



“Technical Note”

## Analyzing Effects of Policy Pricing on Energy Consumption in Industry Iran by System Approach

M. Zarezadeh, S. F. Ghaderi\* & R. Tavakoli-Moghadam

Masooreh Zarezadeh, [mzarezadeh@ut.ac.ir](mailto:mzarezadeh@ut.ac.ir)  
Sayed Farid Ghaderi, [ghaderi@ut.ac.ir](mailto:ghaderi@ut.ac.ir)  
Reza Tavakoli Moghadam, [tavakoli@ut.ac.ir](mailto:tavakoli@ut.ac.ir)

### Keywords

System Dynamics,  
Energy consumption,  
Industrial sector,  
Energy price,  
Energy intensity.

### ABSTRACT

*Energy has significant role in socio-economic development of countries any decision on energy sector may affect the broad area in societies. System approach in energy modeling as an efficient method is known by many researchers in management and planning in a country particularly in energy sector. Also System Dynamics is one of the efficient methods, because it has unique abilities. Hence, in this paper applied this method to analyzing effects of energy price changes at industrial section. At first, effective factors on energy consumption were identified consider related papers with industrial energy demand in literature, that these are such as energy price, energy intensity, added value, production and applied technology at production appliances. Then effects of these factors are have described by related equations, that major equation are explained to clarifying. At following, for validation the results of simulation for energy consumption are compared with the actual data for years 2000-2006. After, different scenarios in energy price have defined and for energy consumption and intensity energy are simulated and analyzed until 2020 for different scenarios..*

© 2013 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 24, No. 1, All Rights Reserved

\*  
Corresponding author. Sayed Farid Ghaderi  
Email: [ghaderi@ut.ac.ir](mailto:ghaderi@ut.ac.ir)



"یادداشت فنی"

## بررسی سیستمی اثرات سیاست‌های قیمتی انرژی بر مصرف صنایع ایران

منصوره زارع زاده، سیدفرید قادری\* و رضا توکلی مقدم

### کلمات کلیدی

پویایی‌های سیستم،  
مصرف انرژی، بخش صنعت،  
قیمت انرژی، شدت انرژی

### چکیده:

نظر به اهمیت انرژی و نقشی که صنایع در توسعه کشورها پیدا کرده‌است، تصمیم‌های مربوط به بخش انرژی در صنایع حوزه وسیعی را تحت تاثیر می‌دهد. امروزه رویکرد سیستمی در حل مسائل پیچیده، جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بخش‌های مختلف کشور از جمله بخش انرژی، مورد توجه بسیاری از مدیران و محققین جهان می‌باشد. روش پویایی سیستم نیز به عنوان یکی از ابزارهای کارای این رویکرد به دلیل ویژگی‌های منحصر بفردش رشد چشم‌گیری داشته‌است. از این‌رو در این مقاله، با استفاده از این روش به تحلیل اثرات سیاست‌های قیمتی انرژی بر مصرف آن در بخش صنعتی پرداخته شده‌است. در ابتدا با توجه به مطالعات انجام شده عوامل اثرگذار بر مصرف انرژی در این بخش که عبارتند از قیمت انرژی، شدت انرژی، ارزش افزوده، سطح تولید و فناوری تجهیزات تولیدی، شناسایی شده و سپس چگونگی تاثیر این عوامل توسط معادلات مربوطه بیان شده است. در ادامه به منظور اعتبارسنجی، نتایج کسب شده از شبیه‌سازی مصرف انرژی با مقادیر واقعی آن طی سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۰ مقایسه شده و خطای آن محاسبه شده‌است. سپس سیاست‌های قیمتی توسط چهار سناریوی مختلف تعریف شده و مقادیر مصرف انرژی و شدت انرژی تحت این سناریوها تا سال ۱۴۰۰ شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته شده‌است. در پایان نیز سناریو بهینه معرفی شده‌است.

### ۱. مقدمه

در حال حاضر کشور ایران در زمینه انرژی با مشکلاتی فراوانی نظیر نبود مرکزیت واحد برای سیاست‌گذاری در بخش انرژی و انحصاری، دولتی بودن ساختار انرژی و مدیریت ناکارای آن، قیمت پایین انرژی و افزایش تقاضای انرژی و ... مواجه است. به منظور جلوگیری از عواقب ناشی از این مدیریت ناکارآمد و توسعه یافتگی در بخش انرژی، نیاز به تغییر برخی از سیاست‌های این بخش

بیش از گذشته احساس می‌شود. از این‌رو تغییر سیاست‌های قیمتی پرداخت یارانه انرژی، در مرحله مقدماتی امری ضروری در کشور محسوب می‌شود. از آنجایی که اتخاذ هرگونه سیاست قیمتی در انرژی تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی در آینده می‌گذارد، استفاده از ابزاری کارآ جهت بررسی اثرات سیاست‌های مختلف قیمتی (یارانه‌های انرژی) بر متغیرهایی نظیر مصرف انرژی و به‌طور کلی آگاهی مدیران از نتایج تصمیم‌گیری‌هایشان در آینده، امری ضروری برای برنامه‌ریزی جهت اهداف بلندمدت، در امر توسعه کشور می‌باشد.

