورد توافق تمام مطالعات می‌باشد. بنابراین سهم عمده پژوهش حاضر پیشنهاد یک مدل SD است که در آن تأثیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک سیاست برای برآوردن تقاضای انرژی، افزایش امنیت انرژی و صرفه جوی در هزینه‌های مرتبط با آن در کشورهای در حال توسعه مانند ایران می‌باشد. این مدل به گونه‌ای توسعه یافته است که می‌تواند در مطالعات آتی برای کشورهای مختلف کالیبره گردد. همچنین مدل پیشنهادی می‌تواند به تصمیم گیرندگان انرژی بینش جدیدی در سیاست‌گذاری انرژی-های تجدیدپذیر بدهد تا با کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی به سطح مطلوبی از امنیت عرضه انرژی برسند.

۳- مبانی نظری

در این بخش نقش تنوع انرژی، قیمت انرژی، تحریم و همچنین واردات انرژی بر امنیت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

امنیت انرژی و تنوع در بازار انرژی از جنبه‌های مهمی است که در مقالات تحقیقاتی برجسته شده است. انتقال انرژی، در میان بحران‌های اقتصادی، بر اثربخشی تنوع سازی در اطمینان از بهره برداری پایدار و توسعه در بخش انرژی تأکید دارد. علاوه بر این، مفهوم امنیت انرژی با تمرکز بر عرضه فیزیکی، اجزای قیمت و انعطاف پذیری در برابر شوک‌های خارجی در حال تکامل است، همانطور که در تجزیه و تحلیل کشورهای شورای همکاری خلیج فارس مشاهده می‌شود (بولینو و گالکین[1]، ۲۰۲۱) . اتحادیه اروپا همچنین بر اهمیت امنیت انرژی، به ویژه با توجه به رویدادهای اخیر، با ایجاد چارچوبی برای ارزیابی وابستگی واردات انرژی و تنوع سازی برای بهبود سیاست تأکید دارد (استریمیکینی[2]، ۲۰۲۳) .

امنیت انرژی موضوع مهمی است که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند وابستگی به واردات، شدت انرژی، و نیاز به تنوع سازی منابع انرژی است. وابستگی به واردات انرژی یک عامل کلیدی موثر بر امنیت ملی انرژی است، زیرا می‌تواند منجر به آسیب پذیری مانند نفوذ اقتصادی و سیاسی از سایر کشورها و قرار گرفتن در معرض شرایط بازار

1. Bollino & Galkin
2. Streimikiene et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

جهانی شود (واسیلینا[1]، ۲۰۲۳) . بحران انرژی جهانی اخیر پس از تهاجم روسیه به اوکراین باعث شده است بسیاری از کشورها سیاست‌های امنیت انرژی خود را دوباره ارزیابی کنند، با تمرکز بر کاهش وابستگی به واردات از طریق تنوع عرضه و کاهش وابستگی به منابع انرژی روسیه علاوه بر این، اتحادیه اروپا ابتکاراتی مانند Re-Power را برای افزایش امنیت انرژی با صرفه جویی در انرژی، تنوع بخشیدن به منابع و ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش وابستگی به واردات روسیه آغاز کرده است. درک و رسیدگی به وابستگی به واردات برای اطمینان از سیستم‌های انرژی پایدار و ایمن در مواجهه با چالش‌های در حال تحول ژئوپلیتیک و نگرانی‌های تغییرات آب و هوایی بسیار مهم است (لوتی و همکاران، ۲۰۲۳) .

تحریم‌ها نقش مهمی در افزایش هزینه‌های معاملات ایفا می‌کند و همچنین عدم اطمینان در سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد. سرمایه‌گذار خواستار تضمین‌های محکم در برابر سود نقدی هستند که این امر باعث کاهش شدید سطح سرمایه گذاری و مشارکت در پروژه های مرتبط با بخش انرژی می‌شود. اقدامات تنبیهی اقتصادی، به‌ویژه تحریم‌های نفتی می‌تواند به امنیت انرژی کشورهای تولیدکننده آن آسیب برساند. آنها یکی از مهمترین عوامل ایجاد رکود در صنایع انرژی این کشورها هستند. چنین جریمه‌های مالی ممکن است به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر خطرات امنیت انرژی تأثیر بگذارد، اگر کشوری خود را تحت تحریم قرار دهد، احتمالاً ظرفیت تولید و ارسال انرژی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. دو مشکل اصلی وجود دارد که ممکن است این اتفاق بیفتد. برای شروع، جریمه‌ها می‌توانند نیاز به برق را در بازارهای بین‌المللی کاهش دهند و سازندگان انرژی مجبور به کاهش تولید و ارسال آن‌ها شوند. دوم، همین مجازات‌ها ممکن است دستیابی به فناوری نوآورانه در تولید انرژی را برای یک کشور سخت کند. با این حال، در حالی که همه چیز درست است، این نوع مجازات‌های اقتصادی می‌تواند باعث شود یک کشور بیشتر روی توسعه فناوری خود و تولید کالا در داخل مرزهایش تمرکز کند (وین و همکاران، ۲۰۲۱) . در ادامه با توجه به مبانی نظری ذکر شده در مورد امنیت انرژی به مدلسازی الگو پرداخته شده است.

1. Vasylyna

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۴- روش شناسی

سیستم‌های پویا (SD) یک رویکرد تفکر سیستمی است که محقق را قادر می‌سازد یک سیستم پیچیده با تمام متغیرها و عوامل مؤثر بر آن در طول زمان مدل سازی کند. از ابزارهای کنترل SD، مانند تأخیرهای زمانی و حلقه بازخورد متعادل می‌باشد، که این ابزارها به محققان کمک می‌کند که نه تنها جزئیات مربوط به رفتار همه متغیرهای سیستم را بررسی کنند، بلکه یک دید کلی و کلان از سیستم به عنوان یک ابزار کنترلی داشته باشند (آزار، ۲۰۱۲) .

با استفاده از رویکرد SD رفتار سیستم بر اساس رابطه بین متغیرها و عوامل موثر در مدل قابل پیش‌بینی است و سیستمی که شامل تعدادی حلقه با رابطه غیر خطی است، نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای سیستم حساس خواهد بود. علاوه بر این SD ابزاری قدرت‌مند می‌باشد که رفتار متغیرها در یک سیستم و رفتار کل سیستم در نتیجه تغییر هر پارامتر را نشان می‌دهد.

به طور کلی SD ابزاری است که برای تحلیل کیفی و همچنین برای تحلیل کمی مورد استفاده قرار می‌گرد و به دلیل کاربردی بودن آن در رشته‌های مختلف به کار گرفته شده و این رویکرد یک گرایش برای پرداختن به سیستم‌های زیست محیطی و انرژی است. از آن جایی که SD بر رفتار و پویایی داخل سیستم تمرکز می‌کند، رابطه بین متغیرهای درون سیستم و ساختار باز خوردی را نشان می‌دهد و می‌توان از آن به عنوان منبع قابل اعتمادی برای بررسی این که آیا امکان تعادل در سیستم وجود دارد استفاده کرد (رانجان و شانکار، ۲۰۲۲) .

انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان منابع انرژی قابل اعتماد و پایدار در کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی می‌باشد. از طرفی پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی می‌تواند منجر به بررسی بهتر امنیت انرژی گردد. تحقیق حاضر همچنین پیشنهاد می‌کند که سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان باید برنامه‌های ارتقا انرژی‌های تجدیدپذیر را برای دست‌یابی به سطح مطلوبی از وابستگی و امنیت تأمین انرژی مورد بازبینی قراردهند.

مراحل مدل‌سازی شامل ۱- تعریف مسئله و هدف: در این مرحله، مسئله اصلی تحقیق (بررسی نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار) و هدف از مدل‌سازی (ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و تأثیر آن بر

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

امنیت انرژی) به طور دقیق مشخص شده است. ۲- شناسایی متغیرها و عوامل مؤثر: با بررسی ادبیات موضوع و مصاحبه با متخصصان، متغیرهای کلیدی مؤثر بر امنیت انرژی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر شناسایی شده است. این متغیرها شامل مواردی مانند میزان مصرف انرژی، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، میزان سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، و عوامل اقتصادی و اجتماعی مرتبط می‌شوند. ۳- تعیین روابط بین متغیرها: با استفاده از دانش تخصصی و تحلیل داده‌ها، روابط علی و معلولی بین متغیرها و نحوه تأثیر آنها بر یکدیگر تعیین شد. این روابط به صورت حلقه‌های بازخورد (مثبت و منفی) در مدل نشان داده می‌شوند. ۴- ساخت مدل پویایی سیستم: با استفاده از نرم‌افزار تخصصی ونسیم، مدل پویایی سیستم بر اساس متغیرها و روابط بین آنها ساخته شد. در این مدل، از ابزارهای کنترل پویایی سیستم مانند تأخیرهای زمانی و حلقه‌های بازخورد برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در طول زمان استفاده خواهد شد. ۵- اعتبارسنجی مدل: مدل ساخته شده با استفاده از داده‌های تاریخی و نظرات متخصصان مورد اعتبارسنجی قرار خواهد گرفت. این مرحله شامل بررسی تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی و تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترها می‌شود. ۶- سناریوسازی و تحلیل: با تعریف سناریوهای مختلف برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند سناریوی خوشبینانه، بدبینانه و سناریوی مرجع)، تأثیر هر سناریو بر امنیت انرژی در آینده شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. ۷- ارائه پیشنهادات: بر اساس نتایج تحلیل سناریوها، پیشنهادهای سیاستی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود امنیت انرژی ارائه می‌شود.

