فصلنامه اقتصاد انرژی ایران
سال سوم، شماره ۹، زمستان ۱۳۹۲، صفحات ۲۱۵-۱۹۹

بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای: رویکرد پویایی سیستمی

داوود منظور* و حسین رضائی**

تاریخ دریافت: ۲۸ آبان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۱ اسفند ۱۳۹۲

چکیده

انتظار می‌رود اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها در بازار برق مقررات زدایی شده کشور به افزایش قیمت برق در بازار و در نتیجه تغییر در تولید برق و به تبع آن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر شود. جهت سنجش کمّی اثرات اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها بر میزان انتشار آلاینده‌ها در کشور، در این مقاله بازار برق مقررات زدایی شده به روش پویایی سیستمی مدل سازی می‌شود. این مدل دارای بخش‌های نرخ بازگشت سرمایه گذاری، حجم سرمایه گذاری،تولید، تقاضا و قیمتاست که برای شبیه سازی آن از نرم افزار پاورسیم[1] استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند قیمت های قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها در چارچوب مدل، پیش بینی می‌شود میزان آلاینده‌های کربنی از۱۵٦ میلیون تن درهر تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۵ درصد رشد سالیانه به ۲۷۷/۸ میلیون تن برای گازهای گلخانه ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاینده در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید. با اجرای مرحله اول قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و افزای شقیمت سوخت تحویلی به نیروگاه ها، تولید برق و به تبع آن میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی کاهش محسوسی خواهد داشت. نتایج مدل نشان می‌دهد با حفظ رشد اقتصادی ٥/٤ درصد، میزان تولید آلاینده‌های زیست محیطی در پایان دوره نسبت به زمان عدم اجرای طرح تحول ادرصد کاهش رشد سالیانه خواهد داشت و درصورت افزایش رشد اقتصادی به ۸ درصد، میزان انتشار سالانه حدود ۳ درصد افزایش رشد سالیانه خواهد داشت. همچنین درصورت افزایش رشد راندمان نیروگاهها براساس قانون پنجم توسعه، با رشد ٥/٤ درصدی ۰/٦ درصد کاهش رشد سالیانه و در صورت رشد ۸ درصدی،

* دانشیار دانشگاه امام صادق علیه السلام- دانشکده اقتصاد manzoor@isu.ac.ir
** دانشجوی دکتری دانشگاه امام صادق علیه السلام Hrezaee@isu.ac.ir

1. POWERSIM

www.SID.ir

حدود ۰/٤ درصد نسبت به پیش از اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها افزایش رشد خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بازار برق– ظرفیت نیروگاهها، تولید انرژی الکتریکی- قیمت برق– پویایی سیستمی.

طبقه‌بندی JEL: C61، P22، C63، D50، D43.

۱. مقدمه

استفاده از انرژی مطمئن کلید رشد و توسعه اقتصادی کشورها محسوب می‌شود، هر چند انرژی فسیلی عمده ترین و رایج‌ترین انرژی مورد استفاده در تمامی کشورها محسوب می‌شود، لیکن آلودگی زیست محیطیاز مهمترین پیامدهای خارجی استفاده از سوختهای فسیلی است که تاثیرات منفی گرانباری بر کره زمین برجای نهاده است. تعریف آلودگی محیط زیست موجب تنزل کیفیت محیط زیست از طریق افزودن ماده یاشکلی از انرژی نسبت به مقدار طبیعی آن می‌شود بطوری‌که سلامت انسان را تهدید می‌کند. در فرآیند تولید تا مصرف انرژی برق علاوه بر آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده، آلودگی ناشی از میدانیهای الکترومغناطیس نیز رخ می‌دهد. در این مقاله صرفا به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها می‌پردازیم.

آمارها نشان می‌دهد که میزان انتشار دی اکسید کربن به ازای تولید یک کیلووات ساعت برق در کشور ۶۷۷/۸ گرم است که بر این اساس ایران بعد از هندوستان ، عربستان، چین و اندونزی، در رتبه پنجم جهان قرار دارد (IEA,2013). همچنین سرانه انتشار دی اکسید کربن ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور در سال ۱۳۹۰ معادل ۷/۲۱ تن است که از لحاظ رتبه در جهان هفتم و در خاورمیانه بعد از عربستان رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. سیاستگذاری برای کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوختهای فسیلی مستلزم توجه به دو متغیر سطح مصرف انرژی و نوع فن‌آوری مورد استفاده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که قیمت اسمی و قیمت های نسبی مهمترین عوامل موثر بر این دو متغیر هستند (Schmitz,2001). بنابراین سیاستهای اصلاح قیمت و مالیات بر کربن می‌تواند بر میزان مصرف و ارتقاء فن‌آوری های مصرف انرژی و به تبع آن کاهش انتشار تاثیر به سزایی داشته باشد.

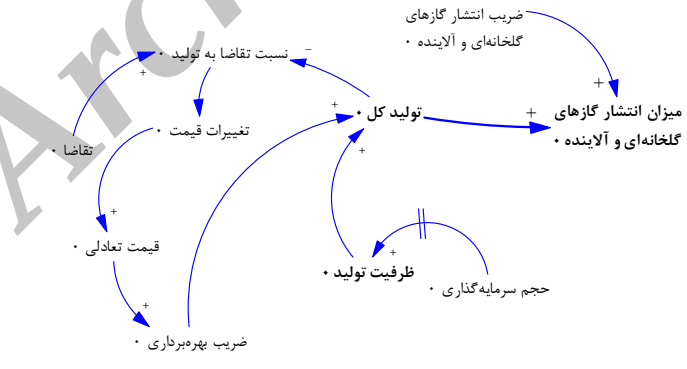
www.SID.ir

مطالعات تجربی نشان می‌دهد با افزایش قیمت حاملهای انرژی در کشور، هم سطح مصرف حاملهای انرژی کاهش می‌یابد (منظور، رضائی، ۱۳۸۹) و هم فن‌آوری استفاده از انرژی تحت تاثیر قرار می‌گیرد (منظور و دیگران، ۲۰۰۹). با توجه به اینکه استفاده از انرژی های فسیلی عامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند انتظار می‌رود اصلاح قیمت‌های انرژی می‌تواند تاثیر چشمگیری در کاهش انتشار در کشور داشته باشد.