در صنایع نیز به دلیل اهمیت این بخش در توسعه کشور این موضوع از اهمیت بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها برخوردار است. در داخل کشور تا کنون بیشتر تحقیقاتی که در زمینه پیش‌بینی تقاضای انرژی در این بخش انجام گردیده با استفاده از روش‌های کلاسیک نظیر اقتصادسنجی انجام گردیده‌است، از جمله کاری که

تاریخ وصول: ۸۹/۳/۱۰

تاریخ تصویب: ۹۰/۸/۲۸

منصوره زارع زاده، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تهران. [mzareezadeh@ut.ac.ir](mailto:mzareezadeh@ut.ac.ir)

\*نویسنده مسئول مقاله: دکتر سیدفرید قادری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران [ghaderi@ut.ac.ir](mailto:ghaderi@ut.ac.ir)

رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران [tavakoli@ut.ac.ir](mailto:tavakoli@ut.ac.ir)

COAL1,2 اثر راجر نیل<sup>۲</sup>، سری فسیلی اثر باکس<sup>۳</sup> اشاره کرد، که به مطالعه آسیب‌پذیری‌های سیاسی و اقتصادی در زمان بحران در حوزه نفت پرداخته‌اند. پس از این دو نیز افراد دیگری نظیر استرمن<sup>۴</sup>، ریچاردسون<sup>۵</sup>، دیویدسن<sup>۶</sup>، نیز هر یک در بخش‌های مختلف انرژی از این تکنیک استفاده نمودند. حل مسئله توسط مدل پویایی سیستم‌ها در شش مرحله زیر انجام می‌گردد:

- ۱) تعریف مسئله و شناسایی متغیرها (تعیین مرز سیستم و مشخص کردن متغیرهای مسئله).
- ۲) ساختن مدل مفهومی (ترسیم نمودار زیرسیستم‌ها و نمودارهای حلقه‌ی علی).
- ۳) ساختن مدل ریاضی (ترسیم نمودار حالت-جریان و شرح معادلات مربوطه).
- ۴) شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل (برای اطمینان از اینکه رفتار مدل مشابه دنیای واقعی است).
- ۵) تعریف سناریوهای مختلف روی مدل و تحلیل آن‌ها (تحلیل سیاست‌ها)
- ۶) انتخاب و پیاده‌سازی راه حل مناسب. (اجرای سیاست)

با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی ساختن مدل ریاضی و شناسایی متغیرهای نرخ و حالت<sup>۷</sup>، می‌باشد، در این قسمت لازم می‌دانیم توضیحاتی راجع به آن ارائه شود. بطور کلی در بازخوردهای سیستم دو نوع متغیر وجود دارد، که شناسایی دقیق آنها به دقتی تر بودن نتایج حاصله کمک بسیاری خواهد کرد، آن دو متغیر عبارتند از:

- ۱) **متغیر حالت:** متغیری است که حالت یا وضعیت سیستم را در یک مقطع زمانی خاص نشان می‌دهد. اگر زمان متوقف شود مقدار متغیر حالت را می‌توان اندازه‌گیری نمود. به عنوان مثال تعداد جمعیت کشور یک متغیر حالت می‌باشد.
- ۲) **متغیر نرخ یا جریان:** متغیری است که سبب تغییر متغیرهای حالت می‌شود، اگر زمان متوقف شود متغیر نرخ هیچ‌گونه مقداری نخواهد داشت. به عبارت دیگر متغیر حالت نتیجه تجمع (انتگرال) متغیر نرخ می‌باشد. به عنوان مثال میزان زاد و ولد در سال یک متغیر نرخ می‌باشد که تجمع آن نشان دهنده جمعیت کشور می‌باشد.

فخرایی [۱] برای تخمین توابع تقاضای انواع حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف کشور از جمله بخش صنعت ارائه نموده و یا کاری که زورار پرمه با استفاده از ماتریس حسابداری اجتماعی به بررسی اثرات افزایش قیمت انرژی تا سطح قیمت‌های جهانی بر شاخص قیمت در بخش صنعت پرداخته‌است [۲].

به‌طور کلی به جز در موارد اندک نظیر کار موسوی و همکارانش که با استفاده از روش پویایی سیستم به تخمین تقاضای برق صنایع ایران [۳] پرداخته‌اند و یا کاری که تاروردیان در پیش بینی مصرف برق صنایع نساجی انجام داده [۴]، می‌توان گفت در کشور ما پیش بینی پویا و همه‌جانبه‌ای بر تقاضا و مصرف انرژی در بخش صنعت صورت نگرفته‌است. از دلایل مهم این امر دولتی بودن اداره بخش انرژی و همچنین عدم انگیزه لازم در مدیریت مصرف انرژی به دلیل دسترسی ایران به ذخایر غنی انرژی قابل ذکر می‌باشد. این در حالی است که در اکثر کشورهای پیشرفته میزان تقاضای انرژی در هر یک از بخش‌های کشورشان برای سال‌های آینده با استفاده از مدل‌های معروفی همچون مدل NEMS و T21 پیش بینی می‌شود [۴-۶].

نحوه سازماندهی در این مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش ۲ توضیحات مختصری در مورد روش بکار گرفته‌شده در این مقاله پرداخته‌شده، در بخش ۳ عوامل اثرگذار بر مصرف انرژی صنایع شناسایی شده و در بخش ۴ چگونگی اثرگذاری این عوامل توسط نمودار علی و معلولی بررسی شده، در بخش ۵ نیز به شرح معادلات میان متغیرهای مهم پرداخته شده‌است. در بخش ۶ به منظور اعتبارسنجی مدل نتایج واقعی و پیش‌بینی-شده مصرف انرژی در صنایع با هم مقایسه شده و در بخش ۷ سناریوهای مختلف قیمتی تعریف شده و به شبیه‌سازی نتایج مصرف و شدت انرژی در صنایع تحت سناریوهای تعریف شده پرداخته شده‌است. در پایان نیز نتیجه‌گیری در بخش ۸ بیان شده‌است.

## ۲. شرح روش تحقیق

روش پویایی سیستم‌ها در اواسط سال ۱۹۵۰ توسط پروفیسور فارستر<sup>۱</sup> از دانشگاه MIT ابداع گردید. او در واقع پارادایم مشتق-گیری را در نظریه کنترل به انباشت (انتگرال‌گیری) در پویایی سیستم تبدیل کرد، زیرا وی عقیده داشت، که طبیعت به جای مشتق شدن انباشته می‌شود.