به منظور ساخت و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های آماری (داده‌های مربوط به میزان مصرف انرژی، تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، و سایر متغیرهای اقتصادی و اجتماعی از منابع معتبر مانند سازمان‌های بین‌المللی (آژانس بین‌المللی انرژی، بانک جهانی)، سازمان‌های دولتی (وزارت نیرو، سازمان برنامه و بودجه)، و مراکز پژوهشی جمع‌آوری شد.) و داده‌های کیفی (نظرات و دیدگاه‌های متخصصان و صاحب‌نظران در حوزه انرژی از طریق مصاحبه‌های تخصصی و پرسشنامه‌ها جمع‌آوری شد. این داده‌ها برای شناسایی عوامل مؤثر بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت) استفاده شده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۴-۱- مدل سازی نمودار علی-حلقوی[1]

مدل سازی SD بیشتر شامل دو مرحله مدل سازی است. در مرحله اول مدل‌ساز تلاش می‌کند تا نمودار علی-حلقوی(CLD) را برای نشان دادن درک مفهومی مدل تنظیم کند. این مرحله شامل تعیین حدود روابط علی در چارچوب سیاستی دولت‌ها با کمک قضاوت خود و نیز نظرات کارشناسان است (اسپکتور و همکاران[2]، ۲۰۰۱ – لین و همکاران[3]، ۲۰۲۰). رابطه بین متغیرها در مدل علی-حلقوی می‌تواند مثبت باشد که سیستم را تقویت می‌کند یا منفی که به عنوان متعادل کننده سیستم عمل خواهد کرد (واترلاندر و همکاران[4]، ۲۰۲۱) . این رابطه‌ها منجر به شناسایی متغیرها و روابط متقابل بین متغیرهای مختلف می‌شود.

مطالعه حاضر چارچوبی با رویکرد SD به منظور ارزیابی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌کند. الگوی سیستم‌های پویا بسط داده شده در این تحقیق به منظور بررسی سیاست‌های جبران تولید انرژی، روشی برای کاهش وابستگی به انرژی-های فسیلی با توجه به تنوع انرژی‌های تجدیدپذیر به همراه تعدادی از متغیرهای موثر بر وابستگی انرژی و تقاضای انرژی برای پیشنهاد سیاست‌های بعدی و آزمایش سناریوهای مختلف مناسب است.

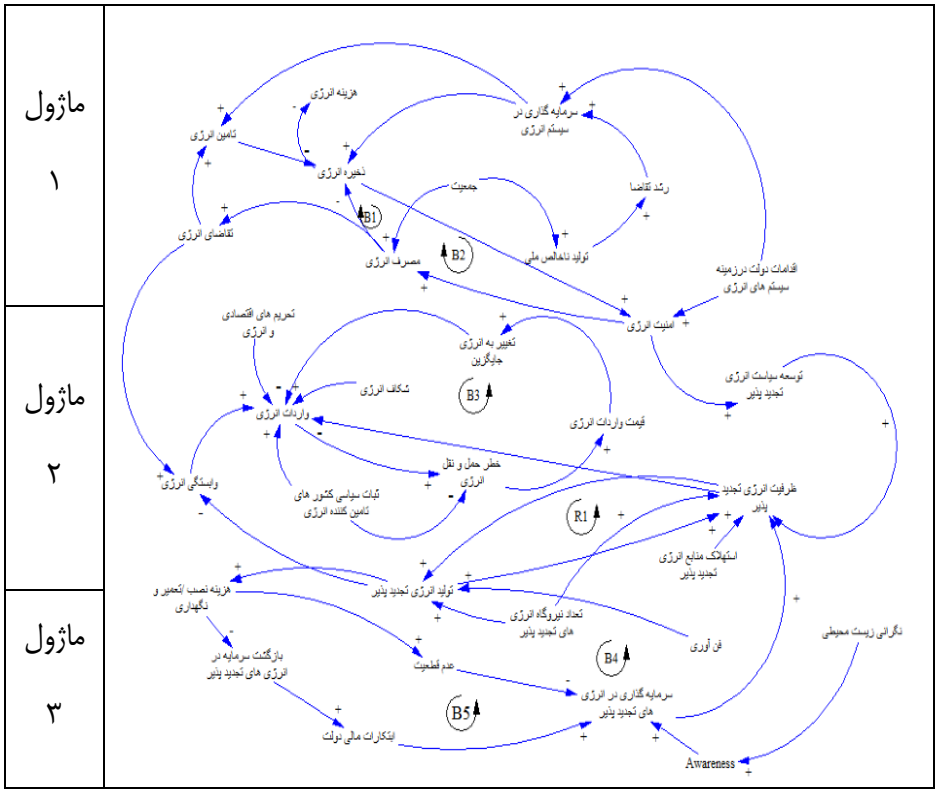
برای طراحی CLD ابتدا باید متغیرهای تأثیرگذار مدل شناسایی شوند. این موضوع را می‌توان با مرور ادبیات و همچنین تجربه متخصصان در موضوع خاص به دست آورد. در فرایند طراحی به منظور توضیح بهتر دیدگاه‌های مختلف، ممکن است نمودار علی-حلقوی به چند بخش تقسیم شود تا مدل از دیدگاه‌های مختلف موضوع بهتر توضیح داده شود. نمودار علی- حلقوی پیشنهادی در تحقیق فعلی شامل سه زیر بخش مختلف است. بخش اول (بخش اقتصاد و تقاضای انرژی): حلقه علی به منظور توضیح تقاضای انرژی طراحی شده است که این حلقه نشان می‌دهد چه شاخص‌هایی بر تقاضای انرژی دریک کشور تأثیر می‌گذارند. بخش دوم (انرژی‌های فسیلی): نشان دهنده وابستگی انرژی به منابع فسیلی و شکاف بین تقاضای انرژی و میزان عرضه انرژی

1. Causal loop modelling
2. Spector et al.
3. Lin et al.
4. Waterlander et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

فسیلی و شاخص‌های آن در یک کشوراست. بخش سوم (انرژی‌های تجدیدپذیر): بر رابطه متقابل انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای انرژی‌های تجدیدناپذیر و به عنوان منابع افزایش امنیت انرژی و کاهش وابستگی به انرژی فسیلی تمرکز دارد.

با توجه به شکل ۲، رابطه متقابل بالقوه بین متغیرها بر اساس وابستگی به منابع انرژی فسیلی (بخش ۲)، تقاضای انرژی (بخش ۱) و انرژی‌های تجدیدپذیر (بخش ۳) وجود دارد. مزیت اصلی توسعه این مدل‌ها تحقیق در مورد ساختارهای بازخوردی عوامل، متغیرها و سیاست‌های مرتبط با سیستم‌های انرژی است.



شکل (۲): نمودار علی–حلقوی وابستگی به انرژی با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر

(مرجع: یافته‌های تحقیق)

در شکل ۲ (ماژول۱) ساختار بازخوردی تقاضای انرژی و امنیت انرژی نشان داده شده است. با افزایش مصرف انرژی، تقاضای انرژی و همچنین میزان انباشت انرژی

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

افزایش می‌یابد، افزایش عرضه انرژی مستقیما بر هزینه انرژی و امنیت انرژی تأثیر گذاشته که باعث افزایش هر دو متغیر می‌شود. از سوی دیگر تولید ناخاص داخلی بر رشد اقتصادی و مصرف انرژی تأثیر مثبت گذاشته و جمعیت کشور بر تولید ناخاص داخلی تأثیر مثبت و هزینه انرژی بر تولید ناخاص‌داخلی تأثیر منفی دارد. با افزایش امنیت انرژی، دولت بیشتر تشویق می‌شود تا سرمایه‌گذاری و برنامه‌های کاربردی بر تحقیق و توسعه انرژی به منظور افزایش امنیت تأمین انرژی و کاهش وابستگی به انرژی فسیلی اجرا کند. بنابراین با توجه به حلقه بازخوردی فوق یکی از سیاست‌های غلبه بر وابستگی به انرژی، استفاده بیشتر از انرژی تجدیدپذیر است.

در زیرمجموعه دوم شکل ۲ (ماژول۲) وابستگی به انرژی، واردات انرژی ثانویه (مانند بنزین) و شاخص‌های مختلف وابستگی به انرژی فسیلی نشان داده شده است. واردات انرژی ثانویه مستقیما بر این واقعیت منطبق است که کشورهای مورد نظر وابسته به انرژی هستند. از طرفی صادرات انرژی اولیه (مانند نفت خام و گاز) می‌تواند خطرات مربوط به حمل و نقل انرژی را افزایش داده و این موضوع می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های صادرات انرژی و در نتیجه تمایل کشورهای دیگر به کاهش واردات انرژی فسیلی خواهد شد. همه این روابط متقابل می‌تواند بر وابستگی اقتصاد به صادرات انرژی تأثیر گذاشته و باید سیاست گذاران را به توسعه سیاست کاهش صادرات انرژی فسیلی و توسعه سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر تشویق کرد. در بخش سوم شکل ۲(ماژول۳) رابطه دو طرفه تمرکز بر ایجاد انرژی‌های تجدیدپذیر با سرمایه‌گذاری مناسب و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با درنظر گرفتن منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر است، در این قسمت راه حل‌های افزایش ظرفیت بالقوه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی شده است.