هدف این مقاله بررسی میزان تاثیر افزایش قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه ها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در نیروگاه‌ها است.برای این منظور با استفاده از رویکرد پویایی سیستمی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده تحت سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، در قسمت دوم ساختار کلی بازار برق در قالب نمودارهای علّی-معلولی و نمودارهای جریان حالت تشریح شده، ضمن معرفی داده‌های مورد استفاده مقادیر پارامترهای الگوی پیشنهادی تعیین می‌شود. در قسمت سوم نتایج حاصل از شبیه سازی مدل تحت سناریوهای مختلف تجزیه و تحلیل می‌شود. قسمت پایانی به جمع بندی و نتیجه گیری می پردازد.

۲. مدل پیشنهادی

در این مدل روابط علی- معلولی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده توسط نیروگاه ها در چارچوب بازار برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرید. به این منظور بازار برق با استفاده از روابط علّی و معلولی در سه بخش شامل تقاضا، تولید و قیمت مدلسازی می‌شود. (نمودار ۱). طبعا انتشار آلاینده‌ها در بخش تولید رخ می‌دهد.



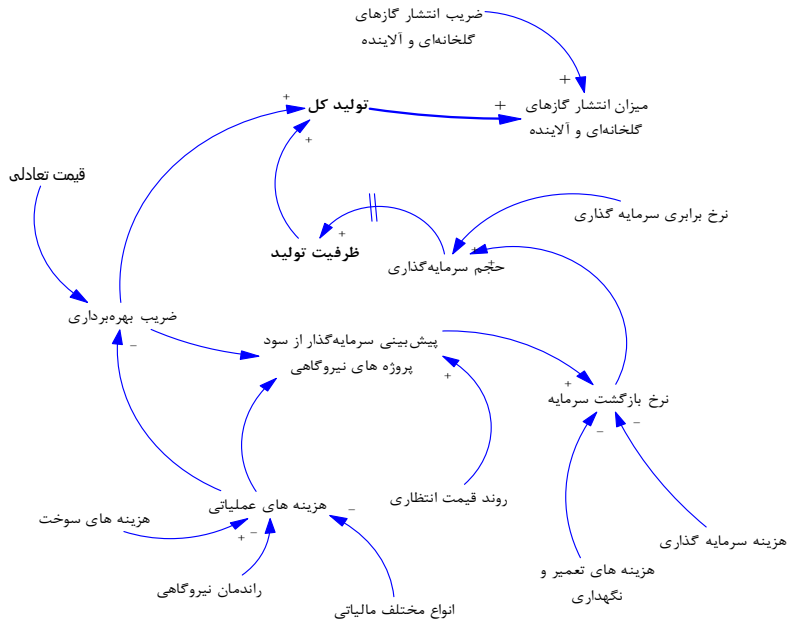
نمودار ۹. روابط علّی- معلولی بازار برق

منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

Archive of SID

www.SID.ir

در زیرمدل تولید، به توضیح نحوه تصمیم‌گیری تولیدکنندگان برق به‌ویژه تصمیمات مربوط به سرمایه‌گذاری در احداث نیروگاه‌های جدید و بهره‌برداری از نیروگاه‌های موجود می‌پردازیم (نمودار ۲).



نمودار ۱۰. نمودار علّی–معلولی تولید و سرمایه گذاری نیروگاه‌ها

منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

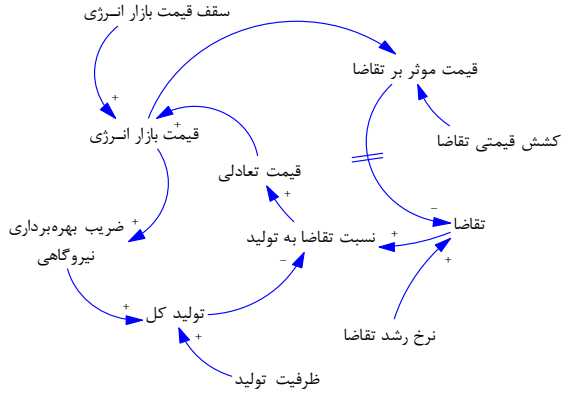
همانطور که ملاحظه می شود سرمایه گذاری های جدید نیروگاهی با توجه به پیش‌بینی سرمایه گذار از سود پروژه‌های نیروگاهی انجام می شود که این سود نیز به نوبه خود تحت تاثیر قیمت انتظاری ، هزینه‌های عملیاتی و ضریب بهره‌برداری از نیروگاه است. افزایش قیمت انتظاری و ضریب بهره برداری سود عملیاتی مورد انتظار را افزایش داده و افزایش هزینه‌ها عملیاتی سبب کاهش آن می شود. افزایش سود در مقابل افزایش مورد انتظار سبب افزایش نرخ بازگشت سرمایه و درنتیجه کاهش سرمایه‌گذاری نیروگاهی می شود. هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه‌های سرمایه گذاری سبب کاهش نرخ بازگشت سرمایه و درنتیجه کاهش سرمایه‌گذاری نیروگاهی می شود به‌هرحال، افزایش ظرفیت نیروگاهی با دو نوع وقفه مواجه است. زمان لازم برای تقاضای مجوز ساخت و بررسی و دریافت تاییدیه آن وقفه اول و زمان لازم برای انجام سرمایه‌گذاری

www.SID.ir

تاخیر دوم محسوب می‌شود که در مدل لحاظ شده است. با افزایش سرمایه‌گذاری، ظرفیت تولید نیروگاه‌ها افزایش می یابد.