از بکارگیری مدل پویایی سیستم‌ها در برنامه‌ریزی و سیاست-گذاری در زمینه انرژی بیش از ۴۰ سال می‌گذرد. از کارهای ارزشمند اولیه در زمینه مدل‌سازی انرژی می‌توان به مدل‌های

<sup>2</sup> Nail 1977

<sup>3</sup> Backus

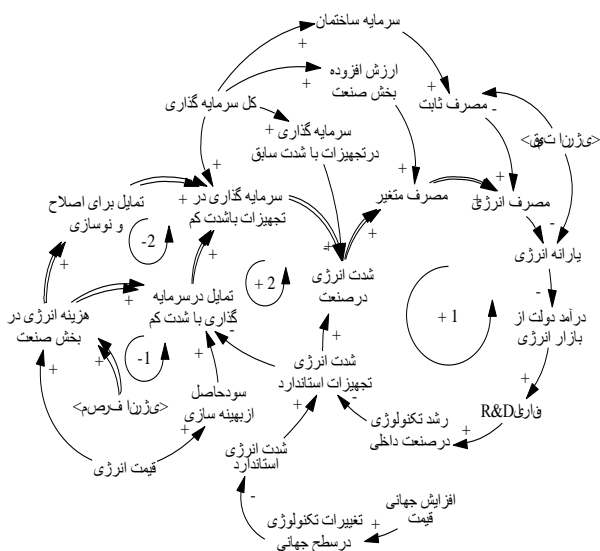
<sup>4</sup> J. Sterman

<sup>5</sup> Richardson

<sup>6</sup> Davidson

<sup>7</sup> Stack&Flow

<sup>1</sup> Forrester



شکل ۱. نمودار علی و معلولی بخش صنعت.

در شکل ۱، به وضوح متغیرهای بخش صنعت و تعاملات بین آن‌ها و مرز مدل قابل مشاهده می‌باشد. مدل صنعت دارای دو حلقه بازخوردی مثبت و دو حلقه بازخوردی منفی می‌باشد، که آن‌ها تعیین کننده رفتار مصرفی این بخش در انرژی می‌باشد. به عنوان نمونه در حلقه مثبت شماره یک این امر به وضوح قابل استنتاج است که با شروع مسیر از هر متغیری در این حلقه نظیر رشد تکنولوژی و رسیدن به آن مقدار این متغیر بصورت نمایی افزایش می‌یابد، همچنین متغیرهای موجود در حلقه‌های منفی نظیر متغیر هزینه انرژی در حلقه منفی شماره یک رفتاری معکوس (کاهش در مقدار) را در طی مسیر یک حلقه از خود نشان می‌دهد. رفتار سایر متغیرها نیز در مدل به همین شکل قابل استنتاج می‌باشد.

در ادامه در نتایج کسب شده از اجرای مدل خواهیم دید، که با توجه به انگیزه بخش صنعت در دسترسی به سود بیشتر از طریق جایگزینی تجهیزات با فناوری روز و اصلاح و نوسازی دو حلقه منفی در این زیر مدل تا حد خوبی اثر دو حلقه مثبت را خنثی کرده و این امر باعث کاهش شدت انرژی در این بخش در آینده خواهد شد.

#### ۵. نمودار جریان حالت و شرح معادلات مربوطه

در این بخش، نمودار جریان - حالت کل و معادلات مهم مربوط به آن‌ها به تفصیل بیان خواهد شد. در واقع نمودار جریان - حالت این بخش، که در پیوست آورده شده، شکل توسعه یافته‌ای از نمودار علی و معلولی بخش قبل می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، برای ترسیم این معادلات قبل از هر اقدامی باید تمامی متغیرها به صورت متغیرهای نرخ، حالت و کمکی مشخص شوند و

همچنین از متغیرهای کمکی برای بیان متغیرهای نرخ در مدل استفاده می‌شود، وجود این متغیرها در مدل اختیاری بوده و استفاده از آن‌ها به فهم و سادگی مدل کمک بسیاری می‌کند [۷].

### ۳. بررسی عوامل تاثیرگذار بر مصرف انرژی در بخش صنعت

در تحقیقات صورت گرفته از جمله عواملی که تأثیر آنها بر تقاضای انرژی مورد بررسی واقع شده است [۶]. عواملی چون سطح تولید، قیمت حامل‌های انرژی، تعداد مشترکان صنعتی و فناوری مورد استفاده در تجهیزات تولیدی می‌باشد. آشکار است که هر چه میزان (سطح) تولید بیشتر شود، استفاده بیشتر از عوامل تولید و از جمله انرژی را به دنبال خواهد داشت. اما در این بخش، به دلیل نبود متغیر سطح تولید بنگاه‌های صنعتی، از متغیر جانشین آن یعنی ارزش افزوده که با متغیر سطح تولید همبستگی بالایی دارد استفاده شده است. همچنین شدت انرژی در بخش صنعت از دیگر عوامل مهم تاثیرگذار بر مصرف انرژی در این بخش می‌باشد، که تغییرات این عامل نیز از عوامل دیگری همچون نوع تجهیزات مورد استفاده در صنعت (جدید یا قدیمی) ناشی می‌شود. که تمامی عوامل تاثیرگذار بر این بخش و تعاملات بین آن‌ها در شکل نشان داده شده است.

#### ۴. نمودار علی و معلولی

بطور کلی هدف از بکارگیری نمودارهای علی در این روش نشان دادن فرضیه‌های علی در هنگام مدل‌سازی است تا از طریق آن‌ها ساختار بازخوردی مدل به شکل کامل بیان شود. در این تمامی نمودارها، متغیرهای سیستم از طریق پیوندهای علی با نماد فلش به هم متصل می‌شوند.

جهت فلش از سوی علت به معلول است و علامت مثبت روی فلش هم جهت بودن تغییرات علت و معلول و علامت منفی غیر هم جهت بودن تغییرات را نشان می‌دهد. در صورتی که مسیر علی از متغیری شروع شود و در نهایت به همان متغیر برسد، یک حلقه بازخوردی علی و معلولی شناسایی می‌شود. بر اساس قاعده تجربی در صورتی که تعداد پیوندهای منفی حلقه بازخوردی زوج باشد، حلقه مثبت تشکیل می‌شود، این حلقه‌های مثبت، رشد یا زوال خودشان را به صورت نمایی تقویت می‌کنند. همچنین در صورتی که تعداد پیوندهای منفی حلقه بازخوردی فرد باشد، حلقه منفی تشکیل می‌شود، این حلقه‌های منفی، هدف‌گرا می‌باشد، به شکلی که با گذشت زمان پیوندهای منفی اثر پیوندهای مثبت را خنثی می‌کنند.

