نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال هفتم/ شماره ۲۲/ بهار ۱۴۰۰ / صفحات ۵۰ - ۷

مدل‌سازی سیستمی برنامه‌ریزی توسعه تولید برق تجدیدپذیر در رقابت با برق فسیلی

فاطمه دیانت
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا همدان
f.dianat94@basu.ac.ir
وحید خداکرمی
استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا همدان (نویسنده مسئول)
v.khodakarami@basu.ac.ir
سید حسین حسینی
دانش‌آموخته دکترای مهندسی صنایع از دانشگاه تهران، مدیر مؤسسه سیستم‌های مدیریتی الگو محور (سمام)
s.h.hosseini@samamsystem.com
حامد شکوری گنجوی
دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران
hshakouri@ut.ac.ir

با وجود تأکید برنامهٔ ششم توسعه، رشد برق تجدیدپذیر در عمل، اولویت اجرایی بالایی ندارد. همچنین با توسعهٔ برق فسیلی نیز، رقابت‌پذیری و امکان توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. به دلیل نیاز کشور به منابع تولیدکنندهٔ برق غیر فسیلی در آینده، توسعهٔ برق تجدیدپذیر موضوعی است که از هم‌اکنون باید به آن اندیشید. این پژوهش در نظر دارد از دید کلان، پویایی‌های توسعه برق تجدیدپذیر را شناسایی کند و بر اساس این پویایی‌ها، برآورد صحیحی از ادامهٔ وضعیت موجود به دست آورد و سیاست‌های مناسبی برای توسعه برق تجدیدپذیر برای بازه‌ای ۳۰ ساله تا سال ۲۰۵۰ ارائه دهد. در این مطالعه، در راستای ایجاد دید سیاست‌گذاری کلان، تحلیل رفتار رقبا و نحوهٔ تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، چارچوبی ترکیبی برای مدل‌سازی سیستمی پیشنهاد گردید. راستی‌آزمایی‌ها نشان می‌دهند که با توجه به اعتبار بالای مدل، می‌توان از آن در سنجش تصمیمات استراتژیک در برنامه‌ریزی انرژی استفاده نمود. با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف روشن می‌شود که با روند کنونی نمی‌توان به اهداف تعیین شده دست‌یافت، در عوض با تغییر سیاست، با کمترین بار مالی، می‌توان تا سال ۲۰۵۰ سهم ظرفیت برق تجدیدپذیر از کل ظرفیت برق را از ۲.۳ درصد (با روند کنونی) به ۵.۴ الی ۱۳.۷ درصد (در سناریوهای مختلف) رساند.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید برق، توسعه برق تجدیدپذیر، رقابت، پویایی سیستم، نظریه بازی تکاملی.

تاریخ دریافت: ۲۶ / ۱۱ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۳ / ۳ / ۱۴۰۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۱. مقدمه

برق تجدیدپذیر، سهم مهمی در سبد انرژی کشورهای توسعه‌یافته دارد (خطیب[1]، ۲۰۱۰). آلودگی هوا که هرساله به‌خصوص در ماه‌های سرد، موجب مشکلاتی در شهرهای ایران می‌شود، با توسعه بی‌رویه نیروگاه‌های فسیلی بی‌ارتباط نیست. توسعه برق تجدیدپذیر موجب کاهش انتشار گازهای آلاینده و کاهش گرمایش زمین، پایداری و امنیت انرژی، مدیریت بحران و مقاومت اقتصادی کشورها در شرایط کمبود منابع فسیلی می‌شود و ازین رو یافتن سیاست‌های مؤثر در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر دارای اهمیت است (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲).

میزان هزینه‌های تولید و توانایی رقابت‌پذیری تکنولوژی‌های تولیدکننده برق به شرایط خاص هر کشور بستگی دارد (خطیب، ۲۰۱۰ و اویانگ[2] و لین[3]، ۲۰۱۴). در کشور ایران به دلیل هزینه پایین سوخت نیروگاه‌های فسیلی (شکوری و علی اکبری ثانی، ۲۰۱۶)، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمتر نیروگاه‌های فسیلی نسبت به هزینه اولیه سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های تجدیدپذیر (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰) و پرداخت نکردن هزینه‌های آلایندگی، هزینه تمام شده نیروگاه‌های فسیلی کم و ساخت نیروگاه‌های آن صرفه اقتصادی دارد. همچنین عدم امکان صادرات و فروش نفت به دلیل تحریم‌های نفتی، توسعه برق فسیلی در داخل کشور را تشدید می‌کند.

این موارد باعث می‌شود که نیروگاه‌های تجدیدپذیر در مقابل نیروگاه‌های فسیلی از سودآوری، توان رقابت و رشد کمتری برخوردار باشند و برق فسیلی سهم قابل‌توجهی از بازار برق ایران را تأمین کند.

بر اساس داده‌های بانک جهانی، امروزه ۷۵ درصد برق دنیا از منابع تجدیدناپذیر تولید می‌شود. این میزان به طور میانگین در ایران نزدیک ۸۵ درصد و صرف‌نظر از نیروگاه‌های برق‌آبی نزدیک ۹۹ درصد (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۷) می‌باشد. متأسفانه ایران در جمع ۲۰ کشور دنیاست که ۷۵ درصد

1. Khatib
2. Ouyang
3. Lin

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

گازهای گلخانه‌ای را تولید می‌کند (مقدم و همکاران، ۲۰۱۱). این در حالی است که دارای منابع طبیعی فراوانی برای راه‌اندازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشد (خجسته و همکاران، ۲۰۱۸).

توسعه برق تجدیدپذیر در ایران ازآن‌رو که در تأمین و قیمت سوخت نیروگاه‌های فسیلی نگرانی وجود ندارد، از اولویت‌های مهم به‌حساب نمی‌آید. با توسعه برق فسیلی، به‌مرور توان رقابت و رشد برق تجدیدپذیر در آینده کاهش می‌یابد. آینده‌ای که لاجرم کشور با اتمام سوخت فسیلی و چالش تأمین برق مصرفی ناشی از افزایش سالیانه تقاضا روبرو می‌شود. ازاین‌رو توسعه برق تجدیدپذیر، چالشی است که از هم‌اکنون باید برای آن راه‌حلی اندیشید و کاراترین سیاست‌های توسعه برق تجدیدپذیر را برای کشور، شناسایی و ارائه کرد.

باتوجه‌به نبود مطالعه‌ای جامع در این زمینه، این مطالعه به دنبال بررسی پویایی‌های مؤثر در فرایند توسعه برق تجدیدپذیر در ایران در بستر بازار رقابتی برق و سایر شرایطی که رشد برق تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را متأثر می‌سازند و منجر به سهم هر یک از آنها در بازار برق می‌شود، می‌باشد. با کمک درک چندجانبه حاصل از مدل‌سازی، توانایی بیشتری در بیان شرایط واقعی و برآورد نتایج سیاست‌های توسعه‌ای پیشنهادی فراهم می‌شود. سیاست‌های توسعه‌ای که با اجرای آن، برق تجدیدپذیر با وجود عدم قطعیت‌های این صنعت، بتواند نقش خود را در بازار برق ایفا کند و به درآمدزایی، سودآوری و نهایتاً توسعه برسد.

در ادامه پس از مروری بر پیشینه پژوهش، در بخش روش پژوهش، درباره مراحل مدل‌سازی مسئله با روش پویایی سیستم به همراه مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان بحث می‌شود. در بخش بعد مدل مفهومی توسعه برق تجدیدپذیر به همراه زیر سیستم‌ها[1] و پویایی‌های تأثیرگذار اصلی بر مسئله شرح و نحوه درنظرگرفتن رقابت توضیح داده می‌شود، سپس در بخش مدل‌سازی، نمودارهای حالت و جریان بر مبنای نمودارهای علت و معلولی به‌دست‌آمده، ایجاد می‌شوند. بعد از اعتبارسنجی مدل،

1. Subsystems

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در بخش تجزیه‌وتحلیل یافته‌ها، با مدل‌سازی تحت شرایط مختلف، راهکارهایی برای توسعه برق باتوجه‌به سازوکارهای موجود در بازار ارائه می‌شود. بخش آخر نیز نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برنامه‌ریزی توسعه تولید برای تأمین تقاضای روبه‌رشد مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، بخش عمده مطالعات برنامه‌ریزی انرژی را در برمی‌گیرد. امروزه برنامه‌ریزی توسعه تولید به‌خاطر رخداد تجدید ساختار در صنعت برق، عمدتاً به معنای بررسی سیاست‌ها و تصمیمات می‌باشد.

بررسی فرایند توسعه برق و روابط پیچیده موجود در آن، نیازمند رویکرد جامع است (گنسر[1] و همکاران، ۲۰۲۰ و داینر[2] و لارسن[3]، ۲۰۰۱). سه نوع عمده مدل‌های بهینه‌سازی، مدل‌های اقتصادسنجی و مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند برای توصیف رفتار بلندمدت بازارهای برق آزاد شده[4]، مورد استفاده قرار بگیرند (ابانی[5]، ۲۰۱۹ و اولسینا[6]، ۲۰۰۸، لاند[7] و همکاران، ۲۰۱۷). رویکردهای مدل‌سازی سنتی انرژی که تأکید بر روابط مستقیم بین پارامترهای مدل دارند، برای تحلیل بازار برق آزاد شده محدودیت‌هایی دارند و نیاز به رویکردهای مدل‌سازی جدیدی مانند مدل‌سازی عامل بنیان، پویایی سیستم، نظریه بازی، مدل‌سازی ریسک مالی و گزینه‌های واقعی[8] می‌باشد (ابانی، ۲۰۱۹ و داینر و لارسن، ۲۰۰۱).

باتوجه‌به تفاوت‌های سه نوع عمده مدل‌های بازار برق (لاند و همکاران، ۲۰۱۷ و اولسینا، ۲۰۰۸) و تسهیل در بررسی مسائل پیچیده، کلان و چندبعدی (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۰)، چشم‌انداز بلندمدت مسئله، متغیرهای فراوان، نیاز به ساختار منعطف در اضافه و کم نمودن متغیرها و توابع متنوع و غیرخطی، مدل‌های شبیه‌سازی به‌منظور بررسی روند توسعه برق تجدیدپذیر به‌عنوان روش حل انتخاب گردید.

1. Gencer
2. Dyner
3. Larsen
4. Liberalized
5. Abani
6. Olsina
7. Lund
8. Real Options

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

از دیگر موارد این انتخاب، می‌توان از اثرات متوالی و روابط به‌هم‌پیوسته، داشتن روابط بازخوردی، نبود داده‌های آماری زیاد و تعریف سناریوهای مختلف نام برد.

مدل‌های شبیه‌سازی خود به چند دسته تقسیم می‌شوند. نگاه کلی و ماکروسکوپی به همراه درنظرگرفتن پیچیدگی سطح کلان همچون پویایی سیستم‌ها (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۰)، و نگاه جزئی و میکروسکوپی به همراه درنظرگرفتن پیچیدگی سطح خرد همچون مدل‌سازی عامل بنیان (بهدانی[1]، ۲۰۱۳). ترکیب این دو نگاه در کنار هم، موجب دیدی جامع به مسئله و کامل شدن روش مدل‌سازی و تحلیل‌های دقیق‌تر می‌گردد (لاتیلا[2] و همکاران، ۲۰۱۰ و لوه[3] و همکاران، ۲۰۱۴).

از منظری دیگر، مجموعه تکنیک‌های ارائه شده در بخش برنامه‌ریزی توسعه تولید می‌تواند به دودسته تقسیم شود: اول: تجزیه‌وتحلیل سناریوها، تحلیل ریسک و گزینه‌های واقعی (که بر روی تحلیل عدم قطعیت متمرکز شده‌اند) و دوم: شبیه‌سازی عامل محور و نظریه بازی (که عمدتاً با تحلیل استراتژیک رقبا و سیستم در ارتباط است). این دودسته مکمل همدیگر هستند و یک مطالعه برنامه‌ریزی توسعه تولید کامل باید تکنیک‌های هر دو مجموعه را موردتوجه قرار دهد. پویایی سیستم می‌تواند به‌عنوان ابزار مکمل برای هر یک از تکنیک‌های اشاره شده به‌حساب آید (موراتیلا سوریا[4] و ایبانز لوپز[5]، ۲۰۱۹ و داینر و لارسن، ۲۰۰۱).

ازآنجاکه برنامه‌ریزی توسعه تولید برق یک مسئله تصمیم پیچیده است، تعداد زیادی از مسائل برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی با استفاده از پویایی سیستم در میان سایر تکنیک‌ها، تجزیه‌وتحلیل شده‌اند. این جریان به‌وسیله پروژه‌های مدل‌سازی WORLD در اوایل دهه ۱۹۷۰ در

1. Behdani
2. Lättilä
3. Lewe
4. Moratilla Soria
5. Ibáñez López

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

گروه پویایی‌های سیستم دانشگاه MIT، آغاز و با مطالعات مدل‌سازی COAL، FOSSIL، شبیه‌سازی تجزیه‌وتحلیل انرژی پویا یکپارچه[1] (IDEAS)، انرژی ۲۰۲۰ و [2] FREE، دنبال شد.

مدل‌های انرژی شمال اروپا همچون مدل ELEPHANT (در کشور دانمارک)، مدل BALMOREL (در کشور دانمارک)، مدل NORDMOD-T (در کشور نروژ)، مدل MARKAL (در کشورهای نروژ، سوئد و فنلاند)، مدل PoMo (در کشور سوئد)، مدل EFOM (در کشور فنلاند)، مدل EMPS (در کشورهای نروژ، سوئد، دانمارک و فنلاند) و مدل RAMSES (در کشور دانمارک) و مدل Kraftsim (برای بازار برق کشورهای شمال اروپا و گذار از تولید برق مبتنی بر انرژی‌های فسیلی به سمت تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر) و مدل Zertsim (بازار برق آلمان) از مطالعات تجزیه‌وتحلیل بازار برق و انرژی با کمک پویایی سیستم می‌باشند.

در این راستا، تعداد زیاد دیگری نیز از مدل‌های توسعه تولید برق و سیاست‌گذاری انرژی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم توسعه یافته‌اند. مطالعاتی در زمینه بازارهای برق تجدیدپذیر (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۰ و حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)، ارزیابی سیاست‌هایی مشخص برای ارتقاء سرمایه‌گذاری در تولید برق تجدیدپذیر (هسو[3]، ۲۰۱۲)، نظیر تعرفه تغذیه[4] (FIT) (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵) و مالیات کربن (پتیت[5] و همکاران، ۲۰۱۶) از تحقیقات مرتبط با برنامه‌ریزی توسعه تولید با ابزار پویایی سیستم می‌باشند.

البته در کنار نقاط قوت بسیار، استفاده بیش از حد از تجمیع، به علت توجه نکردن به مکانیسم‌های تعامل در میان عناصر فردی، برای صحت مدل مضر است. دید کلان مستلزم نادیده‌گرفتن سازوکارهای اساسی در سطح منسجم، مانند همکاری، رقابت یا حراج است (اولسینا، ۲۰۰۸ و لیو[6] و همکاران، ۲۰۱۹). هنگامی‌که مدل در جهت‌های متنوعی توسعه می‌یابد، سبب وارد

1. Integrated Dynamic Energy Analysis Simulation (IDEAS)
2. Feedback-Rich Energy-Economy Climate Model (FREE)
3. Hsu
4. Feed-In Tariffs (FIT)
5. Petitet
6. Liu

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

شدن متغیرها و محدودیت‌های زیادی به مسئله می‌شود که با الگوریتم‌هایی با دید محدود نمی‌توان آن را حل کرد (تیان[1] و همکاران، ۲۰۱۴).

