اقتصاد و تجارت نوین، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
فصل‌نامهٔ علمی ـ پژوهشی، سال سیزدهم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۳۹۷، ۲۹-۵۳

طراحی مدلی برای قیمت‌گذاری فناوری بیوگاز در ایران با رویکرد پویایی سیستم

رستم بهمردی کلانتری*

علی‌اصغر توفیق، محمدعلی شفیعا*****

چکیده

افزایش تقاضا برای انرژی، محدودبودن منابع انرژی فسیلی، و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای سبب افزایش توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. یکی از مسائل عمده در این زمینه تعیین روش مناسب قیمت‌گذاری است. در قیمت‌گذاری فناوری‌های تجدیدپذیر متغیرهای کلان و خرد زیادی دخیل‌اند که ترکیب آن‌ها حالت‌های عدم اطمینان زیادی را ایجاد می‌کنند؛ بنابراین، طراحی مدلی که علاوه‌بر متغیرها روابط متقابل آن‌ها را نیز شامل شود سبب افزایش دقت قیمت‌گذاری می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو تأثیرگذاری متغیرها در یک‌دیگر و مقادیر احتمالی آن‌ها در آینده تعیین شده است و سپس با استفاده از شبیه‌سازی مدل قیمت فناوری در آینده مشخص می‌شود. نتیجه این‌که متغیرهای دولتی به‌نسبت بازار تأثیر بیش‌تری در قیمت و توسعهٔ فناوری دارند. درنهایت، مشخص شد که یارانه بالاترین تأثیر را در روند گسترش و تعیین قیمت فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر دارد.

کلیدواژه‌ها: پویایی‌شناسی سیستم‌ها، انرژی تجدیدپذیر، منحنی یادگیری، مونت کارلو، هاضم بی‌هواز.

طبقه‌بندی JEL: C13، C81.

---

* دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت فناوری و نوآوری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسندهٔ مسئول)
Behmardi@aut.ac.ir

** دانشیار دانشکدهٔ مدیریت و مهندسی سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Ali.a.tofigh@gmail.com

*** دانشیار دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، Omidshafia@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

۱. مقدمه

فناوری ازلحاظ اقتصادی اهمیت فراوانی دارد، تحقیقات اقتصاددانان حاکی از آن است که هفتاد درصد از رشد کشورهای توسعه‌یافته برای فناوری است. در سال‌های اخیر و با افزایش شرکت‌های دانش‌بنیان، پارک‌های علم و فناوری، مراکز تجاری‌سازی فناوری، و هم‌چنین، شکل‌گیری انواع قراردادهای اعطای امتیاز، انتقال فناوری، یا سرمایه‌گذاری خطرپذیر، قیمت‌گذاری فناوری جایگاه خاصی در مسائل مدیریت فناوری پیدا کرده است. طبق تحقیقات انجام‌شده بر تأمین‌کنندگان و دریافت‌کنندگان فناوری مشخص شد که قیمتْ اولین منبع اختلاف آن‌هاست (Baashe and Duer 1975).

زندگی روزمرهٔ انسان‌ها وابستگی شدیدی به تولید و مصرف انرژی دارد؛ بنابراین عرضه و تقاضای آن در جوامع بشری به‌طور مستمر رو به افزایش است. درحال‌حاضر، بیش از ۷۵ درصد کل انرژی مصرفی جهان را منابع هیدروکربنی تأمین می‌کند. سوخت‌های فسیلی با تولید گازهای آلاینده و گل‌خانه‌ای در فرایند تبدیل و درنتیجه، تخریب لایهٔ ازن زیست‌بوم را به‌شدت موردتهدید قرار داده‌اند و موجب گرم‌شدن بیش‌تر کرهٔ زمین می‌شوند. بنابراین، به‌منظور حفظ محیط زیست توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر ضروری به‌نظر می‌رسد. بیوگاز ازجمله منابع مهم انرژی تجدیدپذیر است و امکان استفادهٔ بهینه از آن در سال‌های اخیر موردتوجه کشورهای مختلف، به‌خصوص کشورهایی که از این منبع برخوردارند، قرار گرفته است. یکی از روش‌های تولید بیوگاز هاضم بی‌هوازی است. هضم بی‌هوازی فرایندی طبیعی است که در آن میکروارگانیسم‌ها مواد ارگانیک را در نبود اکسیژن به بیوگاز (ترکیبی از دی‌اکسیدکربن و متان) و مادهٔ گواریده (هضم‌شده) تبدیل می‌کند. هاضم بی‌هوازی در مقایسه با دیگر فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مزایای بیش‌تری، مانند توانایی تولید پیوستهٔ انرژی برخلاف انرژی بادی، خورشیدی، و جزر و مد و هم‌چنین، قابلیت ذخیرهٔ گاز خروجی در شبکه دارد. علاوه‌براین، متان جزو معدود سوخت‌های تجدیدپذیر است که برای وسایل نقلیهٔ سنگین مناسب است. ساخت تجهیزات هاضم بی‌هوازی تقریباً سریع است و در مقایسه با دیگر فناوری‌های مدیریت ضایعات ارزان‌تر است. ورودی و خروجی آن قابل‌انعطاف است و واحد فرایند هضم بی‌هوازی می‌تواند براساس وضعیت محلی و مواد خام اولیه طراحی شود و به شبکهٔ گاز یا برق متصل شود. هم‌چنین، با تولید کودهایی با کربن پایین برای کشاورزی مواد آلی می‌توانند مجدداً در مزارع مورداستفاده قرار گیرند و سبب کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای شوند.

آمارها و بررسی‌ها نشان می‌دهند که میزان بهره‌برداری از بیوگاز در ایران در مقایسه با بسیاری از کشورها، حتی برخی از کشورهای همسایه نظیر ترکیه ناچیز است (عدل و علی‌قارداشی ۱۳۸۰). باتوجه‌به مطالب بیان‌شده، یکی از گام‌های اساسی در ترویج فناوری بیوگاز قیمت‌گذاری است. باتوجه‌به ماهیت انرژی‌های تجدیدپذیر علاوه‌بر عوامل معمول در ارزش‌گذاری فناوری عوامل دیگری ازجمله سیاست‌های دولتی و قوانین بین‌المللی در قیمت این فناوری‌ها اثرگذار است.

در این مقاله با مطالعهٔ کتاب‌خانه‌ای عوامل مؤثر در قیمت‌گذاری فناوری تعیین شد. سپس، نحوهٔ ارتباطات متغیرهای یادشده به‌صورت روابط ریاضی بیان شد. درانتها، با استفاده از روش سیستم دینامیک (system dynamics)، که به‌عقیدهٔ بسیاری از صاحب‌نظران بهترین روش برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده است، یک مدل دینامیک طراحی شد و با استفاده از شبیه‌سازی قیمت هاضم بی‌هوازی بیوگاز (anaerobic digester) تعیین شده است.

۱.۱ بیوگاز

بیوگاز وقتی تولید می‌شود که میکروارگان‌های به‌خصوصی مواد آلی را در محیطی عاری از اکسیژن تجزیه کنند. این فرایند می‌تواند درون دفن‌گاه‌ها، فاضلاب، واحدهای هاضم بی‌هوازی، و هم‌چنین هنگام تبخیر گرمایی مواد آلی انجام شود (Norin 1998). بسته به نوع مواد و نوع واحد هاضم بی‌هوازی محتوای متان در بیوگاز متفاوت است.

مشاهده می‌شود که بیوگاز حاصل از دفن‌گاه در مقایسه با دیگر روش‌ها دارای متان کم‌تر و نیتروژن بیش‌تری است. هم‌چنین، هضم بی‌هوازی پس‌ماند آلی دارای بیش‌ترین بازده و بهترین کیفیت است.

هضم مواد آلی علاوه‌بر دفن‌گاه‌ها در مخزن‌های هاضم نیز انجام می‌شود. در روش مخزنی امکان کنترل دما و رطوبت فراهم است و قسمت اعظم انرژی مواد به گاز متان تبدیل می‌شود. روش بی‌هوازی در مقایسه با روش هضم هوازی گرمای کم‌تری تولید می‌کند و مواد زائد باقی‌مانده در آن نیز کم‌تر است. فرایند بی‌هوازی درصورت کنترل دما بهتر عمل می‌کند. ترکیبات بیوگاز به مواد اولیه، فرایند تولید، و نحوهٔ جمع‌آوری آن بستگی دارد. گاز تولیدی در مخازن در مقایسه با گاز تولیدی از دفن‌گاه‌ها محتوای انرژی بیش‌تری دارد که علت اصلی آن فرایند کنترل‌شده در مخازن هاضم درمقابل ورود جریان هوای ناخواسته به درون دفن‌گاه است.