بهربرداری از نیروگاه‌های موجود برای تولید برق تابعی از ضریب بهره برداری[1] و ظرفیت نیروگاهی موجود است. ضریب بهره‌برداری با قیمت برق رابطه مستقیم و با هزینه‌های عملیاتی رابطه‌ای معکوس دارد. سرانجام اینکه میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای به حجم تولید نیروگاه‌های حرارتی و ضریب انتشار آلاینده بستگی دارد.

نمودار (۳) زیرمدل تقاضا را نشان می‌دهد. براساس این نمودار تغییرات تقاضا تابعی از عوامل قیمتی و عوامل حقیقی در اقتصاد است. قیمت تاثیر منفی و عوامل حقیقی تاثیر مثبت بر تقاضا دارند. افزایش تقاضا به خودی خود سبب افزایش نسبت تقاضا به تولید شده، که این امر افزایش قیمت در بازار برق موجب می‌شود. افزایش قیمت بازار برق تعادلی به نوبه خود کاهش تقاضا را در بازخورد بعد موجب می‌شود.



نمودار ۳. روابط علّی – معلولی تقاضا

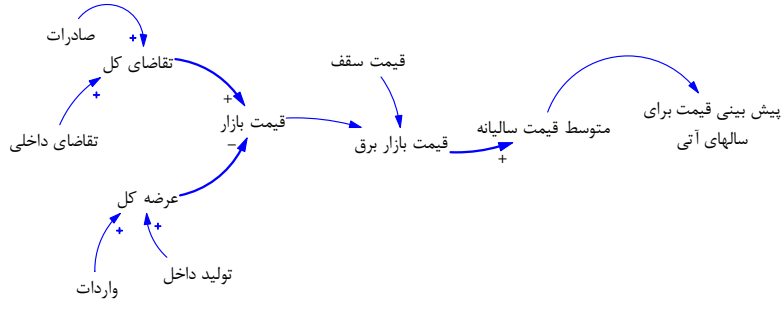
منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

نمودار (۳) روابط علّی – معلولی قیمت را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایشتقاضا سبب افزایش نسبت تقاضا به عرضه و در نتیجه افزایش قیمت بازار برق می‌شود. افزایش قیمت تعادلی در نهایت با رعایت سقف قیمت بازار سبب افزایش قیمت متوسط سالیانه بازار برق می‌شود.

۱. ضریب بهره برداری (capacity factor) بیانگر درصد استفاده از ظرفیت کامل نیروگاه در یک دوره زمانی معین است.

www.SID.ir

افزایش قیمت متوسط سالیانه بازار برق از یک طرف سبب کاهش تقاضا و در نهایت کاهش نسبت تقاضا به عرضه و از طرف دیگر سبب افزایش ضریب بهره‌برداری نیروگاهی می‌شود. با ثابت بودن هزینه‌های عملیاتی انواع مختلف نیروگاه‌ها، افزایش ضریب بهره برداری سبب افزایش تولید و کاهش نسبت تقاضا به تولید می‌شود که در نهایت تاثیر منفی بر قیمت بازار برق دارد. بنابراین افزایش قیمت از یک سو سبب کاهش تقاضا و از سوی دیگر سبب افزایش تولید شده، بازار به تعادل بازمی‌گردد.



نمودار ۱۱. روابط علّی – معلولی قیمت

منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

بیان ریاضی روابط علّی – معلولی

در این قسمت اهم روابط علّی و معلولی را که در قسمت قبل معرفی شد، با استفاده از توابع معمول در نرم‌افزار پاورسیم، به زبان ریاضی بیان می‌شود.

میزان تولید نیروگاه نوع iام که در مرحله v از چرخه عمر خود قرار دارد از حاصل ضرب ظرفیت آن در ضریب بهره‌برداری و ساعات کل سال حاصل می‌شود .

$$G_{i,v}= Ca_{i,v}\times CF_{i,v}\times hr \qquad [twh/yr] \qquad (۱)$$

با توجه به رابطه فوق، $G_{i,v}$ تولید کل انواع نیروگاه‌ها و $CF_{i,v}$، ضریب بهره‌برداری فن‌آوری نیروگاهی نوع iام از مرحله v چرخه عمر و hr تعداد ساعات در طول سال است. همچنین:

$$TG=Im + \sum_{i\in T, v\in V} G_{i,v} \qquad [twh/yr] \qquad (۲)$$

$$NG= TG \times(1- gl) \qquad [twh/yr] \qquad (۳)$$

$$Hr=8760 \qquad [hr/yr] \qquad (۴)$$

Archive of SID

www.SID.ir

با توجه به روابط فوق، TG تولید کل شبکه، Im واردات، NG تولید خالص و gl تلفات شبکه انتقال است.مقدار تولید هر نیروگاه تابعی از ظرفیت و ضریب بهره‌برداری آن نیروگاه است و قیمت بازار برق عامل مهمی در مقدار این ضریب به‌شمار می‌رود.

ضریب بهره‌برداری نیروگاه که بیانگر درصد استفاده از ظرفیت کامل یک نیروگاه در یک دوره زمانی معین را نشان می‌دهد[۱]، تابعی از قیمت بازار، هزینه سوخت، بازده نیروگاه، مالیات و یارانه‌ها است. به طور خلاصه، ضریب ظرفیت را متناسب با نسبت قیمت بازار برق و معکوس هزینه‌های عملیاتی درنظر می‌گیریم. برای حصول نتایج دقیق‌تر، ضریب بهره‌برداری را برای انواع مختلف نیروگاه و مراحل مختلف چرخه عمر نیروگاه‌های متفاوت درنظر می‌گیریم.