با کاهش هزینه نصب و راه اندازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر تولید انرژی‌های تجدیدپذیر تا حدی افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش نرخ بازده تولید انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود. بنابراین دولت تشویق خواهد شد تا روش‌ها و نوآوری‌های مالی بیشتری در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر اعمال کند. با حمایت‌های دولت سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری و همچنین آگاهی عمومی برای کمک به توسعه زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت. شایان ذکر است که با افزایش تعداد منابع انرژی تجدیدپذیر، تعداد منابع انرژی تجدیدپذیر مستهلک شده نیز در طول زمان افزایش می‌یابد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۴-۲- مدل سازی نمودار انباشت و جریان

مدل سازی علی- حلقوی اولین مرحله از مدل‌سازی SD می‌باشد که شامل رابطه‌های متقابل بین شاخص‌های انرژی، سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن وابستگی به انرژی و حلقه‌های بازخورد است (گراوندسترویم و جوهولا[1]، ۲۰۲۱) . درنمودارهای علی-حلقوی رفتار متغیرها در سیستم قابل بررسی نمی‌باشد. به منظور بررسی رفتار متغیرها در طول زمان باید از نمودارهای انباشت-جریان استفاده نمود (اسچافرنیچت[2]، ۲۰۱۰) ((Schaffernicht, 2010. در شکل ۳ با توجه به سیاست‌های انرژی‌های تجدیدپذیر جهت ارزیابی سطح وابستگی یک کشور یا منطقه به انرژی، نمودار انباشت-جریان طراحی شده است. به عنوان برنامه‌ای عملیاتی جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، شش متغیر انباشت در این تحقیق (شکل ۳) معرفی شده است. که به طور بالقوه می‌توانند وابستگی انرژی به منابع فسیلی را کاهش دهند. این متغیرها شامل ظرفیت انرژی برق آبی، انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، انرژی نیروگاه بادی و سایر موارد می‌باشد.

متغیر انباشت انرژی‌های تجدیدپذیر مجموع برق تولید شده توسط تمام منابع انرژی تجدیدپذیر است. ظرفیت هر یک از منابع تجدیدپذیر تحت تأثیر افزایش تعداد منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که این موضوع خود تحت تأثیر برنامه‌ریزی و سیاست‌های دولت در مورد منابع انرژی تجدیدپذیر در آینده است. از طرفی ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر متاثر از تعداد نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر مستهلک شده است. در قسمت بعد و برای ایران در بخش بعد این نمودار مورد بررسی بیشتری قرار خواهد گرفت.

جدول ۲ پارامترها، واحدهای مرتبط و روابط را برای مدل انرژی SD پیشنهادی نشان می‌دهد. پارامترهای متغیرهای انباشت به یک مقدار اولیه به عنوان ورودی نیاز دارند. این مقدارها بر اساس سال پایه ۱۳۹۶ در نظر گرفته شده است. همچنین تا سال ۱۴۰۲ مقادیر تحقق یافته متغیرهای الگو موجود می‌باشد و این ۶ سال جهت صحت سنجی الگو استفاده شده است. مقادیری از سایر متغیرها بر اساس اهداف برنامه توسعه

1. Groundstroem & Juhola
2. Schaffernicht

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

ششم و هفتم و با توجه به رشد در نظر گرفته شده در این برنامه‌ها تا سال ۱۴۳۰ در ارتقاع منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران تنظیم شده است.

با توجه به شکل ۳، تقاضای انرژی[1] در یک متغیر انباشت نشان داده شده است. با توجه به روند افزایش تقاضای انرژی و همچنین با توجه به شاخص امنیت انرژی، تمام تقاضای انرژی را نمی توان از منابع فسیلی تأمین کرد. شکافی که پس از کسر تقاضای انرژی داخلی و انرژی هسته‌ای وجود دارد باید با استفاده از انرژی‌های های تجدیدپذیر پر شود. بنابراین، وابستگی به انرژی فسیلی باید تفاوت بین انباشت انرژی تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای و تقاضای داخلی برای انرژی باشد. مقدار پارامترهای مرتبط، واحدها و معادلات، نرخ‌ها و متغیرهای کمکی قبل از اجرای شبیه‌سازی در شکل ۳ و توضیحات مربوط به آن در جدول ۲ بررسی شده است.

با توجه به شکل ۳ تعداد نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر مستهلک شده[2] تحت تأثیر زمان تاخیر می‌باشند، به این معنی که تعداد نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر مستهلک شده به تعداد نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر و دوره‌های استهلاک هر نیروگاه تجدیدپذیر بستگی دارد. علاوه بر این، به منظور ارزیابی نقش اساسی منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان سیاست‌های کاهش وابستگی انرژی به منابع انرژی‌های فسیلی درایران، تعداد نیروگاه‌های تجدیدپذیر با ظرفیت جدید[3]، سیاست‌های مرتبط با توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر[4] و همچنین تعداد نیروگاه‌های مستهلک شده وابسته است. جدول ۳ دوره‌های استهلاک منابع انرژی تجدیدپذیر را نشان می‌دهد، که از مفروضات مطالعات پیشین در مورد دوره‌های استهلاک نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر به دست آمده است.

جدول ۲. مقادیر، واحدها و تعریف متغیرهای الگوی بسط داده شده

پارامترها و متغیرهای تعریف شده	مقدار یا رابطه مربوط به متغیر	واحد	توضیحات
energy domestic demand	INTEG (Rate of lncreased of Electricity Domestic Consumption)	TWY	کل تقاضای انرژی
Capacity of biomass energy	INTEG (Numbar of Added Biomass Plants-Number of Depreciated Biomass Plants)	TWY	ظرفیت نیروگاه‌های زیست توده

1. Energy Domestic Demand
2. Number of depreciated …… plants
3. …. new capacity
4. ….. policy

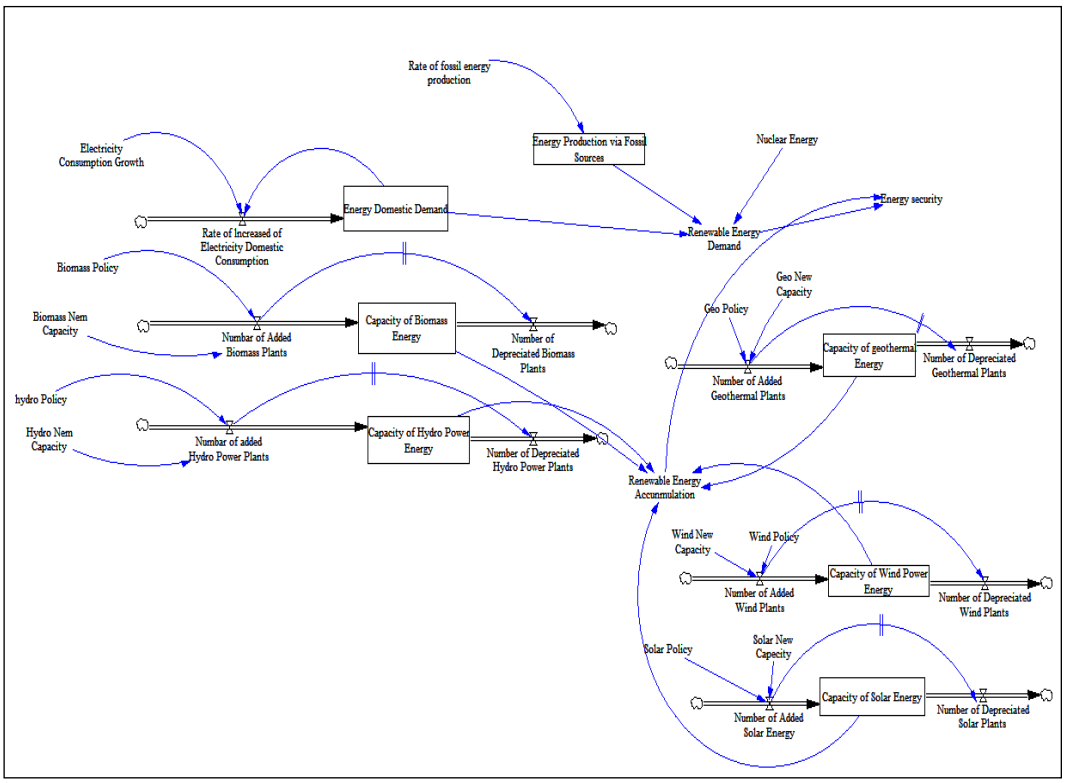
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