در شکل ۱، متغیرهای شناسایی شده در بخش قبل و تاثیراتشان بر هم، توسط نمودار علی و معلولی نشان داده شده است.

$$IEI = (IOIN \times 3.3 + ININ \times DEIIS + IRIN \times 2.56) / (IOIN + ININ + IRIN) \quad (2)$$

برای محاسبه شدت انرژی در تجهیزات با فناوری قدیمی از میانگین شدت انرژی در صنایع ۲۳ گانه کشور (۳/۳) و برای محاسبه شدت انرژی تجهیزات اصلاح و نوسازی شده فرض ما بر این است که با اصلاح و نوسازی شدت انرژی تجهیزات با ۲۵٪ کاهش در مقدار شدت انرژی قبلی خود می‌رسند. همچنین برای محاسبه میزان شدت انرژی در تجهیزات با فناوری جدید از شدت استاندارد جهانی که در ادامه به شرح آن پرداخته شده، استفاده شده است.

**تغییرات تکنولوژی در سطح جهان:** تغییرات تکنولوژی در سطح جهان (WIEI) در جهت کاهش شدت تجهیزات می‌باشد، از آنجایی که با گذشت زمان تکنولوژی‌های تولید و مونتاژ در جهت استفاده مناسب از انرژی توسعه می‌یابد. با توجه به تعاملات بین کشورها در خرید و فروش کالاهای سرمایه‌ای، رشد و توسعه تکنولوژی تجهیزات فراتر از مرزهای کشورها بوده و متاثر از تحولات جهانی است. در اغلب مدل‌های انرژی نظیر مدل نمز توسعه جهانی تکنولوژی بر اساس برخی منحنی‌های امکان توسعه تکنولوژی<sup>۲</sup> (TPC) مدل‌سازی شده است. این منحنی‌ها برپایه روش‌های مهندسی پیش‌بینی شده‌اند [۹]. در این روش میزان شدت انرژی در سال هدف پیش‌بینی شده (که در مدل ارائه شده بر طبق مدل نمز این میزان یک در نظر گرفته شده) سپس در حالت پایه فرض بر آن است که شدت انرژی بصورت نمایی کاهشی از مقدار فعلی به مقدار پیش‌بینی شده در سال هدف خواهد رسید. در این مدل تغییرات قیمت در سطح جهانی به صورت یک عامل اثرگذار در دسترسی سریعتر به مقدار پایه در سال هدف در نظر گرفته شده است.

**شدت انرژی تجهیزات با فناوری جدید (DEIIS):** شدت انرژی تجهیزات با فناوری جدید در کشور میزان این شدت برای سال‌های آینده در جهان پیش‌بینی شده است. (همان‌طور که در قسمت قبل شرح داده شد) در کشور ما نیز به میزان سرمایه‌گذاری در R&D در بخش صنعت به ضریبی از این شدت استاندارد جهانی دست خواهیم یافت (هزینه انتقال تکنولوژی به کشور). برای نشان دادن این اثر از تابع Lookup استفاده شده است.

سپس برطبق نظرات افراد خبره در تحقیقات صورت گرفته نظیر NEMS، T21 و غیره [۶۵] و تجربه فرد مدل‌ساز به تبیین معادلات بین آن‌ها پرداخته شود. در برخی از روابط از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۵۰ الی ۱۳۸۰ موجود در سایت آمار و بانک مرکزی ۱ برای برآزش منحنی و تخمین پارامترهای توابع استفاده شده است. همچنین از روش اقتصادسنجی و بسته نرم افزاری Eviews جهت تخمین پارامترهای در برخی روابط کمک گرفته شده است.

بطور کلی مصرف انرژی در بخش صنعت با الهام از مدل نمز به دو بخش مجزای مصرف انرژی متغیر با تولید و مصرف انرژی مستقل از تولید تقسیم گردیده است. که در ادامه به شرح معادلات نمودار جریان-حالت بخش صنعت، خواهیم پرداخت. متغیرهای مهم مدل عبارتند از:

**مصرف انرژی متغیر با تولید:** مصارف انرژی متغیر با تولید (IVEC) در بخش صنعت معمولاً برای تأمین نیروی محرکه ماشین آلات است. برای محاسبه این مقدار، ابتدا شدت انرژی متغیر با تولید را به صورت تابعی از بهره‌وری تجهیزات (شدت انرژی (IEI) حساب کرده، سپس در ارزش افزوده بخش صنعت (IAV) ضرب می‌کنیم. به صورتی که در معادله ۱ نشان داده شده است. در ادامه نیز چگونگی محاسبه شدت انرژی و ارزش افزوده بیان شده است.

$$IVEC = (IEI \times IAV) \quad (1)$$

**ارزش افزوده بخش صنعت:** این میزان بصورت برونزا و با استفاده از روندی که مقدار آن در سال‌های گذشته داشته، محاسبه شده است.

**شدت انرژی بخش صنعت:** شدت انرژی در بخش صنعت همواره تحت تاثیر تجهیزات و فناوری آن صنعت می‌باشد. از این رو برای محاسبه میزان شدت تجهیزات صنعت به سه دسته تجهیزات با فناوری جدید (ININ) (تجهیزات دارای شدت انرژی پایین)، تجهیزات با فناوری قدیمی (IOIN) (تجهیزات دارای شدت انرژی بالا) و تجهیزات اصلاح و نوسازی شده (IRIN) تقسیم شده است. که تجهیزات با شدت پایین بعد از گذر زمان (با تاخیر زمانی ۳ساله) به تجهیزات با شدت بالا تبدیل می‌شوند. بطور کلی در مدل ارائه شده، شدت انرژی در بخش صنعت از ترکیب وزنی تجهیزات جدید، اصلاح و نوسازی شده و قدیمی ضرب در شدت انرژی بصورتی که در معادله ۲. نشان داده شده، محاسبه می‌شود.