$$CFi, v = CF(P, Fci, efi, v, Ti) \qquad \forall i \qquad (۵)$$

$$CF_{i,v} = \frac{P}{oc_{i,v}} \qquad \% \qquad (۶)$$

$$Oc_{i,v} = \frac{Fc_i - so_i}{ef_{i,v}} + T_i \qquad [Rial/MWh] \qquad (۷)$$

$$Em_i = G_i \times Ein_i \qquad [Mt\ CO2/yr] \qquad (۸)$$

$$TEm_i = \sum_{i \in T} Em_i \qquad [Mt\ CO2/yr] \qquad (۹)$$

$$E_i n_i = constant \qquad [kg\ CO2/MWh] \qquad (۱۰)$$

v مراحل مختلف چرخه عمر نیروگاهی (جدید، میانی و قدیم)،P قیمت بازار برق، $oc_{i,v}$ هزینه عملیاتی نیروگاه iام از زنجیره v، fc_iهزینه سوخت نیروگاه نوع iام، T_i اثر مداخلات (مالیات کربن) بر هزینه عملیاتی نیروگاه نوع iام، so_i یارانه پرداختی به نیروگاه‌ها، $ef_{i,v}$ کارایی نیروگاه iام از زنجیره v است. متوسط سالیانه CF_i برای برآورد هزینه‌های نهایی بلندمدت استفاده می‌شود. Em_i میزان انتشار نیروگاه iام ، Ein_i شدت انتشار آلودگی و G_i تولید نیروگاه نوع iام است. شدت انتشار بیانگر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و آلاینده برحسب کیلوگرم برای تولید یک مگاوات ساعت برق است.TEm_iمقدار کل انتشار در سال است.

ظرفیت نیروگاهی یکی از متغیرهای مهم در زیر مدل تولید است که دراینجا به توضیح آن می پردازیم. رابطه (۱۱)، حجم سرمایه‌گذاری در حال ساخت در هر دوره زمانی ($IV_{i,t}$) به ظرفیت

۱. تراز نامه انرژی- فصل تعریف مفاهیم

Archive of SID

www.SID.ir

نصب شده نیروگاهی(CA_i)، درخواست مجوزهای سرمایه‌گذاری جدید متاثر از شاخص (fap_i) سودآوری و نرخ سرمایه‌گذاری (EI_i) بستگی دارد. نرخ معادل سرمایه‌گذاری بیانگر میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای حفظ سهم هر گروه از نیروگاه‌ها در سبد تولیدی شبکه است که با عکس عمر نیروگاه متناسب است. اثر سودآوری بر سرمایه‌گذاری در واحدهای نیروگاهی از نسبت بازگشت سرمایه (ROI_i) و حداقل نرخ بازگشت سرمایه ($RROI_i$) برای شروع سرمایه‌گذاری حاصل می‌شود.

$$Iv_{i,t} = MIN(pv_{i,t}, CA_i \times fap_i \times EI_i) \qquad [MW/yr] \qquad (۱۱)$$

$$CA_i = \sum_{v \in V} Ca_{i,v} \qquad [MW] \qquad (۱۲)$$

$$EI_i = 1/Lf_i \qquad [1/yr] \qquad (۱۳)$$

$$Pv_{i,t} = Pv_{i,0} + \int (pc_{i,t} - Iv_{i,t} - prj_{i,t}) \cdot dt \qquad (۱۴)$$

$$fap_i = GRAPH\ (ROI_i/RROI_i,\ \alpha_1 \text{، } \alpha_2 \text{، } \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, ..., \beta_n\}) \qquad (۱۵)$$

$$RROI_i = 1 + Ir \qquad (۱۶)$$

$$Ir = constant \qquad (۱۷)$$

$Iv_{i,t}$حجم سرمایه‌گذاری در حال ساخت در هر دوره زمانی،EI_i نرخ سرمایه‌گذاری تعادلی، CA_i ظرفیت نصب شده فعلی نیروگاه iام، fap_i ضریب تاثیر شاخص سودآوری بر درخواست مجوزهای سرمایه‌گذاری جدید،β_i و α_i مقادیر ثابت و داده شده هستند. Lf_i دوره عمر نیروگاه نوع iام. با توجه به روابط فوق، $pc_{i,t}$ تایید نهایی نیروگاه نوع iام در دوره، $prj_{i,t}$ مقدار رد شدن طرح‌های نیروگاه نوع iام، $pv_{i,t}$ حجم طرح‌های سرمایه‌گذاری تایید شده و در نهایت Ir نرخ بازگشت داخلی است.

مهمترین روابط ریاضی زیرمدل قیمت و تقاضا را در قالب علائم مورد استفاده در نرم افزار پاورسیم به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$P_{eq} = P_0 + \int_{s=1}^{t} \Delta P_s \, dt \qquad [NOK/MWh] \qquad (۱۸)$$

$$= [(P_{eq} \times (D_t - TG))/ D_t] \times \frac{1}{AT} \Delta P_s \qquad [Rial/MWh/da] \qquad (۱۹)$$

$$P_0 = constant \qquad [Rial /MWh] \qquad (۲۰)$$

$$Q_d = D_t \times D_v \qquad TWh/yr]$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$_t = D_0 + \int_{s=1}^{t} \Delta D_t \, dt \qquad [TWh/yr] \qquad (۲۲)$$

$$D_0 = constant \qquad [TWh/yr] \qquad (۲۳)$$

$$P_{eq} = P_0 + \int \Delta P_t \, dt \qquad [RIAL/MWh] \qquad (۲۴)$$

$$= D_t \times (\dot{D}_r + \dot{D}_p)\, \Delta D_t \qquad [TWh/yr] \qquad (۲۵)$$

$$= \dot{G}_r + \dot{p}_{op}\, \dot{D}_r \qquad [1/yr] \qquad (۲۶)$$

$$P_{fcs} = FORECAST(Average\ Price,\ 3\ yr,\ 4\ yr) \qquad [RIAL/MWh] \qquad (۲۷)$$

با توجه به روابط فوق، D_t تقاضای سالیانه، ΔD_t تغییرات تقاضای سالیانه، P_{eq} قیمت تعادلی بازار برق، P_0 قیمت اولیه در سال مبنا، ΔP_t تغییرات قیمت در سال t، $\dot{D}_r$ نرخ تغییرات تقاضا ناشی از عوامل حقیقی معادل مجموع نرخ رشد جمعیت ($\dot{p}_{op}$) و نرخ رشد تولید ملی حقیقی ($\dot{G}_r$)، $\dot{D}_p$ تغییرات تقاضا ناشی از عامل قیمت و AT تعدیل زمانی است. P_{fcs} پیش‌بینی قیمت در سال‌های آینده است که برای محاسبه آن از دستور پیش‌بینی در نرم‌افزار پاورسیم[1] استفاده می‌شود.

۳. داده‌های مورد استفاده

همانگونه که ملاحظه می‌شود این مدل شامل پارامترهای برونزای متعددی است که مقادیر آنها باید پیش از حل مدل با توجه به وضعیت سالهای سالهای گذشته صنعت برق کشور تعیین شود. عناوین این پارامترها و مقادیر مورد استفاده برای آنها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مقادیر مفروض برای پارامترهای مدل

نام متغیر	علامت اختصاری	مقدار	نام متغیر	علامت اختصاری	مقدار
نرخ تغییرات واقعی تقاضا (درصد)	$\dot{D}_r$	۶/۴	کشش قیمتی بلندمدت تقاضای برق	E_P	۰/۸۶ −
قیمت[2] اولیه بازار برق در سال ۸۸ (ریال بر کیلووات ساعت)	P_0	۱۶۵	سقف قیمت بازار (ریال بر کیلووات ساعت)	P_{cei_0}	۵۰۰
تقاضای اولیه (تراوات ساعت در سال)	D_0	۱۶۷/۵	نرخ رشد سقف قیمت بازار(درصد)	$\dot{p}_{cer}$	۰/۱

1. FORECAST

Archive of SID

www.SID.ir

صادرات بر حسب گیگاوات ساعت[3]	Ex	۶۱۵۲	واردات بر حسب گیگاوات ساعت[4]	Mp	۲۰۶۸
قیمت صادرات بر حسب ریال بر گیگاوات ساعت	P_{ex}	۴۶۰	قیمت واردات بر حسب ریال بر گیگاوات ساعت	P_{mp}	/۶ ۲۳۲
متوسط راندمان نیروگاه‌ها (درصد)	ef	۳۶/۲	هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاه‌های گازی	FC_{gt}	۱۷/۷
هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاه‌های بخاری	FC_{st}	۱۱/۲	هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی	FC_{cc}	۱۱/۸
تعداد ساعات سال	FC_{gt}	۸۷۶۰	نرخ رشد قیمت برق طی سالهای ۸۸-۸۰ (درصد)	$\dot{P}_t$	۷/۳
نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	FC_{cc}	۵/۴	نرخ رشد جمعیت	$\dot{p_{op}}$	۱/۷

ماخذ: ۱- سایت بانک مرکزی. ۲-سایت شرکت مدیریت شبکه برق ایران. ۳و۴- دفتر روابط برون‌مرزی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران

اجرای مدل‌های پویایی سیستمی مستلزم دراختیارداشتن مقادیر اولیه متغیرها در ابتدای دوره شبیه‌سازی است. جدول (۲) مقادیر اولیه متغیرهای مدل را نشان می‌دهد:

جدول ۲. مقادیر اولیه زیرمدلهای تولید، ارزیابی سودآوری سرمایه‌گذاری، فرآیند درخواست مجوز و سرمایه‌گذاری وزنجیره ظرفیت

نام متغیر	علامت اختصاری	گازی	بخاری	سیکل‌ترکیبی	برق‌آبی	بادی
هزینه تعمیر و نگهداری (R/MWh)	$O\&M_i$	۲۲۵۹۹/۱	۶۶۸۸۷/۲	۳۲۵۲۶/۹	۲۶۷۱۲/۳	۲۲۵۹۹/۱
هزینه سوخت تحویلی (R/MWh)	fc_i	۱۷/۸	۱۱/۳	۱۱/۸	۰	۰
مجوز درخواست اولیه (MW)	$Papp_{i,0}$	۲۲۳۰	۳۵۵۵	۴۰۱۸۳	۴۸۷۷	۱۹۵۹
نرخ سرمایه‌گذاری تعادلی	El_i	۰/۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲	۰/۰۵
مدت زمان ساخت نیروگاه‌ها (yr)	Ct_i	۲	۵	۵	۷	۳
طول عمر نیروگاه‌ها (yr)	Lf_i	۲۰	۳۰	۳۰	۵۰	۲۰
ظرفیت‌های درحال ساخت	$Cu_{i,t}$	۲۲۶۹۰	۶۴۰	۱۷۳۴۰	۴۵۷۰	۱۹۵۹

Archive of SID

www.SID.ir

(MW)						
شدتانتشار گازهای آلاینده نیروگاهی (گرم بر کیلووات ساعت)	Eini		۱۰۶۸	۹۸۵	۶۱۱	۰	۰
ظرفیت نیروگاه‌ها (MW)	جدید	$Nc_{i,t}$	۱۶۹۴	۳۲۵۰	۱۰۴۷۹	۵۴۲۲	۶۳
	میان سال	$Imc_{i,0}$	۵۹۳۳	۴۹۲۵	۰	۸۵	۱۵۲
	قدیمی	$Oc_{i,0}$	۳۴۸۹	۷۴۷۵	۰	۱۹۱۴	۰
راندمان نیروگاه‌ها[۳] (درصد)	جدید	$ef_{i,n}$	۲۹/۹	۴۵	۴۷	۱۰۰	۱۰۰
	میان سال	$ef_{i,m}$	۲۹	۳۹	۴۱/۵	۱۰۰	۱۰۰
	قدیمی	$ef_{i,o}$	۲۵	۳۵	۴۰	۱۰۰	۱۰۰

ماخذ: ۱- ترازنامه انرژی، وزارت نیرو، ۱۳۸۷. ۲- آمار تفصیلی صنعت برق ایران،۱۳۸۷ ۳- گزارش ۴۱ سال صنعت برق ایران. راندمان هر خوشه از میانگین‌گیری وزنی راندمان ظرفیت‌های نصب شده در آن خوشه محاسبه شده است

٤. شبیه سازی مدل

در این بخش، روند انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از بخش نیروگاهی کشوردر یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۹) شبیه‌سازی می‌شود.

از حل مدل جواب متغیرهای درون‌زای مدل تعیین می‌شود. این مدل دارای بیش از ۲۰ متغیر درونز است که در این جا صرفا نتایج مربوط به متغیرهای انتشار گازهای آلاینده وگلخانه‌ای از بخش نیروگاهی کشور گزارش می شود. ابتدا مدل براساس فرض استمرار روند قیمت های سوخت نیروگاهی در سالهای قبل از ۱۳۸۹ اجرا می‌شود. سپس قیمت سوخت نیروگاه ها با توجه به افزایش قیمت ها در سال ۱۳۸۹ در اجرای مرحله اول قانون هدفمندی یارانه‌ها، تعدیل شده، اثرات آن در میزان انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده در دوره (۹۸-۱۳۸۹) شبیه سازی می‌شود. نکته قابل ذکر این است که مدل براساس قیمت های ثابت اجراء شده است و به دلیل اینکه فضای تحریم بر عملکرد بازار برق اثر مستقیم ندارد در مدل لحاظ نشده است.

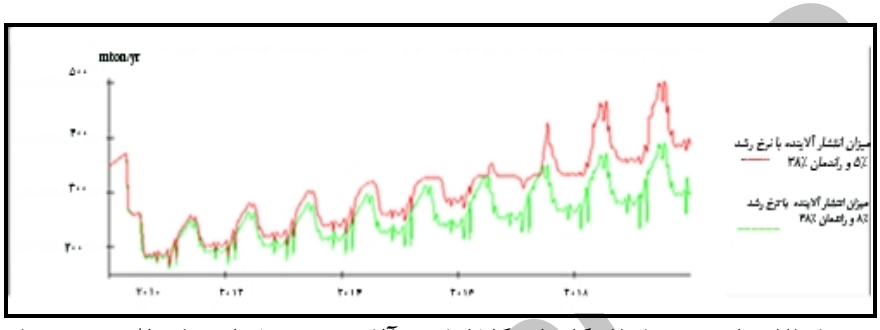
میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از بخش نیروگاهی کشوربه سطح تولید برق و کیفیت نیروگاه های فعال بستگی دارد. بنابراین انتظار می رود در صورت ادامه روند قیمت های پایین سالهای قبل از ۱۳۸۹، رشد بالای تقاضای برق تداوم یافته، انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از بخش نیروگاهی کشور روند نگران‌کننده قبلی را داشته باشد. به هر حال ، با افزایش

Archive of SID

www.SID.ir

قیمت سوخت نیروگاهی انتظار می رود ترکیب نیروگاه ها، میزان تقاضای برق و به تبع آن میزان انتشار گازها آلاینده و گازهای گلخانه‌ای تعدیل شود.

در صورت استمرار قیمت های سوخت نیروگاهی در سال های قبل از اجرای مرحله اول قانون هدفمندی، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده با فرض نرخ رشد اقتصادی ۵/۴ درصد و ۸ درصد [۱] در نمودار (۵) نشان داده شده است.



نمودار ۱۲. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در نرخ‌های رشد ٥/٤ درصد و ۸ درصد پیش از اصلاح قیمت‌های سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

از اجرای مدل پیشنهاد، روند انتشار گازهای آلاینده و زیست محیطی به دنبال اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها با فرض نرخ رشد اقتصادی ۵/۴ درصد و ۸ درصد و متوسط راندمان نیروگاهی ۳۶٪ [۲] و ۴۵٪ [۳] در افق برنامه‌ریزی (۹۸-۱۳۸۹) در نمودارهای (۶) و (۷) نشان داده شده است.

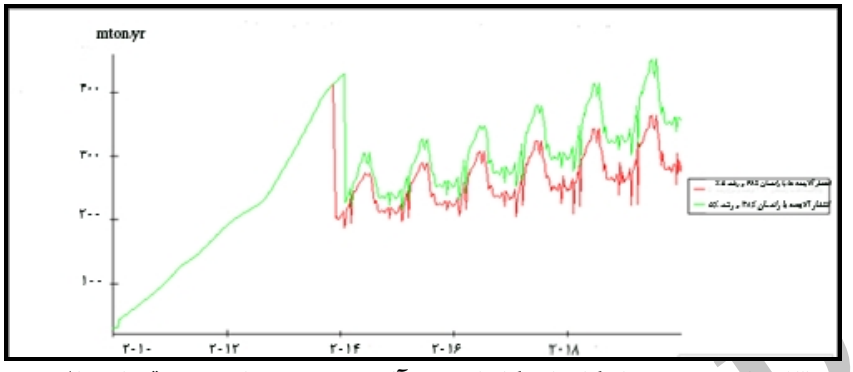
Archive of SID

۱. نرخ رشد ۵/۴ درصد را براساس متوسط نرخ رشد سالهای ۸۳الی۸۸ لحاظ شده است و نرخ رشد ۸ درصد نیز نرخ هدف‌گذاری شده برنامه پنجم توسعه در نظر گرفته شده است.