ازنظر خصوصیات، بیوگاز بین گاز شهری و گاز طبیعی قرار دارد. در برخی کاربری‌ها خصوصیات کیفی بیوگاز باید بهبود یابد. پارامترهایی که باید از بیوگاز جدا شود H2S، آب، دی‌اکسیدکربن، ترکیبات آلی هالوژنه، و ترکیبات آلی سیلیس‌دار (سیلوکسان‌ها) است. برای استفاده از بیوگاز برای سوخت نقلیه باید گاز پالایش و به‌سازی یابد و متان به سطح ۹۷ درصد برسد. هر مترمکعب گاز سبز تولیدی معادل یک لیتر گازوئیل است و بیوگاز بهترین سوخت دوست‌دار طبیعت است که علاوه‌بر کاهش گازهای گل‌خانه‌ای باعث کاهش انتشار اکسید نیتروژن NOx، هیدروکربن، و ذرات ریز می‌شود. بیوگاز به‌منزلهٔ یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر که در چهار دههٔ اخیر در کشور ایران موردتوجه قرار گرفته است در مقایسه با برخی از کشورهای جهان نتوانسته به جایگاهی هم‌سان دست یابد. ظرفیت نامی نیروگاهی نصب‌شده با بهره‌برداری از بیوگاز در ایران در پایان سال ۱۳۹۰ حدود ۶/۴ مگاوات بود که در مقایسه با کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی (هم‌چون آلمان با بیش از ۲۹۰۰ مگاوات ظرفیت نصب‌شدهٔ نیروگاهی بیوگاز در همان زمان) و حتی برخی از کشورهای منطقه (هم‌چون ترکیه با بیش از صد مگاوات ظرفیت نصب‌شده) رقم کوچکی است.

۲. پیشینهٔ تحقیق

در بین تمامی روش‌های ارزش‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر دو روش ارزش‌گذاری مشروط (contingent valuation methode/ CVM) و تنزیل جریان نقدی (discount cash fellow/ DCF) به‌صورت گسترده مورداستفاده قرار گرفته‌اند. روش CVM به‌صورت عمده در حوزهٔ منابع انرژی عمومی با به‌کارگیری روش علاقه‌مندی به خرید (willingness to pay/ WTP) کاربرد داشته است. بدین‌صورت که نمونهٔ تصادفی از مردم انتخاب می‌شود، سپس درمورد میزان هزینه‌ای که حاضرند برای یک منبع انرژی تجدیدپذیر پرداخت کنند سؤال می‌شود و درنهایت، این پاسخ به ارزش پولی برای فناوری تبدیل می‌شود. روش DCF با تکیه بر ارزش اقتصادی پول همهٔ درآمدهای آتی حاصل از فناوری را محاسبه می‌کند و سپس تعیین می‌کند که آیا فناوری سودآور است یا خیر. باتوجه‌به توضیحات ارائه‌شده، مشخص می‌شود که این دو روش برای ارزش‌گذاری فناوری در کوتاه‌مدت و با عدم اطمینان کم مناسب‌اند، اما برای ارزش‌گذاری فناوری‌های تجدیدپذیر که تعداد عدم قطعیت آن در طولانی‌مدت زیاد است و علاوه‌برآن در سرمایه‌گذاری در بخش R&D و سیاست‌ها و قوانین دولت‌ها نیز

عدم قطعیت بیش‌تری را ایجاد می‌کند، این روش‌ها مناسب نیستند. بنابراین، روش جای‌گزین گزینهٔ واقعی (real option) معرفی شد (ETSAP 2015; Junginger et al. 2006). داویس و اونس در سال ۲۰۰۲ هر دو روش‌های گزینهٔ واقعی و روش تنزیل‌شدهٔ نقدی را برای قیمت‌گذاری فناوری تجدیدپذیر استفاده کردند و نتیجه گرفتند که روش تنزیل‌شدهٔ جریان نقدی بدون درنظرگرفتن عوامل ایجادکنندهٔ عدم اطمینان مانند نوسان‌های قیمت بنزین برای انرژی‌های تجدیدپذیر مناسب نخواهد بود. ازاین‌رو، محققان سعی کردند تا روش گزینهٔ واقعی را با الگوی شبکه‌بندی دودویی (binomial lattice model) و روش‌های برنامه‌ریزی پویا بهبود دهند. روش گزینهٔ واقعی بسیاری از متغیرهای تأثیرگذار را در قیمت‌گذاری فناوری در بر می‌گیرد، ولی قادر به ترسیم روابط آن‌ها نیست. علاوه‌بر محدودیت‌های بیان‌شده، این روش‌ها تلاش‌های اندکی دربارهٔ طراحی مدلی برای قیمت‌گذاری فناوری در بلندمدت درخصوص انرژی‌های تجدیدپذیر کرده‌اند (Kumbaroğlu et al. 2008; Fleten et al. 2007). باتوجه‌به مشکلات موردبحث مدل پیش‌نهادی‌ای که علاوه‌بر دربرگیری تمامی متغیرهای تأثیرگذار در قیمت فناوری، روابط متقابل متغیرها را نیز شبیه‌سازی می‌کند و با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت کارلو دقت پیش‌بینی را در بلندمدت بهبود می‌دهد ابزاری مناسب برای قیمت‌گذاری فناوری محسوب می‌شود.

۱.۲ پویایی‌شناسی سیستم‌ها

پویایی سیستم‌ها متدلوژی برای مطالعه و مدیریت سیستم‌های پیچیده و دارای بازخورد است. این سیستم‌ها می‌توانند در حوزه‌های مختلفی مثل کسب‌وکار، اقتصاد، محیط زیست، مدیریت انرژی، مسائل شهری، و دیگر حوزه‌های اجتماعی و انسانی وجود داشته باشند.

رویکرد پویایی سیستم‌ها را در اوایل سال‌های دههٔ ۱۹۶۰ جی فارستر از دانشگاه MIT معرفی کرد. ایدهٔ اولیهٔ شکل‌گیری این حوزه پروژه‌ای بود که فارستر برای شرکت جنرال الکتریک انجام داد. در این پروژه سؤال کارفرما این بود که چه عواملی باعث نوسان در سیستم موجودی و انبار و به‌دنبال آن، نیروی انسانی شرکت می‌شود. تحقیقی که فارستر در این موضوع انجام داد این ایده را شکل داد که از قواعد موجود در کنترل سیستم‌ها در حوزهٔ مهندسی برق و مکانیک می‌توان برای سیستم‌های اجتماعی نیز استفاده

کرد. در این رویکرد تصویری از سیستم براساس بازخوردها و تأخیرهـای موجـود ایجـاد می‌شود تـا رفتـار دینامیکی سیستم‌های پیچیدهٔ فیزیکی، زیستی، و اجتمـاعی بهتـر فهمیـده شود. می‌توان گفت که مهم‌ترین اصـل اساسی‌ای که پویایی سیستم‌ها بیـان مـی‌دارنـد ایـن است که بازخوردها و تأخیرها رفتار سیستم‌ها را می‌سازند و پویایی رفتاری سیسـتم نتیجـهٔ ساختار حاکم بر سیستم است (Forrester 1989).

۳. فرضیهٔ پویا و نمودارهای علّی و معلولی

در این بخش تمامی فرض‌های پویا و نمودارهای علّی و معلولی مفروض در مدل تشـریح شده است.

۱.۳ تأثیر یادگیری در قیمت فناوری

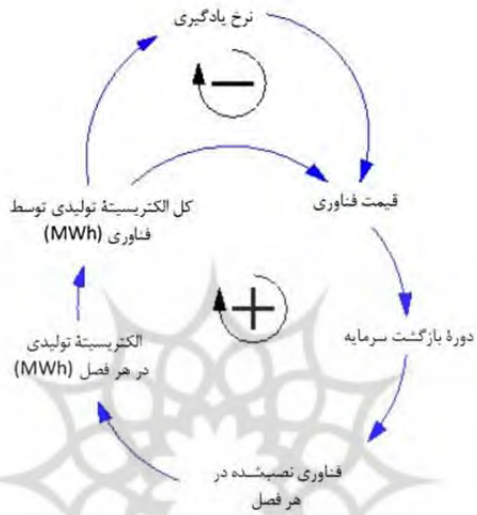
فراینـد یـادگیری در فنـاوری‌هـای بیومـاس بـه سـه بخـش عرضـهٔ سـوخت اولیـه، هزینـهٔ سرمایه‌گذاری و عملیات، و تولید انرژی تقسیم می‌شود و به هریک ضریب یادگیری مجزایـی تخصیص می‌یابد (IEA/ OECD 2000). طبق داده‌های جمع‌آوری‌شده از سـازمان بـین‌المللـی انرژی تجدیدپـذیر (ETSAP 2015) و مقالـهٔ جـانجینجر و همکـاران (Junginger et al. 2006) ضریب یادگیری فناوری درمورد بازده الکتریسیتهٔ تولیدی و سرمایه‌گـذاری وجـود دارد و در بقیهٔ موارد ضریب یادگیری نزدیک به صفر است.

باتوجه‌به مطالعات انجام‌شدهٔ جانجینجر بهترین معیار برای تعیـین پـارامتر یـادگیری مقدار الکتریسیتهٔ تولیدی است. علت این انتخاب آن است که تعداد فناوری‌های هاضـم بی‌هوازی اندک است و استفاده از این معیار عدم قطعیت فراوانی را بـه‌وجـود مـی‌آورد (Junginger et al. 2006).

با مطالعات مقالات، گزارش‌های سازمان بین‌المللی انرژی‌هـای تجدیدپـذیر، و اتحادیـهٔ اروپا نرخ یادگیری بـرای فنـاوری بیوگـاز بـه‌صـورت تـابع توزیـع یـک‌نواخـت پیوسـته U [۰.۰۵,۰.۰۸۲] در نظر گرفته شده است (IEA/ OECD 2000; ETSAP 2015; Neij 2008; www.jrc.ec.europa.eu).