تحلیل روند برق تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی توسعه تولید آن، بدون درنظرگرفتن موضوعاتی همچون تأثیر تعاملات عامل‌ها بر یکدیگر و بر محیط، دیدی جامع و صحیح در اختیار تصمیم‌گیران قرار نمی‌دهد. عدم درنظرگرفتن رقابت بین شرکت‌ها و تکنولوژی‌های متفاوت تولید انرژی، عدم توجه به بازی‌های استراتژیک و رفتار منطقی بین آنها، بی‌توجهی به رشد تکنولوژی، از موضوعاتی است که به طور عام ضعف مقالات این حوزه به‌حساب می‌آید.

در این راستا، ترکیب پویایی سیستم با مفاهیم دیگر، موجب نزدیکی بیشتر به دنیای واقعی و انعطاف‌پذیری مدل شده است (فرج‌پور و همکاران، ۲۰۱۷). پرداختن به مفاهیم نظریه بازی در پویایی سیستم (محمدی و جوانمردی، ۲۰۱۹)، پرداختن به مفاهیم نظریه بازی تکاملی[2] (EGT) در پویایی سیستم (تیان و همکاران، ۲۰۱۴ و لیو و همکاران، ۲۰۱۹ و لی[3] و همکاران، ۲۰۱۹) و پرداختن به ابزارهای تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در پویایی سیستم (لنگرودی و امیری، ۲۰۱۶)، از این دسته از مطالعات می‌باشند. به طور نمونه، ونگ[4] و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای تحلیل اثرات سیاست‌های رفت‌وآمدهای شهری بر کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید، از ترکیب پویایی سیستم با مدل‌سازی عامل بنیان استفاده کرده‌اند.

این پژوهش در نظر دارد برای غلبه بر ضعف‌های مطرح شده، به‌عنوان نوآوری، برای تحلیل کارا از روش ترکیبی بهره ببرد. با جمع‌بندی مطالعات انجام شده، به دلیل اهمیت حرکت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و لزوم توجه به‌تمامی جنبه‌های آن، این مطالعه قصد دارد برای بررسی پویایی‌های مسئله، رویکرد پویایی سیستم را به‌عنوان روش اصلی بررسی انتخاب کند و برای مواجه شدن با کاستی پویایی سیستم، نظیر درنظرنگرفتن شرایط هر عامل به‌تنهایی، اثرات ناشی از تعاملات بین عامل‌ها، بررسی رفتار

1. Tian
2. Evolutionary Game Theory (EGT)
3. Li
4. Wang

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

رقابتی بازیکنان بازار و ارزیابی موقعیت‌های پیچیده استراتژیک همچون بازار برق، مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان و نظریه بازی را به‌عنوان ابزاری که نواقص پویایی سیستم را جبران می‌کند، استفاده کند.

۳. روش پژوهش

به‌منظور مدل‌سازی سیستمی، در گام اول، ادبیات پیشین به‌منظور مشخص‌کردن متغیرها، زیر سیستم‌ها، پویایی‌ها و روابط مؤثر در توسعه برق تجدیدپذیر به طور جامع و دقیق موردمطالعه قرار خواهد گرفت. در گام دوم با کمک صاحب‌نظران صنعت برق تجدیدپذیر، از میان آنها متغیرهای تأثیرگذار اصلی مسئله انتخاب و مرز مدل تعیین خواهد شد. گام سوم، جستجو راه‌حل مناسب برای تحلیل مسئله می‌باشد که همان‌طور که گفته شد رویکرد ترکیبی پویایی سیستم به همراه مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان انتخاب گردید.

در گام چهارم چارچوب مفهومی از طریق نمودارهای علت و معلولی[1] (CLD) که در آن مکانیسم‌ها و حلقه‌های تعادلی (منفی)[2] و تقویت‌کننده (مثبت)[3] تأثیرگذار روی زیر سیستم‌ها وجود دارد، ایجاد خواهد شد. در گام پنجم، مدل‌سازی مسئله انجام می‌شود. مدل برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ به مدت ۴۰ سال در بازار انحصار چندجانبه برق ایران اجرا خواهد شد که از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ برای تطابق با داده‌های تاریخی و از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ برای مشاهده اثر سیاست‌های حمایتی می‌باشد. در گام ششم مدل‌سازی مورد راستی‌آزمایی[4] و اعتبارسنجی[5] قرار خواهد گرفت و در صورت نیاز در گام‌های قبلی، اصلاحاتی صورت می‌گیرد. در گام آخر، با اجرای مدل در شرایط گوناگون، پیشنهادهایی برای توسعه برق تجدیدپذیر بر اساس پویایی مؤثر اصلی به‌دست‌آمده و زیر سیستم‌ها، بیان می‌گردد و اثرگذاری آنها سنجیده می‌شود.

1. Causal Loop Diagram (CLD)
2. Balancing Loops
3. Reinforcing Loops
4. Verification
5. Validation

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در ادامه پژوهش به‌منظور سهولت در بررسی روند توسعه، انرژی باد باتوجه‌به بلوغ[1] (علمداری و همکاران، ۲۰۱۲) و فراوانی تولید در جهان (مورداک[2] و همکاران، ۲۰۱۹) و توربین گاز چرخه ترکیبی (CCGT) باتوجه‌به میزان فراوانی تولید در ایران (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۷)، به‌عنوان نماینده‌ای از تکنولوژی‌های تجدیدپذیر و متعارف در نظر گرفته می‌شوند.

٤. ارائه مدل مفهومی توسعه برق تجدیدپذیر - نمودارهای علت و معلولی

در تحلیل فرایند توسعه برق تجدیدپذیر باید از توجه داشتن به تنها چند زیربخش خاص مانند تقاضا یا عرضه انرژی الکتریکی و توجه نکردن به ارتباط بین این دو بخش با یکدیگر (محمدی و جوانمردی، ۲۰۱۹) دوری نمود. برخلاف مطالعاتی همچون حسینی و همکاران، ۲۰۱۲ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵ که بعضی از سازوکارهای اقتصادی و اجتماعی را در نظر نگرفته‌اند و یا برخی متغیرهای سیستم را برون‌زا در نظر گرفته‌اند، تحلیل سیستم بازار برق تجدیدپذیر، زمانی دید جامع و صحیح از سیستم را به تصمیم‌گیر ارائه می‌دهد که عوامل اصلی موجود در آن، در مدل به طور درون‌زا، در نظر گرفته شده باشد. در همین زمینه دهقان و همکاران در سال ۲۰۲۱، چهار ماژول اصلی تولید، تقاضا، توسعه ظرفیت و سوبسید را برای بررسی بازار برق معرفی کردند. شاه‌محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ بخش‌های هزینه، سود و توسعه تولید را در تحلیل بازار برق، بخش‌های کلیدی ارزیابی می‌کنند. با مطالعه جامع ادبیات پژوهش نظیر میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰، پتیت و همکاران، ۲۰۱۶ و دهقان و همکاران، ۲۰۲۱، و مطالعه اخبار و گزارشات مرتبط، مرزهای اشاره‌شده در مطالعاتی نظیر حسینی و همکاران، ۲۰۱۲ و قدرت الله[3] و سئونگ[4]، ۲۰۱۰ و تحلیل داده‌های بازار، متغیرها و فرضیه‌های مؤثر بر توسعه برق تجدیدپذیر به‌صورت وسیع شناسایی شدند. سپس بعد از طرح این متغیرها و فرضیات با کارشناسان صنعت برق تجدیدپذیر و بازنگری مجدد در آنها، با مشخص‌شدن مرز مدل و لزوم درنظرگرفتن متغیرها در مدل‌سازی، متغیرهای درون‌زا[5] و برون‌زا[6]، به‌صورت جدول ۱ دسته‌بندی شدند و مدل مفهومی نشان‌داده‌شده در شکل ۱ ایجاد گردید.

1. Maturity
2. Murdock
3. Qudrat-Ullah
4. Seong
5. Endogenous
6. Exogenous

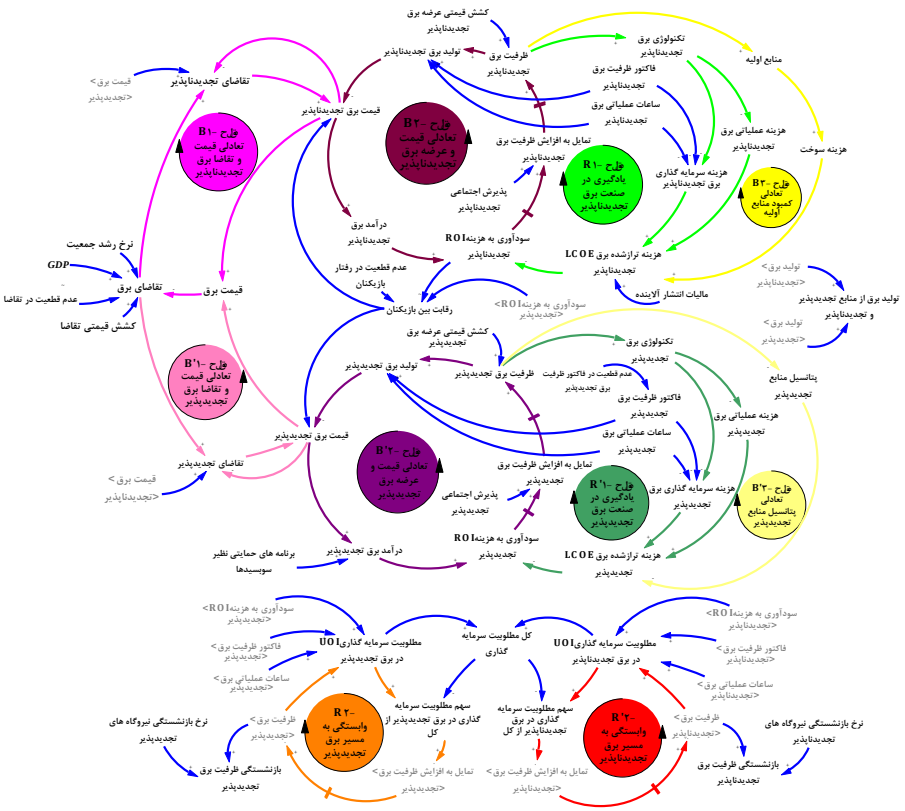
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

جدول ۱. متغیرهای درون‌زا و برون‌زا تحقیق

متغیرهای برون‌زا	متغیرهای درون‌زا
• نرخ انتشار آلاینده (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• هزینه انتشار آلاینده (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
• تولید ناخالص داخلی (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)	• هزینه تعمیرات و نگهداری (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
• هزینه انتقال (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)	• هزینه سرمایه‌گذاری (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
• فاکتور ظرفیت (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• رشد تکنولوژی (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)
• فاکتور یادگیری (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)	• استهلاک سرمایه (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
• تقاضای سوخت (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• سرمایه‌گذاری (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵ و دهقان و همکاران، ۲۰۲۱)
• قیمت سوخت (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• هزینه تراز شده انرژی (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
• نرخ تبدیل ارز (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)	• تقاضای برق (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵ و دهقان و همکاران، ۲۰۲۱ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)
• پتانسیل منابع فسیلی (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)	• سهم تکنولوژی (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)
• پتانسیل توان تجدیدپذیر کشور (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)	• ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های فسیلی (دهقان و همکاران، ۲۰۲۱)
• زمان ساخت نیروگاه‌ها (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر (دهقان و همکاران، ۲۰۲۱)
• طول عمر نیروگاه‌ها (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶ و میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰)	• تولید نیروگاه‌های فسیلی (دهقان و همکاران، ۲۰۲۱ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)
• نرخ تنزیل (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶)	• تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر (دهقان و همکاران، ۲۰۲۱ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)
• ضریب تعدیل (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)	• رقابت (حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)
• نرخ استهلاک (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)	• قیمت برق (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶ و دهقان و همکاران، ۲۰۲۱)
• ضریب گرمایی (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)	• سیاست‌های حمایتی نظیر سوبسیدها (دهقان و همکاران، ۲۰۲۱ و قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)
• پذیرش اجتماعی (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)	• درآمد (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵)
	• ظرفیت در حال ساخت (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵ و دهقان و همکاران، ۲۰۲۱)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل ۱. پویایی‌ها و حلقه‌های تأثیرگذار اصلی بر فرایند توسعه تولید برق تجدیدپذیر و برق تجدیدناپذیر

مدل مفهومی به‌دست‌آمده، دارای سه حلقه اصلی تعادلی (B1 و B2 و B3) اثر متقابل قیمت و تقاضا، اثر متقابل قیمت و عرضه، و کمبود منابع اولیه، و دو حلقه اصلی تقویت‌کننده (R1 و R2) اثر یادگیری و وابستگی به مسیر[1] ناشی از سودآوری نسبت به هزینه‌های تولید می‌باشد که توسعه برق را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین میزان قیمت در یک بازار رقابتی تعیین می‌شود. پذیرش اجتماعی و برنامه‌های حمایتی در افزایش و یا کاهش اثرات حلقه‌ها تأثیرگذار هستند. در این زمینه

1. Path Dependence

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

نباید از عدم قطعیت‌های موجود که ممکن است اثرات حلقه‌ها را افزایش یا کاهش دهد، غافل شد. در ادامه این موارد به‌تفصیل بیان می‌شوند.

٤-١. وابستگی به مسیر

شناخت از قواعد بازی، وجود سازگاری با تجهیزات و کالاهای مکمل و سایر مواردی که ناشی از سهم بیشتر داشتن از بازار و پدیده وابستگی به مسیر می‌شوند (استرمن[1]، ۲۰۱۰)، مشابه پدیده‌ای است که در صنعت برق ایران رخ‌داده و سال‌به‌سال علی‌رغم فواید انرژی‌های تجدیدپذیر و زیان‌های نیروگاه‌های فسیلی تنها به دلیل موجه بودن سودآوری نیروگاه‌های فسیلی، به ظرفیت نیروگاه‌های فسیلی افزوده می‌شود. در حلقه R2 و R'2 شکل ۱، از مفهوم سهم هر عامل نسبت به سهم باقی عامل‌ها (استرمن، ۲۰۱۰) استفاده شده است تا پدیده وابستگی به مسیر مدل‌سازی شود.

٤-٢. عرضه، تقاضا و قیمت

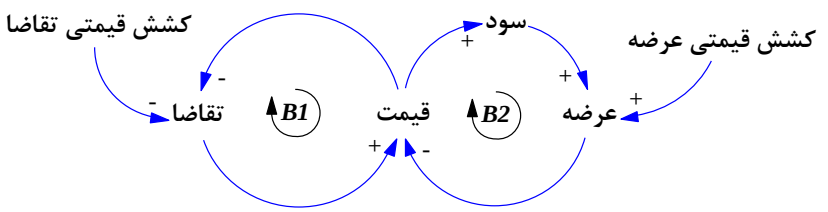
با افزایش تولید برق یک نوع نیروگاه، قیمت برق خریداری شده از آن کاهش می‌یابد و سود حاصله از آن به‌واسطه قیمت، کم و به‌واسطه مقدار، زیاد می‌شود، از طرف مقابل با کاهش تولید یک نوع نیروگاه، قیمت پیشنهادی خریداری از آن، بالا می‌رود و سود حاصله از آن به‌واسطه قیمت، زیاد و به‌واسطه مقدار، کم می‌شود، حلقه‌های B2 و B'2 در شکل ۱.