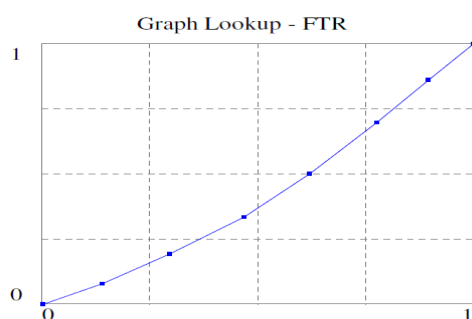
<sup>2</sup> Technology Possibility Curve

<sup>1</sup> <http://www.sci.org.ir>

میزان سرمایه‌گذاری در اصلاح و نوسازی تجهیزات قدیمی: میزان سرمایه‌گذاری در اصلاح و نوسازی تجهیزات قدیمی (RIN) به صورت مینیمم هزینه‌ای که هر ساله برای اصلاح و نوسازی در صنایع در نظر گرفته می‌شود (۵ درصد سرمایه‌گذاری) و تجهیزات قابل اصلاح و نوسازی حاصل می‌شود. میزان اصلاح و نوسازی نیز از حاصل ضرب تمایل برای اصلاح و نوسازی (TRIN) در پتانسیل اصلاح و نوسازی (RP) حاصل می‌شود. همچنین زمان تبدیل تجهیزات اصلاح شده به قدیمی ۵ سال فرض شده است. مدت زمان اصلاح (LTR) یک سال و میزان شدت آن نیز ۰.۸٪ شدت تجهیزات معمولی در نظر گرفته‌ایم.

$$RIN = \min (TRIN \times PR, 0.05 \times AIN) \quad (3)$$

تمایل در اصلاح و نوسازی و استفاده از تجهیزات با فناوری جدید: با توجه به اینکه تولیدکننده زمانی تمایل به هزینه کردن برای اصلاح و نوسازی دارد که میزان کاهش هزینه‌های انرژی (به علت اصلاح و نوسازی) درصد قابل قبولی از هزینه‌های سالانه اصلاح و نوسازی را بپوشاند. یعنی هرچه میزان کاهش هزینه‌های سالانه انرژی به علت اصلاح و نوسازی، نسبت به هزینه‌های سالانه اصلاح و نوسازی بیشتر باشد تمایل تولید کننده به خرید یا تعویض ماشین آلات افزایش می‌یابد. این تمایل (FTR) به صورت تابع تقریبی Lookup در به صورتی که در شکل زیر نمایش داده شده است، می‌باشد.



شکل ۲. تابع تمایل اصلاح و نوسازی

مصرف انرژی مستقل از تولید: مصارف انرژی در این بخش بیشتر برای تأمین سرمایش، گرمایش، روشنایی و تهویه و غیره است. مصارف این بخش از این جهت ثابت خوانده می‌شوند که با تغییرات محدود تولید، تغییر نمی‌کنند. هرچه موجودی ساختمان در صنایع بیشتر باشد مصرف انرژی آن نیز بیشتر خواهد بود؛ به طوری که می‌توان گفت مصرف انرژی مستقل از

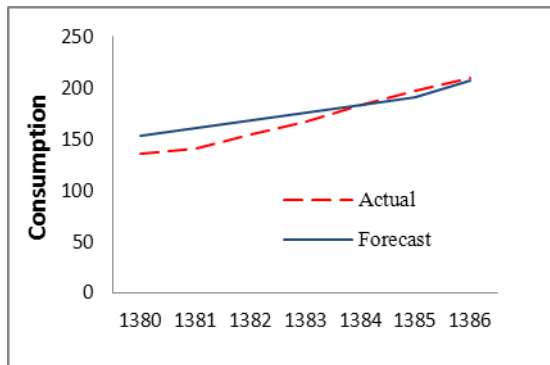
سرمایه‌گذاری در بخش صنعت: میزان سرمایه‌گذاری در بخش صنعت (IIN) به صورت تابعی لگاریتمی از ارزش افزوده سال گذشته (PIAV) و میزان کل سرمایه‌گذاری (INV) در کشور در نظر گرفته شده است. کل سرمایه‌گذاری مالی بر روی هر بخش صنعتی به سرمایه‌گذاری ساختمان (IBIN) و سرمایه‌گذاری تجهیزات (AIN) دسته‌بندی شده است. بطور متوسط ۷۰ درصد از این سرمایه به خرید تجهیزات مربوط می‌شود، که میزان سرمایه‌گذاری در خرید تجهیزات با شدت سابق، یا تجهیزات با شدت پایین، به تمایل سرمایه‌گذاران در خرید تجهیزات با تکنولوژی روز (که در ادامه محاسبه خواهد شد) بستگی دارد.

سرمایه اولیه تجهیزات: از تقسیم میزان سرمایه ریالی در بخش صنعت بر هزینه ساخت یک واحد سرمایه‌گذاری در تجهیزات (یک واحد سرمایه‌گذاری معادل یک میلیارد ریال فرض شده است) بدست آمده است.

سرمایه‌گذاری در تجهیزات: سرمایه‌گذاری در تجهیزات برابر با میزان سرمایه‌گذاری ریالی در تجهیزات صنایع تقسیم بر هزینه ساخت یک واحد سرمایه‌گذاری در تجهیزات (یک میلیارد ریال) می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، کل تجهیزات صنعت به سه قسمت تجهیزات قدیمی و نوسازی شده و جدید تقسیم شده است، که تجهیزات نوسازی شده و جدید هر یک پس از اتمام طول عمر خود به تجهیزات قدیمی تبدیل می‌شوند. فرض ما بر این است که هزینه سرمایه‌گذاری در هر واحد تجهیزات با تکنولوژی جدید یک و نیم برابر (۵۰٪ بیشتر) تجهیزات با تکنولوژی قدیمی است. همچنین هزینه اصلاح و نوسازی نیز ده درصد هزینه سرمایه‌گذاری در تجهیزات با تکنولوژی قدیمی (صدمیلیون ریال) فرض شده است.