با افزایش میزان تجمعی الکتریسیتهٔ تولیدی توسط فناوری طبق فرایند یـادگیری قیمـت فنـاوری کـاهش مـی‌یابـد کـه باعـث کـاهش دورهٔ بازگشـت سـرمایه مـی‌شـود. سـپس، سرمایه‌گذاران به سرمایه‌گذاری راغب می‌شوند و تعداد فناوری نصب‌شده و میزان تجمعـی

الکتریسیتهٔ تولیدی افزایش می‌یابد. این حلقه به‌طور دائم تکرار مـی‌شـود و باعـث کـاهش قیمت فناوری می‌گردد. ازسوی‌دیگر، هنگامی که الکتریسیتهٔ تولیدی از حد مجازی تجـاوز کند، دیگر نرخ یادگیری به صفر می‌رسد و قیمت فناوری ثابت می‌شود. این حلقه در شکل ۱ نشان داده شده است.

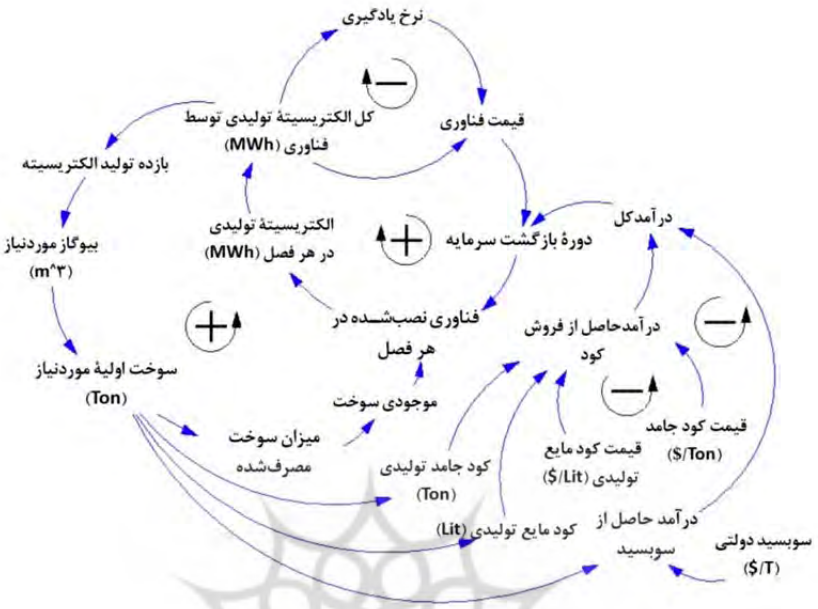


شکل ۱. تأثیر یادگیری در قیمت فناوری

۲.۳ تأثیر یادگیری در بازده الکتریسیته

شکل ۲ ارتباط تولید تجمعی برق توسط فناوری با بازدهی الکتریسیته را نشان می‌دهـد. بـا افزایش تولید تجمعی برق با درنظرگرفتن فرایند یادگیریْ بازده تولیـد الکتریسـیته افـزایش می‌یابد که سبب کاهش سوخت اولیهٔ موردنیاز می‌شـود؛ درنتیجـه، سـوخت دردسـت‌رس افزایش می‌یابد و تعداد فناوری نصـب‌شـده و الکتریسـیتهٔ تولیـدی افـزایش پیـدا مـی‌کنـد (ETSAP 2015).

ازسوی‌دیگر، کاهش سوخت اولیه باعث می‌شود میزان فضولات لازم برای تولید بیوگاز کاهش یابد، درنتیجه، یارانهٔ حاصل از بازیافت فضولات کاهش خواهد یافت. هم‌چنین، بـا کاهش میزان فضولات لازم (سوخت موردنیاز) میزان کود تولیدی نیز کاهش مـی‌یابـد کـه درمجموع، سبب کاهش درآمد، افزایش دورهٔ بازگشت سرمایه، کاهش نرخ نصب فنـاوری، و کاهش کل الکتریسیتهٔ تولیدیِ هاضم می‌شود.



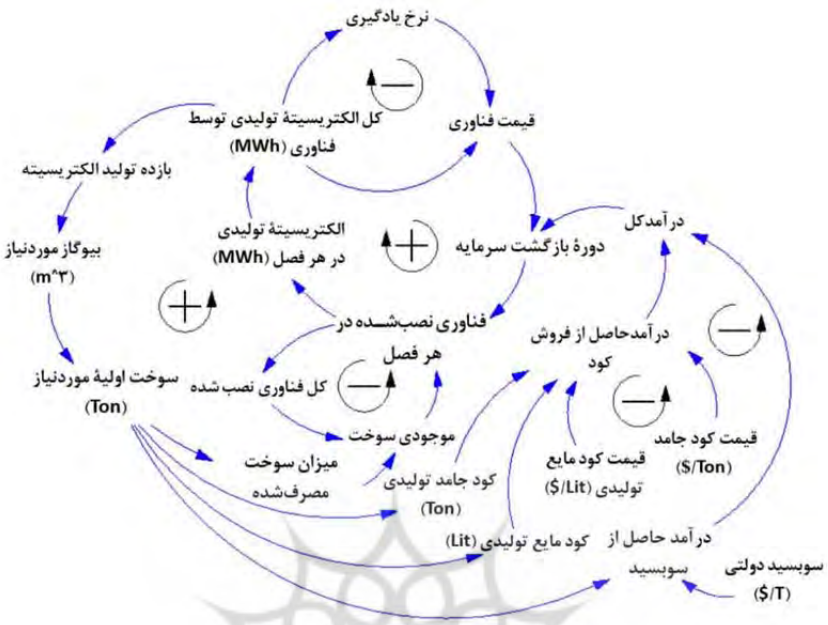
شکل ۲. تأثیر یادگیری در بازده الکتریسیته

با افزایش سوخت اولیهٔ موردنیاز میزان کود تولیدی و درآمد حاصل از فروش کود افزایش می‌یابد. ازسوی‌دیگر، با افزایش سوخت اولیه میزان درآمد حاصل از یارانه افزایش می‌یابد که باعث افزایش درآمد، کاهش دورهٔ بازگشت سرمایه، افزایش نصب فناوری، و افزایش کل الکتریسیتهٔ تولیدی فناوری می‌شود.

۳.۳ محدودیت عرضهٔ سوخت اولیه

وجود وضعیت منطقه‌ای مناسب برای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است. مثلاً برای توسعهٔ انرژی‌های بادی وجود مناطق بادخیز امری حیاتی به‌شمار می‌رود. ازاین‌رو، یکی از محدودیت‌های توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر وجود مناطق مستعد است (http://ocw.mit.edu/terms 2010).

از عوامل اولیه برای توسعهٔ فناوری هاضم بی‌هوازی وجود سوخت اولیهٔ موردنیاز مثل فضولات به میزان کافی است. با افزایش تعداد فناوری‌های نصب‌شده مصرف سوخت اولیه افزایش می‌یابد که باعث کاهش موجودی سوخت اولیه می‌شود و باعث کاهش نرخ نصب فناوری در سال می‌شود. حلقهٔ علّی و معلولی بیان‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. محدودیت عرضهٔ سوخت اولیه

۴.۳ نمودار علّی و معلولی مدل

یکی از ذی‌نفعان اصلی توسعهٔ فناوری‌های تجدیدپذیر دولت است؛ ازاین‌رو، برای افـزایش دقت در فرایند قیمت‌گذاری متغیرهایی که دربرگیرندهٔ منافع دولت‌اند نیـز در مـدل علّـی و معلولی آورده شده است. برخی از این متغیرها هم‌راه با تعریف آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. سـپس، برخـی از حمایـت‌هـای دولتـی بـرای تـرویج اسـتفاده از انـرژی‌هـای تجدیدپذیر، ازقبیل تعرفهٔ خرید برق و اعتبار کربن اضافه شده است. نمودار علّی و معلولی مدل در شکل ۴ نشان داده شده است.

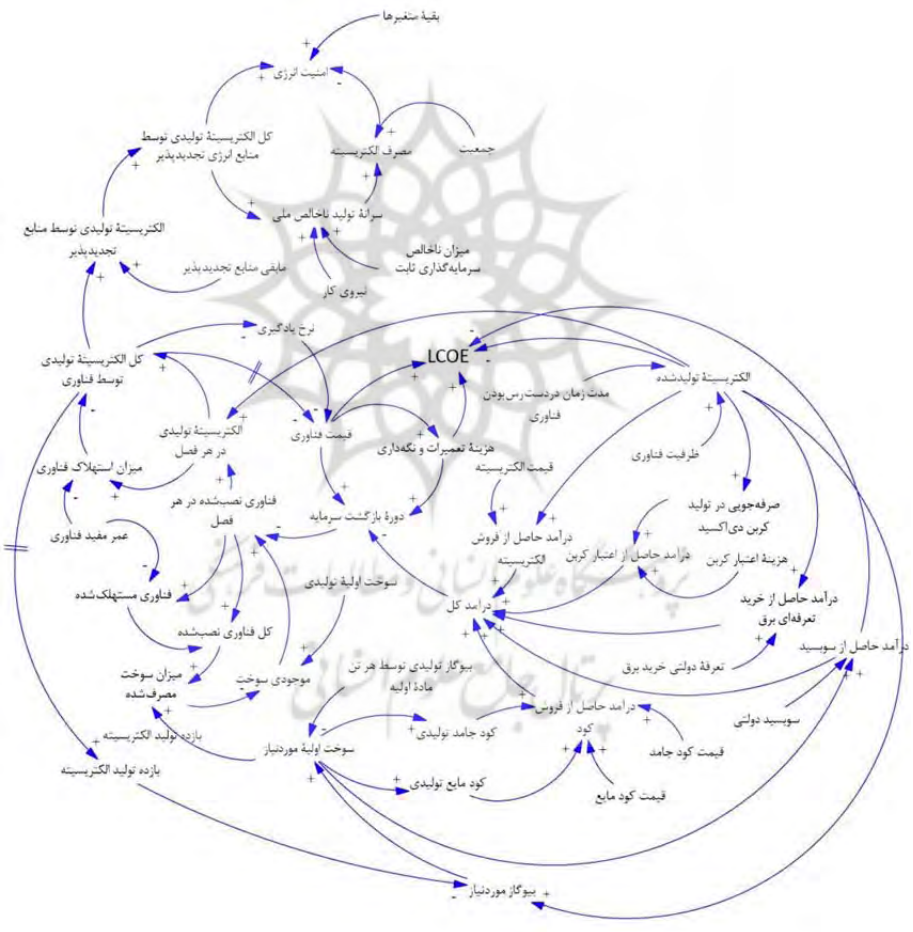
جدول ۱. متغیرهای تأثیرگذار در توسعهٔ انرژی تجدیدپذیر ازمنظر دولت