تقاضای انرژی متأثر از اثر مثبت جمعیت و استانداردهای کیفیت زندگی همچون تولید ناخالص داخلی[2] و متأثر از اثر منفی آثار مدیریت و کاهش مصرف انرژی نظیر تغییرات ساختاری و بهبود کارایی صنایع، می‌باشد (محقر و نجف‌زاده، ۱۳۹۶). تحلیل این بخش، خارج از محدوده مدل تشخیص داده شد و فرض می‌شود تغییرات تقاضا به‌صورت روند سالیان گذشته اتفاق می‌افتد. به‌علاوه تقاضای برق از قیمت برق و کشش قیمتی آن، به‌صورت درون‌زا تأثیر می‌پذیرد. کشش قیمتی یک نوع برق بر روی تقاضای آن برق تأثیر منفی و کشش قیمتی کالاهای جانشین بر روی

1. Sterman
2. GDP

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

تقاضای آن برق تأثیر مثبت دارد. قیمت‌های کمتر تقاضای صنعت را تحریک می‌کند و به سمت تقاضای بیشتر می‌برد و با افزایش تقاضا، قیمت افزایش می‌یابد، حلقه‌های B1 و B'1 شکل ۱. رابطه کلی بین عرضه، تقاضا و قیمت به‌صورت خلاصه در شکل ۲ آورده شده که در شکل ۱ در حلقه‌های B1 و B2 یا B'1 و B'2 با جزئیات بیشتر ترسیم شده است.



شکل ۲: قیمت و رابطه آن با عرضه و تقاضا

۳-٤. سرمایه‌گذاری باتوجه‌به سودآوری نسبت به هزینه‌های تولید

در این مطالعه به اهم هزینه‌های موجود در تولید برق یعنی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری ثابت و متغیر، هزینه سوخت و هزینه‌های اثرات خارجی و زیست‌محیطی[1] پرداخته می‌شود. هزینه تراز شده سالیانه انرژی[2] (LCOE) برای برق سیکل ترکیبی به‌صورت معادله ۱ و برای برق بادی به‌صورت معادله ۲ و ضریب تراز شده[3] (LF) از معادله ۳ تعیین می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۱۲). هزینه زیست‌محیطی از طریق معادله ۴ قابل محاسبه است. حلقه فزاینده در مورد هزینه‌های اثرات خارجی و زیست‌محیطی انرژی‌های فسیلی، به ارجحیت انرژی‌های تجدیدپذیر می‌افزاید (پتیت و همکاران، ۲۰۱۶). مقادیر پارامترهای مورداستفاده برای مدل‌سازی برگرفته از ترازنامه انرژی ایران می‌باشد که در جدول ۱ پ، در انتهای پژوهش و به پیوست ارائه شده‌است.

1. Externality Cost (EC)
2. Levelized Cost of Energy (LCOE)
3. Levelization Factor (LF)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

$$LCOE_{CCGT}\left[{}^{\$}/_{KWH}\right] = \left[\frac{DR\times IIC(1+r)^{CL}}{HY\times CF}\right] + \left[LF\times\left(\frac{FOM}{HY\times CF}+VOM\right)\right] + [LF\times NGP\times HR] + EC \quad (۱)$$

$$LCOE_{WT}[{}^{\$}/_{KWH}] = \left[\frac{DR\times IIC(1+r)^{CL}}{HY\times CF}\right] + \left[LF\times(\frac{FOM}{HY\times CF}+VOM)\right] \quad (۲)$$

$$\%LF = \frac{r(1+r)^{PL}}{(1+r)^{PL}-1}\times\frac{1+e}{r-e}\times\left[(\frac{1+r}{1+e}) - \left(\frac{1+e}{1+r}\right)^{PL}\right] \quad (۳)$$

$$EC[{}^{\$}/_{KWH}] = EF\times UEC\times HR \quad (۴)$$

از متغیر سودآوری مورد انتظار نسبت به هزینه تراز شده یا نرخ بازگشت سرمایه[1] (ROI)، معادله ۵، به‌عنوان شاخصی برای تمایل به سرمایه‌گذاری[2] (WFI) استفاده می‌شود که به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین متغیرهای مدل و عامل اصلی برای سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت به شمار می‌رود (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵). در متغیر تمایل به سرمایه‌گذاری، متغیرهای هزینه، درآمد و سود نهفته هستند.

$$\%ROI = \frac{profitability}{Expence} = \frac{Income-Expence}{Expence} = \frac{Income-LCOE}{LCOE} \quad (۵)$$

برای هر نوع نیروگاه، با توجه سطوح قیمتی برق همان نیروگاه و سطوح قیمتی برق سایر نیروگاه‌ها به‌واسطه اثر کشش قیمتی بر میزان تولید، میزان ROI تعیین می‌شود.

مطلوبیت برای سرمایه‌گذاری در هر نیروگاه، معادله ۶، علاوه بر میزان ROI، به فراوانی میزان تولید آن نوع نیروگاه نیز بستگی دارد. مطلوبیت، مطابق با منطق فرایند وابستگی به مسیر، پویایی‌های مدل را به حرکت می‌اندازد و هر چه مطلوبیت سرمایه‌گذاری از تولید نوعی برق به کل مطلوبیت موجود در سرمایه‌گذاری در صنعت برق، بیشتر باشد، سرمایه‌گذاران بیشتری جذب می‌شوند. تمامی عوامل بازدارنده و تشویقی، از طریق تأثیر بر روی متغیر مطلوبیت برای سرمایه‌گذاری بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر اثر خواهند گذاشت.

$$UOI\,[KWH] = ROI\times CF\times HY\times TIC\,[KW] \quad (۶)$$

1. Return on Investment (ROI)
2. Willingness for Investment (WFI)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

٤-٤. اثر یادگیری

مطابق با معادله ۷، با بیشتر شدن میزان تولید تجمیعی یک نیروگاه (وابسته به ظرفیت کل[1] (TIC) و ظرفیت ازکارافتاده[2] (DC))، در مدل حلقه‌های مثبتی ایجاد می‌شود (به مردی کلانتری و همکاران، ۱۳۹۶) که به‌مرور بر دانش تولید افزوده و از هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری[3] (IIC) کاسته می‌شود، حلقه R1 و R'1 در شکل ۱.

$$IIC_t[{}^{\$}/_{KW}] = IIC_{t-1} \times (1 - \alpha_{learning} \times log_2(\frac{TIC_t + DC_t}{TIC_{t-1} + DC_{t-1}})) \quad (۷)$$

۵. پذیرش اجتماعی

فشار تشکل‌های زیست‌محیطی در برابر توسعه بیش از اندازه نیروگاه‌های فسیلی، موجب کاهش تمایل سرمایه‌گذاران در این زمینه می‌گردد (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰). از طرفی نباید اثر گروه‌های فشار برای استفاده از انرژی‌های فسیلی را نادیده گرفت (مطلبی که به‌ندرت به آن توجه شده است). برای مثال، تحریم‌هایی که گاه‌وبیگاه به کشور وارد می‌شود، امکان فروش و صادرات نفت را کاهش می‌دهد و نگرانی از استفاده نشدن ذخایر و تمایل به مصرف این منابع به‌عنوان سوخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در کنار بهای بسیار نازل آن را افزایش می‌دهد.

۱-۵. رقابت بین بازیکنان بازار برق

باتوجه‌به مطالعاتی در مورد ترکیب پویایی سیستم و مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان (ونگ و همکاران، ۲۰۲۰) در هنگامی‌که با سیستم‌های پیچیده روبه‌رو هستیم، و همچنین باتوجه‌به مطالعاتی در زمینه ترکیب نظریه بازی با روش پویایی سیستم همچون لیو و همکاران، ۲۰۱۹ و لی و همکاران، ۲۰۱۹ در هنگامی‌که استراتژی‌های انتخابی بازیکنان در بازار محدود نباشد، از رویکرد نظریه بازی تکاملی استفاده کرده‌اند، یکی از نوآوری‌های این مقاله برای تعیین قیمت مناسب در محیطی رقابتی برای

1. Total Installed Capacity (TIC)
2. Decommissioned Capacity (DC)
3. Initial Investment Cost (IIC)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، استفاده از مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان و نظریه بازی تکاملی در رویکرد پویایی سیستم است. زیرا هر جزء ویژگی رفتاری خود را دارد و می‌تواند محدودیت‌ها و فروض محدودکننده‌ای را که در نظریه بازی‌ها وجود دارد، حذف نماید.

در بازار برق، برای هر یک از بازیکن‌های برق بادی و سیکل ترکیبی، دو استراتژی در نظر می‌گیریم. استراتژی اول، پیشنهاد قیمت کم در بازار برق به‌منظور برنده شدن و در نتیجه فروش بیشتر و استراتژی دوم، پیشنهاد قیمت زیاد در بازار برق به جهت سودآوری بیشتر. در نتیجه چهار حالت قیمتی شکل می‌گیرد که برای تصمیم‌گیری در مورد بهترین استراتژی دو بازیکن و یافتن نقطه تعادلی، لازم است پیامد هر بازیکن در این ۴ حالت مجموعاً ۸ پیامد مورد محاسبه قرار گیرد، شکل ۳. این پیامدها، ROI نیروگاه‌های بادی و سیکل ترکیبی در حالت‌های مختلف هستند. مقادیر ROI در هر یک از حالت‌ها به‌صورت پویا در حال تغییر هستند و نتایج آنها برای تصمیم‌گیری در مورد نقطه تعادلی، به‌صورت پیوسته وارد بازی رقابتی می‌گردد. احتمال انتخاب قیمت‌گذاری نهایی با پاداش دریافتی از آن ارتباط دارد.

		بازیکن دوم: نیروگاه سیکل ترکیبی	
		پیشنهاد قیمت کم برق سیکل ترکیبی	پیشنهاد قیمت زیاد برق سیکل ترکیبی
بازیکن اول: نیروگاه بادی	پیشنهاد قیمت کم برق بادی	a_1 , a_2	b_1 , b_2
	پیشنهاد قیمت زیاد برق بادی	c_1 , c_2	d_1 , d_2

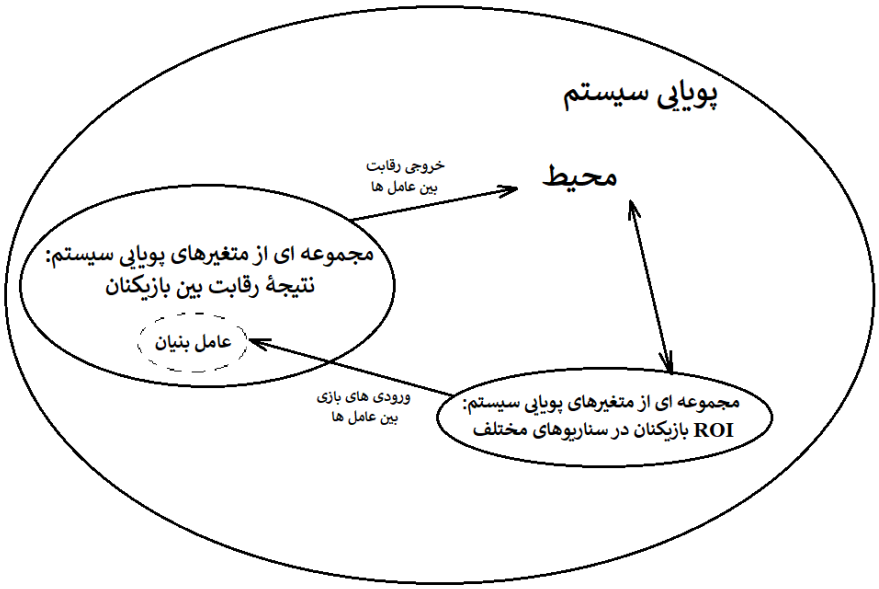
شکل ۳. عایدی بازیکنان

نیروگاه‌ها مانند عامل‌هایی در محیطی رقابتی، در تلاش‌اند که با استفاده از قوانینی منطقی، قیمت‌گذاری مناسبی برای محصول خود در بازار انجام دهند تا به‌واسطه قیمت و مقدار تولیدی، از ROI بیشتری نسبت به رقیب خود برخوردار شوند و تمایل به سرمایه‌گذاری در ظرفیت‌سازی در آنها بیشتر شود. سرانجام یک نقطه تعادل ایجاد می‌گردد که در آن ROI همه بازیگران با درنظرگرفتن استراتژی یکدیگر، بیشینه است. مدل‌سازی بازی تکاملی بین نیروگاه‌های بادی و سیکل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

ترکیبی با کمک پویایی سیستم و مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان در شکل ۱ پ در انتهای پژوهش و به پیوست ارائه شده است.

مطابق با شکل ۴، متغیرها در مدل پویایی سیستم، شبیه‌سازی می‌شوند و به‌عنوان ورودی‌های مدل بازی وارد رقابت می‌شوند. نتیجه رقابت بین بازیکنان به‌صورت ورودی، وارد شبیه‌سازی پویایی سیستم می‌شود و در ادامه، مقدار متغیرهای مدل پویایی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چرخه مذکور مجدداً تکرار می‌شود. هر یک از این چرخه‌ها، همانند مراحل نسل‌های الگوریتم‌های تکاملی عمل می‌کنند که با هر تکرار، مدل را به جواب تعادلی میان بازیکنان، نزدیک‌تر می‌کنند.



شکل ۴: جریان اطلاعات دوطرفه بین پویایی سیستم و مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۵-۲. عدم قطعیت

به‌منظور پیش‌بینی صحیح از سیاست‌های اعمالی و ارائه پیشنهادهای توسعه، نباید از تحلیل چالش‌ها و عدم قطعیت‌های صنعت برق تجدیدپذیر غافل شد (لیو[1] و زنگ[2]، ۲۰۱۷). رویکرد پژوهش حاضر در مورد ریسک، رویکردی علی است و تلاش دارد، با ساختار بازخوردی و به‌صورتی پویا، منابع عدم قطعیت را مورد تحلیل قرار دهد.

۵-۳. منابع اولیه

در تحقیقات به طور عام فرض می‌شود که با استفاده از منابع اولیه تجدیدناپذیر، به‌مرور سطح این منابع کاهش و هزینه استحصال و قیمت آن افزایش می‌یابد. البته نباید محدودیت پتانسیل قابل استحصال انرژی‌های تجدیدپذیر را هم فراموش کرد. به عبارتی، حلقه کمبود منابع اولیه برای انرژی‌های تجدیدناپذیر به‌صورت افزایش قیمت و حلقه کمبود منابع اولیه برای انرژی‌های تجدیدپذیر به‌صورت فراتر رفتن از پتانسیل قابل استحصال انرژی‌های تجدیدپذیر یک منطقه نمود می‌یابد، حلقه‌های B3 و B'3 شکل ۱.

٥-٤. برنامه‌های حمایتی

از برنامه‌های حمایتی می‌توان برای توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر به‌عنوان عاملی اثرگذار بر مقدار مطلوبیت سرمایه‌گذاری در نیروگاه و ایجاد حلقه‌های مثبت یادکرد.

در این تحقیق ۸ سیاست حمایتی برای توسعه برق تجدیدپذیر باتوجه‌به پویایی‌های اثرگذار، تعریف می‌شوند و با فرض اجرای آنها و امکان رقابت انرژی‌های تجدیدپذیر در بازار رقابتی برق از سال ۲۰۲۰ به بعد، نتایج آنها در یک بازه ۳۰ ساله تحلیل می‌شوند.