پارامترها و متغیرهای تعریف شده	مقدار یا رابطه مربوط به متغیر	واحد	توضیحات
Capacity of hydro power energy	INTEG (Numbar of added Hydro Power Plants-Number of Depreciated Hydro Power Plants)	TWY	ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی
Capacity of geothermal energy	INTEG (Number of Added Geothermal Plants-Number of Depreciated Geothermal Plants)	TWY	ظرفیت نیروگاه‌های زمین گرمایی
Capacity of wind power energy	INTEG (Number of Added Wind Plants-Number of Depreciated Wind Plants)	TWY	ظرفیت نیروگاه‌های بادی
Capacity of solar energy	INTEG (Number of Added Solar Energy-Number of Depreciated Solar Plants)	TWY	ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی
Number of added biomass plants	Biomass Nem Capacity+Biomass Policy	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت برنامه ریزی شده انرژی زیست توده
Number of depreciated biomass plants	DELAY FIXED(Numbar of Added Biomass Plants, 15 , 0)	$\frac{TWY}{Year}$	تعداد نیروگاه زیست توده مستهلک شده
Number of added hydro power plants	Hydro Nem Capacity+hydro Policy	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت برنامه ریزی شده انرژی برق آبی
Number of depreciated hydro power plants	DELAY FIXED(Numbar of added Hydro Power Plants, 15 , 0)	$\frac{TWY}{Year}$	تعداد نیروگاه برق آبی مستهلک شده
Number of added geothermal plants	Geo New Capacity+Geo Policy	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت برنامه ریزی شده انرژی زمین گرمایی
Number of depreciated geothermal of depreciated geothermal plant	DELAY FIXED(Number of Added Geothermal Plants, 20 , 0)	$\frac{TWY}{Year}$	تعداد نیروگاه زمین گرمایی مستهلک شده
Number of added wind plants	Wind New Capacity+Wind Policy	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت برنامه ریزی شده انرژی بادی
Number of depreciated wind plants	DELAY FIXED(Number of Added Wind Plants, 20 , 0)	$\frac{TWY}{Year}$	تعداد نیروگاه بادی مستهلک شده
Number of added solar plants	Solar New Capecity+Solar Policy	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت برنامه ریزی شده انرژی خورشیدی
Number of depreciated solar plants	DELAY FIXED(Number of Added Solar Energy, 15 , 0)	$\frac{TWY}{Year}$	تعداد نیروگاه خورشیدی مستهلک شده
Biomass new capacity	1*PULSE(0 , 1)	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت جدید برنامه ریزی شده زیست توده در سال پایه

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

پارامترها و متغیرهای تعریف شده	مقدار یا رابطه مربوط به متغیر	واحد	توضیحات
Biomass policy	در سه سناریو مقادیر مختلفی تعریف شده است که در قسمت تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.	$\frac{TWY}{Year}$	سیاست گذاری انرژی زیست توده
Hydro new capacity	10*PULSE(0 , 1)	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت جدید برنامه ریزی شده زیست توده در سال پایه
Hydro policy	در سه سناریو مقادیر مختلفی تعریف شده است که در قسمت تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.	$\frac{TWY}{Year}$	سیاست گذاری انرژی برق آبی
Geothermal new capacity	PULSE(0.04, 1)	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت جدید برنامه ریزی شده زمین گرمایی در سال پایه
Geothermal policy	در سه سناریو مقادیر مختلفی تعریف شده است که در قسمت تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.	$\frac{TWY}{Year}$	سیاست گذاری انرژی زمین گرمایی
Wind new capacity	PULSE(0.89, 1)	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت جدید برنامه ریزی شده بادی
Wind policy	در سه سناریو مقادیر مختلفی تعریف شده است که در قسمت تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.	$\frac{TWY}{Year}$	سیاست افزایش نیروگاه بادی
Solar new capacity	PULSE(1.541, 1)	$\frac{TWY}{Year}$	ظرفیت جدید برنامه ریزی شده خورشیدی در سال پایه
Solar policy	در سه سناریو مقادیر مختلفی تعریف شده است که در قسمت تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.	$\frac{TWY}{Year}$	سیاست گذاری انرژی خورشیدی
Electricity consumption growth	۰,۰۳۳۷	1/Year	ترخ رشد مصرف انرژی الکتریکی
Dependency on fossil fuel	INTEG (Rate of fossil energy production)	TWY	این مقدار به تفاوت بین برق تولید شده توسط انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر و تقاضای برق است
Renewable energy accumulation	Capacity of Biomass Energy+Capacity of geothermal Energy+Capacity of Hydro Power Energy+Capacity of Solar Energy+Capacity of Wind Power Energy	TWY	این مقدار برابر است با مجموع تمام ظرفیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]



شکل ۳. نمودار انباشت–جریان سیستم انرژی با در نظر گرفتن تنوع انرژی‌های تجدیدپذیر

(مرجع: یافته‌های تحقیق)

جدول ۳. دوره‌های استهلاک منابع انرژی‌های تجدیدپذیر

انرژی تجدیدپذیر	دوره استهلاک
خورشید	۱۵
زمین گرمایی	۲۰
نیروگاه بادی	۲۰
برق آبی	۱۵
سایر موارد	۱۵

(مرجع: ربانی و همکارن[1] ۲۰۱۴ (Rabbani, 2014))

1. Rabbani

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

تعداد نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر اضافه شده مستقیماً تحت تأثیر سیاست‌ها یا اقدامات وزارت نیرو و برنامه‌های توسعه ششم و هفتم کشور است که در جدول ۴ توضیح داده شده است. این نکته لازم به ذکر است که در موردی که وزارت نیرو برنامه‌های مشخصی برای ارتقای انرژی تجدیدپذیر نداشته باشد، آن ظرفیت انرژی تجدیدپذیر در فرآیند شبیه‌سازی در نظر گرفته نشد.

جدول۴. اهداف ارتقا منابع انرژی تجدیدپذیر درایران تا سال۱۴۳۰[۱]

منابع تجدیدپذیر	هدف تا سال ۱۴۳۰	طرح‌های سیاست فعلی
خورشیدی	افزایش به ۵۰۰۰۰ مگا وات	جهت افزایش نیروگاه‌های خورشیدی، برنامه ریزی توسعه پنل‌های خورشیدی به نسل جدیدPW با کمک شرکت‌های دانش بنیان به منظور افزایش سرمایه و جلوگیری از خروج ارز از کشور.
زمین گرمایی	افزایش به ۵۵ مگاوات	به علت بالا بودن هزینه راه اندازی نیروگاه‌های زمین گرمایی بودجه بیش از ۷۰۰ میلیارد تومان جهت حفاری سیستم زمین گرمایی در نظر گرفته شده است.
برق بادی	افزایش به ۲۵۰۰۰ مگاوات	حداقل ۴۰ درصد از منابع انرژی تجدیدپذیر باید از منابع انرژی بادی تأمین شود.
برق آبی	افزایش به ۴۰۰ مگاوات	توسعه و ساخت سدهای جدید برای افزایش تولید برق از سدهای آبی.
سایر موارد	افزایش به ۴۰ مگاوات ساعت	ارتقا و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر دیگری که به آن‌ها کم توجهی شده.

(مرجع: برنامه توسعه هفتم و پیش‌بینی نویسندگان)

در مطالعه موردی حاضر، یک منبع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به عنوان متغیری در مدل برای پیش‌بینی رفتار مصرف انرژی و وابستگی انرژی بر اساس سناریوهای مختلف عمل کند. نقش منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین نیاز انرژی و کاهش وابستگی انرژی به منابع انرژی فسیلی است. در ادامه با توجه به داده‌های موجود برای بخش انرژی ایران الگو کالیبره خواهد شد.

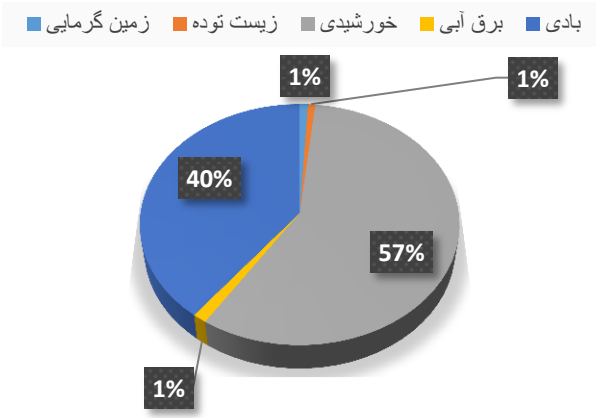
۱. داده های این جدول بر اساس توان تولیدی انرژی های تجدید پذیر در ایران و بر اساس برنامه توسعه هفتم و پیش بینی نویسندگان آورده شده است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۵- کالیبره کردن الگو (مطالعه موردی اقتصاد ایران)

همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، ایران به عنوان مطالعه موردی به منظور بررسی تأثیر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش انرژی فسیلی انتخاب شده است.

مجموع پتانسیل توان انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور ایران معادل ۱۲۴ هزار مگاوات برآورد شده است. از این مقدار انرژی خورشیدی با ۷۱ و بادی ۴۹ هزار مگا وات بیش از ۹۷ درصد از کل پتانسیل موجود کشور در تولید برق تجدیدپذیر را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۴). از این رو تمرکز بر توسعه نیروگاه‌های انرژی خورشیدی و بادی دارای اولویت بالاتری است.