متغیر	تعریف	مرجع
امنیت انرژی	دردست‌رس‌بودن مقدار کافی و قابل‌اطمینان از عرضهٔ انرژی برای راضی‌کردن تقاضا (Sovacool and Marilin 2010)	(Aslani et al. 2014)
صرفه‌جویی در تولید دی‌اکسیدکربن (Carbon Emission)	دی‌اکسیدکربن کاهش‌یافته هنگام استفاده از انرژی تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی	(Jeon and Shin 2014)

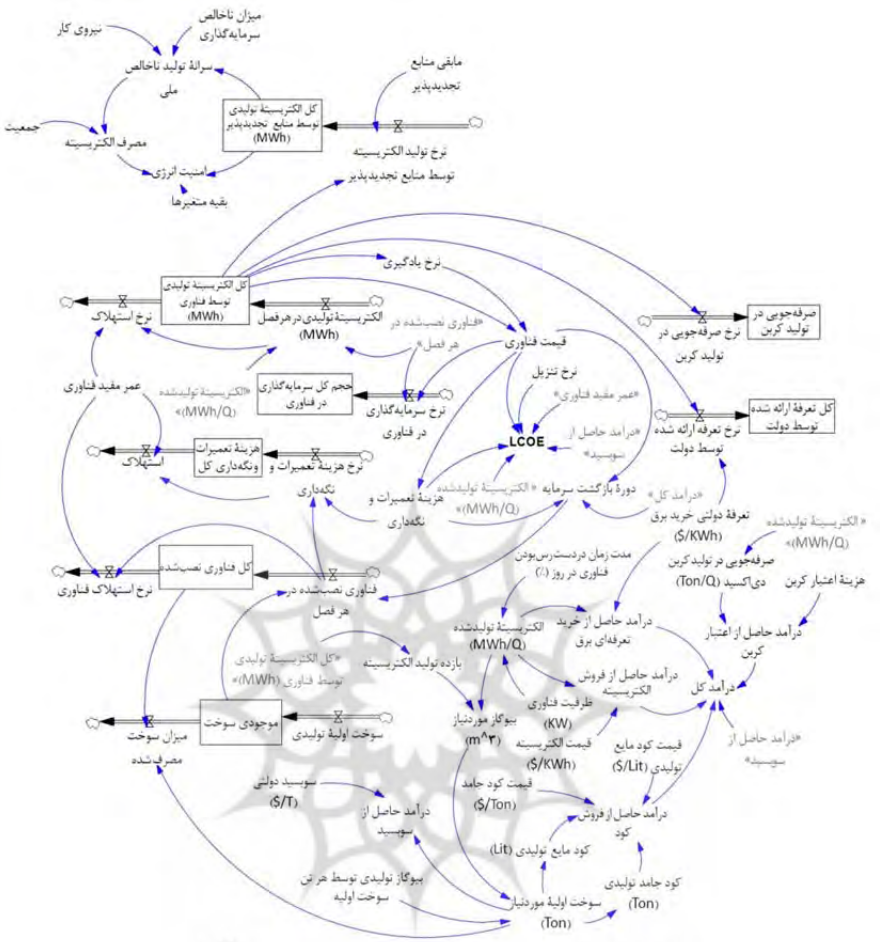
هزینهٔ تولید الکتریسیته (Levelised Cost of Electricity)	هزینهٔ لازم برای تولید هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریسیته توسط فناوری	(ETSAP 2015)
سرانهٔ تولید ناخالص ملی	ارتباط مستقیم افزایش الکتریسیتهٔ تولیدی توسط انرژی تجدیدپذیر با تولید ناخالص ملی	(فطرس و دیگران ۱۳۹۳)

۵.۳ مدل جریان انباشت

مدل جریان انباشت در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار علّی و معلولی مدل

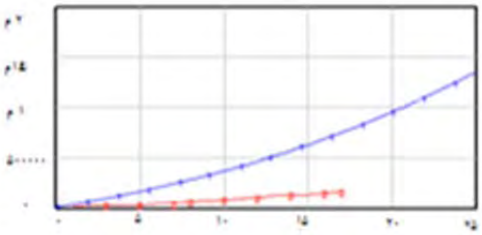


شکل ۵. مدل جریان انباشت

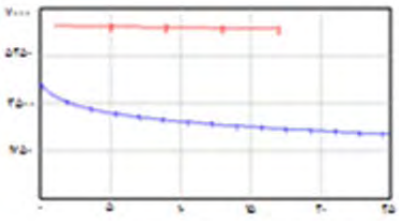
۶.۳ آزمون اعتبارسنجی ارزیابی ساختار مدل

در توسعهٔ مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم سنجش اعتبار ساختار مدل فقط به اعتبارسنجی معادله‌ها و پارامترها منتهی نمی‌شود و لازم است رفتار مدل در وضعیت تغییر مقادیر پارامترها به مقادیر خیلی بزرگ یا خیلی کوچک با رفتار منطقی سیستم در دنیای واقعی نیز مقایسه شود تا بتوان نتیجه گرفت که ساختار مدل از اعتبار کافی برخوردار است (Forrester 1989). با افزایش مقدار پارامتر یادگیری انتظار می‌رود هزینهٔ سرمایه‌گذاری و هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری با افت شدیدی مواجه شوند. هم‌چنین، انتظار داریم توسعهٔ

فناوری تاحد زیادی افزایش یابد. با اِعمال این تغییر در مدل نتایج حاصل در شکل ۶ و شکل ۷ ارائه شده است که با آن‌چه انتظار داریم تطابق دارد.



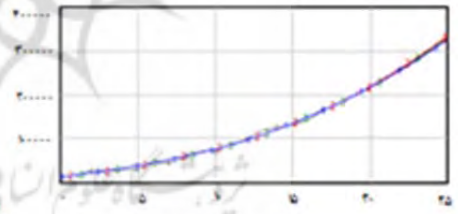
شکل ۶. تأثیر افزایش یادگیری در تجمعی فناوری نصب‌شده



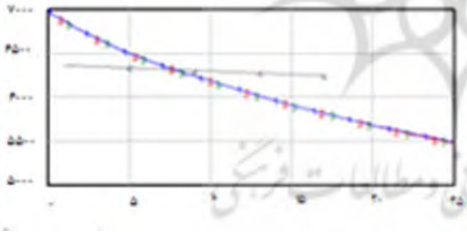
شکل ۷. تأثیر افزایش یادگیری در قیمت فناوری

۷.۳ آزمون اعتبارسنجی تحلیل حساسیت

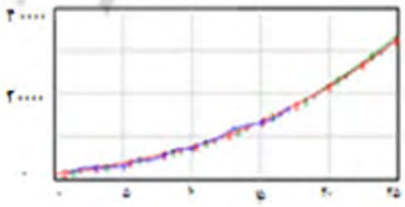
در این آزمون با تغییر اندک پارامترهای ورودی انتظار می‌رود تغییر قابل‌ملاحظه یا رفتار غیرقابل‌قبولی از متغیرها ایجاد نشود. با انجام‌دادن این آزمون نیز اعتبار مدل موردتأیید قرار گرفت که برای نمونه، تأثیرات تغییر قیمت یارانه در شکل‌های ۸ و ۹ و تغییر در قیمت کود جامد در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



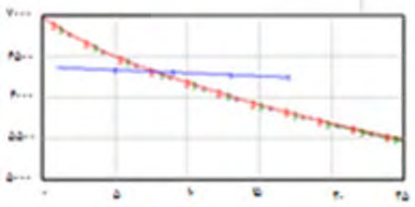
شکل ۸. تأثیر تغییر یارانه در تجمعی فناوری نصب‌شده



شکل ۹. تأثیر تغییر یارانه در قیمت فناوری



شکل ۱۰. تأثیر تغییر قیمت کود جامد در تجمعی فناوری نصب‌شده



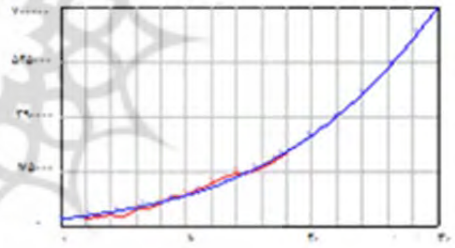
شکل ۱۱. تأثیر تغییر قیمت کود جامد در قیمت فناوری

۸.۳ آزمون اعتبارسنجی بازتولید رفتار گذشته

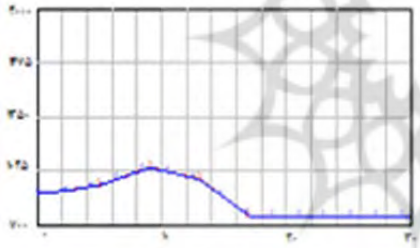
در آزمون بازتولید رفتار گذشته تکرار رفتار گذشتهٔ مدل موردبررسی قرار می‌گیرد. فهرست مراجع، که برای اعتبارسنجی استفاده شده است، در جدول ۲ آمده است. در شکل‌ها رفتار گذشتهٔ سیستم با رفتار شبیه‌سازی‌شده مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدلْ رفتار گذشته را به‌خوبی تکرار کرده است.