1. Liu
2. Zeng

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

- سوبسید مستقیم به برق بادی
- مالیات بر انتشار آلاینده‌ها
- مالیات بر انتشار آلاینده‌ها و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی
- اصلاح قیمت سوخت
- اصلاح قیمت سوخت و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی
- حمایت دولت از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های بادی
- سرمایه‌گذاری در پذیرش اجتماعی و فرهنگ‌سازی مصرف برق تجدیدپذیر
- افزایش فاکتور ظرفیت نیروگاه‌های بادی

٦. مدل‌سازی توسعه برق تجدیدپذیر – نمودارهای حالت و جریان

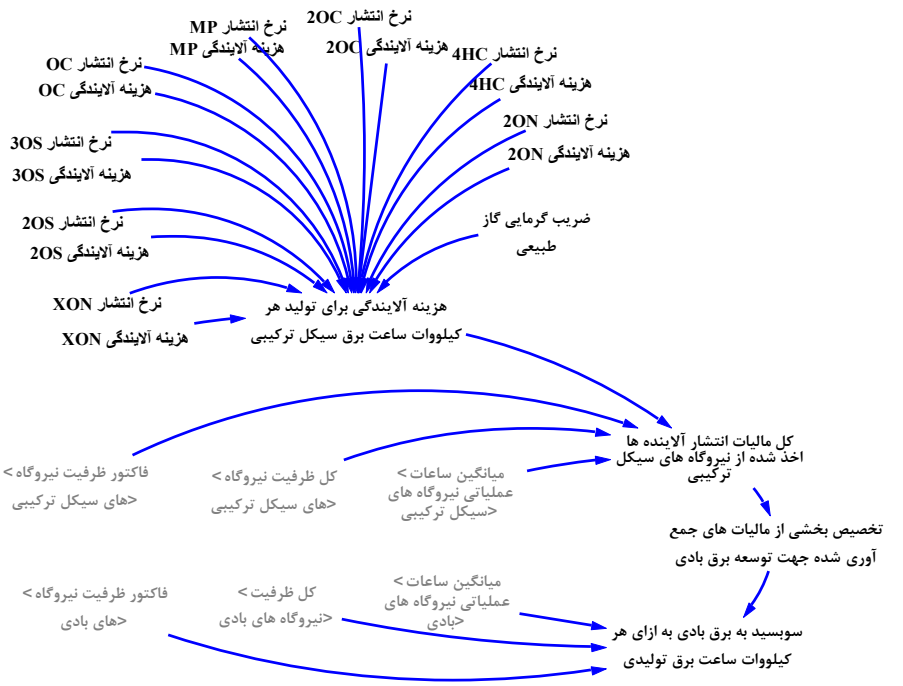
فرموله‌کردن فرضیه‌های پویا[1] آغاز شد و نمودارهای حالت و جریان[2] (SFD) بر مبنای نمودارهای علت و معلولی (CLD) به‌دست‌آمده، ایجاد گردید. روابط استفاده شده در مدل‌سازی در جدول ۲ پ، در انتهای پژوهش و به پیوست ارائه شده است. پس از دستیابی به مدل پایه، برنامه‌های حمایتی پیشنهادی به‌منظور تحلیل نتایجشان بر روی توسعه برق بادی، همچون سناریوهای مختلف، قابل اضافه‌شدن به مدل پایه می‌باشند. نحوه اجرای برنامه‌های حمایتی در مدل در ادامه شرح داده می‌شود: در پیاده‌سازی برنامه حمایتی سوبسید مستقیم به برق بادی، فرض می‌شود که مبلغی به‌عنوان حمایت به تولیدکنندگان برق تجدیدپذیر به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی پرداخت شود که به‌صورت پلکانی با افزایش سهمشان از بازار، ازین مبلغ کاسته شود. این سیاست در بعضی مراجع به‌عنوان سیاست نزدیکی به هدف شناخته می‌شود (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰). در جدول ۲ پ، روابط استفاده شده برای مدل‌سازی این برنامه آورده شده است.

1. Dynamic Hypothesis
2. Stock Flow Diagram

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در پیاده‌سازی برنامه مالیات بر انتشار آلاینده‌ها، فرض می‌شود از نیروگاه‌های آلاینده، به میزان شدت آلایندگی تولید شده، مالیات آلایندگی اخذ شود و به‌این‌ترتیب میزان مالیات بر هزینه‌های تولید برق فسیلی افزوده می‌شود. هزینه آلایندگی هر واحد آلاینده و نرخ انتشار گازهای آلاینده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در جدول ۱ پ برگرفته از داده‌های ترازنامه انرژی ایران آورده شده است.

در برنامه مالیات بر انتشار آلاینده‌ها و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی، فرض می‌شود تمامی درآمد حاصل از مالیات بر انتشار آلاینده (مجموع حاصل‌ضرب هزینه آلایندگی هر واحد آلاینده در نرخ انتشار گازهای آلاینده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی)، در تولید برق تجدیدپذیر به‌ازای تولید هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی، صرف شود، شکل ۵. سوبسید به‌دست‌آمده، موجب افزایش درآمد نیروگاه‌های بادی می‌شود.

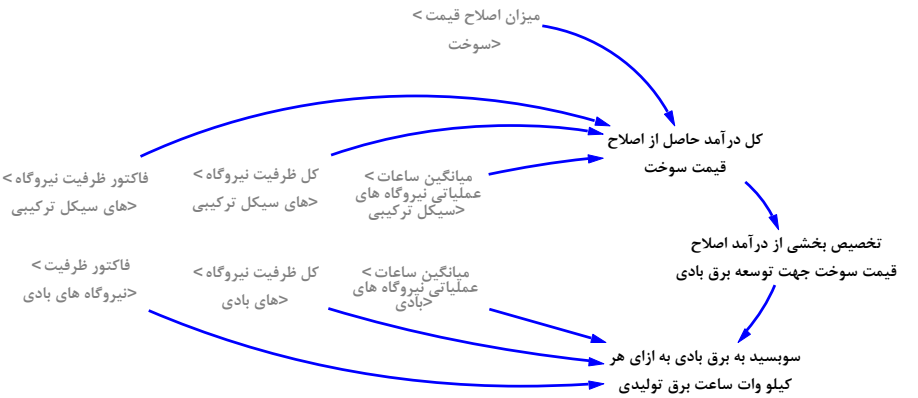


شکل ۵. نحوه اختصاص مالیات بر انتشار آلاینده‌ها به‌عنوان سوبسید به برق بادی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در برنامه اصلاح قیمت سوخت، با هدف نزدیک شدن قیمت سوخت به قیمت جهانی، فرض می‌شود قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، دوبرابر گردد.

همچنین در برنامه اصلاح قیمت سوخت و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی، فرض می‌شود تمامی درآمد حاصل از افزایش قیمت سوخت، در رشد برق تجدیدپذیر صرف شود، شکل ۶. این سوبسید موجب افزایش سطح درآمد و سود نیروگاه‌های بادی می‌شود.



شکل ۶. نحوه اختصاص درآمد حاصل از اصلاح قیمت سوخت به‌عنوان سوبسید به برق بادی

به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالا در انرژی‌های تجدیدپذیر، دولت می‌تواند با تقبل بخشی از آن و یا تسهیل در پرداخت آنها همچون اقدامات مالی نظیر دادن وام، موجب سودآوری بیشتر در سرمایه‌گذاری برق تجدیدپذیر شود. در برنامه حمایت دولت از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های بادی، فرض می‌شود ۵۰ درصد از هزینه‌های اولیه را دولت تقبل کند.

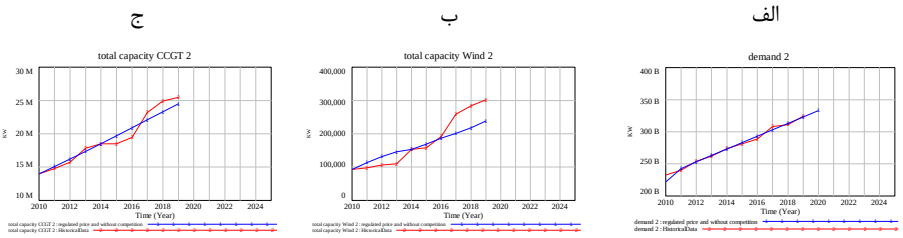
در برنامه سرمایه‌گذاری در پذیرش اجتماعی فرض می‌شود با فرهنگ‌سازی در مصرف برق تجدیدپذیر، تمایل به سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک، ۵ درصد اضافه شود.

برای شبیه‌سازی اجرای برنامه افزایش فاکتور ظرفیت نیروگاه‌های بادی در مدل، فرض می‌شود میانگین فاکتور ظرفیت نیروگاه‌های بادی از ۳۵ درصد به ۵۰ درصد برسد. روابط استفاده شده برای مدل‌سازی این ۸ برنامه در جدول ۲ پ آورده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۷. اعتبارسنجی

پویایی‌های روند توسعه برق تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و حلقه‌های تعادلی و تقویت‌کننده (شکل ۱)، مورد تأیید کارشناسان برق تجدیدپذیر قرار گرفت. بدین ترتیب حین مدل‌سازی مفهومی، دو روش صحت سنجی برای مدل‌های کیفی شامل کفایت مرزها و ارزیابی ساختار، انجام شد (قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰). همچنین اعتبار مدل‌سازی با آزمون‌هایی شامل سازگاری واحدها، ارزیابی پارامترها، آزمون شرایط حدی، تحلیل حساسیت، ارزیابی رفتاری، تولید مجدد رفتار (آزمون بازتولید) و مقایسه با داده‌های تاریخی (برگرفته از آزمون‌های ارائه شده در مرجع (قدرت الله و سئونگ، ۲۰۱۰)) مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری و رفتاری نشان می‌دهند که در مدل، قوانین حفظ و بقاء انرژی و مواد دنبال می‌شوند و مدل، رفتاری سازگار با واقعیت به معرض نمایش می‌گذارد. شکل ۷، مقادیر شبیه‌سازی شده را به همراه داده‌های تاریخی نشان می‌دهد.



شکل ۷ (الف، ب و ج): داده‌های تاریخی و مقادیر شبیه‌سازی تقاضا، ظرفیت برق بادی و سیکل ترکیبی

برای محاسبه میزان خطا طبق معادله ۸ و ۹، از قدرمطلق خطا و همچنین جذر میانگین مربعات خطا (حداقل خطای مجذورات)[1] استفاده می‌شود که در آنها y_{T+i}^{s} نتایج شبیه سازی شده و y_{T+i}^{a}

1. Root Mean Square Percent Error (RMSPE)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

داده‌های تاریخی و n تعداد مشاهدات است و هر چه میزان خطا به صفر نزدیکتر باشد اعتماد به نتایج شبیه‌سازی بیشتر می‌شود (استرمن، ۲۰۱۰). با توجه به جدول ۳ پ، میانگین تفاوت نتایج مدل‌سازی با داده‌های تاریخی، کمتر از ۹ درصد محاسبه شد که با توجه به پیچیدگی‌های بالای مسئله، مقدار قابل قبولی است. از طرفی موفقیت در سنجش اعتبار یک مدل، نشان دهنده تطابق کامل آن با واقعیت نیست، بلکه نشان دهنده مفید بودن یک مدل است.

$$PE = \left|\frac{y^s_{T+i} - y^a_{T+i}}{y^a_{T+i}}\right| \times 100 \quad (۸)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{y^s_{T+i} - y^a_{T+i}}{y^a_{T+i}}\right)^2} \times 100 \quad (۹)$$

پارامترهای استفاده شده در مدل جهت محاسبه هزینه تراز شده تولید برق بادی و سیکل ترکیبی (جدول ۱ پ)، از قبیل فاکتور ظرفیت، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، مدت‌زمان ساخت و طول عمر نیروگاه‌ها، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و... با پارامترهای ارزیابی شده در سایر تحقیقات نظیر مطالعه اویانگ و لین در سال ۲۰۱۴ که اجزای هزینه تراز شده تولید انواع برق‌های تجدیدپذیر در چین را گردآوری نموده و یا مطالعه مروری لارسون[1] و همکاران در سال ۲۰۱۴ که ارزیابی هزینه‌های تولید برق از انواع تکنولوژی‌های مختلف تولید برق در دنیا را انجام داده است، همخوانی دارد.

برای مقایسه نتایج مطالعه کنونی و تطابق رفتاری مدل با مطالعات پیشین، بهتر است از نزدیک‌ترین تحقیقات در شرایط مشابه، بهره برد. در این زمینه می‌توان به پژوهش میلاد موسویان و همکاران در سال ۲۰۲۰ اشاره کرد که در شرایط کشور ایران، سعی در ارزیابی پویایی‌های سیاست‌های مختلف تعرفه تغذیه بر روی ظرفیت احداث شده برق تجدیدپذیر داشتند. نویسندگان، پیش‌بینی می‌کنند تا سال ۲۰۳۵، ظرفیت نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر قابلیت تحقق بین ۴.۵ تا ۱۴ گیگاوات برق را خواهند داشت و نرخ نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به ۴ الی ۱۳ درصد می‌رسد. نتایج مطالعه حاضر نیز نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۵، می‌توان تحت سناریوهای معرفی شده به حدود ۱.۲۵ تا ۳ گیگاوات برق بادی با ضریب نفوذ ۰.۸ تا ۱.۸ رسید. ازآنجاکه طبق داده‌های ساتبا، انرژی

1. Larsson

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

بادی ۳۵ درصد از سبد برق تجدیدپذیر در ایران را تشکیل می‌دهد، لذا طبق مطالعه حاضر پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۵ ظرفیت کل برق تجدیدپذیر در ایران می‌تواند به ۳.۶ تا ۸.۵ گیگاوات با نرخ نفوذ ۲.۳ تا ۵.۲ درصد برسد. این محدوده با مقادیر به‌دست‌آمده با مقاله موسویان و همکاران، هم‌پوشانی مناسبی دارد. همچنین می‌توان به پژوهش دیگری توسط حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۲، اشاره کرد که توسعه برق بادی در شرایط کشور ایران را تا سال ۲۰۱۵، بین ۰.۳ گیگاوات در شرایط نبود برنامه‌های حمایتی و ۳ گیگاوات با وجود برنامه‌های حمایتی و میزان احداث نیروگاه‌های جدید بادی را در نبود برنامه‌های حمایتی از سال ۲۰۱۵ به بعد بیش از ۰.۱۲۵ گیگاوات در سال و با وجود برنامه‌های حمایتی بیش از 0.3 گیگاوات در سال پیش‌بینی کرده بودند. ازآنجاکه طبق داده‌های تاریخی (جدول ۳ پ) تا سال ۲۰۱۵، ظرفیت برق بادی ۰.۱۵۸۵ گیگاوات می‌باشد، در صورت ادامه فرضیات مقاله حسینی و همکاران تا سال ۲۰۳۵، حدوداً بین ۲.۵ تا ۶ گیگاوات ظرفیت برق بادی ایجاد خواهد شد که با توجه به‌کندی روند توسعه برق بادی در واقعیت نسبت به پیش‌بینی انجام شده توسط حسینی و همکاران برای سال ۲۰۱۵، این مقدار با نتیجه مطالعه حاضر (بین 1.25 تا ۳ گیگاوات ظرفیت برق بادی تا سال ۲۰۳۵) هم‌پوشانی دارد.

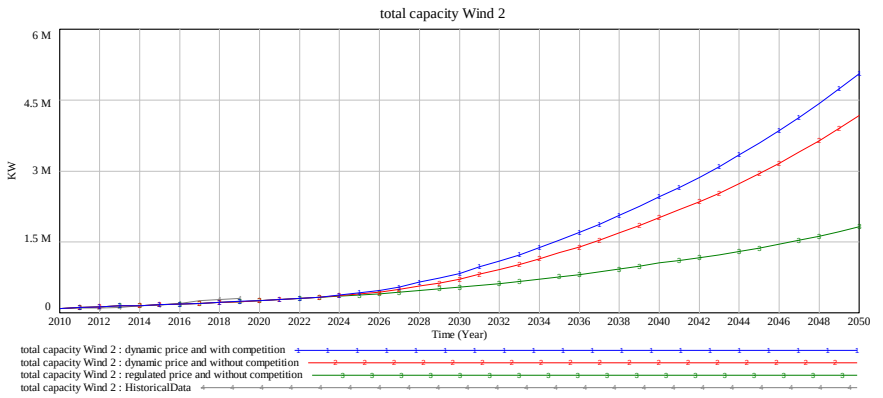
بعد از تطابق داشتن ساختار مدل، معادلات و نمودارهای علی استفاده شده و همچنین روند منطقی سیستم با سایر مطالعات انجام شده در همین زمینه مانند پتیت و همکاران، ۲۰۱۶ و میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰، با یافتن اطمینان از درستی مدل‌سازی، راهکارهایی برای توسعه برق تجدیدپذیر بر اساس پویایی‌های معرفی‌شده، بیان می‌شوند.

۸. تجزیه‌وتحلیل یافته‌ها

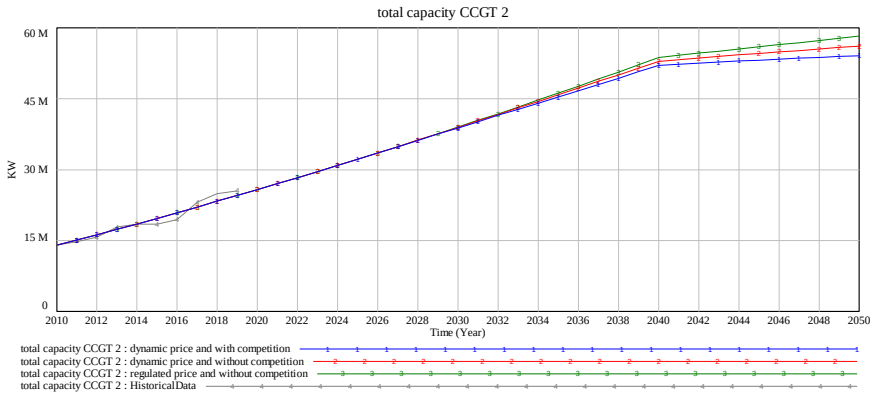
مدل‌سازی دینامیک‌های اصلی مسئله نشان می‌دهند برق بادی توانایی توسعه در مقابل سایر برق‌های متعارف در صورت استمرار وضع موجود را به دلیل قدرت و سهم غالب برق فسیلی از بازار و پدیده وابستگی به مسیر نخواهد داشت (دیاگرام ۳ شکل ۸). برق بادی با روند و اقدامات حمایتی کنونی در فضای قیمت‌گذاری دستوری و تعرفه‌ای نمی‌تواند شکاف بین وضعیت موجود (۳۰۲۲۰۰ کیلووات ظرفیت نصب شده برق بادی تا سال ۱۳۹۸) و اهداف تعریف شده (رسیدن به بخش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

تأثیرگذاری از ۵ گیگاوات انرژی تجدیدپذیر از اهداف برنامه توسعه ششم تا سال ۱۴۰۰) را پر نماید و نیاز به سیاست‌های حمایتی بیشتری می‌باشد. در این راستا مدل‌سازی نشان می‌دهد که برقراری رفتار منطقی بر بازار به‌گونه‌ای که با عرضه و تقاضا قیمت تغییر کند (دیاگرام ۲ شکل ۸) و یا ایجاد بازار رقابتی (دیاگرام ۱ شکل ۸)، توسعه برق تجدیدپذیر را سرعت می‌بخشد (قلیزاد و همکاران، ۲۰۱۷)، اما همچنان این میزان توسعه به‌واسطه ایجاد رقابت کافی نبوده و همراه شدن مجموعه‌ای از سیاست‌های حمایتی در کنار رقابتی بودن بازار برای توسعه تولید برق بادی لازم خواهد بود.



(الف)

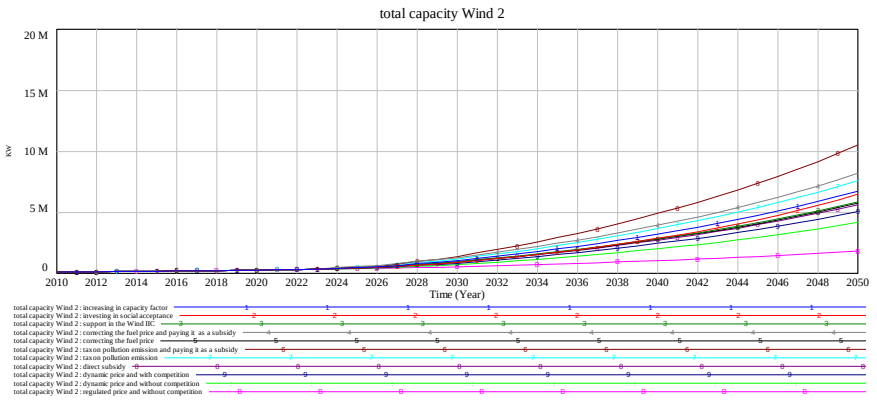


(ب)

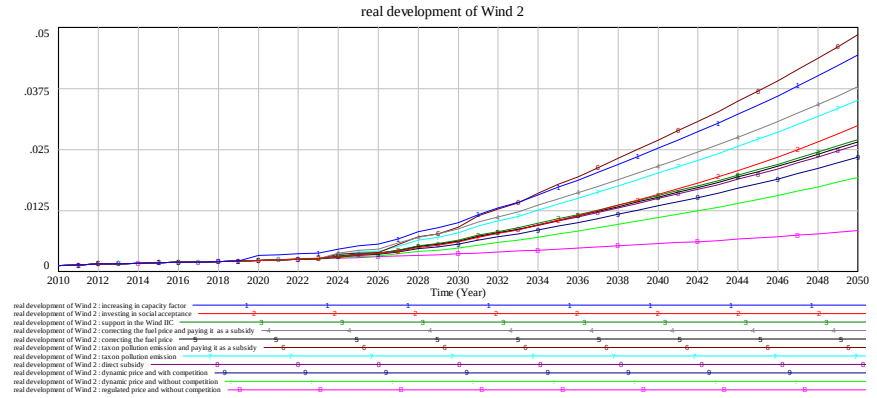
شکل ۸. (آ و ب): روند برق بادی و سیکل ترکیبی با شرایط موجود و تحت تأثیر رقابت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در این مطالعه ۸ برنامه حمایتی اشاره شده، مدل‌سازی شدند. نتایج برنامه‌های حمایتی بر روی ظرفیت نصب شده برق بادی و بر روی درصد سهم برق بادی از بازار برق در دیاگرام‌های شکل ۹ (آ و ب) و بر روی ظرفیت نصب شده برق سیکل ترکیبی و بر روی درصد سهم برق سیکل ترکیبی از بازار در دیاگرام‌های شکل ۱۰ (آ و ب) آورده شده است. نتایج نشانگر آن است که سیاست‌های حمایتی می‌توانند در بستر بازار رقابتی، توسعه برق را بیش از چندین برابر افزایش دهند.



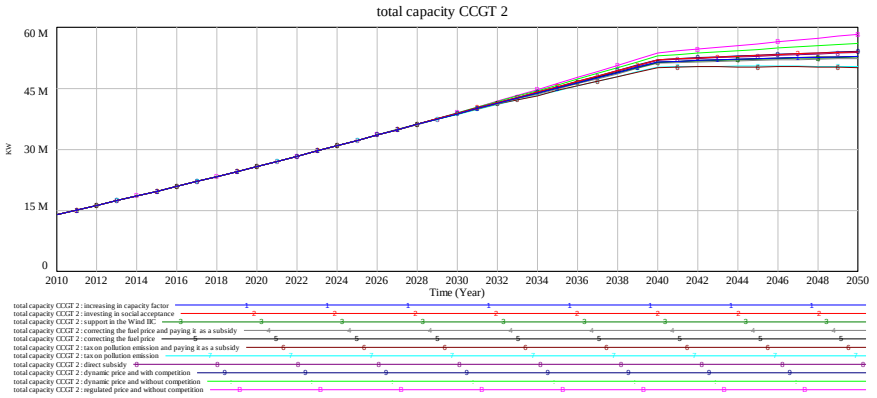
(الف)



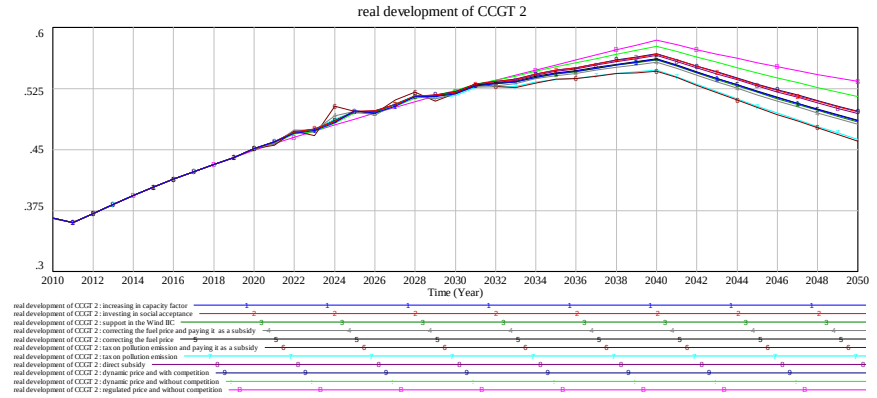
(ب)

شکل ۹. تأثیر سیاست‌های حمایتی بر ظرفیت برق بادی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



(الف)

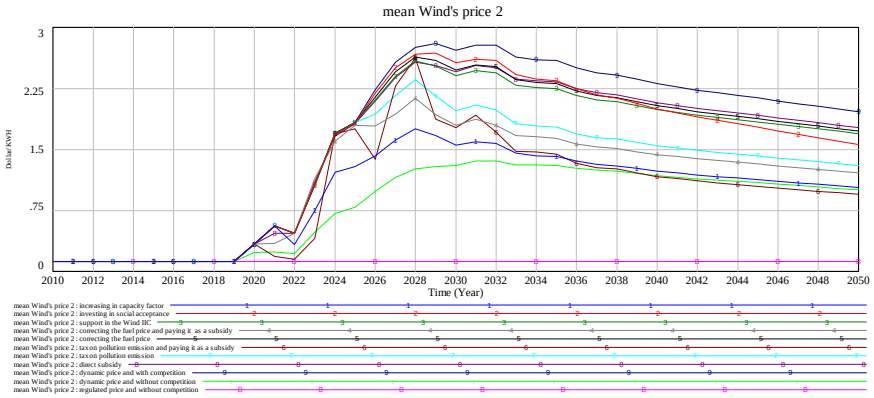


(ب)

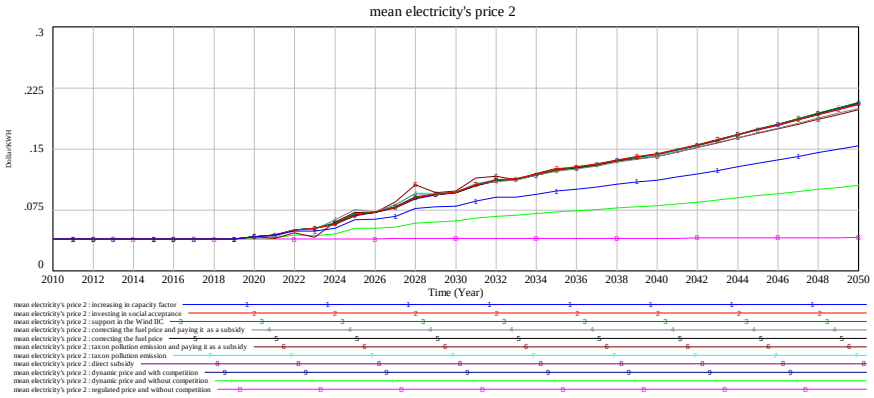
شکل ۱۰. تأثیر سیاست‌های حمایتی بر ظرفیت برق سیکل ترکیبی

اثر این ۸ سیاست بر روی قیمت برق بادی و بر روی قیمت کلی برق نیز به ترتیب در دیاگرام‌های شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل ۱۱. تأثیر سیاست‌های حمایتی بر قیمت برق بادی



شکل ۱۲: تأثیر سیاست‌های حمایتی بر قیمت کلی برق

اخذ مالیات بر انتشار آلاینده‌ها، موجب کاهش مطلوبیت سرمایه‌گذاری بر نیروگاه‌های فسیلی می‌شود و با افزایش هزینه‌های خارجی و زیست‌محیطی انتشار آلاینده‌ها، مشابه با نتایج مطالعه پتیت و همکاران در سال ۲۰۱۶، شدت این اثرات نیز بیشتر خواهد شد. در اجرای برنامه حمایتی اخذ مالیات از نیروگاه‌های آلاینده و پرداخت دریافتی حاصل از این طرح به‌عنوان سوبسید به برق بادی، نه‌تنها موجب کسری بودجه دولت نظیر سیاست سوبسید به‌صورت مستقیم نمی‌شود بلکه تأثیرگذاری بیشتری بر توسعه نسبت به سیاست اخذ مالیات از نیروگاه‌های آلاینده نیز دارد، شکل ۹ (آ و ب). توسعه برق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

بادی تحت این برنامه، چهار برابر بیشتر نسبت به ادامه روند کنونی تحقق می‌یابد. در این سیاست، برآیند قیمت برق بادی کاهشی می‌باشد (شکل ۱۱) که ازین جهت به نفع مصرف‌کننده برق پاک خواهد بود. در این سیاست، سوبسید داده شده به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق بادی تولید شده روندی نزولی پیدا خواهد کرد و با آنکه در ابتدا سوبسید داده شده به برق بادی بیشتر از سیاست سوبسید مستقیم می‌باشد اما بعد از گذشت زمان به‌مراتب کمتر از آن می‌شود. با توجه به شکل ۹ (آ و ب)، این در حالی است که کارایی این سیاست در توسعه به‌مراتب بیشتر از برنامه سوبسید مستقیم می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت چگونگی مرحله شروع اقدامات حمایتی در توسعه برق‌بادی می‌باشد.

برنامه اصلاح قیمت سوخت نیز همچون اخذ مالیات بر انتشار آلاینده‌ها، بر بار مالی نیروگاه‌های فسیلی می‌افزاید. اما اگر منابع دریافتی از اصلاح قیمت سوخت به نیروگاه‌های بادی به‌عنوان سوبسید تخصیص یابد، نه‌تنها موجب کسری بودجه دولت در توسعه نیروگاه‌های پاک نمی‌شود بلکه تأثیرگذاری بیشتری نسبت به سیاست اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها دارد شکل ۹ (آ و ب). تحت این سیاست، برآیند قیمت کلی برق بادی کاهشی می‌باشد که به نفع مصرف‌کننده برق پاک خواهد بود شکل ۱۱. با مقایسه سیاست سوبسید مستقیم با این سیاست نیز اهمیت مرحله شروع اقدامات حمایتی نتیجه می‌شود.

در برنامه حمایت دولت در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، علاوه بر اینکه کسری بودجه برای دولت ایجاد می‌شود، برطبق شکل ۹ (آ و ب) به علت آنکه تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر رشد برق تجدیدپذیر ندارد و نفع قابل‌توجهی برای مصرف‌کننده برق پاک از نظر قیمت ایجاد نمی‌کند (شکل ۱۱)، سیاست مناسبی ارزیابی نمی‌گردد. برنامه فرهنگ‌سازی، بر هزینه‌های اجتماعی برق فسیلی می‌افزاید و در استفاده از انرژی پاک و سرمایه‌گذاری در آن، مؤثر است. برنامه بهبود فاکتور ظرفیت برق بادی نیز، منجر به تولید بیشتر برق پاک، بیش از سه برابر ادامه روند کنونی می‌شود و با اجرای این برنامه طبق نمودار شکل ۱۱ قیمت کلی برق بادی کاهش می‌یابد که ضمن داشتن نفع برای مصرف‌کننده این نوع برق، موجب افزایش تقاضا برای نیروگاه‌های پاک نیز می‌گردد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهند تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای مختلف، برق بادی قابلیت رسیدن به ظرفیت ۴.۲ تا ۱۰.۵ گیگاوات برق با ضریب نفوذ ۱.۹ تا ۴.۸ درصد را خواهد داشت در حالی‌که در صورت ادامه روند کنونی (بدون بازار رقابتی و بدون وجود برنامه‌های حمایتی)، این مقدار به ۱.۸ گیگاوات با ضریب نفوذ ۰.۸ درصد می‌رسد. از آنجایی که برق بادی، ۰.۳۵ درصد از سبد برق تجدیدپذیر در کشور را تشکیل می‌دهد، لذا می‌توان انتظار داشت تا سال ۲۰۵۰ با اعمال تغییرات در سیستم، با کمترین بار مالی بر دولت، ظرفیت برق تجدیدپذیر به ۱۲ الی ۳۰ گیگاوات با ضریب نفوذ ۵.۴ الی ۱۳.۷ درصد برسد. این در حالی است که با ادامه روند کنونی، برق تجدیدپذیر تنها به ظرفیت ۵ گیگاوات با ضریب نفوذ ۲.۳ درصد خواهد رسید.

در صورت اقدامات حمایتی، در ابتدا به دلیل آنکه زیرساخت‌های کافی برای ظرفیت‌سازی برق تجدیدپذیر در کشور وجود ندارد، مطابق با نمودارهای شکل ۱۱، تقاضای برق تجدیدپذیر و به‌تبع قیمت برق این نیروگاه‌ها بالا می‌رود. با افزایش سودآوری، ظرفیت برق تجدیدپذیر افزایش (نمودارهای شکل ۹) و آلایندگی (نمودارهای شکل ۱۰) کاهش می‌یابد. به‌مرور با افزایش تولید برق تجدیدپذیر، افزایش قیمت این نوع برق کنترل می‌شود و کاهش می‌یابد (نمودارهای شکل ۱۱). در نتیجه در ابتدای توسعه برق بادی، افزایش قیمت برق این نوع نیروگاه‌ها چه ناشی از برنامه‌های حمایتی برای ایجاد انگیزه سرمایه‌گذاران و چه ناشی از سازوکار سیستم، قابل‌انتظار است.

باتوجه‌به پویایی‌های مؤثر اصلی معرفی شده و باتوجه‌به اثر سیاست‌های حمایتی، توصیه‌های زیر برای توسعه یافتن صنعت برق تجدیدپذیر در کشور با فرض امکان رقابت انرژی‌های تجدیدپذیر در بازار برق، پیشنهاد می‌شوند.

۱. مطابق با شکل ۹ و ۱۰ اخذ مالیات بر انتشار آلاینده‌ها موجب کاهش سودآوری و کاهش مطلوبیت سرمایه‌گذاری بر نیروگاه‌های فسیلی و افزایش ظرفیت نیروگاه‌های بادی می‌شود (پتیتت و همکاران، ۲۰۱۶). با افزایش هزینه‌های خارجی و زیست‌محیطی انتشار آلاینده‌ها، شدت این اثرات بیشتر خواهد شد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۲. مطابق با شکل ۹ و ۱۰ مالیات بر انتشار آلاینده‌ها و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی، هم‌زمان هم بر روی کاهش سودآوری نیروگاه‌های تجدیدناپذیر و هم افزایش سودآوری برق بادی تأثیرگذار است. با این تفاوت که کسری بودجه‌ای برای حمایت از برق تجدیدپذیر ایجاد نمی‌کند و سیاست کاراتری در جهت توسعه و رقابت‌پذیری با سایر برق‌های متعارف، نسبت به سیاست مالیات بر انتشار آلاینده‌ها به‌تنهایی است. در ادامه اجرای این سیاست، مطابق با شکل ۱۱، برآیند قیمت برق بادی کاهشی می‌شود که ازین جهت به نفع مصرف‌کننده برق خواهد بود.

۳. مطابق با شکل ۹ و ۱۰ اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها برای ترغیب مصرف‌کننده به مصرف برق تجدیدپذیر مؤثر می‌باشد.

۴. مطابق با شکل ۹ و ۱۰، اصلاح قیمت سوخت و پرداخت درآمد حاصل از آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی، همچون سیاست اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، هم بر کاهش سودآوری نیروگاه‌های فسیلی و هم بر روی توسعه برق بادی تأثیرگذار است با این تفاوت که کسری بودجه برای دولت برای کمک به برق بادی ایجاد نمی‌شود و تأثیرگذاری آن نیز بیشتر است. مطابق با شکل ۱۱، با ادامه اجرای این سیاست، قیمت برق بادی روندی کاهشی خواهد داشت.

۵. میزان سوبسید در سیاست‌های سوبسید به برق بادی حاصل از اخذ مالیات و حاصل از اصلاح قیمت سوخت، با روند برق تولیدی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تناسب دارد. از طرفی مقادیر اخذ شده از نیروگاه‌های آلاینده بر میزان تولید نیروگاه‌های بادی، تقسیم می‌شود تا سوبسید برای برق بادی به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی به دست آید. ازآنجاکه مطابق شکل ۹ میزان تولید نیروگاه‌های برق بادی، روند صعودی دارد، سوبسید داده شده به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق بادی تولید شده روندی نزولی پیدا خواهد کرد و با آنکه در ابتدا سوبسید داده شده به برق بادی از هر یک از این دو برنامه، بیشتر از سوبسید خالص می‌باشد اما بعد از گذشت زمان به‌مراتب کمتر از آن می‌شود. این در حالی است که کارایی این دو سیاست در توسعه به‌مراتب بیشتر می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت چگونگی مرحله شروع اقدامات حمایتی در توسعه برق بادی می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۶. مطابق با پویایی‌های شکل ۱، دولت می‌تواند بخشی از قیمت خریداری‌شده برق تجدیدپذیر را به مصرف‌کننده این نوع برق بپردازد. بدین ترتیب تقاضای برق بادی افزایش و سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری در برق بادی ترغیب می‌شوند.

۷. مطابق با شکل ۹ و ۱۰، تعیین قیمت مناسب و افزایش قیمت برق بادی نسبت به قیمت سایر برق‌ها در بازارهای غیررقابتی از طریق سیاست‌هایی نظیر FIT و یا در هنگامی‌که قیمت برق در بازار تعیین می‌شود با اعمال سوبسید مستقیم به آنها، مطلب مهمی است که برق بادی را قابل‌رقابت با سایر برق‌ها می‌نماید. بالارفتن قیمت برق تا جایی که کاهش تقاضا محسوس نباشد، سبب سودآوری و ایجاد انگیزه برای سرمایه‌گذاری می‌شود.

۸. سیاست تعرفه تغذیه که به‌نوعی سوبسید مستقیم به برق تجدیدپذیر محسوب می‌شود، اگرچه اثرات رضایت‌بخشی بر توسعه خواهد گذاشت، اما کسری دولت را به همراه خواهد داشت که در این صورت تنها یک افزایش موقتی و نه توسعه بلندمدت را در پی دارد (شاه‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵ و میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه هر سیاست حمایتی که به نحوی نشأت گرفته از درون سیستم باشد و موجب کسری بودجه نگردد و هم‌زمان ساختارهای سیستم را به نفع انرژی‌های تجدیدپذیر تغییر دهد همچون مالیات بر انتشار آلاینده‌ها و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی و یا اصلاح قیمت سوخت و پرداخت آن به‌عنوان سوبسید به برق بادی، سیاست کاراتری محسوب می‌شود.

۹. با توجه به نمودارهای شکل ۹ و ۱۰، سه برنامه حمایتی سوبسید مستقیم، اصلاح قیمت سوخت و حمایت دولت از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، با وجود ایجاد اثرات مثبت در توسعه برق بادی، اما توانایی رساندن تولید برق بادی به اهداف تعیین‌شده را ندارند. این برنامه‌ها، در زمینه کاهش قیمت برق بادی که به نفع مصرف‌کننده نیز هست، بهبود قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کنند؛ لذا سوبسید مستقیم و حمایت دولت از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برق بادی به دلیل ایجاد کسری بودجه، و اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها بدون صرف این درآمد اضافی بر روی توسعه برق تجدیدپذیر، برنامه‌های کارایی ارزیابی نمی‌شوند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۱۰. باتوجه‌به شکل ۹ و ۱۰، سرمایه‌گذاری در پذیرش اجتماعی از راه‌هایی همچون فرهنگ‌سازی برای مصرف برق بادی و ایجاد فشار تشکل‌های زیست‌محیطی، بر هزینه‌های اجتماعی برق فسیلی می‌افزاید و در استفاده از انرژی پاک و سرمایه‌گذاری در آن، بسیار مؤثر است.

۱۱. نتایج مدل‌سازی در شکل‌های ۹ و ۱۰، نشان از آن دارند که بهبود فاکتور ظرفیت نیروگاه‌های برق بادی بر روی توسعه برق تجدیدپذیر تأثیرگذارند.

۱۲. مطابق با شکل‌های ۱۱ و ۱۲، سیاست‌های حمایتی علاوه بر تأثیر مثبت در رشد برق تجدیدپذیر، بر کاهش قیمت برق تجدیدپذیر و قیمت کلی برق نیز مؤثرند. این موضوع نشان‌دهنده آن است که با کاهش قیمت برق تجدیدپذیر، به‌مرور سهم این نوع برق از بازار زیاد شده و به دلیل پدیده وابستگی به مسیر، سرمایه‌گذاری و رشد بیشتری برای آن اتفاق خواهد افتاد.

چارچوب پیشنهاد شده در این مسئله به دلیل ساختار پویا و مبتنی بر تصمیمات هر عامل، برای بررسی رفتار بازیکنان در بازار انحصاری چندجانبه و بررسی سیاست‌های توسعه و همچنین تحلیل‌های حساسیت تحت نا اطمینانی‌ها و انواع شرایط این بازار، از کارایی مناسبی برخوردار است. مدل‌سازی سیستمی ارائه شده در این پژوهش، می‌تواند ابزار نوین و قدرتمندی برای پیش‌بینی عملکرد سیاست‌های توسعه در یک محیط مجازی فراهم کند.

استفاده از این ساختار، به بازیگران این بازار اجازه می‌دهد که بینش درستی بر روند نیروگاه‌های تازه نصب شده داشته باشند و همچنین تصمیم‌گیران را در انتخاب سیاست‌های مؤثر، یاری می‌کند.

۹. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

باتوجه‌به توسعه بسیار اندک انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور و نیازمندی درحال‌رشد به انرژی الکتریکی به‌خصوص انواع تجدیدپذیر آن در آینده، این پژوهش پویایی‌های توسعه برق تجدیدپذیر را موردمطالعه قرار داد تا تحلیلی صحیح از ادامه وضعیت موجود داشته باشد و توصیه‌های سیاستی مناسبی برای توسعه برق در چنین شرایط ارائه دهد. با مطالعات گذشته در زمینه به‌کارگیری پویایی سیستم در مدل‌سازی انواع مختلف سیستم‌های انرژی و مطالعاتی در زمینه ترکیب پویایی سیستم با مفاهیم دیگر، به‌منظور نزدیکی بیشتر به دنیای واقعی و انعطاف‌پذیری مدل و جامعیت تحلیل‌ها، در راستای ایجاد مدل‌سازی سیستمی،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

چارچوبی جامع از ترکیب پویایی سیستم و مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان برای تحلیل توسعه برق تجدیدپذیر پیشنهاد گردید. در نهایت پیشنهاداتی برای توسعه برق تجدیدپذیر باتوجه‌به همین پویایی‌ها، ارائه شد و میزان اثرگذاری آنها سنجیده شد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که رقابتی کردن بازار به همراه اعمال برخی برنامه‌های حمایتی منتخب از برق تجدیدپذیر، موجب توسعه بیشتر برق تجدیدپذیر می‌شود. در پژوهش‌های آینده می‌توان سازوکار قیمت‌گذاری با اهداف دیگری به جز کسب بیشترین سود برای نیروگاه‌ها، نظیر کاهش آلایندگی یا کاهش کسری بودجه دولت ناشی از اجرای برنامه‌های حمایتی، در چارچوب روش ارائه شده در این تحقیق، صورت پذیرد.

منابع

محقر، علی و کیان نجف‌زاده (۱۳۹۶). "مدل مبتنی بر پویایی سیستم برای توسعه ظرفیت تولید برق در کشور"، *فصلنامه فرایند مدیریت و توسعه*، دوره ۳۰، شماره ۲، پیاپی ۱۰۰، صص ۱۴۵-۱۷۲.

به مردی، رستم؛ توفیق، علی‌اصغر و محمدعلی شفیعا (۱۳۹۶)، "قیمت‌گذاری فناوری بیوگاز در ایران با رویکرد پویایی سیستم"، *مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاستگذاری انرژی*، سال ۳، شماره ۸، صص ۹۹-۱۱۸.

Abani, A. O. (2019). Electricity market design for long-term capacity adequacy in a context of energy transition, Economics and Finance, PSL Research University.

Alamdari, P., Nematollahi, O., & Mirhosseini, M. (2012). "Assessment of wind energy in Iran: A review", Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 16, pp. 836–860.

Behdani, B. (2013). Handling disruptions in supply chains: an integrated framework and an agent-based model. (PhD), TU Delft, Next Generation Infrastructures Foundation.

Dehghan, H., Amin-Naseri, M. R., & Nahavandi, N. (2021). "A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies", Utilities Policy, Vol. 69, pp. 101165.

Dyner, I., & Larsen, E. R. (2001). "From planning to strategy in the electricity industry", Energy Policy, Vol. 29, pp. 1145–1154.

Farajpour Khanaposhtani, G., Jafari, S. S., Ariana, F., Alaie, A., & Salimi, H. (2017). "Formulating the supply chain strategy of automotive industry in Iran using balanced Scorecard, System Dynamics, and Game Theory", Marketing and Branding Research, Vol. 4, pp. 135–147.

Gencer, B., Larsen, E. R., & van Ackere, A. (2020). "Understanding the coevolution of electricity markets and regulation", Energy Policy,Vol. 143, pp. 111585.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

Gholizad, A., Ahmadi, L., Hassannayebi, E., Memarpour, M., & Shakibayifar, M. (2017). "A system dynamics model for the analysis of the deregulation in electricity market", International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA), Vol. 6, pp. 1–30.

Hosseini, S. H., Ghaderi, S. F., & Shakouri, G. H. (2012). An investigation on the main influencing dynamics in renewable energy development: A systems approach, Paper presented at the Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG).

Hosseini, S. H., Shakouri, G. H., & Akhlaghi, F. R. (2012). A study on the near future of wind power development in Iran: a system dynamics approach, Paper presented at the Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG).

Hsu, C.-W. (2012). "Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations", Applied Energy, Vol. 100, pp. 205–217.

Khatib, H. (2010). Review of OECD study into "Projected costs of generating electricity—2010Edition", Energy Policy, Vol. 38, pp. 5403–5408.

Khojasteh, D., Khojasteh, D., Kamali, R., Beyene, A., & Iglesias, G. (2018). "Assessment of renewable energy resources in Iran; with a focus on wave and tidal energy", Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 81, pp. 2992–3005.

Langroodi, R. R. P., & Amiri, M. (2016). "A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty", Expert Systems with Applications, Vol. 51, pp. 231–244.

Larsson, S., Fantazzini, D., Davidsson, S., Kullander, S., & Höök, M. (2014). "Reviewing electricity production cost assessments", Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 30, pp. 170-183.

Lättilä, L., Hilletofth, P., & Lin, B. (2010). "Hybrid simulation models–when, why, how?", Expert Systems with Applications, Vol. 37, pp. 7969–7975.

Lewe, J.-H., Hivin, L., & Mavris, D. (2014). "A multi-paradigm approach to system dynamics modeling of intercity transportation", Transportation research part E: logistics and transportation review, Vol. 71, pp. 188–202.

Li, K., Wang, W., Zhang, Y., Zheng, T., & Guo, J. (2019). "Game modelling and strategy research on the system dynamics–based quadruplicate evolution for high–speed railway operational safety supervision system", Sustainability, Vol. 11, pp. 1300.

Liu, Q., Li, X., & Meng, X. (2019). "Effectiveness research on the multi-player evolutionary game of coal-mine safety regulation in China based on system dynamics", Safety Science, Vol. 111, pp. 224–233.

Liu, X., & Zeng, M. (2017). "Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics", Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 73, pp.782–788.

Lund, H., Arler, F., Østergaard, P. A., Hvelplund, F., Connolly, D., Mathiesen, B. V., & Karnøe, P. (2017). "Simulation versus optimisation: theoretical positions in energy system modelling", Energies, Vol. 10, pp. 840.

Mashayekhi, A. N., Mohammadi, H., Mirassadollahi, K., & Kamranianfar, A. (2010). Modeling sustainability of renewable energies in rural areas: A case study for Iran. Paper presented at the Proceedings System Dynamics Conference.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

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

Moghaddam, N. B., Mousavi, S. M., Nasiri, M., Moallemi, E. A., & Yousefdehi, H. (2011). "Wind energy status of Iran: Evaluating Iran's technological capability in manufacturing wind turbines", Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 15, pp. 4200–4211.

Mohammadi, A., & Javanmardi, E. (2019). "System dynamics modeling of oligopoly market based on game theory", International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, Vol. 10, pp. 673–687.

Moratilla Soria, B. Y., & Ibáñez López, A. S. (2019). "System Dynamics modeling for the assessment of technical and socio-economic impact of power system policies".

Mousavi, S. M., Ghanbarabadi, M. B., & Moghadam, N. B. (2012). "The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran", Energy Policy, Vol. 42, pp. 651–656.

Murdock, H. E., Gibb, D., André, T., Appavou, F., Brown, A., Epp, B.,... Ranalder, L. (2019). Renewables 2019 Global Status Report.

Olsina, F. (2008). Long-term dynamics of liberalized electricity markets. (PhD), National University of San Juan Argentina

Ouyang, X., & Lin, B. (2014). "Levelized cost of electricity (LCOE) of renewable energies and required subsidies in China", Energy Policy, Vol. 70, pp. 64-73.

Petitet, M., Finon, D., & Janssen, T. (2016). "Carbon price instead of support schemes: wind power investments by the electricity market", The Energy Journal, Vol. 37, pp.109–140.

Qudrat-Ullah, H., &Seong, B. S. (2010). "How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model", Energy Policy, Vol. 38, pp. 2216–2224.

Shahmohammadi, M. S., Yusuff, R. M., Keyhanian, S., & Shakouri, H. (2015). "A decision support system for evaluating effects of Feed-in Tariff mechanism: Dynamic modeling of Malaysia's electricity generation mix", Applied Energy, Vol. 146, pp.217–229.

Shakouri G, H., & Aliakbarisani, S. (2016). "At what valuation of sustainability can we abandon fossil fuels? A comprehensive multistage decision support model for electricity planning", Energy, Vol. 107, pp. 60–77.

Sterman, J. (2010). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world: Irwin/McGraw-Hill c2000.

Tian, Y., Govindan, K., & Zhu, Q. (2014). "A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers", Journal of Cleaner Production, Vol. 80, pp. 96–105.

Wang, H., Cao, R., & Zeng, W. (2020). "Multi-agent based and system dynamics models integrated simulation of urban commuting relevant carbon dioxide emission reduction policy in China", Journal of Cleaner Production, Vol. 272, pp. 122620.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

پیوست‌ها

جدول ۱ پ: پارامترهای مدل برای نیروگاه‌های بادی و سیکل ترکیبی (برگرفته از ترازنامه انرژی ۱۳۹۷)

پارامترها	معادل فارسی	مقدار		واحد
		بادی	CCGT	
• Discount Rate (r)	نرخ تنزیل	0.15	0.15	%
• Escalation rate (e)	ضریب تعدیل	0.02	0.02	%
• Depreciation rate (DR) or Fixed charge rate (FCR)	نرخ استهلاک، یا نرخ شارژ ثابت	0.05	0.05	%
• Plant Lifetime (PL)	طول عمر نیروگاه	30	30	year
• Physical construction Lifetime/ delay (CL)	تأخیر فیزیکی ساخت نیروگاه	2	4	year
• Informational construction delay (time to adjust investment)	تأخیر اطلاعاتی ساخت نیروگاه	2	2	year
• Annual Initial Investment cost for 2010 (IIC_{2010}) or Total plant cost (TPC)	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌ازای هر واحد	1250	700	$[\$/KW]$
• Fixed O&M cost (FOM)	هزینه ثابت تعمیر و نگهداری به‌ازای هر واحد	20	4	$[\$/KW\ in\ year]$
• Variable O&M cost (VOM)	هزینه متغیر تعمیر و نگهداری به‌ازای هر واحد	0.001	0.0025	$[\$/KWH]$
• Natural gas price or Fuel cost (NGP) (FC)	قیمت گاز طبیعی	0	0.3	$[\$/MMBTu]$
• Heat rate for natural gas (HR)	ضریب گرمایی	–	0.00643	$[MMBTu/KWH]$
• $\begin{bmatrix} CO_2 \\ NOX \\ SO_2 \\ SO_3 \\ CO \\ PM \\ CH_4 \\ NO_2 \end{bmatrix}$ emission factor (EF)	نرخ انتشار	–	$\begin{bmatrix} 60000 \\ 200 \\ 25 \\ 0.85 \\ 1 \\ 9 \\ 1.5 \\ 0.15 \end{bmatrix}$	$[gr/MMBTu]$
• $\begin{bmatrix} CO_2 \\ NOX \\ SO_2 \\ SO_3 \\ CO \\ PM \\ CH_4 \\ NO_2 \end{bmatrix}$ Unit emission cost (UEC)	هزینه آلایندگی هر واحد آلاینده	–	$\begin{bmatrix} 0.0000178 \\ 0.00107278 \\ 0.00326289 \\ 0 \\ 0.000335222 \\ 0.00768789 \\ 0.000374222 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[\$/gr]$
• Initial Installed power capacity (2010)	ظرفیت احداث شده اولیه	92900	13983500	KW
• Capacity factor (CF)	فاکتور ظرفیت	0.35	0.75	%
• Operational hours per year (HY)	ساعات عملیاتی نیروگاه	8322	7728	hour
• Learning factor ($\alpha_{learning}$)	فاکتور یادگیری	0.1	0.1	%

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

جدول ۲ پ: روابط استفاده شده در مدل‌سازی

متغیر	رابطه	توضیحات
total capacity CCGT (KW)	INTEG (increase capacity CCGT-decrease capacity CCGT, 1.39835e+007)	ظرفیت نصب شده برق سیکل ترکیبی
total capacity Wind (KW)	INTEG (increase capacity Wind-decrease capacity Wind,92900)	ظرفیت نصب شده برق بادی
capacity factor Wind	IF THEN ELSE (Time<=2019, 0.35, 0.35 or 0.5)	درصورتی‌که بخواهیم برنامه افزایش فاکتور ظرفیت را در مدل پیاده‌سازی کنیم، می‌توان ۰.۳۵ را به ۰.۵ تغییر داد.
CCGT's tax for Wind ($)	(total tax pollution CCGT*0 or 1)	زمانی که فرض کنیم تمامی درآمد حاصل از مالیات، صرف توسعه برق تجدیدپذیر می‌شود، می‌توان ۰ را تبدیل به ۱ نمود.
subside tax polution for Wind ($/KWH)	CCGT's tax for Wind/(capacity factor Wind*operational hours per year Wind *total capacity Wind)	سوبسید به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق بادی تولیدی، از درآمد حاصل از مالیات نیروگاه‌های آلاینده
CCGT's gas price for Wind ($)	(total difference gas expence CCGT*0 or 1)	زمانی که فرض کنیم تمامی درآمد حاصل از اصلاح قیمت سوخت، صرف توسعه برق تجدیدپذیر می‌شود، می‌توان ۰ را تبدیل به ۱ نمود.
subside gas price for Wind ($/KWH)	CCGT's gas price for Wind/(capacity factor Wind*operational hours per year Wind*total capacity Wind)	سوبسید به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برق بادی تولیدی، از درآمد حاصل از اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها
cost of CCGT per KWH ($/KWH)	((initial investment cost per kW CCGT *CCGT's FCR*((1+CCGT's discount rate)^CCGT's CL))/(operational hours per year CCGT*capacity factor CCGT))+((((''fixed O&M cost CCGT'')/(operational hours per year CCGT*capacity factor CCGT))+''variable O&M cost CCGT'')*LF CCGT)+(price of natural gas*heat rate of natural gas*LF CCGT)+((emission factor CCGT technology NO2*unit emission cost NO2+emission factor CCGT technology CH4*unit emission cost CH4+emission factor CCGT technology CO*unit emission cost CO +emission factor CCGT technology CO2*unit emission cost CO2+emission factor CCGT technology NOX*unit emission cost NOX +emission factor CCGT technology PM*unit emission cost PM +emission factor CCGT technology SO2*unit emission cost SO2+emission factor CCGT technology SO3*unit emission cost SO3)*heat rate of natural gas*PULSE(2020, 30)*0 or 1)	این رابطه، کلیه هزینه‌های تولید برق سیکل ترکیبی را شامل می‌شود. در صورت پیاده‌سازی سیاست اخذ مالیات می‌توان با تغییر عدد ۰ پایانی به ۱، این مالیات را بر هزینه‌ها افزود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

متغیر	رابطه	توضیحات
LF CCGT	((((CCGT's discount rate+1)^CCGT plant's age)*CCGT's discount rate)/(((CCGT's discount rate+1)^CCGT plant's age)-1))*((1+CCGT escalation rate)/(CCGT's discount rate-CCGT escalation rate))*(1-(((1+CCGT escalation rate)/(1+CCGT's discount rate))^CCGT plant's age))	محاسبه ضریب LF برق سیکل ترکیبی
cost of Wind per KWH ($/KWH)	((initial investment cost per kW Wind*Wind's FCR*((1+Wind's discount rate)^Wind's CL))/(operational hours per year Wind*CFW)) +((("fixed O&M cost Wind")/(operational hours per year Wind*CFW))+"variable O&M cost Wind")*LF Wind)	این رابطه، کلیه هزینه‌های تولید برق بادی را شامل می‌شود.
LF Wind	((((Wind's discount rate+1)^Wind plant's age)*Wind's discount rate)/(((Wind's discount rate+1)^Wind plant's age)-1))*((1+Wind escalation rate)/(Wind's discount rate-Wind escalation rate))*(1-(((1+Wind escalation rate)/(1+Wind's discount rate))^Wind plant's age))	محاسبه ضریب LF برق بادی
demand CCGT (KWH)	demand CCGT decreasing*pre demand CCGT	تقاضای برق سیکل ترکیبی با ضریبی حاصل از تغییرات قیمتی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد.
demand CCGT decreasing	(1+(elasticity CCGT's price*ratio CCGT's price))*(1+(common elasticity*ratio Wind's price))	ضریبی حاصل از تغییرات قیمتی برای تقاضای برق سیکل ترکیبی که با تغییرات قیمت برق سیکل ترکیبی و تغییرات قیمت برق جانشین بادی، تغییر می‌کند.
demand Wind (KWH)	demand Wind decreasing*pre demand Wind	تقاضای برق بادی با ضریبی حاصل از تغییرات قیمتی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد.
demand Wind decreasing	(1+(elasticity Wind's price*ratio Wind's price))*(1+(common elasticity*ratio CCGT's price))	ضریبی حاصل از تغییرات قیمتی برای تقاضای برق بادی که با تغییرات قیمت برق بادی و تغییرات قیمت برق جانشین سیکل ترکیبی، تغییر می‌کند.
generation CCGT (KWH)	capacity factor CCGT*operational hours per year CCGT*total capacity CCGT	میزان تولید برق سیکل ترکیبی (کیلووات‌ساعت)
generation Wind (KWH)	capacity factor Wind*operational hours per year Wind*total capacity Wind	میزان تولید برق بادی (کیلووات‌ساعت)
price of natural gas	IF THEN ELSE(Time<=2019, 0.3 , 0.3*1 or 2)	درصورتی‌که بخواهیم برنامه اصلاح قیمت سوخت را در مدل پیاده‌سازی کنیم، می‌توان ۱ را به ۲ تغییر داد.
initial investment cost per kW CCGT previous ($/KW)	DELAY FIXED(initial investment cost per kW CCGT, 1 ,IIC)	هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برق سیکل ترکیبی در سال قبل

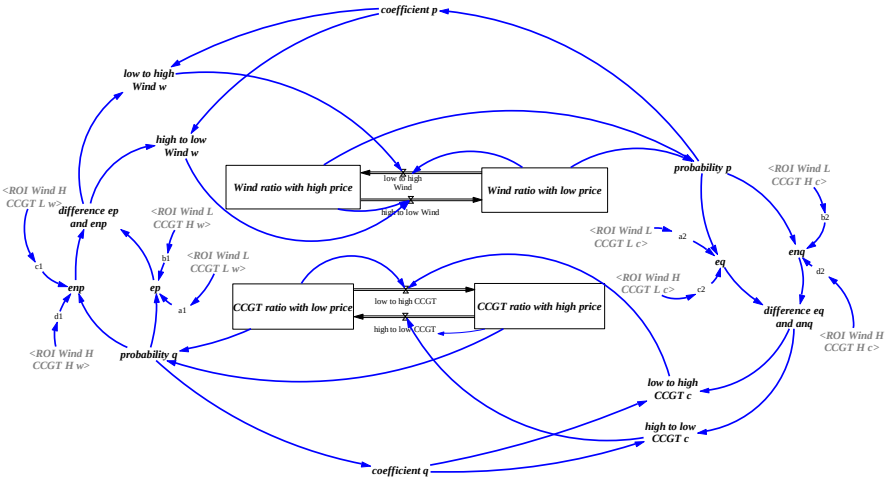
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

متغیر	رابطه	توضیحات
total capacity CCGT plus decreasing of CCGT (KW)	total capacity CCGT+ total decreased capacity CCGT	تولید تجمیعی برق سیکل ترکیبی
initial investment cost per kW CCGT ($/KW)	initial investment cost per kW CCGT previous*(1-(LOG((total capacity CCGT plus decreasing of CCGT/total capacity CCGT plus decreasing of CCGT previous) , 2))*0.1)	اثر یادگیری با این فرض که با هر دوبرابر شدن ظرفیت برق سیکل ترکیبی، ۱۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کاهش می‌یابد.
initial investment cost per kW Wind previous ($/KW)	DELAY FIXED(initial investment cost per kW Wind, 1 ,IIW)	هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برق بادی در سال قبل
total capacity Wind plus decreasing of Wind (KW)	total capacity Wind+total decreased capacity Wind	تولید تجمیعی برق بادی
initial investment cost per kW Wind ($/KW)	(initial investment cost per kW Wind previous)*(1-(LOG((total capacity Wind plus decreasing of Wind/total capacity Wind plus decreasing of Wind previous) , 2))*0.1)*IF THEN ELSE(Time=2020 , 1 or 0.5 , 1)	اثر یادگیری با این فرض که با هر دوبرابر شدن ظرفیت برق بادی، ۱۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کاهش می‌یابد. درصورتی‌که بخواهیم برنامه حمایت دولت در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برق بادی به میزان نیمی از هزینه‌ها را پیاده‌سازی کنیم، می‌توان ۱ را تبدیل به ۰.۵ نمود.
mean CCGT's price ($/KWH)	((probability q *price CCGT low+(1-probability q)*price CCGT high))	میانگین قیمت برق سیکل ترکیبی
mean Wind's price ($/KWH)	((probability p*price Wind low+(1-probability p)*price Wind high))	میانگین قیمت برق بادی
mean electricity's price ($/KWH)	((mean Wind's price*generation Wind+ mean CCGT's price*generation CCGT)/(generation Wind+ generation CCGT))	میانگین قیمت کلی برق
share of CCGT from power market	generation CCGT/demand	سهم برق سیکل ترکیبی از کل بازار برق
share of Wind from power market	generation Wind/demand	سهم برق بادی از کل بازار برق
subside per kW wind ($/KWH)	IF THEN ELSE(Time<=2019 , 0 , ((IF THEN ELSE(sum share of Wind from power market<=0.01, 0.25 , IF THEN ELSE(sum share of Wind from power market>0.01:AND:sum share of Wind from power market<=0.05, 0.15 , IF THEN ELSE(sum share of Wind from power market>0.05:AND:sum share of Wind from power market<=0.1, 0.10 , IF THEN ELSE (sum share of Wind from power market>0.1:AND:sum share of Wind from power market<=0.5, 0.05 , 0)))))*0 or 1 +subside tax pollution for Wind+ subside gas price for Wind))	انواع سوبسید به برق بادی از طریق روش سوبسید مستقیم پلکانی که می‌توان برای پیاده‌سازی آن، ۰ را به ۱ تغییر داد، به همراه سوبسید از روش مالیات اخذ شده از نیروگاه‌های آلاینده و سوبسید از طریق اصلاح قیمت سوخت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

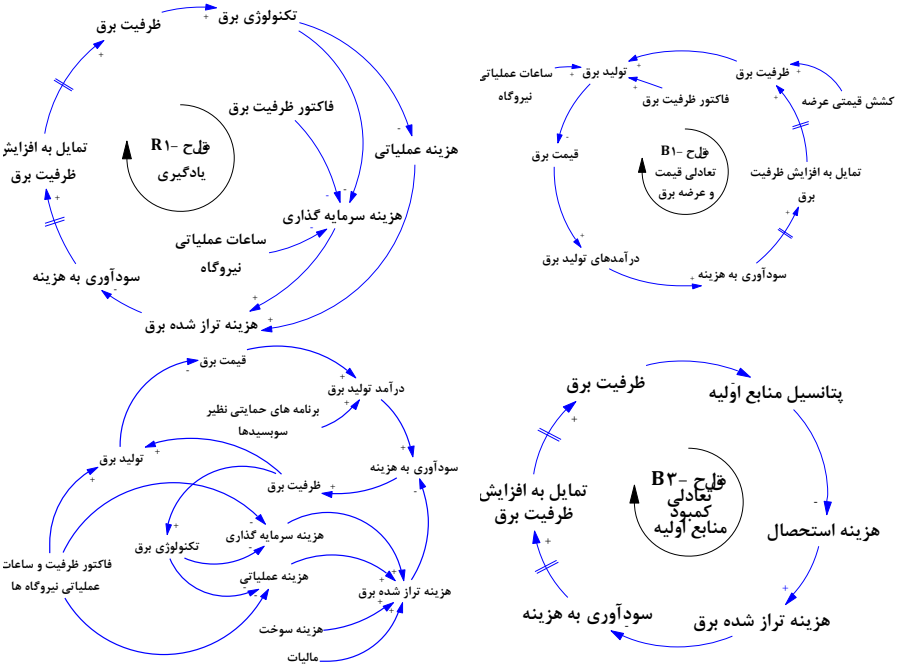
جدول ۳ پ: داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های تاریخی متغیرهای تقاضا، ظرفیت برق بادی و سیکل ترکیبی

زمان	تقاضای برق شبیه‌سازی‌شده (KWH)	داده تاریخی تقاضای برق (KWH)	درصد خطا (PE)	ظرفیت برق بادی شبیه‌سازی‌شده (KW)	داده تاریخی ظرفیت برق بادی (KW)	درصد خطا (PE)	ظرفیت برق سیکل ترکیبی شبیه‌سازی‌شده (KW)	داده تاریخی ظرفیت برق سیکل ترکیبی (KW)	درصد خطا (PE)
۲۰۱۰	2.22e+11	2.33e+11	4.7558	۹۲۹۰۰	۹۲۹۰۰	۰	۱۳۹۸۳۵۰۰	۱۳۹۸۳۵۰۰	۰
۲۰۱۱	2.43e+11	2.40e+11	1.1899	۱۱۳۲۰۰	۹۸۲۰۰	۱۵.۲۷۴۹۴۹	۱۵۰۷۹۵۰۰	۱۴۷۷۹۵۰۰	۲.۰۳
۲۰۱۲	2.53e+11	2.54e+11	0.523	۱۳۱۱۰۰	۱۰۶۱۰۰	۲۳.۵۶۲۶۷۷	۱۶۲۱۳۵۰۰	۱۵۷۴۳۵۰۰	۲.۹۸۵
۲۰۱۳	2.63e+11	2.62e+11	0.2226	۱۴۵۴۶۱	۱۱۰۲۰۰	۳۱.۹۹۷۲۷۸	۱۷۳۵۹۱۰۰	۱۷۸۴۹۱۰۰	۲.۷۴۵
۲۰۱۴	2.73e+11	2.74e+11	0.5073	۱۵۲۶۲۵	۱۵۳۵۰۰	۰.۵۷۰۰۳۳	۱۸۵۱۳۱۰۰	۱۸۴۹۳۱۰۰	۰.۱۰۸
۲۰۱۵	2.83e+11	2.81e+11	0.8482	۱۶۹۱۵۱	۱۵۸۵۰۰	۶.۷۱۹۸۷۴	۱۹۷۰۳۱۰۰	۱۸۴۹۳۱۰۰	۶.۵۴۳
۲۰۱۶	2.93e+11	2.89e+11	1.3411	۱۸۷۲۵۹	۱۹۱۰۰۰	۱.۹۵۸۶۳۹	۲۰۸۹۳۰۰۰	۱۹۴۶۹۱۰۰	۷.۳۱۴
۲۰۱۷	3.03e+11	3.08e+11	1.6263	۲۰۱۱۷۰	۲۵۸۹۰۰	۲۲.۲۹۸۱۸۵	۲۲۰۹۴۳۰۰	۲۳۱۶۵۰۰۰	۴.۶۲۲
۲۰۱۸	3.13e+11	3.11e+11	0.6703	۲۱۸۱۲۶	۲۸۴۶۰۰	۲۳.۳۵۶۹۹۲	۲۳۳۰۷۶۰۰	۲۴۹۲۳۰۰۰	۶.۴۸۲
۲۰۱۹	3.23e+11	3.24e+11	0.4387	۲۳۸۳۶۵	۳۰۲۲۰۰	۲۱.۱۲۳۴۲۸	۲۴۵۳۱۵۰۰	۲۵۴۷۵۰۰۰	۳.۷۰۴
میانگین خطا			1.2123	میانگین خطا		۱۴.۶۸۶۲۰۵	میانگین خطا		۳.۶۵۳
RMSPE			1.744085	RMSPE		۱۸.۳۰۴۷۱۲۰۵	RMSPE		4.40422

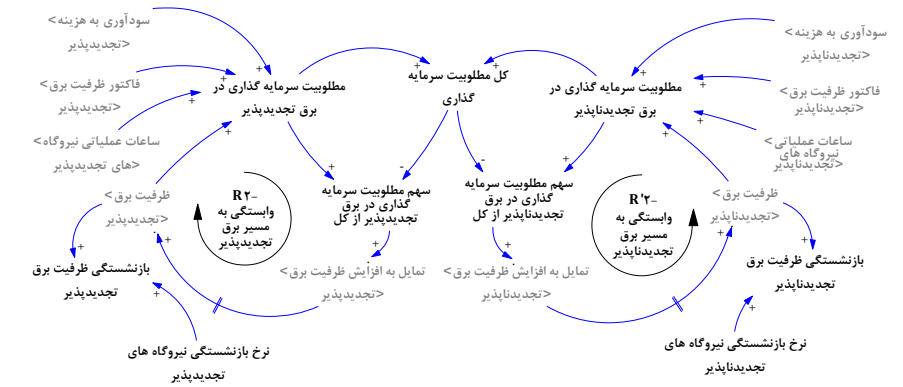


شکل ۱ پ: مدل‌سازی بازی تکاملی بین نیروگاه‌های بادی و سیکل ترکیبی با کمک پویایی سیستم و مفاهیم مدل‌سازی عامل بنیان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

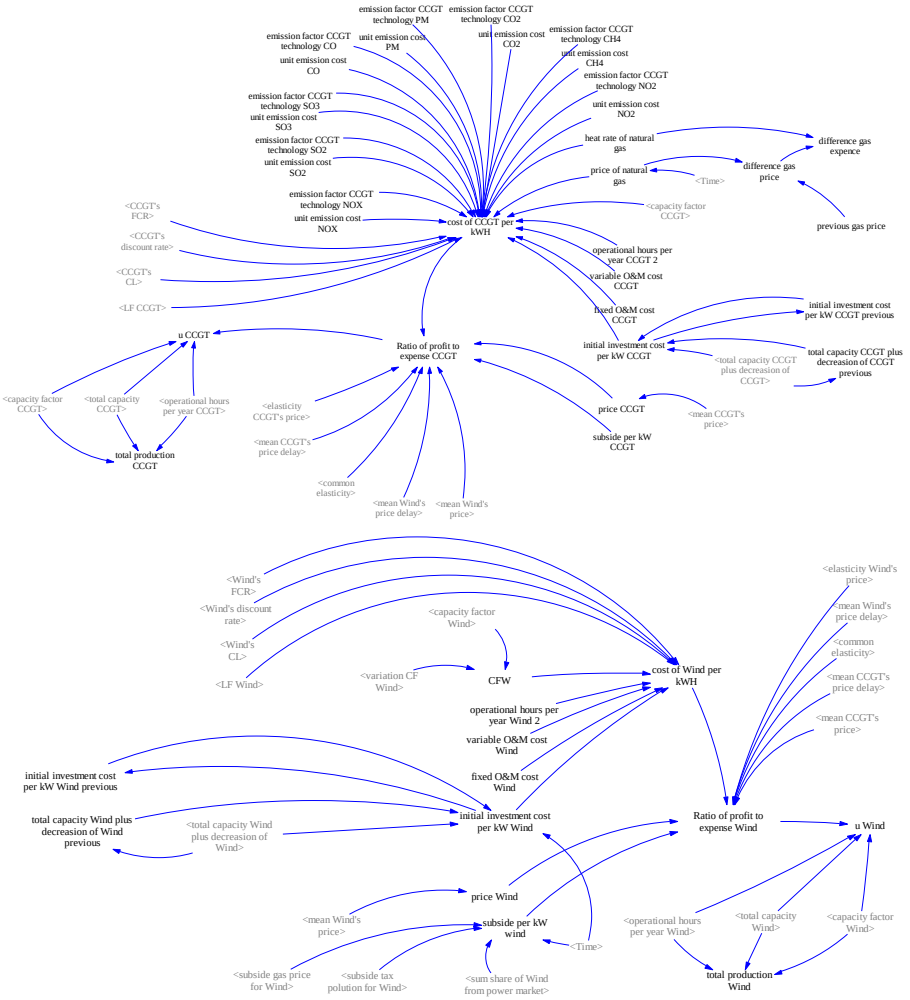


نمودارهای علت و معلولی (CLD)

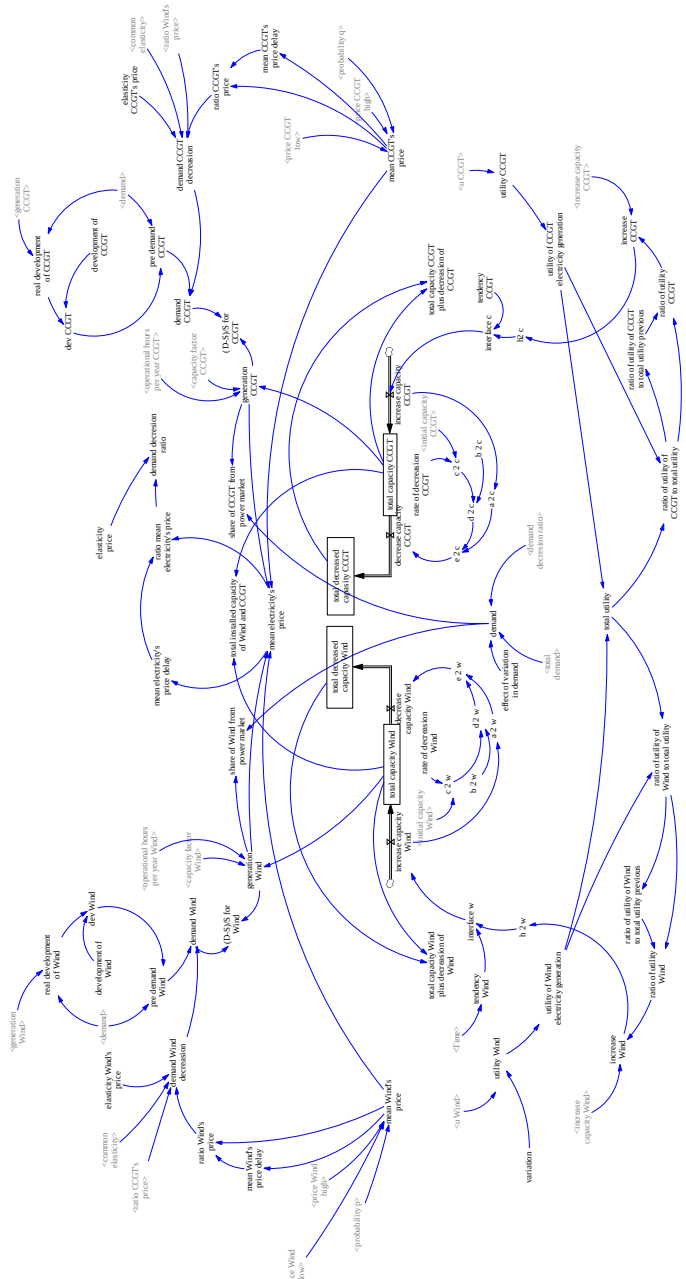


نمودارهای حالت و جریان (SFD)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]