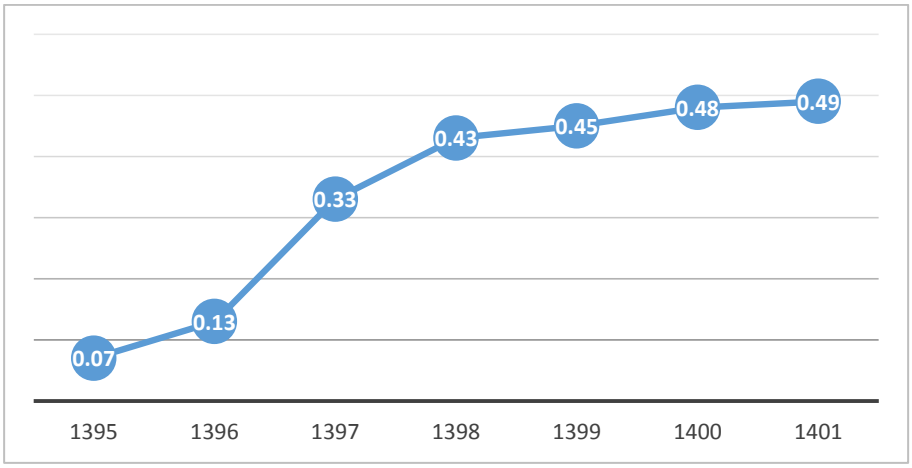
شکل ۴. سهم پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در کل کشور (درصد)[۱]

به رغم ضرورت متنوع سازی سبد تولید انرژی برق کشور، به دلیل ملاحظات تأمین سوخت گاز، امنیت و مباحث محیط زیستی و لزوم حرکت به سمت خوروهای برقی و همچنین تکالیف قانونی ماده ۵۰ قانون برنامه پنج ساله ششم توسعه تا پایان سال ۱۴۰۱ مجموع ظرفیت نصب شده برق تجدیدپذیر کشور برابر با ۱۰۵۸ مگا وات بوده که معادل ۱/۱۳ درصد از کل ظرفیت نصب شده کشور است و دارای اختلاف زیادی با اهداف کمی برنامه می‌باشد. اگر چه میزان انرژی برق تولیدی از محل انرژی‌های تجدیدپذیر در طول برنامه ششم تویعه افزایش داشته است و در سال ۱۴۰۱

۱. مرجع: یافته های تحقیق و گزارشات پتانسیل سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر در استان های کشور، ساتبا، ۱۳۹۸-۱۴۰۱

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

به ۱۷۶۴ میلیون کیلو وات رسیده، اما تنها ۰/۵ درصد از کل برق تولیدی کشور را تشکیل می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل تولید برق

(مرجع: یافته‌های تحقیق و گزارشات پتانسیل سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر)

بررسی ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه گذشته نشان می‌دهد که رشد ظرفیت تولید برق تجدیدپذیر از سال ۱۳۹۵ به طور قابل توجهی تسریع شده است (شکل ۵) و این جهش همزمان با ظهور نیروگاه‌های خورشیدی است. در ایران مجموع ظرفیت برق تجدیدپذیر از ۳۷۲ مگاوات در سال ۱۳۹۵، تا سال ۱۴۰۱ به ۱۰۵۸ مگاوات افزایش یافته است. این افزایش نسبت انرژی خورشیدی نشان دهنده علاقه سرمایه‌گذاران به این نوع از انرژی تجدیدپذیر است، روندی که در مقیاس جهانی نیز مشهود می‌باشد. عدم تمایل به توسعه انرژی زمین گرمایی در ایران و سایر کشورها ناشی از سرمایه‌گذاری‌های مالی قابل توجه برای فعالیت‌های اکتشاف و حفاری است. برعکس، انرژی بادی و خورشیدی در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر هزینه نسبتاً کمتری ارائه می‌دهد. با توجه به عوامل مانع پیشرفت نیروگاه‌های آبی، جنبه‌های قابل توجه شامل تقاضای سرمایه‌گذاری قابل توجه، وابستگی به سطوح بارش سالانه و محدودیت‌های فضایی است که منجر به ظرفیت اسمی ثابت این نیروگاه‌ها در سالهای اخیر شده است (منبع: گزارش آماری ماهانه، ۱۴۰۲، ساتبا، وزارت نیرو)

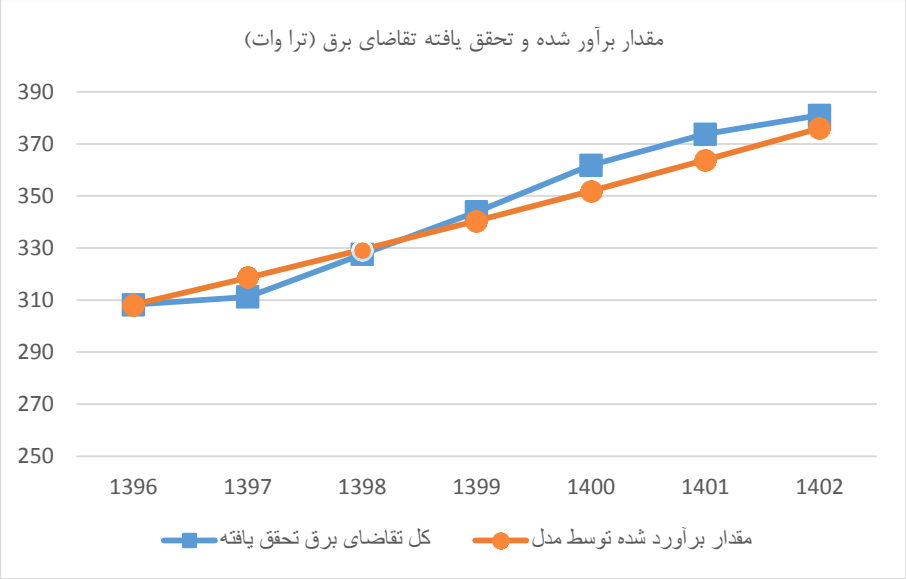
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

در ادامه با توجه به داده‌های انرژی برای ایران (جدول ۲، ۳ و ۴)، الگو شبیه‌سازی شده و پس از اعتبار سنجی و اطمینان از صحت شبیه‌سازی به بررسی نتایج پرداخته شده است.

۶- اعتبار سنجی مدل

این مطالعه سه آزمون اعتبارسنجی مختلف برای اثبات صحت مدل SD بسط داده شده ایجاد کرده است. به طور کلی برای ارزیابی پایایی، ثبات و دقت آن در پیش‌بینی رفتار متغیرها در مدل و اینکه آیا مدل قادر به رفتار دقیق است و آیا با سیستم واقعی مطابقت دارد، سه آزمون بر اساس الگوی تحقیق انجام می‌شود. سه آزمون اصلی اعتبار سنجی انجام شده در این مطالعه، آزمون‌های رفتار مدل، تأیید پارامتر و آزمون‌های سازگاری ابعادی می‌باشد (یوآن و یانگ، ۲۰۲۲) .

رفتار مدل: هدف آزمون رفتار مدل، بررسی رفتار تقاضای داخلی انرژی در ایران به عنوان متغیر هدف شبیه‌سازی شده در مدل از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ و مقایسه آن با مصرف واقعی برق در ایران به دست آمده از داده‌های تاریخی است. نتایج شبیه‌سازی شده در شکل ۶ برای دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند تقریباً با رفتار واقعی مصرف انرژی سازگار باشد.



شکل ۶. اعتبارسنجی مدل با مقایسه بین داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده (مرجع: یافته‌های تحقیق)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

برای اطمینان از اینکه شکاف بین مدل شبیه‌سازی شده و داده‌های تاریخی در شکل ۶ قابل توجه نیست، یک آزمون اعتبار سنجی آماری انجام شد. آزمون نرمال بودن انجام شده برای رفتار واقعی و مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که توزیع نرمال را نمی توان در سطح اطمینان ۰,۰۵ =∝ (سطح معنی داری) رد کرد. به منظور آزمون اختلاف میانگین بین هر دو مجموعه داده از آزمونt دو نمونه‌ای استفاده شد. بنابراین، آزمون فرضیه برای آزمون t با توجه به دو نمونه فوق به شرح زیر است:

$$\begin{cases} H0: \mu a = \mu s \\ H1: \mu a \neq \mu s \end{cases} \quad (۱)$$

نتیجه آزمون t نشان می‌دهد که مقدار p برابر با ۰/۷۲۴است. بنابراین آزمون در رد فرضیه صفر شکست خورده و این بدان معناست که رفتار هر دو مجموعه داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده را نمی توان در سطح اطمینان $\alpha = 0.05$ نابرابر در نظر گرفت. از این رو مدلSD تناسب قابل قبولی با روندهای تاریخی دارد و می‌تواند به عنوان یک الگوی معتبر برای رفتار مصرف انرژی در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

آزمون تایید پارامتر: کلیه پارامترهای موجود در مدل از منابع رسمی و بر اساس داده‌های واقعی یا برآوردهای مربوط و با رعایت آزمون تایید پارامتر جمع آوری شده است.

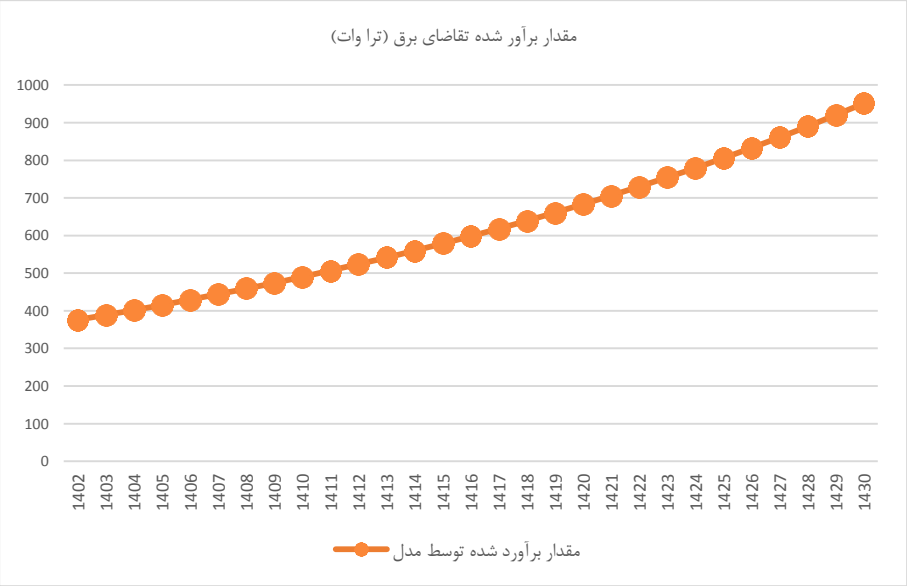
تست سازگاری ابعادی: با استفاده از ابزار چک واحد تعبیه شده در نرم افزار VENSIM این آزمون انجام شد و نتایج نشان داد که تمامی واحدها با پارامترهای مرتبط مطابقت دارند بنابراین، مدل آزمون سازگاری ابعادی را پشت سر گذاشت.