جدول ۲. منابع اعتبارسنجی مدل

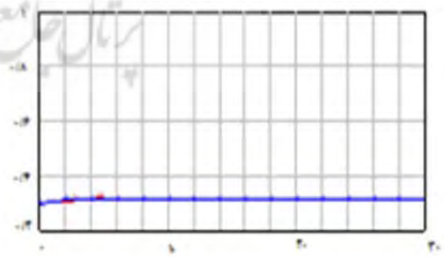
متغیر	مرجع
برق تولیدشده از فناوری تجمعی	(Hemingway 2015)
امنیت انرژی	INTERNATIONAL INDEX OF ENERGY) (SECURITY RISK 2015
بازده تولید الکتریسیته	(ETSAP 2015)
فناوری نصب‌شدهٔ تجمعی	(UK's Department for Environment 2011)
قیمت فناوری	(www.pwc.co.uk)



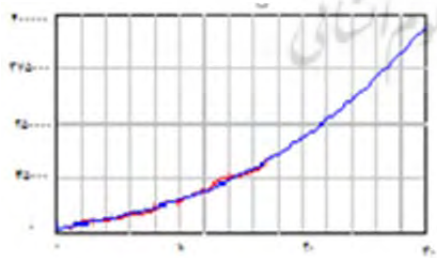
شکل ۱۲. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شدهٔ متغیر کل الکتریسیتهٔ تولیدی با مقادیر واقعی



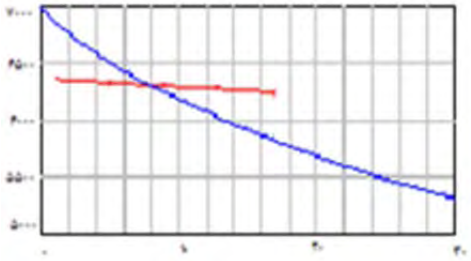
شکل ۱۳. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شدهٔ امنیت انرژی با مقادیر واقعی



شکل ۱۴. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شدهٔ متغیر بازده تولید الکتریسیته با مقادیر واقعی



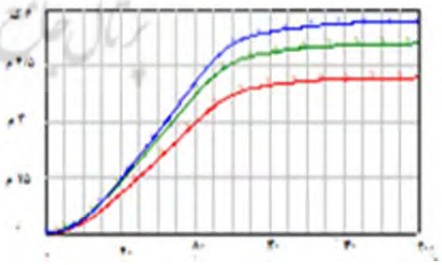
شکل ۱۵. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شدهٔ متغیر تجمعی فناوری نصب‌شده با مقادیر واقعی



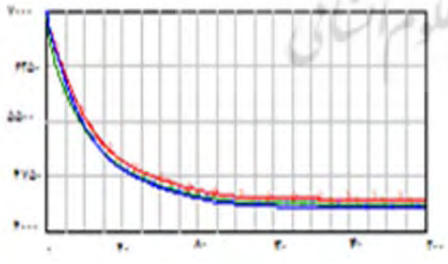
شکل ۱۶. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شدهٔ متغیر قیمت فناوری با مقادیر واقعی

۴. سناریونویسی و پیش‌بینی

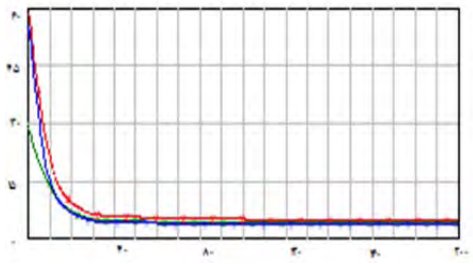
در این بخش تأثیر تغییر متغیرهای ورودی در قیمت فناوری شبیه‌سازی می‌شود. درابتدا، متغیرها به دو بخش حمایت‌های دولتی، که شامل یارانه، خرید تعرفه‌ای برق، و اعتبار کربن است و تغییر بازار که شامل تغییر قیمت گواریده و الکتریسیته است، تقسیم شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده است. نمودارها حاکی از آن است که حمایت‌های دولتی به‌نسبت تغییرات بازار تأثیرگذاری بیش‌تری در قیمت و انتشار فناوری دارند. شواهد زیادی یافتهٔ مذکور را تأیید می‌کنند. مثلاً همهٔ کشورها به‌منظور توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر خود حمایت‌های دولتی را تعریف کرده‌اند و هر کشوری که حمایت‌های بیش‌تری را مدنظر قرار داده است با سرعت بیش‌تری در این زمینه توسعه یافته است. مثلاً دو کشور آلمان و انگلیس با وضع قوانین و بسته‌های حمایتی فراوان توانستند به‌سرعت در زمینهٔ فناوری‌های هاضم بی‌هوازی به مرحلهٔ بلوغ برسند.



شکل ۱۷. تأثیر سناریوهای مختلف در تجمعی فناوری نصب‌شده



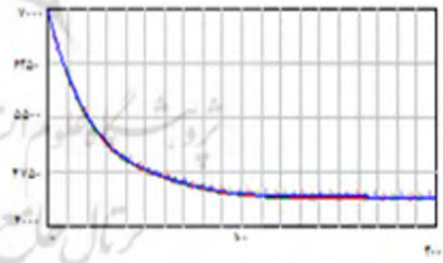
شکل ۱۸. تأثیر سناریوهای مختلف در قیمت فناوری



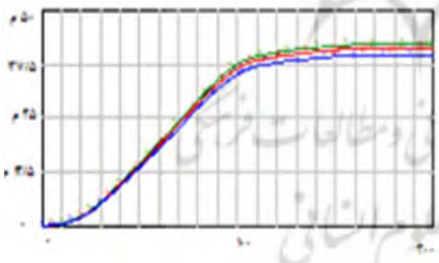
شکل ۱۹. تأثیر سناریوهای مختلف در دورهٔ بازگشت سرمایه

سپس، سناریوی دیگری بر متغیرهای یارانه، خرید تعرفه‌ای برق، و میزان اعتبـار کـربن انجام شد تا تأثیر هریک از این متغیرها در قیمت و انتشار فناوری تعیین شود. نتایج حاصل در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ نشان داده شده است. بدین‌ترتیب، مشخص می‌شود کـه مـؤثرترین حمایت‌های دولتی بر قیمت فناوری به‌ترتیب عبارت‌اند از نرخ یارانه، خرید تعرفه‌ای بـرق، و اعتبار کربن.

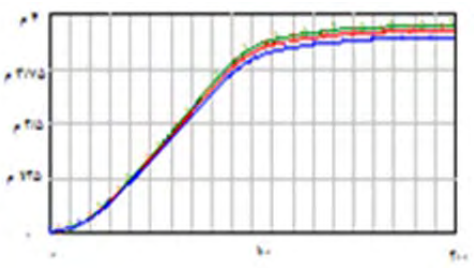
علت این اتفاق آن است که یارانه برخلاف دیگر حمایت‌های دولتی فقط مختص به بیوماس و بیوگاز است که افزایش آن سبب افزایش جذابیت فناوری در مقایسه با دیگر فناوری‌های تجدیدپذیر می‌شود و انتشار فناوری را تسریع می‌کند.



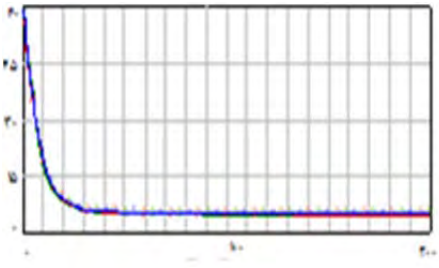
شکل ۲۰. حمایت‌های دولتی بر قیمت فناوری



شکل ۲۱. حمایت‌های دولتی بر صرفه‌جویی در انتشار کربن



شکل ۲۲. تأثیر انواع حمایت‌های دولتی در تجمعی فناوری نصب‌شده



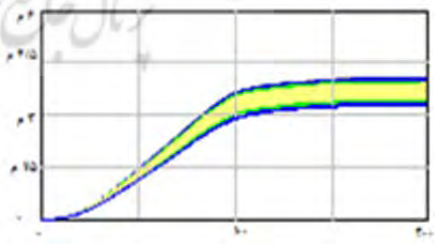
شکل ۲۳. تأثیر انواع حمایت‌های دولتی در دورهٔ بازگشت سرمایه

۱.۴ شبیه‌سازی مونت کارلو

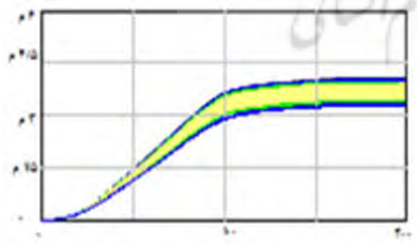
برای بررسی اثر تغییر قیمت کود پارامتر یادگیری، ضریب رشد قیمت برق، نرخ تعرفهٔ برق، و درصد هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری بر قیمت فناوری از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است که در آن برای هریک از پارامترها تابع توزیع تعریف می‌شود و سپس، براساس شبیه‌سازی متعدد (پانصد بار) نتایج حاصل می‌شود. درادامه، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی تشریح شده است.