۲. متوسط وزنی راندمان نیروگاه‌های گازی، سیکل ترکیبی و بخاری در ابتدای دوره شبیه‌سازی

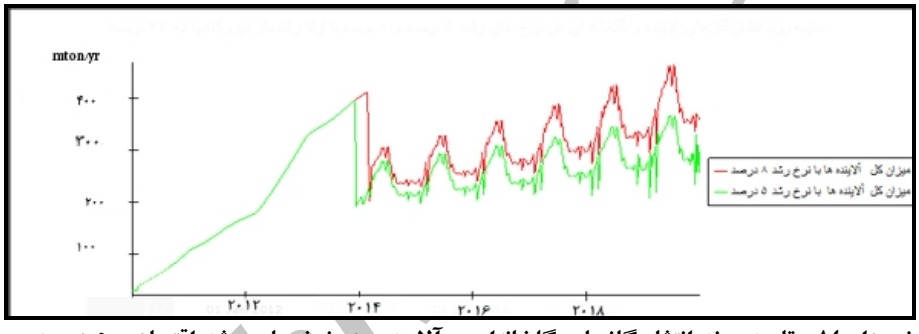
۳. متوسط راندمان جهانی نیروگاه‌ها

www.SID.ir



نمودار ۱۳. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در نرخ های رشد اقتصادی۵/٤ درصد و ۸ درصد با ارتقاء راندمان نیروگاه‌ها به ۳۸درصد

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل



نمودار ۱٤. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در نرخ های رشد اقتصادی ۵ درصد و ۸ درصد با ارتقاء راندمان نیروگاه‌ها به ٤۵ درصد

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به نتایج مدل، پیش بینی می‌شود در صورت استمرار روند گذشته قیمت‌های سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، با فرض نرخ رشد اقتصادی ۵ درصد و متوسط راندمان نیروگاهی ۳۸ درصد ، تولید کل شبکه از ۲۳۳ تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۴ درصد رشد سالیانه به ۳۲۷ تراوات ساعت برسید. در این‌صورت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره با حدود ۵ درصد رشد سالیانه به ۲۷۷/۸ میلیون تن برای گازهای گلخانه ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاینده در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید. با فرض افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸درصد، میزان انتشار آلاینده ها با ۱۱ درصد رشد سالیانه به ۳۶۰

www.SID.ir

میلیون تن در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید که از این مقدار ۳۵۹/۸ میلیون تن سهم گازهای گلخانه ای و ۲۲۷ هزار تن سهم گازهای آلاینده خواهد بود.

در مرحله اول اجرای این قانون قیمت گاز تحویلی به نیروگاه‌ها از ۴۹/۴ ریال در هر متر مکعب به ۷۰۰ ریال در هر متر مکعب افزایش یافته است. قیمت گازوئیل و نفت کوره نیز به ترتیب از ۵۹/۱۸ و ۳۰/۶ ریال بر هر لیتر به ۲۵۰۰ و ۸۰۰ ریال برای هر لیتر افزایش یافته است.

نتایج مدل در پایان دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد با حفظ رشد اقتصادی ۵/۴ درصد، میزان تولید گازهای گلخانه ای و آلاینده از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره شبیه‌سازی به ۲۶۱/۶ میلیون تن افزایش خواهد یافت که نسبت به دوره مشابه در صورت عدم اجرای طرح تحول اقتصادی، با کاهش نرخ رشد سالیانه حدود ۱درصدی همراه خواهد بود. از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای ۱۶/۴ میلیون تن و گازهای آلاینده ۱۰/۳ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه‌سازی خواهد بود.

طبعاً یکی از پارامترهای مهم در پیش‌بینی تولید برق و به طبع آن میزان انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده، نرخ رشد اقتصادی است. در تحلیل سیاستی اولیه نرخ رشد اقتصادی در دوره پیش‌بینی برابر با متوسط نرخ رشد ده سال گذشته (۵/۴ درصد) فرض شد. حال می‌توان اثرات افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸درصد، نرخ رشد هدفگذاری شده در قانون برنامه پنجم توسعه (۱۳۹۴-۱۳۹۰)، را بر میزان انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده بررسی کرد. نتایج اجرای مدل نشان می‌دهد متوسط نرخ رشد انتشار آلاینده‌ها در پایان دوره با ۱۰/۶درصد رشد سالیانه در مقایسه با پیش از اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه ها، به ۳۲۲/۳ میلیون تن خواهد رسید و نسبت به حفظ نرخ رشد ۵ درصدی بعد از اصلاح قیمت سوخت حدود ۴ درصد (معادل ۶۲ میلیون تن گازهای آلاینده و گلخانه ای) افزایش رشد سالیانه را نشان می‌دهد. . از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای ۳۷/۷ میلیون تن و گازهای آلاینده ۲۳/۸ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه‌سازی خواهد بود. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود نرخ رشد اقتصادی به دلیل افزایش تولید انرژی الکتریکی، تاثیر بسیاری بر تولید نیروگاه‌ها و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده خواهد داشت. خلاصه نتایج مدل برای سال‌های پایانی دوره شبیه‌سازی (۱۳۹۸) در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است.

www.SID.ir

جدول ۳. اثرات افزایش قیمت سوخت نیرگاهها بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۸

	واحد	رشد اقتصادی ۵٪ با متوسط راندمان ۳۸٪	رشد اقتصادی ۵٪ با متوسط راندمان ۴۵٪	رشد اقتصادی ۸٪ با متوسط راندمان ۳۸٪	رشد اقتصادی ۸٪ با متوسط راندمان ۴۵٪
میزان انتشار بدون تعدیل قیمت	میلیون تن در سال	۲۷۷/۸	۲۷۹/۸	۳۵۹/۸	۳۵۴/۳
میزان انتشار پس از تعدیل قیمت	میلیون تن در سال	۲۶۱/۴	۲۶۱/۷	۳۲۲/۱	۳۲۳/۵
کاهش انتشار در اثر افزایش قیمت سوخت نیروگاهی	میلیون تن در سال	۱۶/۴	۱۸/۱	۳۷/۷	۳۰/۸