۷- نتایج تحقیق

پس از اطمینان از اعتبار مدل ارائه شده، رفتار مدل برای پیش‌بینی متغیرهای آتی انجام شده است. پس از وارد کردن داده‌های بخش انرژی ایران بر حسب واحد هر پارامتر در مدل انباشت - جریان، شبیه‌سازی انجام شد. در شکل ۷ پیش‌بینی انرژی در ایران بین سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۳۰ نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد تقاضای داخلی ۳۷۶/۱ ترا وات در سال ۱۴۰۲ به ۹۵۱/۲ ترا وات در سال ۱۴۳۰خواهد رسید که میانگین رشد سالیانه ۳/۳ درصد تقاضای برق را نشان می‌دهد. در

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

تحقیق(حافظی و دلفان، ۲۰۲۲) تقاضای برق ایران تحت ۴ سناریو محاسبه شده است. سناریو اول مبتنی بر رشد اقتصادی ۲ درصد سالیانه کشور است. بر مبنای این سناریو تقاضای برق در سال ۲۰۵۰ (۱۴۳۰) به ۹۷۵ تراوات ساعت خواهد رسید. در تحقیق فوق ۳ سناریو دیگر نیز بررسی شده است ولی نتیجه این سناریو به پیش‌بینی مطالعه حاضر نزدیک تر است.



شکل ۷. مقدار پیش‌بینی شده تقاضای برق برای ایران (مرجع: یافته‌های تحقیق)

همان طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، مدل سازی SD توانایی پیشبینی دقیق تقاضای انرژی را دارد، که با آزمایش کاربرد سناریوهای مختلف در مدل ارائه شده کمک می‌کند. با بررسی سناریوهای پیشنهادی می‌توان دریافت که آیا برنامه‌های عملیاتی بهره برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهت کاهش وابستگی به انرژی در آینده موثر است؟ با این حال، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده توسط دولت مؤثر نخواهد بود زیرا سطح وابستگی به انرژی در سال‌های آتی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد این سیستم از اهداف سیاست در کوتاه مدت پشتیبانی می‌کند، امادر بلند مدت، سیستم به وضعیت قبل از تغییر سیاست بازمی گردد یا وضعیت بدتری ایجاد می‌کند. بنابراین، وزارت نیرو سناریوهای مختلف استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را می‌تواند بررسی کند که منجر به پایداری وابستگی به انرژی در ایران می‌شود. در ایران

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

ظرفیت انرژی بادی بالایی وجود دارد. سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر بیان می‌کند که مناطق شرقی ایران چون زابل، خواف و دوروح، سه منطقه باد خیز است که ظرفیت انرژی بادی حدود ۳۰۰۰ مگا وات ساعت پیشبینی شده است و از آن جهت که ظرفیت بادی آن منطقه برای سال ۱۴۰۱، ۵۰ مگا وات ساعت بوده است. این نشان دهنده کارایی نیروگاه‌های بادی در کاهش وابستگی به انرژی است.

جدول ۵. سیاستگذاری توسعه انرژی بادی و خورشیدی

سال	سیاست گذاری انرژی خورشیدی[1]						سیاست گذاری انرژی بادی[2]					
	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶
1402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1405	0	0.2	0.5	1	1	1.4	0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4
1406	0	0.2	0.5	1	1	1.4	0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4
1407	0	0.5	1.1	2.4	2.7	4.1	0	0.2	0.5	1	1.6	1.6
1408	0	0.5	1.1	2.4	2.7	4.1	0	0.2	0.5	1	1.6	1.6
1409	0	0.5	1.1	2.4	2.7	4.1	0	0.2	0.5	1	1.6	1.6
1410	0	0.5	1.1	2.4	2.7	4.1	0	0.2	0.5	1	1.6	1.6
1411	0	0.5	1.1	2.4	2.7	4.1	0	0.2	0.5	1	1.6	1.6
1412	0	0.9	1.9	4.2	5	7.4	0	0.4	0.8	2.5	3.6	3.6
1413	0	0.9	1.9	4.2	5	7.4	0	0.4	0.8	2.5	3.6	3.6
1414	0	0.9	1.9	4.2	5	7.4	0	0.4	0.8	2.5	3.6	3.6
1415	0	0.9	1.9	4.2	5	7.4	0	0.4	0.8	2.5	3.6	3.6
1416	0	0.9	1.9	4.2	5	7.4	0	0.4	0.8	2.5	3.6	3.6
1417	0	1.4	2.8	6.2	8.2	11.6	0	0.6	1.2	4.4	6.3	6.3
1418	0	1.4	2.8	6.2	8.2	11.6	0	0.6	1.2	4.4	6.3	6.3
1419	0	1.4	2.8	6.2	8.2	11.6	0	0.6	1.2	4.4	6.3	6.3
1420	0	1.4	2.8	6.2	8.2	11.6	0	0.6	1.2	4.4	6.3	6.3
1421	0	1.4	2.8	6.2	8.2	11.6	0	0.6	1.2	4.4	6.3	6.3
1422	0	2	3.8	9	12.3	15.8	0	0.8	1.7	6.4	9.3	9.3
1423	0	2	3.8	9	12.3	15.8	0	0.8	1.7	6.4	9.3	9.3
1424	0	2	3.8	9	12.3	15.8	0	0.8	1.7	6.4	9.3	9.3
1425	0	2	3.8	9	12.3	15.8	0	0.8	1.7	6.4	9.3	9.3
1426	0	2	3.8	9	12.3	15.8	0	0.8	1.7	6.4	9.3	9.3
1427	0	2.7	4.9	12	17.3	20	0	1.1	2.4	9.2	12.4	12.4
1428	0	2.7	4.9	12	17.3	20	0	1.1	2.4	9.2	12.4	12.4
1429	0	2.7	4.9	12	17.3	20	0	1.1	2.4	9.2	12.4	12.4
1430	0	2.7	4.9	12	17.3	20	0	1.1	2.4	9.2	12.4	12.4

1. STEP(1.4,3)+STEP(2.7,5)+STEP(3.3,10)+STEP(4.2,15)+STEP(4.2,20)+STEP(4.2,25)
2. STEP(0.4,3)+STEP(1.2,5)+STEP(2,10)+STEP(2.7,15)+STEP(3,20)+STEP(3.1,25)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

در ادامه امنیت انرژی با اعمال شش سناریوی مختلف در مدل در طول زمان برآورد می‌شود (شش سناریو در جدول شماره ۵ مورد بررسی قرار گرفته است). سناریوی اول به عنوان مبنایی برای سناریوهای دیگر تنظیم می‌شود.

بر اساس سناریوی اول (سناریو عدم توسعه) وضعیت وابستگی به انرژی بدون اجرای هرگونه برنامه اقدام انرژی‌های تجدیدپذیر، مقدار انرژی انباشته شده از منابع انرژی تجدیدپذیر بین سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۳۰ بدون تغییر در نظر گرفته شده است. به این معنی که سیاست انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه صفر درصدی در سال می‌باشد. از آنجایی که هیچ برنامه ریزی عملیاتی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در این سناریو اجرا نخواهد شد، وضعیت انباشت انرژی‌های تجدیدپذر در سطح فعلی تا مستحلک تجهیزات باقی خواهد ماند (بر اساس شکل ۸ در سال ۱۴۱۷ افت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را شاهد خواهیم بود). بر اساس این سناریو در سال ۱۴۳۰، ۴۲۲ تراوات در سال کمبود تولید برق را شاهد خواهیم بود. بر اساس این سناریو در سال ۱۴۳۰ کسری ۵۴/۱ درصدی تولید برق را شاهد خواهیم بود.

در ادامه ۵ سناریو دیگر بررسی می‌گردد. در این ۵ سناریو بررسی شده با توجه به پتانسیل پایین ایران در توسعه انرژی‌های زمین گرمایی و زیست توده و همچنین عدم توسعه نیروگاه‌های برق آبی با توجه به خشکسالی‌های اخیر تمرکز محققین بر توسعه نیروگاه‌های بادی و خورشیدی می‌باشد. که این توسعه در شکل ۸ مورد بررسی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که توسعه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر ۵ ساله و به صورت پله‌ای فرض شده است.