۱.۱.۴ هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری

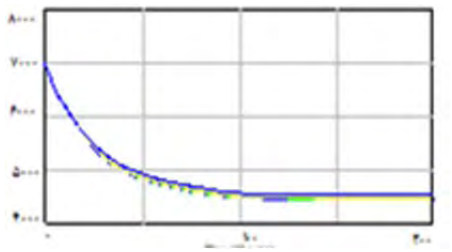
باتوجه‌به اطلاعات ارائه‌شده در مراجع تابع توزیع هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری به‌صورت U[۰.۰۵,۰.۰۸۲] در نظر گرفته شده است (Irena.org; www.pwc.co.uk). نتایج حاصل‌شده در شکل‌های ۲۴ تا ۲۷ نشان داده شده است. همان‌گونه‌که انتظار می‌رود، با افزایش هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری میزان جذابیت فناوری برای سرمایه‌گذاران کاهش می‌یابد که سبب کاهش نرخ نصب فناوری می‌شود و روند انتشار فناوری را کاهش می‌دهد.



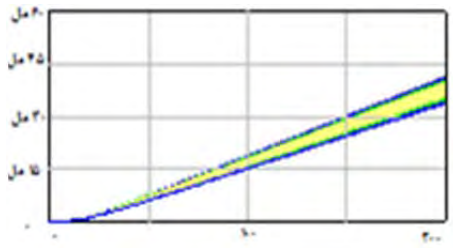
شکل۲۴. تأثیر تغییر هزینه تعمیرات و نگهداری بر تجمعی الکتریسته تولیدی توسط فناوری



شکل۲۵. تأثیر تغییر هزینه تعمیرات و نگهداری بر تجمعی فناوری نصب شده



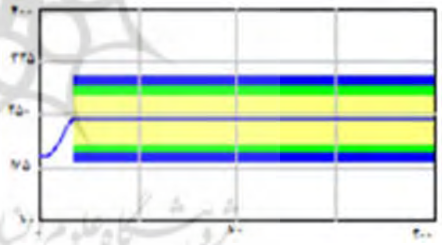
شکل ۲۶. تأثیر تغییر هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری در قیمت فناوری



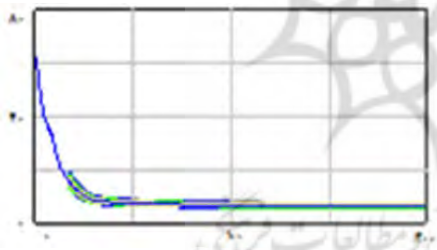
شکل ۲۷. تأثیر تغییر هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری در کل سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری

۲.۱.۴ قیمت برق

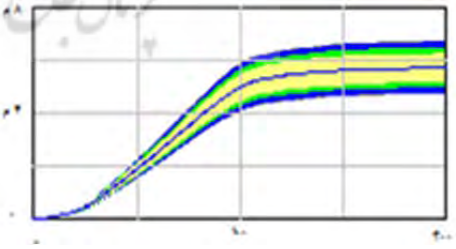
در شکل ۲۸ تغییرات قیمت برق در آینده نشان داده شده است. مثلاً با افزایش قیمت برق دورهٔ بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد (شکل ۲۹). جذابیت فناوری برای سرمایه‌گذاران افزایش پیدا می‌کند که باعث افزایش نصب فناوری در سال می‌شود (شکل‌های ۳۰ و ۳۱). سپس، براثر وجود پدیدهٔ یادگیری قیمت فناوری کاهش می‌یابد و سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳۲ و ۳۳).



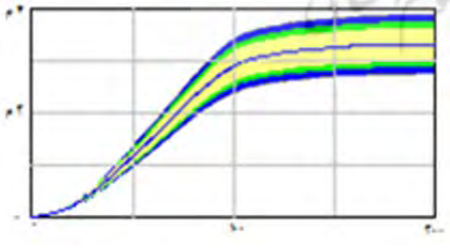
شکل ۲۸. تغییر قیمت برق



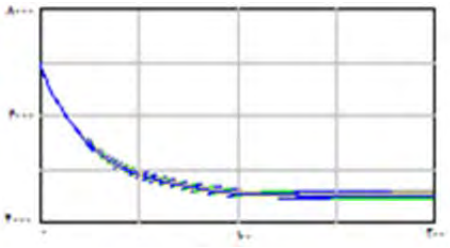
شکل ۲۹. تغییر قیمت بر دورهٔ بازگشت سرمایه



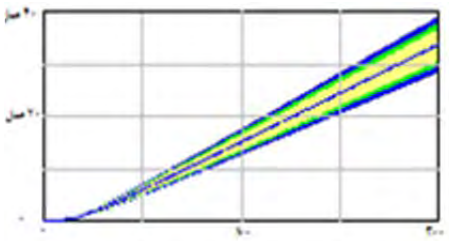
شکل ۳۰. تأثیر تغییر قیمت برق در تجمعی الکتریسیتهٔ تولیدی



شکل ۳۱. تأثیر تغییر قیمت برق در تجمعی تعداد فناوری نصب‌شده



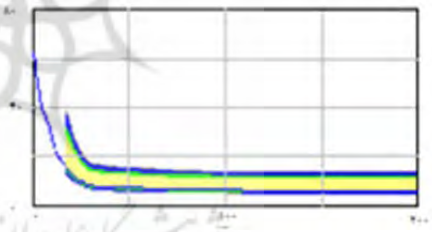
شکل ۳۲. تأثیر تغییر قیمت برق در قیمت فناوری



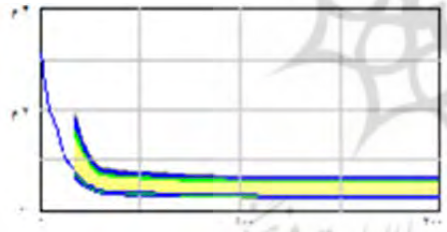
شکل ۳۳. تأثیر تغییر قیمت برق در کل سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری

۳.۱.۴ تأثیر نرخ یادگیری در قیمت فناوری

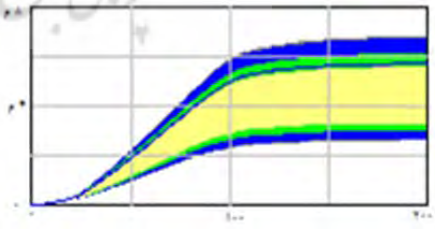
طبق تحقیقات انجام‌شده، نرخ یادگیری فناوری بیوگاز به‌صورت U[۰.۰۵,۰.۱] در نظر گرفته شده است (http://fs-unep- McDonald and Schrattenholzer 2015; Junginger et al. 2006; centre.org/ Agency 2014). مثلاً با افزایش نرخ یادگیری قیمت فناوری کاهش می‌یابد؛ درنتیجه، دورهٔ بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد (شکل ۳۴) و سبب افزایش نرخ نصب فناوری و تجمعی تعداد فناوری نصب‌شده می‌شود (شکل‌های ۳۵ تا ۳۷).



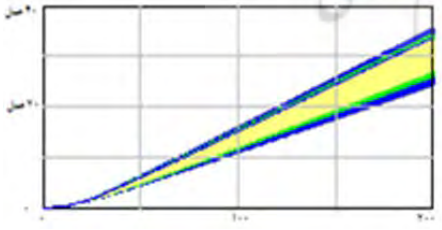
شکل ۳۴. تأثیر تغییر نرخ یادگیری در دورهٔ بازگشت سرمایه



شکل ۳۵. تأثیر تغییر نرخ یادگیری در تجمعی تعداد فناوری نصب‌شده



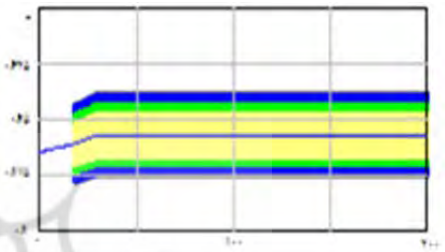
شکل ۳۶. تأثیر تغییر یادگیری در تجمعی الکتریسیته تولیدشده توسط فناوری



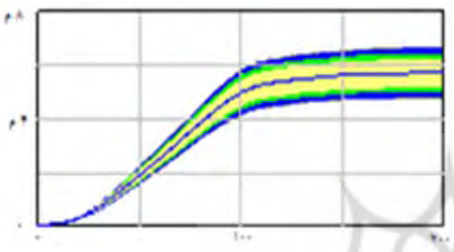
شکل ۳۷. تأثیر تغییر یادگیری در کل سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری

۴.۱.۴ تغییر قیمت تعرفه‌ای خرید برق در قیمت فناوری

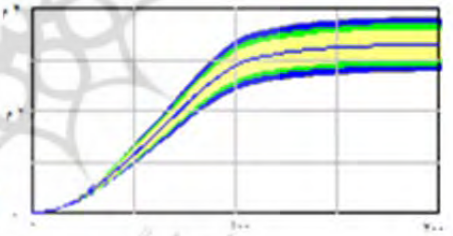
بازهٔ تغییر قیمت تعرفه‌ای برق با استناد به گزارش‌های ادارهٔ گاز و برق انگلستان (Office of Gas and Electricity) در شکل ۳۸ نشان داده شده است. افزایش نرخ تعرفه باعث افزایش درآمد و کاهش دورهٔ بازگشت سرمایه می‌شود. درنتیجه، تعداد فناوری نصب‌شده افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳۹ و ۴۰) که باتوجه‌به نرخ یادگیری سبب کاهش قیمت فناوری می‌شود (شکل‌های ۴۱ و ۴۲).