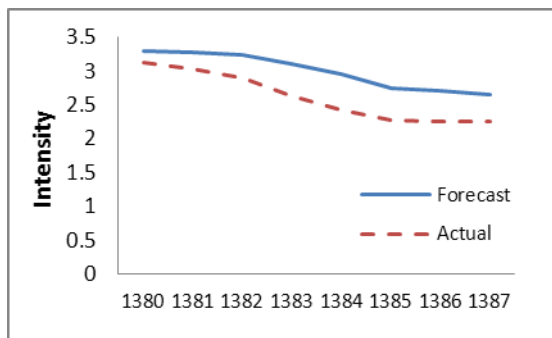
میزان سرمایه‌گذاری در خرید تجهیزات با تکنولوژی جدید: این میزان از حاصل ضرب مقدار تابع تمایل در خرید تجهیزات با تکنولوژی جدید در حداکثر میزان خرید این نوع تجهیزات که از تقسیم کل میزان سرمایه‌گذاری در تجهیزات بر هزینه خرید تجهیزات (فرض شده است که هزینه خرید تجهیزات با تکنولوژی جدید دو برابر تجهیزات معمولی است)، محاسبه می‌شود.

تمایل خرید تجهیزات با تکنولوژی جدید: میزان این تمایل به صورت تابعی از نسبت سود کسب شده از صرفه‌جویی به هزینه اضافی صرف شده بابت خرید آن، مشابه تابع تمایل در خرید تجهیزات بخش خانگی تعریف شده است.



شکل ۳. مقادیر واقعی و پیش بینی شده مصرف انرژی.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، اختلاف زیادی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده در این بخش وجود ندارد. خطای محاسبه شده در حدود ۶/۳٪ می‌باشد، که این میزان نیز با توجه به توضیحاتی که در مورد اعتبارسنجی نتایج روش پویایی سیستم بیان شد، قابل قبول می‌باشد. همچنین در ادامه میزان شدت انرژی با مقادیر واقعی آن چنانچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقایسه‌ای صورت گرفته که در این قسمت نیز مقادیر واقعی و پیش بینی شده نزدیک است و خطای محاسبه شده در حدود ۲/۷۴٪ می‌باشد.



شکل ۴. مقادیر واقعی و پیش بینی شده شدت انرژی.

البته این نکته را نیز باید همواره در نظر داشت که ممکن است نتایج کسب شده از پیش بینی در سایر روش‌ها نظیر اقتصادسنجی و هوش مصنوعی از دقت بیشتری نسبت به روش پویایی سیستم برخوردار باشند، اما این رویکرد نقطه قوتش در مدلسازی رفتارهای پیچیده اقتصادی-اجتماعی، کمی‌سازی متغیرهای کیفی و تعریف سناریوهای مختلف می‌باشد. بطور کلی اعتبارسنجی روش‌های سیستمی نرم نظیر روش پویایی‌های سیستم و هدفی که از بکارگیری آنها در مدلسازی می‌شود متفاوت از سایر روش‌های سخت نظیر تحقیق در عملیات و هوش مصنوعی می‌باشد و مقایسه نتایج به تنهایی بدون در نظر داشتن هدف، نتیجه بخش نخواهد بود.

تولید در صنایع (IEC) برابر است با موجودی سرمایه ساختمان (TBC) آن صنعت ضرب در مصرف انرژی مستقل از تولید هر واحد سرمایه ساختمان (PBEC). مصرف انرژی در هر واحد از سرمایه ساختمان به عنوان تابعی از قیمت انرژی (IEP) در نظر گرفته شده‌است. کشش قیمتی تقاضای انرژی در صنایع حساب شده است، که تقریباً معادل ۰/۱ = می‌باشد.

**قیمت انرژی:** دو نوع قیمت انرژی در مدل محاسبه شده‌است، یکی مربوط به وضعیت فعلی با نرخ افزایش سالانه در حدود ۱۰ درصد دیگری برای اجرای سیاست حذف یارانه انرژی که در آن صورت نیز افزایش سالانه قیمت ۱۰ درصد فرض شده‌است.

**یارانه انرژی:** این متغیر از تفاضل قیمت انرژی در خاورمیانه (ارزش منطقه‌ای آن) از قیمت اسمی انرژی هر بخش در کشور ضرب در مصرف انرژی حاصل می‌شود. ارزش منطقه‌ای انرژی در هر بخش مصرفی با استفاده از داده‌های ترازنامه هیدروکربوری برآورد شده‌است.

**یارانه R&D:** در مدل این متغیری به منظور تعریف سناریو سوم (در صورت افزایش قیمت انرژی و حذف یارانه) که در ادامه شرح داده شده این میزان به صنایع کشور تعلق خواهد گرفت، تعبیه شده‌است.

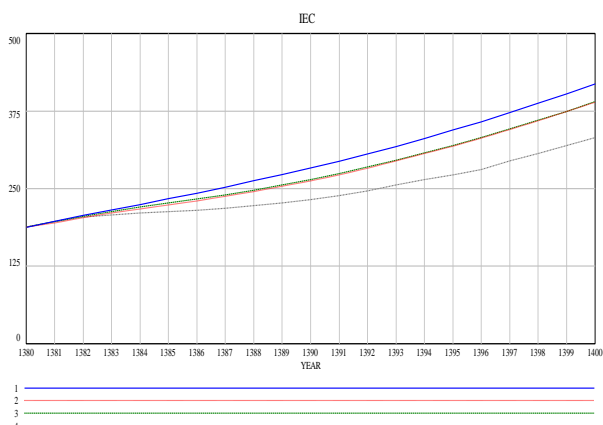
## ۶. اعتبارسنجی

ماهیت اعتبار و نوع آزمون‌هایی که برای اعتبارسنجی این روش بکارگرفته می‌شود، تفاوت زیادی با اعتبارسنجی در روش‌های نظیر اقتصادسنجی دارد. اعتبار مدل‌های ارائه شده با این روش بیشتر در توانایی آن در برقراری ارتباط، کمک به ایجاد بینش، سازگاری با سیستم واقعی، ارتقاء درک و بطور کلی تاثیرگذاری بر مخاطب خود بستگی دارد تا به تطابق تاریخی و پیش بینی‌های دقیق برای آینده [۸].

همان‌طور که در ادامه نشان داده شده، خروجی‌های مدل به خوبی موید این امور می‌باشد، اما در این قسمت برای نشان دادن اعتبار نسبی مدل حتی در پیش‌بینی برای آینده به منظور اعتبارسنجی بیشتر، نتایج کسب شده از مدل برای دو متغیر کلیدی مصرف و شدت انرژی با مقادیر واقعی آن‌ها برای سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۶ مقایسه شده که این نتایج در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده‌است.

## ۷-۲. مصرف انرژی

در شکل میزان مصرف انرژی تحت سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده‌است. همان‌طور که در قبل بیان شده، مصرف انرژی در بخش صنعت تحت تاثیر ارزش افزوده و شدت انرژی در این بخش قرار دارد، و با توجه به روند افزایشی ارزش افزوده در بخش صنعت بر طبق داده‌های آن در سال‌های گذشته، بر میزان مصرف انرژی در این بخش با افزایش این میزان افزوده می‌گردد، ولی به دلیل اثرگذاری شدت تجهیزات بکارگرفته‌شده در بخش صنعت (نتایج مربوط به شدت در ادامه نشان داده‌شده) با افزایش قیمت انرژی و تمایل به اصلاح نوسازی و خرید تجهیزات با فناوری جدید تحت سناریوهای دوم و سوم کاهش یافته و این امر موجب شده که مقدار مصرف انرژی در این دو سناریو نسبت به سناریو اول کاهش یافته و مقادیرشان با شیب کمتری افزایش یابد.



شکل ۴. مصرف انرژی در بخش صنعت.

در سناریو چهارم نیز کمترین میزان مصرف را به دلیل اثری که یارانه تحقیق و توسعه در کاهش شدت انرژی و یارانه اصلاح و نوسازی در صنعت دارد، خواهیم داشت. بطور کلی تحت تاثیر سناریو چهارم در حدود ۲۰٪ در میزان مصرف انرژی صنعت صرفه جویی خواهد شد، بدون اینکه در آینده از بهره‌وری تولید در صنعت کاسته شود.

## ۷-۳. شدت انرژی در صنعت (شاخص بهره‌وری)

از آنجایی که امروزه، شدت انرژی به‌عنوان یک شاخص مهم برای آگاهی از روند پیشرفت و توسعه یک کشور در مقایسه با سایر کشورها محسوب می‌شود، چنانچه در خیلی از مقالات به پیش بینی مقدار آن در آینده پرداخته می‌شود و همچنین با توجه به نقش اثرگذار شدت انرژی در بخش صنعت بر میزان مصرف انرژی در شکل ۵. مقادیر شدت انرژی در صنعت تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده‌است.

بعد از اطمینان نسبی از نتایج مدل، در ادامه از این مدل برای شبیه‌سازی نتایج مربوط به مصرف انرژی در بخش صنعت و سایر متغیرها مرتبط با آن استفاده شده است

## ۷. تعریف سناریوهای مختلف و شبیه‌سازی مصرف و

### شدت انرژی تحت آن سناریوها

#### ۷-۱. تعریف سناریوهای

مدل ارائه‌شده قابلیت تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلفی را دارد، در این بخش با توجه به هدف که تغییر سیاست‌های قیمتی در آینده کشور و هدفمندسازی یارانه‌ها می‌باشد، چهار سناریوی که در ادامه ارائه شده، تعریف شده‌است. سناریوهای تعریف شده عبارتند از:

۱. با وجود یارانه انرژی در کشور (وضعیت فعلی کشور)
۲. حذف یکباره (دفعی) یارانه انرژی در سه بخش صنعت.
۳. حذف تدریجی یارانه انرژی در طی ۱۰ سال (در بخش صنعت).
۴. حذف تدریجی یارانه انرژی (طی ۱۰ سال) در بخش صنعت و هدفمندسازی یارانه در جهت اصلاح و نوسازی و اختصاص یارانه R&D به صنایع کشور.

با توجه به اینکه مدل ارائه شده، شاخص متعددی را در بر می‌گیرد، در ادامه نتایج حاصل از سناریوهای مختلف به عنوان نمونه نتایج حاصل از اجرای مدل، در مورد دو شاخص مهم متاثر از تغییرات قیمتی انرژی یعنی مصرف و شدت انرژی (این شاخص‌ها در تصمیم‌گیری‌های کلان کمک بیشتری به مدیران مربوطه می‌کند) تحت سناریوهای تعریف شده مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. تمامی نتایج کسب‌شده تحت این فرض انجام‌شده که در روند عوامل اثرگذار بر شاخص‌های تعریف‌شده تغییرات فاحشی صورت نگیرد، شبیه‌سازی شده‌اند، بدیهی است، در صورتی‌که دولت اقداماتی دیگری (به‌جز سناریوهای تعریف‌شده نظیر حذف تدریجی طی ۵ سال و ...) در راستای بهینه‌سازی انجام دهد باید آن‌ها را نیز تحت سناریوهای دیگری در مدل تعریف کرد.

همچنین پیش‌بینی مقادیر شاخص‌ها به‌صورت بلندمدت (۲۰ساله) انجام شده، تا در این زمان فرصتی برای تغییر رفتار مصرف‌کننده در مقابل تغییرات قیمت انرژی (جایگزینی تجهیزات با کارایی بالاتر، استانداردهای ساز و غیره) باشد، همچنین فرض ما بر ثبات روابط علی تعریف‌شده تا سال ۱۴۰۰ می‌باشد.

تمامی شکل‌های این بخش هر سناریو با شماره آن مشخص شده است، به عنوان مثال عدد یک نشان دهنده نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحت سناریو اول می‌باشد.

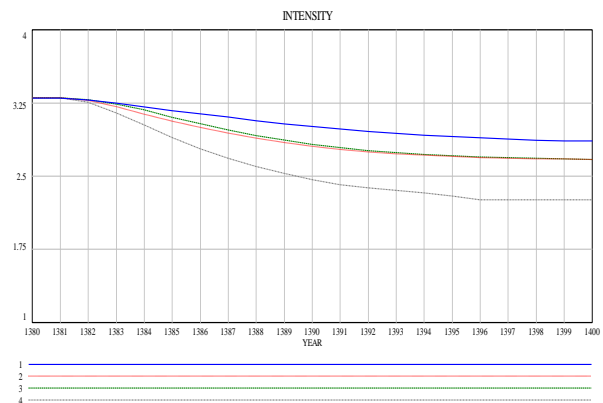


پس از اعتبارسنجی نتایج کسب‌شده از مدل، سناریوهای مختلف برای سیاست‌گذاری‌های قیمتی در آینده کشور تعریف شده و به شبیه‌سازی نتایج برخی از متغیرهای مدل از جمله مصرف انرژی و شدت انرژی تا سال ۱۴۰۰ پرداخته شده و در مورد هر یک از نتایج سناریو بهینه پس از بحث و بررسی انتخاب شده‌است. در پایان نیز در برآیندی از نتایج کسب‌شده سناریو چهارم یعنی حذف تدریجی یارانه انرژی (طی ۱۰ سال) و هدفمندسازی یارانه در جهت اصلاح و نوسازی و اختصاص یارانه R&D به صنایع کشور، به عنوان سناریوی بهینه معرفی شده‌است. در پایان نیز توصیه می‌شود، برای تحقیق بیشتر در آینده، اثرات تغییرات قیمتی به تفکیک برای هر یک از حامل‌ها در بخش صنعت و سایر بخش‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

- [۱] پریسا موسوی اهرنجاری، سیدفرید قادری و محمدعلی آزاده، «شبیه‌سازی تقاضای برق صنایع ایران با استفاده از سیستم داینامیک»، دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
- [۲] زورار پرمه، «بررسی اثر سیاست نقدی کردن یارانه‌ها بر سطح قیمت‌ها در ایران» همایش یارانه، تهران، ۱۳۸۴.
- [۳] تاروردیان، ساناز، «برآورد مصرف برق در صنعت نساجی و بهینه‌سازی آن»، صفحات ۲-۳، ۱۳۸۲.
- [4] Fakhraei, S.H., "Final Report on Energy Demand Forecasting of Various Energy Carriers of Different Consumer Sectors", 1992.
- [5] Administration (EIA), E.I., "Industrial Demand Module (NEMS)", 2003.
- [6] Holtberg, P.D., "The National Energy Modeling: An Overview 2003," Energy Information Administration, U.S. Department of Energy Washington, 2003.
- [7] Bassi, A.M., Shilling, J.D., Herren, H.R. and Bassi, N., "Modeling U.S. Energy with Threshold 21 (T21)", Informing the U.S. Energy Policy Debate with T21, U.S., 650, 2007.
- [8] Sterman, J.D., "Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World Massachusetts Institute of Technology", Sloan School of Management, 2000.
- [9] sushil, *System Dynamics: a Practical Approach for Managerial Problems*, 1994.
- [10] Barreto, L. "Technological Learning In Energy Optimisation Models And Deployment Of Emerging Technologies", March 26, 2001.

بطور کلی در بخش صنعت به دلیل اصلاح و نوسازی و جایگزینی تجهیزات با تکنولوژی جدید، روند شدت انرژی در آینده نزولی می‌باشد، همان‌طوری که در سناریو اول مشاهده می‌شود، البته باید توجه داشت که این اقدامات صنایع به‌منظور انگیزه آن‌ها در افزایش تولید و بهبود این امر صورت می‌گیرد که بدون افزایش قیمت نیز این اقدامات در صنایع به انگیزه‌های دیگر صورت می‌گیرد، اما با افزایش قیمت این اقدامات در سطح وسیع‌تری انجام می‌شود.



شکل ۵. شدت انرژی در بخش صنعت.

در مدل ارائه شده اثر افزایش قیمت انرژی تحت سناریو دوم و سوم با کاهش بیشتری در شدت به دلیل افزایش انگیزه بخش صنعت در اصلاح و نوسازی و جایگزینی تجهیزات با تکنولوژی روز مواجه خواهیم بود. همچنین در سناریو چهارم به دلیل کمک‌های مالی دولت برای اصلاح و نوسازی در صنعت و پرداخت یارانه R&D به میزان قابل توجهی از این شدت در مقایسه با سایر سناریوها کاسته خواهد شد.

## ۸. نتیجه گیری

با توجه به رشد تقاضای انرژی و محدودیت منابع، اصلاح برخی سیاست‌ها در بخش انرژی از جمله سیاست‌های قیمتی امری ضروری در کشور می‌باشد. در این مقاله، اثرات تغییرات قیمت انرژی بر مصرف انرژی و شدت انرژی در صنعت به‌عنوان موتور توسعه در کشور، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است. در ابتدا به بررسی عوامل مهم اثرگذار بر مصرف انرژی با نگرشی جامع و سیستمی پرداخته شده که این عوامل عبارتند از ارزش افزوده، قیمت انرژی، شدت انرژی و سطح تولید و فناوری مورد استفاده در تجهیزات تولیدی (تجهیزات نو، قدیمی و اصلاح و نوسازی- شده). در ادامه به ترسیم نمودار علی و معلولی و شرح معادلات مهم میان این عوامل پرداخته شده‌است.