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

جدول ٤. اثرات افزایش قیمت سوخت نیرگاهها بر کاهش انتشار گازهای آلاینده در سال ۱۳۹۸

در سال ۹۸	واحد	رشد اقتصادی ۵٪ با متوسط راندمان ۳۸٪	رشد اقتصادی ۵٪ با متوسط راندمان ۴۵٪	رشد اقتصادی ۸٪ با متوسط راندمان ۳۸٪	رشد اقتصادی ۸٪ با متوسط راندمان ۴۵٪
میزان انتشار بدون تعدیل قیمت	هزار تن در سال	۱۷۵/۲	۱۷۶/۴	۲۲۶/۸	۲۲۳/۴
میزان انتشار پس از تعدیل قیمت	هزار تن در سال	۱۶۴/۸	۱۶۵	۲۰۳	۲۰۴
کاهش انتشار در اثر افزایش قیمت سوخت نیروگاهی	هزار تن در سال	۱۰/۳	۱۱/۴	۲۳/۸	۱۹/۴

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

۵. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر میزان انتشار گازهای گلخانه ای و گازهای آلاینده با رویکرد پویایی سیستمی در یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۹) می‌پردازیم. ابتدا به پیش بینی روند تولید نیروگاهی در صورت عدم اجرای طرح تحول

Archive of SID

www.SID.ir

اقتصادی با قیمت دستوری و در چارچوب مدل می‌پردازیم. با توجه به نتایج مدل، پیش‌بینی می شود تولید کل شبکه از ۲۳۳ تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۴ درصد رشد سالیانه به ۳۲۷ تراوات ساعت خواهد رسید. در این‌صورت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره با حدود ۵ درصد رشد سالیانه به ۲۷۷/۸ میلیون تن برای گازهای گلخانه ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاینده در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید. با فرض افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸درصد، میزان انتشار آلاینده ها با ۱۱ درصد رشد سالیانه به ۳۶۰ میلیون تن در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید که از این مقدار ۳۵۹/۸ میلیون تن سهم گازهای گلخانه ای و ۲۲۷ هزار تن سهم گازهای آلاینده خواهد بود.

سپس میزان انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده حاصل از فعالیت نیروگاه ها را در دوره مورد نظر با فرض اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها بر اساس قانون هدفمندی یارانه‌ها و افزایش راندمان نیروگاه هابررسی می‌کنیم. در مرحله اول اجرای این قانون قیمت گاز تحویلی به نیروگاه‌ها از ۴۹/۴ در هر متر مکعب به ۷۰۰ ریال در هر متر مکعب افزایش یافته است. قیمت گازوئیل و نفت کوره نیز به ترتیب از ۵۹/۱۸ و ۳۰/۶ ریال بر هر لیتر به ۲۵۰۰ و ۸۰۰ ریال برای هر لیتر افزایش یافته است.

در تحلیل سیاستی اول با حفظ رشد اقتصادی ۵/۴ درصدی در یک بازه زمانی ده ساله، میزان تولید آلاینده های زیست محیطی از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره شبیه سازی به ۲۶۱ میلیون تن افزایش خواهد یافت که نسبت به دوره مشابه در صورت عدم اجرای طرح تحول اقتصادی، با کاهش نرخ رشد سالیانه همراه خواهد بود از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای ۱۶/۴ میلیون تن و گازهای آلاینده ۱۰/۳ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه‌سازی خواهد بود. با افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸درصد، نرخ رشد هدفگذاری شده در قانون برنامه پنجم توسعه (۱۳۹۴-۱۳۹۰)، متوسط نرخ رشد انتشار آلاینده ها در پایان دوره با ۱۰/۶ درصد رشد سالیانه در مقایسه با پیش از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها به ۳۲۲/۳ میلیون تن خواهد رسید و نسبت به حفظ نرخ رشد ۵ درصدی بعد از اصلاح قیمت سوخت حدود ۴ درصد (معادل ۶۲ میلیون تن گازهای آلاینده و گلخانه ای) افزایش رشد سالیانه را نشان می‌دهد. . از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای ۳۷/۷ میلیون تن و گازهای آلاینده ۲۳/۸ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه‌سازی خواهد بود. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود نرخ رشد اقتصادی به دلیل افزایش تولید انرژی

Archive of SID

www.SID.ir

الکتریکی، تاثیر بسیاری بر تولید نیروگاه‌ها و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده خواهد داشت.

منابع

الف- فارسی

۴۲ سال صنعت برق ایران در آئینه آمار (۱۳۴۶-۱۳۸۷)

آمار تفصیلی صنعت برق ایران طی سالهای مختلف

ترازنامه انرژی سال‌های مختلف،وزارت نیرو.

منظور، د. ، رضائی، ح. (۱۳۸۹). «پیش بینی تاثیر تغییر قیمت حامل‌های انرژی بر روند تقاضای انرژی الکتریکی با رویکرد پویایی سیستمی»، هشتمین همایش بین المللی انرژی، تهران

ب- انگلیسی

http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp
http://www.cbi.ir/page/2053.aspx
http://www.pep.moe.org.ir
http://www.tavanir.org.ir

Jäger, T., Schmidt, S., Karl, U. (2009). "A system dynamics model for the German electricity market – model development and application". 27th International Conference of the System Dynamics Society, Albuquerque, New Mexico, July 26 – 30.

Manzoor, D., *et al*. (2009). "An analysis of energy price reform: A CGE approach", *Gas* 7(600): 85.71

Schmitz,S. (2001). "Do Energy Prices Induce Progress in Energy-Related Technology? An Empirical Study", Discussion Paper Series 26224, Hamburg Institute of International Economics

Sterman J. D. (2006). Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World.McGraw-Hill.

Vogstad, K. (2005). A system dynamics analysis of the Nordic electricity market : The transition from fossil fuelled toward a renewable electricity supply within a liberalized electricity market. PhD thesis 2005:15, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

www.SID.ir