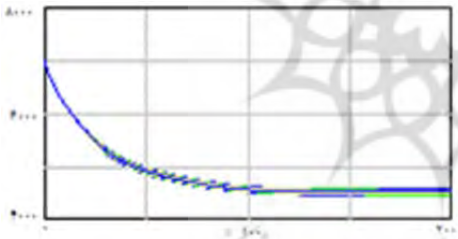
شکل ۳۸. تغییرات قیمت تعرفه‌ای خرید برق



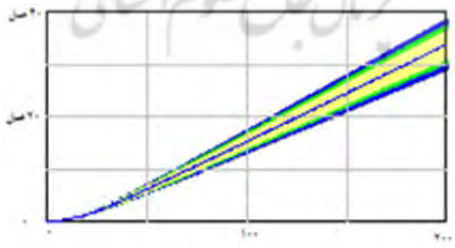
شکل ۳۹. تأثیر تغییر تعرفهٔ قیمت خرید برق در تجمعی الکتریسیتهٔ تولیدشده توسط فناوری



شکل ۴۰. تأثیر تغییر تعرفهٔ قیمت خرید برق در تجمعی تعداد فناوری نصب‌شده



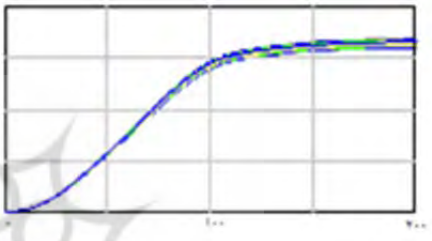
شکل ۴۱. تأثیر تغییر تعرفهٔ قیمت خرید برق در قیمت فناوری



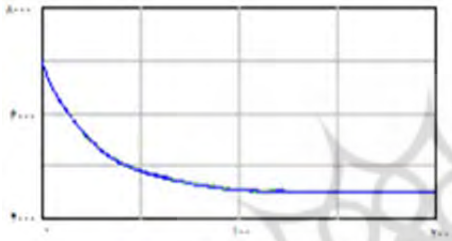
شکل ۴۲. تأثیر تغییر تعرفهٔ قیمت خرید در کل سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری

۵.۱.۴ تأثیر تغییر قیمت گواریده در قیمت فناوری

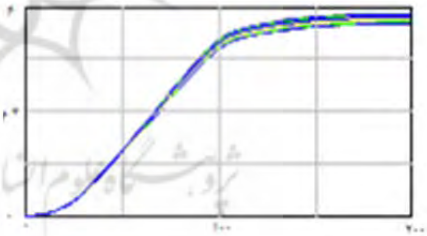
با جمع‌آوری داده از منابع گوناگون تابع قیمت گواریدهٔ جامد و قیمت گواریدهٔ مایع به‌صورت $U[۱۰۰,۱۶۰]$ در نظر گرفته شده است (University, Washington state). با افزایش قیمت گواریده درآمد افزایش می‌یابد. درنتیجه، دورهٔ بازگشت سرمایه کاهش خواهد یافت. سپس، انتشار فناوری افزایش می‌یابد و بنابر اصل یادگیری قیمت فناوری کاهش پیدا می‌کند (شکل‌های ۴۳ تا ۳۶).



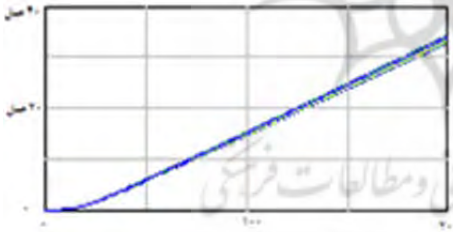
شکل ۴۳. تأثیر گواریده در تجمعی الکتریسیتهٔ تولیدی توسط فناوری



شکل ۴۴. تأثیر قیمت گواریده در تجمعی تعداد فناوری نصب‌شده



شکل ۴۵. تأثیر تغییر قیمت گواریده در قیمت فناوری



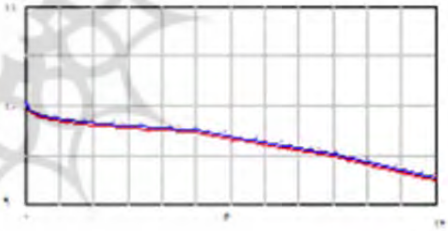
شکل ۴۶. تأثیر تغییر قیمت گواریده در کل سرمایه‌گذاری انجام‌شده در فناوری

۲.۴ تطبیق مدل برای ایران

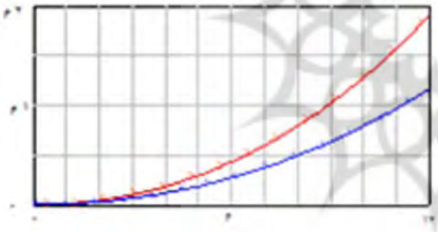
باتوجه‌به ماهیت انرژی تجدیدپذیر توجه جهانی برای توسعهٔ آن و داده‌های جمع‌آوری‌شده از سازمان بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر قیمت فناوری و هزینه‌های تعمیرات و نگه‌داری در همهٔ جهان تقریباً یک‌سان در نظر گرفته شده است. به همین علت، قیمت و هزینهٔ

تعمیرات و نگه‌داری فناوری در ایران نیز مشابه انگلستان در نظر گرفته شده است (Jeon and Shin 2014; ETSAP 2015).

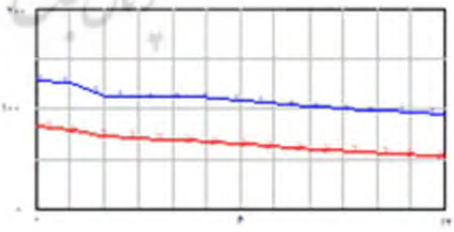
اطلاعات متغیرهای مربوط، مانند قیمت برق، یارانه، اعتبار کربن، قیمت خرید تعرفه‌ای برق، تولید ناخالص ملی، نیروی کار، و ... از سایت سازمان انرژی‌های نو ایران (Saina.org)، ترازنامه‌های انرژی، و بانک جهانی جمع‌آوری شده است. با نظرسنجی از خبرگانْ دورهٔ بازگشت سرمایهٔ مطلوب بین پانزده تا هجده سال در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی مدل برای ایران متغیری به نام قیمت سوخت اولیه به مدل اضافه شده است، زیرا در ایران هر تن فضولات دامی و مرغی قیمت مشخصی دارد که با اطلاعات جمع‌آوری‌شده از بازار مقدار آن به‌طور میانگین ۲۶ دلار به‌ازای هر تُن در نظر گرفته شده است. سپس، سناریوی تأثیر وجود یارانه و هزینهٔ اعتبار کربن در قیمت فناوری و میزان انتشار آن شبیه‌سازی شد و با سناریوی حال‌حاضر مقایسه شد. نتایج حاصل‌شده در شکل‌های ۴۷ تا ۵۱ نشان داده شده است.



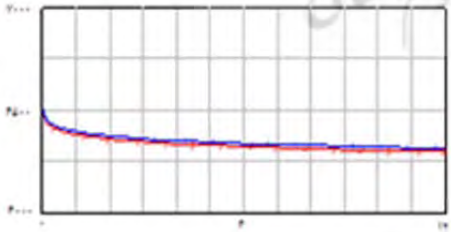
شکل ۴۷. مقایسهٔ سناریوی پیش‌نهادی و سناریوی حال حاضر برمبنای هزینهٔ تولید الکتریسیته



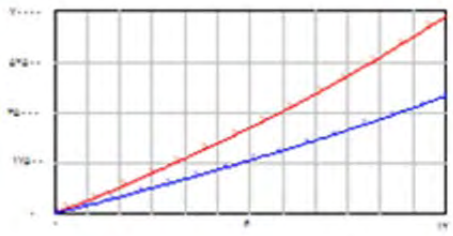
شکل ۴۸. مقایسهٔ سناریوی پیش‌نهادی و سناریوی حال حاضر برمبنای شاخص صرفه‌جویی در انتشار کربن



شکل ۴۹. مقایسهٔ سناریوی پیش‌نهادی و سناریوی حال‌حاضر برمبنای دورهٔ بازگشت سرمایه



شکل ۵۰. مقایسهٔ سناریوی پیش‌نهادی و سناریوی حال‌حاضر برمبنای قیمت فناوری



شکل ۵۱. مقایسهٔ سناریوی پیش‌نهادی و سناریوی حال‌حاضر برمبنای تجمعی الکتریسیتهٔ تولیدشده

۵. نتیجه‌گیری

باتوجه‌به اثر یادگیریْ انتشار فناوری در قیمت فناوری تأثیرگذار است؛ ازاین‌رو، متغیرهای تأثیرگذار در انتشار فناوری شناسایی شد و به دو دستهٔ حمایت‌های دولتی و بازار تقسیم شد. پس از اعتبارسنجی و شبیه‌سازی مدل برای انگلستان مشخص شد که حمایت‌های دولتی تأثیر به‌سزایی در توسعه و انتشار فناوری دارند. از بین تمامی حمایت‌های دولتی یارانه مؤثرترین عامل در انتشار فناوری شناخته شد.