سناریوی دوم: این سناریو توسعه ضعیف تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. در این سناریو میزان راه اندازی نیروگاه‌های انرژی بادی و خورشیدی بر اساس سال در شکل ۸ آورده شده است. بر اساس این سناریو برنامه ریزی برای رشد متوسط راه اندازی ۱۸/۲ و ۱۶/۵ درصدی (به صورت پله‌ای و ۵ ساله) به ترتیب برای نیروگاه‌های بادی و خورشیدی فرض شده است. با توجه به برنامه ریزی این سناریو به طور متوسط رشد سالانه ۵/۶ درصدی برای انرژی‌های تجدیدپذیر را شاهد خواهیم بود. با فرض توسعه بر اساس این سناریو ۳۲/۲ درصد کسری تولید برق در سال ۱۴۳۰ را شاهد خواهیم بود. ذکر این نکته ضروری است که با این روند برنامه ریزی در سال

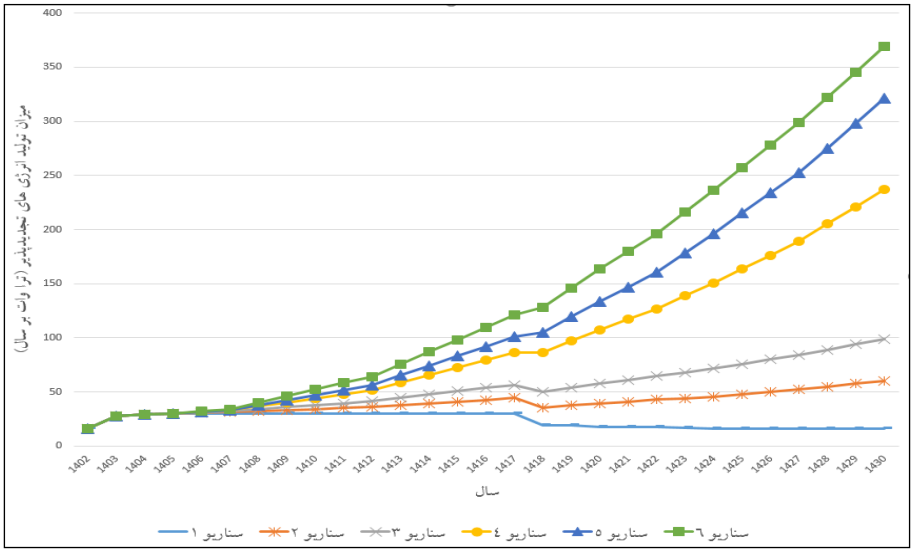
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۱۴۳۰ تولید برق مورد تقاضا از انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی به ترتیب ۷/۷۳ و ۵۸/۳۸ درصد پیش‌بینی می‌شود.

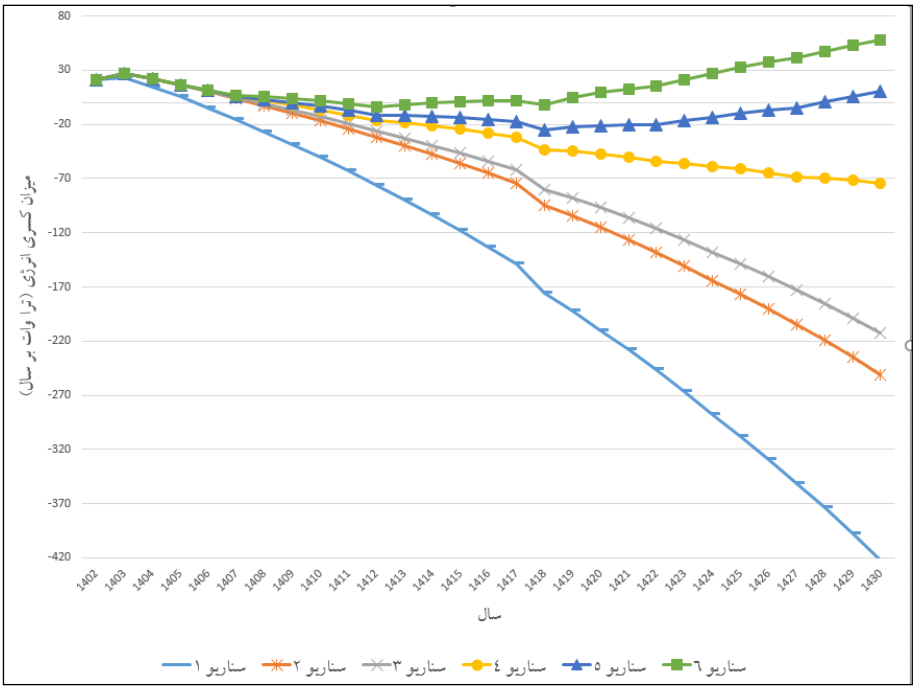
سناریو سوم: بر اساس شکل ۸ برنامه ریزی جهت راه اندازی نیروگاه‌های برق خورشیدی و بادی بر اساس سال‌های مختلف جهت برنامه ریزی بلند مدت آورده شده است. بر اساس برنامه‌ریزی در این سناریو با رشد متوسط سالیانه ۱۷/۱ و ۱۶/۳ درصدی تولید انرژی خورشیدی و بادی، ۹۸/۹ تراوات در سال تولید برق برای انرژی‌های تجدیدپذیر پیش‌بینی می‌شود. با توجه به فروض الگوی این تحقیق با اجرای این سناریو، (رشد ۱۰/۷ درصدی انرژی‌های تجدیدپذیر) میزان تولید برق از انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر به ترتیب ۵۸/۳۸ و ۱۲/۶۸ درصد در سال ۱۴۳۰ پیش‌بینی می‌شود. از طرفی کسری ۲۷/۲ درصدی در این سال پیش‌بینی شده است.

در سناریوهای چهارم، پنجم و ششم رشد متوسط راه اندازی نیروگاه‌های تولید برق خورشیدی و بادی به ترتیب ۲۰ و ۱۸ درصد در سال فرض شده است. تنها مقادیر و سال‌های راه اندازی جابجا شده است. بر اساس پیش‌بینی تحقیق در سناریو چهارم ۹/۵ درصد کسری برق پیش‌بینی شده است و در سناریوهای پنجم و ششم به ترتیب ۱/۳ و ۷/۴ درصد مازاد تولید برق در کشور پیش‌بینی شده است (شکل ۹). در این سه سناریو برای تولید برق تجدیدپذیر به ترتیب رشد سالیانه ۱۰/۷، ۱۱/۸ و ۱۲/۴ درصدی پیش‌بینی می‌شود (شکل ۸). با توجه به سناریو ششم که قوی ترین و خوشبینانه‌ترین حالت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. پیش‌بینی الگو تولید ۴۷/۳۱ درصدی تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۱۴۳۰ می‌باشد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]



شکل ۸. میزان تولید انباشته انرژی‌های تجدیدپذیر در طول زمان (مرجع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۹. میزان کسری یا مازاد انرژی (مرجع: یافته‌های تحقیق)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

۸- نتیجه‌گیری

توسعه سیستم‌های انرژی- اقتصادی در الگوهای سیستم‌های پویا به سیاست گذاران و تصمیم گیرندگان انرژی کمک می‌کند، تا برنامه‌های توسعه انرژی تجدیدپذیر را به عنوان شیوه‌های سیاستی برای دستیابی به سطح مطلوبی از وابستگی و امنیت عرضه انرژی بررسی کنند. در نظر گرفتن سیاست‌های مختلف در مدل برای تصمیم گیری بهتر در مورد اینکه چه چیزی برای مدیریت وابستگی به انرژی و تقویت نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین تقاضای انرژی مطمئن ضروری است. از آنجایی که مدل سیستم‌های پویای پیشنهادی عمومی است، که می‌توان آن را در مطالعات موردی مختلف به کار برد. این موضوع مدل را برای مطالعات مختلف کاربردی‌تر خواهد کرد. در این تحقیق به منظور تعیین این که چگونه نتایج سناریوهای پیشنهادی می‌تواند به کاهش وابستگی انرژی در ایران کمک کند، صرفه جویی در هزینه به منظور کاهش وابستگی انرژی در ایران با اجرای برنامه‌های اقدام تجدیدپذیر برآورد شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در ضعیف‌ترین سناریو استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (عدم اجرای هرگونه برنامه اقدام انرژی‌های تجدیدپذیر)، مقدار انرژی انباشته از منابع انرژی تجدیدپذیر بین سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۳۰ بدون تغییر در نظر گرفته شده است. بنابراین بر اساس این سناریو وضعیت انباشت انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح فعلی تا مستهلک شدن تجهیزات باقی خواهد ماند. بر اساس این سناریو در سال ۱۴۳۰، ۴۲۲ تراوات در سال کمبود تولید برق را شاهد خواهیم بود. با توجه به افزایش تقاضای برق و رشد کمتر عرضه انرژی‌های فسیلی نسبت به تقاضا، پیش‌بینی می‌شود که در سال ۱۴۳۰، ایران با کسری ۵۴/۱ درصدی در تولید برق مواجه شود.

در خوش بینانه ترین سناریو افزایش نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، رشد سالانه راه‌اندازی این نیروگاه‌ها به ترتیب ۲۰ و ۱۸ درصد در سال فرض شده است. بر اساس پیش‌بینی تحقیق با توجه به فروض در نظر گرفته شده ۷/۴ درصد مازاد تولید برق در سال ۱۴۳۰ در کشور پیش‌بینی شده است. بر اساس این سناریو تولید برق تجدیدپذیر به ترتیب رشد سالیانه ۱۲/۴ درصدی خواهد داشت. با توجه به قوی ترین و خوشبینانه-ترین حالت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر پیش‌بینی الگوی بسط داده شده توسط

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

تحقیق نشان دهنده تولید ۴۷/۳۱ درصدی تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۱۴۳۰ می‌باشد.

۹- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

در این تحقیق رشد مصرف برق بر اساس رشد سالانه و تاریخی در نظر گرفته شده است. می‌توان متغیرهایی مانند جمعیت و رشد صنعتی را به این تحقیق اضافه و رشد تقاضای برق را متغیر وابسته‌ای به جمعیت و همچنین رشد بخش‌های مختلف اقتصادی (مانند خانگی، کشاورزی، صنعتی و غیره) در نظر گرفت.

توسعه فن آوری می‌تواند بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر معناداری داشته باشد. بنابراین یکی از متغیرهایی که می‌تواند بر رشد توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر گذار باشد رشد فن آوری است که برای مطالعات جاری می‌تواند موضوع مهم و حائز اهمیتی باشد.

با توجه به توسعه صنعتی و همچنین افزایش جمعیت, نه تنها ایران, بلکه تمام کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته با مشکل آلودگی و محیط زیست روبرو می‌باشند. از آنجا که انرژی‌های تجدیدناپذیر باعث آلودگی زیست محیطی می‌باشد و همچنین محدودیت انرژی‌های فسیلی، بهترین روش کاهش آلودگی بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. بنابراین آلودگی اگر به الگو اضافه گردد می‌تواند به تکمیل الگو کمک کند.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

منابع

- استادزاد, علی حسین (۱۴۰۳). انرژی خورشیدی و توسعه پایدار اقتصادی در ایران. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو, ۱۱(۲), ۱۲۸-۱۳۷.
- امینی امید، امانی رامین، قادری سامان (۱۴۰۱). مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر و ریسک امنیت انرژی در ایران: کاربرد مدل خودرگرسیون برداری ساختاری (SVAR). نشریه انرژی ایران. ۲۵ (۴) :۸۱-۱۰۳
- فتاحی زاده, ابوذر، اندرخورد, شیرین. انرژی‌های تجدیدپذیر و راهبردهای امنیت انرژی ایران. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران. https://doi.org/10.22054/jiee.2025.79556.2089
- رضوی سید عبدااله (۱۴۰۰). اروپا و معضل امنیت انرژی؛ محدودیت و راهبردها. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۷ (۷۱) :۱۸۷-۲۲۱
- مغانی امیرمحمد، حیدری بهاره، ملکی عباس (۱۴۰۳). گاز طبیعی و انرژی خورشیدی؛ چالش‌ها و فرصت‌های ایران از منظر امنیت انرژی. فصلنامه پژوهش‌های سیاست گذاری وبرنامه ریزی انرژی. ۱۰ (۲) :۳۲-۶۴
- Ahmad, M. M., Kumar, A., & Ranjan, R. (2018). Current trends in renewable energy: an overview. Int J Eng Res Adv Technol (IJERAT), 4, 1-15.
- Ainou, F. Z., Ali, M., & Sadiq, M. (2023). Green energy security assessment in Morocco: green finance as a step toward sustainable energy transition. Environmental Science and Pollution Research, 30(22), 61411-61429.
- Axon, C., & Darton, R. (2021). Sustainability and risk–a review of energy security. Sustainable Production and Consumption, 27, 1195-1204 .
- Ayoo, C. (2020). Towards energy security for the twenty-first century. Energy policy, 15-40.
- Azar, A. T. (2012). System dynamics as a useful technique for complex systems. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 10(4), 377-410.
- Bahgat, G. (2008). Energy Security: What Does It Mean? The Journal of Social, Political, and Economic Studies, 33, 1.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

- Berdysheva, S., & Ikonnikova, S. (2021). The energy transition and shifts in fossil fuel use: the study of international energy trade and energy security dynamics. Energies, 14(17), 5396.
- Bollino, C.A., & Galkin, P. (2021). Energy security and portfolio diversification: Conventional and novel perspectives. Energies, 14(14), 4257.
- Emmanuel, M., Doubleday, K., Cakir, B., Marković, M., & Hodge, B.-M. (2020). A review of power system planning and operational models for flexibility assessment in high solar energy penetration scenarios. Solar Energy, 210, 169-180.
- Galagan, M., & Frigerio, A. (2023). The Contribution of Renewable Energy to International Security: A Preliminary Study. Вестник КазНУ. Серия международные отношения и международное право, 101(1), 116-122.
- Gökgöz, F., & Güvercin, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 226-239.
- Groundstroem, F., & Juhola, S. (2021). Using systems thinking and causal loop diagrams to identify cascading climate change impacts on bioenergy supply systems. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 26(7), 29.
- Hafezi, H., & Delfan, M. (2022). Long-Term Forecasting of Iran's Electricity Demand (A Scenario-Based Approach Using a Combined ARDL and ARIMA Approach). Iranian Energy Economics, 11(44), 41-71. https://doi.org/10.22054/jiee.2022.70675.1959
- Hosseinabad, E. R. (2018). Evaluating the role of energy demand prediction and renewable energy utilization on energy dependency management: a generic system dynamics model. Northern Illinois University.
- Hosseinabad, E. R., & Moraga, R. J. (2020). The evaluation of renewable energy predictive modelling in energy dependency reduction: a system dynamics approach. International Journal of Applied Management Science, 12(1), 1-22.
- Kalair, A., Abas, N., Saleem, M. S., Kalair, A. R., & Khan, N. (2021). Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. Energy Storage, 3(1), e135.
- Kober, T., Schiffer, H.-W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019. Energy Strategy Reviews, 31, 100523.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

- Ionescu, R. V., Zlati, M. L., Antohi, V. M., & Stanciu, S. (2022). Was the European oil industry prepared for the current global crisis?. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 12(12), 3357-3372.
- Lin, B., & Raza, M. Y. (2020). Analysis of energy security indicators and CO2 emissions. A case from a developing economy. Energy, 200, 117575 .
- Lin, G., Palopoli, M., & Dadwal, V. (2020). From causal loop diagrams to system dynamics models in a data-rich ecosystem. Leveraging data science for global health, 77-98.
- Luty, L., Zioło, M., Knapik, W., Bąk, I., & Kukuła, K. (2023). Energy security in light of sustainable development goals. Energies, 16(3), 1390 .
- Malik, M. S. (2020). Electricity generation from the high-speed wind of the spillway in a hydroelectric power station. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1-13.
- Odoom, R., Brännlund, R., Karimu, A., & Nanzoninge, J. (2023). Oil and Gas Energy Security. In The Economics of the Oil and Gas Industry (pp. 58-71). Routledge.
- Ranjan, M., & Shankar, R. (2022). A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects. Journal of Energy Storage, 45, 103717.
- Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H., & Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. Ecological Indicators, 108, 105682.
- Schaffernicht, M. (2010). Causal loop diagrams between structure and behaviour: A critical analysis of the relationship between polarity, behaviour and events. Systems Research and Behavioral Science, 27(6), 653-666 .
- Sotnyk, I., Kurbatova, T., Kubatko, O., Prokopenko, O., Prause, G., Kovalenko, Y., Trypolska, G., & Pysmenna, U. (2021). Energy security assessment of emerging economies under global and local challenges. Energies, 14(18), 5860.
- Spector, J. M., Christensen, D. L., Sioutine, A. V., & McCormack, D. (2001). Models and simulations for learning in complex domains: Using causal loop diagrams for assessment and evaluation. Computers in Human Behavior, 17(5-6), 517-545.
- Streimikiene, D., Siksnelyte-Butkiene, I., & Lekavicius, V. (2023). Energy diversification and security in the EU: comparative assessment in different EU regions. Economies, 11(3), 83.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]

- Subramanian, A. S. R., Gundersen, T., & Adams, T. A. (2018). Modeling and simulation of energy systems: A review. Processes, 6(12), 238.
- Taghizadeh-Hesary, F., Chang, Y., Yoshino, N., & Morgan, P. J. (2021). Energy insecurity, renewable energy and economic growth. In (Vol. 66, pp. 313-322): World Scientific.
- Tang, M., Wang, S., Dai, C., & Liu, Y. (2020). Exploring CO2 mitigation pathway of local industries using a regional-based system dynamics model. International Journal of Information Management, 52, 102079 .
- Vasylyna, O. (2023). INFLUENCE OF PHYSICAL ECONOMY ON ENERGY SECURITY. Economics & Education, 8(1), 68-71 .
- Wang, L., Li, Z., Xu, Z., Yue, X., Yang, L., Wang, R.,... & Ma, H. (2024). Carbon emission scenario simulation and policy regulation in resource-based provinces based on system dynamics modeling. Journal of Cleaner Production, 460, 142619.
- Waterlander, W. E., Singh, A., Altenburg, T., Dijkstra, C., Luna Pinzon, A., Anselma, M., Busch, V., van Houtum, L., Emke, H., & Overman, M. L. (2021). Understanding obesity-related behaviors in youth from a systems dynamics perspective: the use of causal loop diagrams. Obesity reviews, 22(7), e13185.
- Wen, J., Zhao, X., Wang, Q.-J., & Chang, C.-P. (2021). The impact of international sanctions on energy security. Energy & Environment, 32(3), 458-480.
- Wu, W., Sheng, L., Tang, F., Zhang, A., & Liu, J. (2021). A system dynamics model of green innovation and policy simulation with an application in Chinese manufacturing industry. Sustainable Production and Consumption, 28, 987-1005.
- Yuan, H., & Yang, B. (2022). System dynamics approach for evaluating the interconnection performance of cross-border transport infrastructure. Journal of Management in Engineering, 38(3), 04022008.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-11-26]