پس از شبیه‌سازی مدل برای ایران مشخص شد که درصورت وجود یارانه و اعتبار کربن فناوری با سرعت بیش‌تری انتشار می‌یابد و قیمت نیز با شیب بیش‌تری کاهش می‌یابد. درانتها، قیمت فناوری در بلندمدت نیز تعیین شد. زندگی روزمرهٔ انسان‌ها وابستگی شدیدی به تولید و مصرف انرژی دارد؛ بنابراین، عرضه و تقاضای آن در جوامع بشری به‌طور مستمر رو به افزایش است. درحال‌حاضر، بیش‌تر از ۷۵ درصد کل انرژی مصرفی جهان را منابع هیدروکربنی تأمین می‌کند. سوخت‌های فسیلی با تولید گازهای آلاینده و گل‌خانه‌ای در فرایند تبدیل و درنتیجه، تخریب لایهٔ ازن زیست‌بوم را به‌شدت موردتهدید قرار می‌دهد و موجب گرم‌شدن بیش‌تر کرهٔ زمین می‌شوند. بنابراین، به‌منظور حفظ محیط زیست توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر ضروری به‌نظر می‌رسد.

بیوگاز یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر است و هاضم بی‌هوازی یکی از فناورهای بالغ در زمینهٔ تولید بیوگاز از پس‌ماند، زباله، فضولات، و ... است که به‌علت خواص منحصربه‌فرد، ازجمله توانایی بازیافت، در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری قرار گرفته است.

تجاری‌سازی فناوری در بازار وابسته به میزان قدرت ذی‌نفعان کلیدی و میزان سود و زیان حاصل از فناوری برای هریک از آن‌هاست. درصورتی‌که ارزش حاصل از فناوری

برای ذی‌نفعان حامی فناوری قابل‌توجه باشد و از قدرت لازم برخوردار باشد، احتمال تجاری‌سازی موفق فناوری به میزان زیادی افزایش خواهد یافت و برعکس. دولت، مالک، و خریدار فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر سه ذی‌نفع اصلی در فرایند قیمت‌گذاری فناوری‌های بیوگاز هستند. درنتیجه، با شناسایی و ارزش‌گذاری منافعی که هریک از ذی‌نفعان با توسعهٔ فناوری به‌دست می‌آورند، احتمال تجاری‌سازی موفق و میزان انتشار فناوری در بازار (بازار بالقوه) تعیین شد. اثر یادگیری که بیان‌گر کاهش قیمت فناوری درصورت انتشار فناوری است، مدل‌سازی شد. درنتیجه، با شناسایی متغیرهای تأثیرگذار در منافع ذی‌نفعان و نحوهٔ ارتباط آن‌ها با یک‌دیگر، درقالب یک مدل دینامیکی، قیمت فناوری با سناریوهای مختلف در آینده پیش‌بینی شد.

ازجمله منافع حاصل از توسعهٔ فناوری هاضم بی‌هوازی برای دولت صرفه‌جویی در انتشار کربن و افزایش امنیت انرژی است. حمایت‌های دولتی مانند یارانه، هزینهٔ اعتبار کربن، و نرخ تعرفه‌ای خرید برق ازجمله هزینه‌های دولت برای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر است. دورهٔ بازگشت سرمایه و قیمت فناوری به‌ترتیب شاخصی برای منافع خریدار و مالک فناوری در نظر گرفته شده‌اند.

متغیرهای مؤثر در انتشار فناوری به دو دستهٔ حمایت‌های دولتی و بازار تقسیم شدند و پس از شبیه‌سازی مشخص شد که حمایت‌های دولتی به‌نسبت متغیرهای بازار تأثیر بیش‌تری در انتشار و قیمت فناوری دارند. شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که یارانه مؤثرترین حمایت دولتی را در انتشار و قیمت فناوری دارد.

باتوجه‌به این‌که متغیرهایی مانند قیمت برق، یارانه، نرخ تعرفه‌ای خرید برق، و ... قطعیت ندارند، به‌منظور افزایش دقتْ شبیه‌سازی مونت کارلو نیز انجام شد تا قیمت فناوری با درنظرگرفتن عدم قطعیت در آینده نیز پیش‌بینی شود. مرز مدل طراحی‌شده در این مدل به دولت ختم می‌شود و ارتباط منافع دولت، مثل انتشار کربن با حمایت‌های دولتی در نظر گرفته نشده است. شناسایی و شبیه‌سازی ارتباطات یادشده باعث افزایش دقت تخمین قیمت و انتشار فناوری می‌شود. در این پژوهش فرض شده است که قیمت فناوری در بازار در ابتدای دوره کاملاً عادلانه است و منافع تمامی ذی‌نفعان در نظر گرفته شده است؛ درصورتی‌که متغیرهای تأثیرگذار در هزینهٔ سود مالک فناوری نیز در مدل دخیل شده باشد و ارتباط آن‌ها با یک‌دیگر و دیگر متغیرها مشخص شده باشد، دقت در پیش‌بینی قیمت فناوری افزایش خواهد یافت.

با استفاده از منطق فازی به‌منظور تعیین یک بازهٔ قیمتی برای خریدار و مالک فناوری اثر چانه‌زنی نیز به مدل اضافه شد و کارآیی مدل را افزایش خواهد داد. باتوجه‌به وجود سه ذی‌نفع، که هریک انتخاب‌های مخصوص به خود را دارند، انتظار می‌رود ترکیب نظریهٔ بازی‌ها با سیستم دینامیک دقت مدل را تاحد زیادی بهبود دهد. شبیه‌سازی تأثیر عرضه و تقاضا در قیمت و توسعهٔ فناوری سبب افزایش دقت پیش‌بینی می‌شود.

کتاب‌نامه

عدل، مهرداد و ابوالقاسم علی‌قارداشی (۱۳۸۰)، «بیوگاز در ایران (پتانسیل موجود، استحصال فعلی، دورنمای آینده)»، در: *مجموعه‌مقالات سومین همایش ملی انرژی*، تهران: کمیتهٔ ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو.

فطرس، محمدحسن، اکبر آقازاده، و سودا جبرائیلی (۱۳۹۳)، «رابطهٔ علّیت پانلی بین مصرف انرژی تجدیدپذیر و رشد اقتصادی؛ مقایسهٔ مناطق مختلف جهان»، *پژوهش‌نامهٔ اقتصاد کلان*، ش ۱۸.

Aslani, Alireza, Petri Helo, and Marja Naaranoja (2014), "Role of Renewable Energy Policies in Energy Dependency in Finland: System Dynamics Approach", *Applied Energy*, vol. 113.

Baashe, Jmae R. and Michael G. Duer (1975), "International Transfer of Technology: A Worldwide Survey of Chief Executive", in: *The Conference Board*, New York.

ETSAP, IEA (2015), "Biomass for Heat and Power" in: *International Renewable Energy*.

Fleten, S. E., Karl Magnus Maribu, and Ivar Wangensteen (2007), "Optimal Investment Strategies in Decentralized Renewable Power Generation under Uncertainty", *Energy*, vol. 32.

Forrester, J. (1989), "The Beginning of System Dynamics-Banquet", Talk at the International Meeting of the System Dynamics Society Stuttgart: <http://sysdyn.clexchange.org/sdep/papers. D-4165-1.pdf>.

Hemingway, James (2015), *Renewable Electricity Capacity and Generation*, Departeman of Energy & Climate Change (ed.), DECC Press Office.

IEA/ OECD. (2000), "Experience Curves for Energy Technology Policy", Paris, France: International Energy Agency.

International Index of Energy Security Risk (2015), Institute for 21st Century Energy.

Jeon, Chanwoong and Juneseuk Shin (2014), "Long-Term Renewable Energy Technology Valuation Using System Dynamics and Monte Carlo Simulation: Photovoltaic Technology Case", *Energy*, vol. 66.

Junginger, Martin et al. (2006), "Technological Learning in Bioenergy Systems", *Energy Policy*, vol. 34.

Kumbaroğlu, Gürkan, Reinhard Madlener, and Mustafa Demirel (2008), "A Real Options Evaluation Model for the Diffusion Prospects of New Renewable Power Generation Technologies", *Energy Economics*, vol. 30.

McDonald, Alan and Leo Schrattenholzer (2001), "Learning Rates for Energy Technologies", *Energy Policy*, vol. 29.

Neij, Lena (2008), "Cost Development of Future Technologies for Power Generation; A Study Based on Experience Curves and Complementary Bottom-up Assessments", *Energy Policy*, vol. 36.

Norin, Erik (1998), "BIOGAS–Eller vad man kan göra av ruttna äpplen", Swedish Biogas Association, Stockholm.

Sovacool, Benjamin K. and A. Brown Marilyn (2010), "Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective", *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 35.

UK's Department for Environment, Food and Rural Affairs/ DEFRA (2011), "Anaerobic Digestion Strategy & Action Plan", in: University, Washington State, "Freight Policy Transportation Institute": <www.fpti.wsu.edu>.

http://www.biogaschina.org/index.php?option=com_flexicontent&view=category&cid=18&Itemid=35&lang=en20080422.

http://www.fs-unep-centre.org.

http://www.ocw.mit.edu/terms. 2010.

http://www.jrc.ec.europa.eu.

http://www.pwc.co.uk.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی