Winter (2023) 6(22): 35-50
DOI: 10.30473/JIER.2023.66033.1355
Received: 16 Nov 2022 Accepted: 20 Dec 2022

Industrial Economics Researches
Open Access

ORIGINAL ARTICLE

Understanding the Importance of the Law of Entropy Through the Analysis of the Substitution Elasticities Between Energy and other Inputs in Selected Industries of Iran

Behrouz Sadeghi Amroabadi[1], Nasrin Mansouri[2*]

[1] Assistant Professor of Economics, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
[2] Assistant Professor of Economics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Correspondence
Nasrin Mansouri
Email: n_mansouri90@yahoo.com

How to cite
Sadeghi Amroabadi, B., Mansouri, N. (2023). Understanding the Importance of the Law of Entropy Through the Analysis of the Substitution Elasticities Between Energy and other Inputs in Selected Industries of Iran. Industrial Economics Researches, 6(22), 35-50.

ABSTRACT
The second law of thermodynamics or the law of Entropy is a warning to economic activists and economic policymakers who pursue the goal of unlimited economic growth without considering the capacity of the environment. The main goal of this paper is to answer the question whether energy input is a substitute for capital and other inputs in the automotive, chemical and food industries. For this purpose, while using the data of companies indexed in Tehran Stock Exchange for the period of 1386-1400 Hs, the Translog cost function was estimated. Substitution of inputs in the selected industries was judged based on price elasticities and Allen's elasticity of substitution. Contrary to theoretical expectations, the results showed that the cross elasticities and Allen's substitution elasticities between electricity and other energy carriers are negative and therefore these inputs are not substitutes for electricity. In other words, in the production process of the aforementioned industries, electricity and other energy inputs are needed. Also, the findings of this research showed that Allen's elasticity of substitution between electricity and capital is negative, and therefore these two inputs are complementary to each other. Due to the fact that it is not possible to replace electricity with other inputs in the selected industries, it can be concluded that the growth of these industries regardless of the capacity of the environment will bring harmful effects on the environment through energy supply for these industries.

KEYWORDS
Allen's Elasticity of Substitution, Entropy, Energy and Capita Inputs.
JEL Classification: L11,Q21, Q43, L51, P28.

© 2023, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

سال ششم، شماره بیست‌ودوم، پیاپی، زمستان ۱۴۰۱ (۵۰-۳۵)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۹

DOI: 10.30473/JIER.2023.66033.1355

نشریه علمی

پژوهش‌های اقتصاد صنعتی

«مقاله پژوهشی»

درک اهمیت قانون آنتروپی از طریق تحلیل کشش جانشینی انرژی و سایر نهاده‌ها در صنایع منتخب ایران

بهروز صادقی عمروآبادی[۱]، نسرین منصوری[۲*]

[۱] استادیار گروه اقتصاد دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

[۲] استادیار اقتصاد، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:
نسرین منصوری
رایانامه: n_mansouri90@yahoo.com

چکیده

قانون دوم ترمودینامیک یا قانون آنتروپی هشداری است به فعالان اقتصادی و سیاست‌گذاران اقتصادی که هدف رشد اقتصادی نامحدود را بدون توجه به ظرفیت محیط‌زیست دنبال می‌کنند. هدف محوری این مقاله پاسخ به این سؤال است که آیا نهاده انرژی با سرمایه و سایر نهاده‌ها در صنایع خودرو، شیمیایی و خوراکی جانشین است. برای این‌منظور ضمن استفاده از داده‌های شرکت‌های نمایه‌شده در بورس اوراق بهادار تهران برای دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۴۰۰، تابع هزینه ترانسلوگ تخمین زده شد. جانشینی نهاده‌ها در صنایع مورد نظر براساس کشش‌های قیمتی و همچنین کشش جانشینی آلن مورد قضاوت قرار گرفت. برخلاف انتظارات نظری نتایج نشان داد که کشش‌های قیمتی و کشش‌های جانشینی آلن بین برق و سایر حامل‌های انرژی منفی است و لذا این نهاده‌ها جانشین برق نیستند. به‌عبارت دیگر در فرایند تولید صنایع فوق‌الذکر نهاده برق و سایر شقوق انرژی مورد نیاز می‌باشند. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان داد کشش جانشینی آلن بین برق و سرمایه منفی است و لذا این دو نهاده مکمل یکدیگر می‌باشند. باتوجه به اینکه در صنایع منتخب امکان جانشینی برق با سایر نهاده نیست می‌توان نتیجه گرفت که رشد این صنایع بدون توجه به ظرفیت محیط‌زیست، آثار مخرب زیست‌محیطی فراورانی را به‌واسطه تأمین انرژی برای این صنایع به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی

کشش جانشینی، آنتروپی، نهاده انرژی و سرمایه.

طبقه‌بندی JEL: L11,Q21, Q43, L51, P28

استناد به این مقاله:

صادقی عمروآبادی، بهروز و منصوری، نسرین. (۱۴۰۱). درک اهمیت قانون آنتروپی از طریق تحلیل کشش جانشینی انرژی و سایر نهاده‌ها در صنایع منتخب ایران. فصلنامه علمی پژوهش‌های اقتصاد صنعتی، ۶(۲۲)، ۵۰-۳۵.

۱. مقدمه

مطالعات مهندسی حاکی از قابلیت چشمگیر بهبود کارایی انرژی از طریق جانشین‌نمودن سرمایه به‌جای انرژی است اما تحقیقات اقتصادسنجی طی سه دهه به هیچ اجماعی در این‌خصوص که آیا نهاده‌های فوق به بهترین نحو به‌عنوان جانشین توصیف می‌شوند یا مکمل، دست نیافته و درباره اینکه چگونه عوامل مختلف بر نتایج تجربی تأثیرگذارند، هیچ توافقی وجود ندارد. باتوجه به تحقیق برندت و وود[1] (۱۹۷۵) و بخش زیادی از ادبیات تحقیق، انرژی و سرمایه مکمل‌های یکدیگر باتوجه به کشش جانشینی آلن AES و کشش قیمتی مقطعی و CPE[2] هستند (شهیکی تاش و همکاران، ۱۳۹۹) و حاکی از آن است که افزایش قیمت‌های انرژی موجب کاهش نرخ سرمایه‌گذاری سرمایه خواهد شد (برندت، ۱۹۷۵، ۱۹۹۰). به بیان دیگر چنانچه دو نهاده انرژی و سرمایه مکمل باشند، درصورتی‌که قیمت یکی از این دو گروه (انرژی) افزایش یابد و نیز اگر این افزایش قیمت با جبران مصرف‌کننده همراه شود، انتظار می‌رود که تقاضا برای گروه دیگر کالایی (سرمایه) کاهش یابد (فروتن و همکاران، ۱۳۹۸). چنین نتیجه‌ای مبین آن است که انرژی و سرمایه پیوند نزدیکی با تولید اقتصادی دارند و افزایش قیمت‌های انرژی می‌تواند رشد ستاده را کاهش دهد. تئوری نئوکلاسیک رشد اقتصادی، محیط زیست و انرژی را به‌عنوان عوامل مهم توابع تولید درنظر نمی‌گیرند و به جانشینی نسبی و یا کامل محیط‌زیست و دیگر عوامل تولید اعتقاد دارند (کوئیکس[3]، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). درحقیقت، آن‌ها فرض می‌کنند که منابع طبیعی نامحدود می‌باشند و معتقدند که رشد اقتصادی می‌تواند به‌طور پیوسته و همیشگی افزایش یابد. این رویکرد توسط اکثر اقتصاددانان اکولوژی قابل پذیرش نمی‌باشد. در زمان فعالیت‌های محیط‌زیستی، در پروسه‌های تولیدی در هر مرحله زباله تولید می‌شود. موضوعی که در دهه‌های اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است، بحث بازیافت می‌باشد که می‌تواند زباله‌های تولیدی را کاهش دهد. همان‌طور که وار و آیرس[4] (۲۰۱۰) نشان داده است، "اگرچه ممکن است بیومس به‌سرعت بازیافت شود، اما این صحیح نیست که هیچ زباله غیربازیافتی در طبیعت وجود نخواهد داشت". به بیان دیگر همان‌طور که دیلی[5] (۲۰۰۵) می‌گوید"حقیقت آن است که بیوسفر زمین محدود، بسته و غیرقابل رشد است (به‌جز نهاده نور خورشید) و سیستم اقتصادی به‌وسیله قوانین ترمودینامیکی محدود شده است." از طرف دیگر سورل[6] (۲۰۰۷) در مورد محدودیت‌های محیط‌زیستی سیستم‌های اقتصادی بحث می‌کند که تعاریف چندگانه "کشش‌های جانشینی[7]" می‌تواند منجر به ابهام شود و مدل‌های اقتصادسنجی فعلی نمی‌تواند به‌صورت قابل قبول اثرات ریبوند (بازگشتی) در بخش‌های مختلف صنعتی را نشان داده و جانشینی ضعیف بین محیط‌زیست و دیگر عوامل تولید را مشاهده کرد که دلیل اصلی این موضوع را محدودیت‌های تکنولوژیکی می‌توان عنوان کرد. از طرف دیگر و در مقابل وضعیت صنعتی‌شدن، مبنای فیزیکی یک سیستم تولید صنعتی محدود به محدودیت‌های تکنولوژیکی می‌باشد (برودستوک و همکاران[8]، ۲۰۰۷). لذا موضوع چالش‌برانگیز در اقتصاد کشورهای مختلف همچون ایران که با محدودیت‌های جدی در زمینه عوامل تولید مبتنی بر موهبت‌های محیط‌زیستی هستند، مدیریت این منابع و استفاده بهینه‌تر از آن‌ها می‌باشد. از طرف دیگر با بررسی جانشینی انرژی و سرمایه در صنایع مختلف اقتصادی و درصورت تأیید مکمل‌بودن این عوامل تولید، نیاز و ضرورت حفاظت از نهاده‌های محیط‌زیستی همچون انواع انرژی‌های تجدیدناپذیر برای سیاست‌گذاران و پژوهشگران این حوزه پررنگ‌تر خواهد شد.

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و مشکلات اقتصاد ایران همچون بسیاری از اقتصادهای درحال توسعه دیگر، نداشتن یک دید بلندمدت نسبت به مسائل زیست‌محیطی در توسعه صنعتی می‌باشد. در واقع نیاز به بازنگری در نگاه به انرژی و سایر عوامل زیست‌محیطی مبتنی بر یک توسعه پایدار می‌باشد. آیرس و همکاران[9] (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که انرژی مهم‌تر از یک عامل تولید بوده که معمولا در فرایند تولید به نسبت سهم هزینه کوچک آن مشخص شده است. این نشان می‌دهد که فرایند رشد اقتصادی باتوجه به روند تاریخی آن نمی‌تواند مطمئن فرض شود. آن‌ها نشان داده‌اند که دو نوع محدودیت محیط‌زیستی در سیستم‌های اقتصادی وجود دارد: محدودیت‌های سخت که از دو نوع می‌باشند؛ اولی، درجه استفاده از ظرفیت می‌باشد که همیشه

1. Berndt & Wood
2. AES: *Allen Elasticity of Substitution, CPE: Cross Price Elasticity*
3. Couix
4. Warr & Ayres
5. Daly
6. Sorrell
7. elasticity's of substitution
8. Broadstock et al.
9. Ayres et al

این نسبت برابر یا کمتر از یک می‌باشد، زیرا نمی‌توان بیشتر از مقدار انرژی که یک سیستم و تکنولوژی با حداکثر ظرفیت خود استفاده کرد. دوم آنکه، درجه اتمی‌شدن نمی‌تواند از درجه ممکن تکنولوژی اتمی‌شدن بیشتر رود که این نسبت هم حداکثر می‌تواند برابر با یک باشد. علاوه بر این موضوع، محدودیت‌های نرم وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی شرایط اجتماعی، مالی، سازمانی و یا محدودیت‌های قانونی بوده و درنهایت همه این موارد احتمال جانشینی عوامل محیطزیستی همچون انرژی را در طول زمان محدود می‌کند و اهمیت آن را بیشتر روشن می‌سازد. باتوجه به پذیرش مکمل و ضروری‌بودن انرژی در پروسه تولید صنعتی در کشور و محدودبودن منابع انرژی، می‌توان گفت محدودیت‌های محیطزیستی در سیستم‌های اقتصادی به‌صورت معنادار وجود دارد که همگی نشان‌دهنده‌ی وجود و حضور قوانین ترمودینامیکی در سیستم‌های پیچیده اقتصادی و صنعتی می‌باشند. در یک جمله می‌توان گفت "انقلاب اقتصاد اکولوژی، هماهنگی بین نظام بازار و طبیعت" می‌باشد (میومی[1]، ۲۰۱۷). بنابراین باید اقتصاد را به‌صورت یک سیستم مشاهده کرد که محدودیت‌های محیطزیستی را در خود نشان می‌دهد و می‌تواند توسعه صنعتی را با مشکل مواجه کند. این موضوع نشان می‌دهد تکنولوژی‌های تولید، محدودیت‌هایی در استفاده از مواد و عوامل محیطزیستی (انرژی) دارند که به‌معنای کمیابی محیطزیست در سیستم اقتصادی می‌باشد.

امروزه استفاده بی‌رویه از مواهب زیست‌محیطی و رقابت در به‌کارگیری منابع اکولوژیکی در کشور ما شتاب فزاینده‌ای به خود گرفته و ابزارهای اقتصادی بازدارنده و مناسب، باعث بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی مختلفی شده است. ایران، در اوایل دهه ۱۳۵۰، برای ایجاد محیط زیستی سالم، تمایل جدی نشان داد و برخی اصول در قانون اساسی لحاظ شدند که باعث شد برنامه‌های کنترل آلودگی و حفاظت محیطزیست با برنامه‌های جاری توسعه ترکیب شود تا اطمینان حاصل شودکه فعالیت‌های زیست‌محیطی بخشی از توسعه ملی تلقی می‌شوند. برنامه‌های عمرانی و توسعه ایران نشان می‌دهند که در تشویق و حفظ محیطزیست، نقش دولت در قبل و بعد از انقلاب اسلامی به‌جای ترویج رقابت، کارایی و حفاظت از طریق ساز و کار بازار، دستور و نظارت مستقیم بوده است. در دهه هفتاد شمسی، واقعیت‌های موجود برنامه‌ریزان کشور را بر آن داشت که در سیاست‌های زیست‌محیطی کشور، رهیافت انگیزه‌های اقتصادی را جایگزین رهیافت «نظارت و کنترل» نمایند. به همین‌منظور در قانون برنامه‌های اول و دوم توسعه تعدادی مشوق اقتصادی پیش‌بینی شد، اما روند توسعه صنعتی کشور بعد از جنگ (عراق علیه ایران)، بیش از آن بود که این سیاست‌ها بتواند مانعی بر سر راه تخریب و آلودگی محیطزیست ایجاد نماید، برای اولین‌بار در ایران جرائم زیست‌محیطی {در قالب ماده ۱۳۴ و بند (ج) ماده ۱۰۴ برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی} مطرح شد و به‌دنبال آن آیین‌نامه اجرایی مواد یاد شده بالا تدوین گردید (عابدی و همکاران، ۱۳۹۳). در این‌باره ضعف برنامه‌های اجرایی، نبود آگاهی عمومی و شانه خالی‌کردن افراد و کارخانه‌ها از سیاست‌ها و قوانین، قرا گرفتن اولویت‌های تخصیص بودجه‌های سالانه در عرصه‌های دیگری به غیر از محیطزیست باعث ناتوانی سیاست‌های کنترل محیطزیست در ایران شده است (جهانگرد، ۱۳۹۷). برای مثال آلودگی هوا یکی از مشکلات زیست‌محیطی ایران است که در سال‌های اخیر و همگام با توسعه جوامع، صنعتی‌شدن و رشد تکنولوژی به خطری جدی بدل شده است. چنانچه آلودگی هوا موجب گسترش بیماری‌ها و متعاقباً نیازمندی جوامع به خدمات بهداشتی گردیده، مصرف منابع مالی جهت مراقبت‌های بهداشتی در کشور را افزایش داده است. این مهم بار اقتصادی سنگینی بر دوش جامعه و دولت‌ها در اقتصاد ایران تحمیل کرده است (سلاطین و اسلامبولچی، ۱۳۹۵). این روزها قطعی برق کارخانه‌ها، گاز پتروشیمی‌ها و آب برخی صنایع و... همگی حاکی از چالش جدی منابع انرژی و محیطزیستی در راستای توسعه صنعتی کشور می‌باشد. از طرف دیگر شکاف تئوریک مبتنی بر ضرورت توجه بیشتر منابع محیطزیستی باتوجه به تئوری‌های اقتصادی نئوکلاسیک و جانشینی انرژی و سرمایه به این چالش‌ها دامن زده است.

باتوجه به مسائل فوق، ایران و توسعه اقتصادی آن از مسیر و در کنار توسعه صنعتی می‌گذرد که نیاز به مصرف گسترده منابع محیطزیستی دارد و مسائل و مشکلات بسیاری را برای اقتصاد ایران و محیطزیست آن و حتی آینده و چشم‌انداز خود صنایع به‌وجود آورده است. این موضوع می‌تواند با نادیده‌انگاشتن قانون دوم ترمودینامیک و آنتروپی در مباحث محیطزیستی و تحلیل‌های مبهم جانشینی انرژی و سرمایه در اقتصاد و صنایع کشور باشد. مطابق با قانون آنتروپی در اقتصاد، محیطزیست و انرژی در سیستم اقتصادی محدود بوده و همواره به سمت کمیابی بیشتر در جریان است؛ به‌نحوی‌که کمبود مصرف انرژی به‌عنوان یک عامل

1. Mayumi

تولید می‌تواند رشد اقتصادی را محدود کند (صادقی عمروآبادی و رنانی، ۱۳۹۹). لذا در این مطالعه با بررسی کشش جانشینی انرژی و سایر نهاده‌های تولید همچون نیروی کار و سرمایه در صنایع منتخب بورس اوراق بهادار تهران طی دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰، وضعیت جانشینی و یا مکمل‌بودن انرژی و سرمایه مورد توجه قرار گرفته که می‌تواند تأییدکننده‌ی محدودیت‌های زیست‌محیطی بر توابع تولید باشد که درنهایت تأییدکننده‌ی دیدگاه آنتروپی اقتصادی به یک سیستم اقتصادی می‌باشد. به بیان دیگر روابط بین بهبود بهره‌وری انرژی برای تولیدکنندگان، سهولت جانشینی بین انرژی و سایر نهاده‌ها و اندازه اثرات معکوس حاصل در صنایع مختلف بورس اوراق بهادار تهران در این مقاله بررسی می‌شود. در واقع در این مقاله به بررسی اهمیت انرژی به‌عنوان یک عامل زیست‌محیطی بر تولید در صنایع مختلف کشور اشاره می‌شود. لذا پس از مقدمه، ادبیات و پیشینه تحقیق مربوط به توابع تولید و هزینه و جانشینی عوامل تولید بنگاه ارائه می‌گردد. سپس روش تحقیق، مدل و متغیرهای تحقیق و روش تخمین مدل ارائه می‌گردد. در ادامه نتایج مدل‌های رگرسیون و محاسبه کشش‌های توابع ارائه گردیده و درنهایت تجزیه و تحلیل نتایج و پیشنهادات تحقیق ارائه گردد.

۲. ادبیات و پیشینه تحقیق

انرژی به‌عنوان یکی از عوامل مهم تولید که از محیط‌زیست گرفته می‌شود و کارایی آن، رابطه نزدیکی با قانون آنتروپی دارد. قانون دوّم ترمودینامیک به‌عنوان قانون آنتروپی شناخته می‌شود که مطابق با آن تمام فرایندهای فیزیکی از طریقی حرکت می‌کنند که انرژی در دسترس کاهش می‌یابد و این به بدین‌معنی است که آنتروپی در سیستم افزایش می‌یابد. مقدار کل انرژی مفید که قابلیت تبدیل به کار را دارد در یک سیستم منزوی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. مطابق با بیان کلوین-پلانک[1] از قانون دوم ترمودینامیک؛ ساخت یک موتور گرمایی سیکلی (چرخه‌ای) که جز جذب گرما از منبع و انجام کار، مساوی با گرمای جذب‌شده تأثیر دیگری بر محیط نداشته باشد، غیرممکن است. یا می‌توان گفت که ساخت ماشین گرمایی با بازدهی ۱۰۰ درصد غیرممکن است. به بیان دیگر محدودیت‌های زیست‌محیطی و کمیابی انرژی همراه قانون آنتروپی در یک سیستم اقتصادی، دو روی یک سکه‌اند. در واقع قانون آنتروپی بیان می‌کند که انرژی مفید سیستم درحال کاهش می‌باشد و این محدودیت‌های زیست‌محیطی خود را در ضروری و مکمل‌بودن انرژی در تابع تولید نشان خواهد داد. درحقیقت آنتروپی ویژگی است که معادل است با میزان انرژی که در سیستم وجود دارد اما با آن نمی‌توان کار مفید انجام داد و بنابراین هرچه انرژی برای انجام‌دادن کار بیشتر باشد آنتروپی کمتر است. آنتروپی خاصیتی از هر سیستم است که افزایش آن نشانه کاهش انرژی مفید در سیستم‌ها، بی‌نظمی و تباهی است. بنابراین آنتروپی منفی به‌عنوان نشانه‌ای از پایداری یک سیستم درنظر گرفته می‌شود. جرجسکیو روگن، قانون دوّم ترمودینامیک را بیان کرد که مطابق با آن تغییر شکل مواد یا انرژی به‌ناچار در یک فرایندی صورت می‌گیرد که انرژی آزاد یا در دسترس به انرژی که در دسترس نیست تبدیل می‌شود و این تغییر شکل بیانگر افزایش آنتروپی است؛ بنابراین آنتروپی را می‌توان به‌عنوان انرژی خارج از دسترس بیان کرد (انصاری فرد، ۱۳۹۱).

در مقابل، برخی افزایش کارایی انرژی و به‌نوعی مقابله با آنتروپی انرژی را بیان می‌کنند. در واقع «اثر ریبوند یا معکوس»[2] یک اصطلاح کلی برای انواع مختلف مکانیسم‌های اقتصادی می‌باشد که «صرفه‌جویی‌های انرژی» ناشی از کارایی انرژی بهبودیافته را نشان می‌دهد (سورل، ۲۰۰۷). بهبود کارایی انرژی مقرون‌به‌صرفه برای تولیدکنندگان، مصرف بیشتر خدمات انرژی را تشویق می‌کند، بهره‌وری را ارتقا می‌دهد، بازده را افزایش می‌دهد و به‌طور بالقوه بر مصرف انرژی در سرتاسر اقتصاد اثرگذار است. اثر معکوس معمولا به‌صورت درصد صرفه‌جویی‌های بالقوه انرژی که از طریق مکانیسم‌های مختلف فوق متعادل می‌شود تعریف می‌گردد (ساندرز[3]، ۲۰۱۳). نتایج ساندرز دلالت بر آن دارد که مطالعات تجربی «سهولت جانشینی» بین انرژی و سایر نهاده‌ها بایستی بزرگی احتمالی اثرات معکوس در بخش‌های مختلف مورد بررسی را امکان‌پذیر سازد (استوک اتیوسکی و همکاران[4]، ۲۰۲۰؛ کندی، ۲۰۲۰ و کوئیکس، ۲۰۱۹).

توابع تولید نئوکلاسیک حاکی از حداکثر ستاده اقتصادی ممکن (Y) به‌دست آمده از سرمایه (K)، کار (L) و نهاده‌های واسطه برای یک سازمان یا بخش باتوجه به فناوری موجود در زمانی خاص (t) است. واسطه‌ها معمولا به انرژی (E) و سرمایه گذاری تحقیق و توسعه (M) تجزیه می‌شود:

$$lnY= f(lnK, \ln L, lnE, lnM, \ln t) \qquad (۱)$$

توابع تولید معمولا فزاینده، دوبار مشتق‌پذیر و نیمه‌مقعر با

1. Kelvin-Planck

2. rebound effects
3. Saunders
4. Skorek-Osikowska et al.

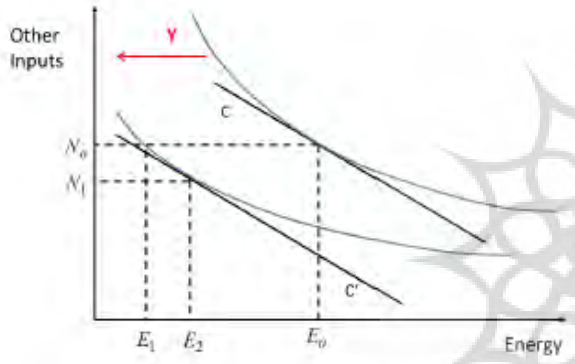
بازده‌های ثابت نسبت به مقیاس فرض می‌شود. به‌موجب فرضیات استاندارد، یک *تابع هزینه* دوگانه را می‌توان تعریف کرد که حداقل هزینه ممکن (C) ستاده حاصل Y را باتوجه به قیمت های هر نهاده (p_i) و حالت فعلی فناوری (t) نشان می‌دهد:

$$C= g(pK, pL, pE, pM, Y, t) \qquad (۲)$$

ساندرز (۱۹۹۲) اثرات معکوس را در رابطه با تغییر فنی انرژی افزا ($E\tau$) تعریف کرد که بیانگر بهبود بهره‌وری انرژی «خالص» می‌باشد که بر بهره‌وری سایر نهاده‌ها تأثیرگذار نیست یا تأثیری منفی بر ستاده اقتصادی دارد (کندی[1]، ۲۰۲۰). اما مطالعات تجربی احتمالا به‌طور مستقیم این شکل از تغییر فنی را برآورد نمی‌کنند، ممکن است مدل‌های اقتصادی انرژی آن را شبیه‌سازی نکنند و مطالعات اثرات معکوس می‌تواند متغیر مستقل مختلفی را انتخاب کند. همچنین مجزا کردن تغییر فنی انرژی افزا به این طریق تا حدودی ساختگی است؛ چراکه فناوری‌های جدید غالبا بهره‌وری چندین نهاده را به‌طور همزمان بهبود می‌بخشند. به‌طور کلی، تغییر فنی انرژی افزا منجر به بهبود مناسب بهره‌وری انرژی جمعی (θ_E) نخواهد شد زیرا:

انرژی مؤثر با قیمت پایین‌تر، جانشینی انرژی (مؤثر) برای سایر نهاده‌های (مؤثر) را برمی‌انگیزد، و هزینه‌های پایین‌تر نهاده، افزایش ستاده را برمی‌انگیزد که در عوض، مصرف انرژی را «تشدید خواهد کرد».

اثرات جانشینی فوق به‌طور ترکیبی، مصرف انرژی را بیشتر از آنچه که درصورت عدم وجود واکنش‌های فوق خواهد بود، افزایش خواهند داد. مجموع این دو، *اثر معکوس مستقیم* برای تولیدکنندگان است. به‌علاوه، اثرات معکوس مختلف غیرمستقیم و گسترده در اقتصاد نیز وجود خواهد داشت. به‌عنوان مثال اگر محصول مربوطه، یک نهاده واسطه برای سایر بخش‌ها تشکیل دهد (مثلا فولاد در تولید خودرو) کاهش قیمت‌های محصول می‌تواند محرک ستاده بیشتر از آن بخش‌ها و درنتیجه، افزایش بیشتر مصرف انرژی گسترده در اقتصاد باشد (دونگ و همکاران[2]، ۲۰۲۰). نقش جانشینی دراثر معکوس مستقیم را می‌توان با نمایش هندسی نشان داد. برای سهولت، فرض می‌کنیم نهاده‌های غیرانرژی از نهاده‌های انرژی «تفکیک‌پذیر» هستند و در نتیجه می‌توانند با همدیگر دسته‌بندی یا «تودرتو[3]» شوند. شکل زیر یک تابع تولید قراردادی با دو نهاده را نشان می‌دهد که ترکیب بهینه انرژی (E) و «دسته‌ای» از سایر نهاده‌ها (N) جهت تولید Y برای هزینه C از طریق محل تقاطع تولیدهای یکسان با خط هزینه یکسان (N_0، E_0) به‌دست می‌آید. تغییر فنی انرژی اندوز، تولیدهای یکسان را به سمت چپ انتقال می‌دهد و شیب‌شان را تغییر می‌دهد. اگر نهاده‌های دیگر بدون تغییر باقی بمانند صرفه‌جویی‌های بالقوه انرژی E_0-E_1 هستند. با این‌حال، تولیدکنندگان در طول زمان به‌سوی یک ترکیب نهاده هزینه جدید و پایین‌تر (N_1, E_2) تغییر مسیر می‌دهند، منجر به صرفه‌جویی‌های انرژی واقعی E_0-E_2 می‌گردد که کمتر از صرفه‌جویی‌های بالقوه هستند. اندازه اثر معکوس ((E_2-)/(E_0-E_1)) بستگی به سهولت جانشینی بین انرژی و نهاده‌های دیگر دارد که با خمیدگی تولید یکسان نشان داده می‌شود.



نمودار ۱. تغییر فنی انرژی افزا
مآخذ: ساندرز، ۲۰۱۳

نمودار ۱ و تغییر فنی انرژی افزا موجب برانگیختن جانشینی انرژی سایر نهاده‌ها می‌شود. تغییر فنی نیز می‌تواند ستاده را افزایش دهد (نشان داده نشده) زیرا: نخست، سطح بالاتر ستاده را می‌توان برای هزینه یا نهاده‌های خاصی به‌دست آورد و دوم، کاهش قیمت‌های کالا می‌تواند عرضه جمعی و درنتیجه ستاده را افزایش دهد. این افزایش ستاده منجر به افزایش مصرف انرژی خواهد شد. اثر معکوس مستقیم کلی، مجموع اثرات جانشینی و ستاده فوق است. در ادامه، اثر جانشینی در کانون توجه قرار می‌گیردکه به‌نظر ساندرز (۲۰۱۳) مهم‌تر است. اهمیت جانشینی برای اثرات معکوس حاکی از آن می‌باشد که این اثرات زمانی بیشترند که گستره جانشینی بین انرژی و سایر نهاده‌ها آسان‌تر است. ساندرز (۲۰۱۳) این مسئله را با استفاده از تعریف زیر از اثر معکوس مستقیم (R) نشان می‌دهد. همان‌طور که در ساندرز (۲۰۰۸) نشان داده σ =1/(1-ρ) کشش جانشینی هیکس (HES) بین ترکیب سرمایه–کار و انرژی مؤثر به‌عنوان معیار استاندارد

1. Kennedy
2. Dong et al.
3. nested

سهولت جانشینی است. اگر σ=0 باشد هیچ اثر معکوسی وجود ندارد؛ درحالی‌که چنانچه σ>1 باشد تغییر فنی انرژی افزا، بهره‌وری انرژی جمعی را کاهش می‌دهد (Δθ<1) و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد (ΔE>1). این وضعیت غیرمحتمل به‌نظر می‌رسد؛ زیرا حاکی از آن است که انرژی یک نهاده غیرضروری است. اما ساندرز (۱۹۹۲) اذعان می‌کند که «ساختارهای تو در توی» توابع (یعنی *(KE)L* و *(LE)K*) همواره منتهی به اثرات معکوس بزرگ‌تر، صرف‌نظر از HES بین دسته‌ها می‌شوند. لذا به‌نظر می‌رسد بزرگی برآورد شده اثرات معکوس نسبت به ساختار تو در تو و شکل تابعی حساس است. باتوجه به بحث فوق‌الذکر، بخش‌هایی که در آن‌ها جانشینی به‌سوی انرژی آسان‌تر است (یعنی σ بزرگ‌تر است) دربرابر اثرات معکوس آسیب‌پذیرتر خواهند بود. هوگان و مان[1] (۱۹۷۰) با استفاده از استدلال‌های مشابهی خاطرنشان ساختند در بخش‌هایی که جانشینی انرژی ساده‌تر است، افزایش قیمت‌های انرژی، آسیب‌پذیری کمتری دارد (کوئیکس، ۲۰۱۹). هر دو نتیجه‌گیری دارای کاربردهای سیاستی مهمی هستند و اهمیت برآورد صحیح سهولت جانشینی و سرعت تغییر فنی انرژی افزا در بخش‌های مختلف را مشخص می‌کنند. وزنا[2] (۲۰۱۶) در مطالعه خود، نتایج و تحلیل‌های فوق را تأیید می‌کند.

اسمولدرز[3] (۱۹۹۵)، در مقاله‌ی خود به ساختن مدل مناسب برای رابطه بین رشد و مشکلات محیط‌زیست پرداخته است. وی بیان می‌کند با وجود مشکلات محیط‌زیست، کیفیت محیط‌زیست کاهش یافته و باتوجه به وابستگی فعالیت اقتصادی به محیط‌زیست از منظر مواد اولیه یا زیست اجتماعی و فضای تولیدی، رشد اقتصادی وابسته به رشد فیزیکی به‌شدت کاهش خواهد یافت (وزنا، ۲۰۱۶). هنریک هرمانسون (۲۰۰۷) به‌دنبال این هدف است که نشان دهد استخراج منابع طبیعی اتوماتیک و رایگان نیست. وی با معرفی مفهوم منابع طبیعی کم آنتروپی سعی در جهت اصلاح این مسئله دارد. در این مدل محدودیت‌های زیست‌محیطی درارتباط با استخراج منابع طبیعی نیز لحاظ گردیده است. دیدگاه‌هایی که در این مدل به‌کار می‌روند براساس قوانین ترمودینامیک می‌باشند و بیانگر این واقعیت‌اند که اقتصاد یک زیرسیستم از محیط‌زیست است و منابع با آنتروپی پایین (منابع طبیعی کم آنتروپی)، مکمل‌های نیروی انسانی و سرمایه در تولید هستند. محقق به‌دنبال نشان‌دادن این مطلب که چگونه یک مدل رشد ساخته‌شده براساس اقتصاد زیست‌محیطی و استخراج پرهزینه منابع می‌تواند رشدهای متفاوت و نابرابری اقتصادی را توضیح دهد رابطه ریاضی تابع تولید را ارائه کرده است. *سنرک* (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای خود رشد اقتصادی را به‌عنوان عامل محدودکننده محافظت از محیط‌زیست دسته‌بندی می‌کنند. ژیان و همکاران[4] (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که براساس تئوری ساختار اسراف‌آمیز[5] و فرمان‌شناسی زیست‌محیطی[6]، یک رویکرد مقررات زیست‌محیطی در مقیاس شهری، در جهت افزایش نگهداری سالم یک سیستم از طریق کاهش آنتروپی اکوسیستم شهری توسعه داده می‌شود (۲۸). آیرس و همکاران[7] (۲۰۱۳) بیان می‌کنند که باتوجه به نظریه‌های اقتصادی نئوکلاسیک، رشد اقتصادی می‌تواند بدون توجه به در دسترس بودن و یا قیمت انرژی در نرخ پایینی ادامه داشته باشد. در این مطالعه استدلال می‌شود: اول اینکه، تئوری مربوط به سهم هزینه برای یک مدل اقتصادی ساده می‌باشد که قابل اجرا برای دنیای واقعی نمی‌باشد، بنابراین در واقعیت انرژی یک عامل مهم در تولید به حساب می‌آید، دوم، نمی‌توان به‌سادگی فرض نمود که رشد آینده به‌صورت دائمی خواهد بود. سناریوهای آینده مرتبط با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و سیاست‌های اقلیمی، که مرتبط با افزایش قیمت انرژی می‌باشد؛ دارای پیامدهای بسیار منفی برای رشد اقتصادی جهان می‌باشد.

سورل (۲۰۱۰) در مطالعهٔ خود نشان می‌دهد: ۱. اثرات بازگشتی مربوط به بهبود در بهره‌وری انرژی مهم می‌باشد و پتانسیل اختلاف مصرف انرژی از رشد اقتصادی را محدود می‌کند ۲. سهم انرژی در بهبود بهره‌وری و رشد اقتصادی تا حد زیادی دست‌کم گرفته می‌شود ۳. دستیابی به بهره‌وری بهبودیافته باید توسط روحیه و اخلاق قناعت تکمیل گردد ۴. پایداری با ادامه رشد اقتصادی در کشورهای ثروتمند ناسازگار می‌باشد ۵. رشد اقتصادی صفر با سیستم بانکداری ذخیره کسری ناسازگار است. همچنین هالر و هیلاند (۲۰۱۴) با استفاده از یک تابع هزینه ترانسلوگ به بررسی توابع تولید در شرکت‌های بخش تولیدی کشور ایرلند طی دوره زمانی ۲۰۰۹-۱۹۹۱ پرداخته‌اند و نشان می‌دهد که سرمایه و انرژی در فرایند تولید جانشین یکدیگر می‌باشند. همچنین در مورد تمام شرکت‌ها، یک درصد افزایش در انرژی با افزایشی در حدود ۰/۰۴

1. Hogan & Manne
2. Vozna
3. Smulders
4. Xuan et al.
5. dissipative structure theory
6. ecological cybernetics
7. Ayres et al.

درصد در تقاضا برای سرمایه همراه خواهد بود. کشش موریشیما که منعکس‌کنندهٔ پتانسیل جانشینی تکنولوژیکی می‌باشد بیان می‌کند که ۱ درصد افزایش در قیمت انرژی باعث می‌شود که نسبت ورودی سرمایه به انرژی در حدود ۱/۵ درصد افزایش پیدا کند. هریس[1] (۲۰۱۳) بیان می‌کند، همان‌طور که دیلی پیش‌بینی کرده بود؛ اقتصاد انرژی مبتنی بر بهره‌وری بالا و سوخت‌های تجدیدپذیر می‌تواند مسیر رشدنمایی را دنبال کند که اقتصادهای وابسته به سوخت‌های فسیلی در قرن بیست‌ویکم این امکان را نخواهند داشت. شکیبایی و همکاران (۱۳۸۸) به‌صورت موردی در کارگاه های صنعتی ۵۰ نفر کارکن و بیشتر در دورهٔ زمانی ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۵ و صمدی و همکاران (۱۳۸۸) با تخمین تابع تقاضای انرژی طی دوره زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۲ در صنایع تولید فلزات اساسی و اسلاملوییان و استادزاد (۱۳۹۳) با طراحی تابع تولید آشیانه‌ای با چهار نهاده نیروی کار، سرمایه، انرژی و سرمایه‌گذاری در بخش تحقیق و توسعه برای اقتصاد ایران و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیوسته به‌صورت عددی و غیرخطی به اهمیت نهاده انرژی و جانشینی آن با نهاده‌های دیگر پرداخته‌اند. کریمی و نوفرستی (۱۳۹۵) موضوع جانشینی انرژی و سایر نهاده‌های تولید را تأیید می‌کنند. کیم و هو[2] (۲۰۱۳)، هالر و هیلند[3] (۲۰۱۴) و کاستانتینی و مزانتی[4] (۲۰۱۴) در مطالعات تجربی خود جانشینی ضعیف عوامل تولید با عوامل محیطزیستی و انرژی را نشان دادند. تاور و ایگلسیاس[5] (۲۰۱۳) مکمل‌بودن عوامل تولید انرژی و سرمایه را نشان داده‌اند. سبحانی ثابت و منظور (۳۹۳)، کریمی و نوفرستی (۱۳۹۵) و مران[6] (۲۰۱۹) جانشینی انرژی در فرایند تولید را تأیید کرده‌اند.

در کل باتوجه به مطالب فوق می‌توان گفت جانشینی انرژی به‌عنوان یک عامل تولید از طرف محیطزیست با سایر عوامل تولید ضعیف بوده و درنتیجه عوامل محیطزیستی و فیزیکی سیستم اقتصادی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر تولید می‌باشند که باتوجه به محدودیت‌های فیزیکی و تکنولوژیکی در مصرف این عوامل تولید، محدودیت رشد اقتصادی و قوانین ترمودینامیکی همچون آنتروپی اقتصادی و هرزروی انرژی در مورد سیستم‌های اقتصادی مطرح می‌گردد که در بخش های بعدی به‌طور مفصل بحث می‌گردد.

۳. روش تحقیق

در این مطالعه از روش اسنادی و همچنین مدل‌های اقتصادسنجی جهت برآورد توابع هزینه و کشش‌های جانشینی انرژی و سایر نهاده‌های تولید و اثرات معکوس تولید در صنایع مختلف شرکت‌های بورس اوراق بهادار تهران طی دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰ استفاده شده است. در این مطالعه از سه صنعت مجزای خودروسازی/ قطعات، شیمیایی/ پتروشیمی و خوراکی/ آشامیدنی استفاده شده و سه مدل رگرسیونی مجزا با داده‌های پانلی در این صنایع استفاده شده است. در این مطالعه از شکل تابعی انعطاف‌پذیر ترانسلوگ جهت محاسبه کشش جانشینی، تابع هزینه استفاده باتوجه به مدل شریفی و یالمارسون (۲۰۰۰) استفاده شده که به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$LnC_{nt} = 0 + v V_{nt} + \sum_{i=1}^{m} b_{in} lnP_{int} + 0.5\alpha_{vv} V^2_{nt} + \alpha_t T + 0.5 \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \alpha_{ij} lnP_{int} lnP_{jnt} + \sum_{i=1}^{m} \alpha_{ti} lnP_{int} T + \alpha_{yt} V_{nt} T \quad (۱)$$

که Ln لگاریتم طبیعی و T هم روند زمانی است که پیشرفت فنی را نشان می‌دهد، اندیس n شرکت زیر نظر صنعت مورد نظر و t متغیر زمان را نشان می‌دهد که به‌صورت n=1,2,…,N می‌باشد. C_{nt} هزینه کل شرکت nام در سال t و V_{nt} لگاریتم طبیعی ارزش افزودهٔ فعالیت nام در سال t می‌باشد. اندیس‌های I,j مربوط به نهاده‌ها است که ۱=نیروی کار، ۲=سرمایه، ۳=برق و ۴=سایر حامل‌های انرژی (فراورده‌های نفتی و گاز طبیعی) است. در این مطالعه از سه صنعت مجزای خودروسازی/ قطعات، شیمیایی/ پتروشیمی و خوراکی/ آشامیدنی استفاده‌شده و سه مدل رگرسیونی مجزا با داده‌های پانلی در این صنایع استفاده شده است. معادلات سهم هزینه با استفاده از مشتق‌گیری تابع هزینه و لم شفارد به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$S_i = \frac{\partial LnC}{\partial LnP_i} = \frac{P_i X_i}{C}$$

$$\Rightarrow S_{int} = b_{in} + \sum_{j=1}^{4} \alpha_{ij} lnP_{jnt} + \alpha_{vi} V_{nt} + \alpha_{it} T + u_{int} \quad (۲)$$

P_{jnt} قیمت نهاده jام برای شرکت nم در سال t است و متغیر روند نیز با T نشان داده شده است و u_{int} هم جمله خطای نامشهود است. درنهایت باتوجه به اعمال شرایط جمع‌پذیری و همگنی نسبت به قیمت‌ها، m=۴ معادله (به‌ازای هر نهاده یک معادله) وجود دارد که نیاز به برآورد m-1 معادله مستقل خطی به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

1. Harris
2. Kim, & Heo
3. Haller and Hyland
4. Costantini & Mazzanti
5. Tovar and Iglesias
6. Meran

(۳)

$$S_{int} = b_{in} + \sum_{j=1}^{3} \alpha_{ij} \ln \frac{P_{jnt}}{P_{4nt}} + \alpha_{Vi} V_{nt} + \alpha_{Ti} T_t + u_{int}$$

از آنجا که به‌طور متوسط نهاده‌ی چهارم (سایر حامل‌های انرژی) دارای کمترین سهم هزینه‌ی در میان نهاده‌ها بوده است، به‌عنوان نهاده مبنا مورد استفاده قرار گرفته و قیمت سایر نهاده‌ها به‌صورت قیمت نسبی برحسب قیمت سرمایه در معادله‌ی سهم سایر نهاده‌ها وارد می‌شود. محدودیت‌های مدل شامل موارد شرط تقارن: $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$، شرط جمع‌پذیری و همگن بودن نسبت به قیمت‌ها: $\sum b_i = \sum 0_{ij} = 0$ و $0_{vi} = 0$ و شرط هموتتیک بودن: $0_{vi} = 0$، می‌باشند (۳۳). یک راه مناسب برای تفسیر قابلیت جانشینی بین نهاده‌های تولید، استفاده از کشش جزئی جانشینی آلن (AES) است. این کشش درصدی در نسبت دو نهاده‌ی تولید را که ناشی از یک درصد تغییر در قیمت‌های نسبی آن‌هاست، اندازه می‌گیرد. اوزاوا (۱۹۶۲) نشان می‌دهد که می‌توان کشش‌های جانشینی آلن را برای یک تابع هزینه‌ی عمومی C از فرمول $AES_{ij} = CC_{ij} / C_i C_j$ محاسبه کردکه در آن $C_i = \partial C / \partial P_i$ و $C_{ij} = \partial^2 C / \partial P_i \partial P_j$ است که C هزینه و P قیمت عوامل می‌باشد. اگر بخواهیم این رابطه را در تابع هزینه ترانسلوگ استفاده کنیم به‌صورت $AES_{ii} = (\alpha_{ij} + S_i(S_i - 1)) / S_i^2$ و $AES_{ij} = (*_{ij} + S_i S_j) / S_i S_j$ خواهد بود و رابطه کشش‌های خودقیمتی و متقاطع برحسب کشش‌های جانشینی آلن به‌صورت $AES_{ij} = E_{ij} / S_{ij}$ خواهد بود که S سهم هزینه عامل در تابع هزینه می‌باشد (کوئیکس، ۲۰۱۹). مفهوم آنتروپی باتوجه به نتایج کشش عوامل مطرح می‌شود. چنانچه نهاده‌ها مکمل باشند و نشان داده شود که محیط‌زیست برای پروسه تولید ضروری بوده و آن را نمی‌توان با سرمایه جانشین کرد، باتوجه به محدودیت منابع زیست‌محیطی، قانون آنتروپی در اقتصاد و صنعت پر رنگ‌تر خواهد شد.

داده‌های تحقیق از صورت‌های مالی شرکت‌های بورسی و همچنین ترازنامه انرژی کشور گرفته شده است. قیمت نیروی کار همانند مطالعات بیورنر و همکاران[1] (۲۰۰۱) و... برای هر شرکت و هر سال به‌صورت متوسط دستمزد و حقوق سالیانه و از تقسیم پرداختی بابت خدمات نیروی کار بر تعداد کل شاغلان آن زیر بخش محاسبه شده است. قیمت سایر حامل‌های انرژی (هر حامل انرژی به جز برق همچون گاز) از طریق محاسبه میانگین وزنی قیمت حامل‌های انرژی به‌صورت قیمت یک مگاژول انرژی به‌دست آمده است که وزن هر حامل انرژی، میزان انرژی آزادشده از آن حامل انرژی درنظر گرفته شده است. کل هزینه پرداختی برای هر شرکت نیز به‌صورت حاصل جمع ارزش افزوده و پرداختی بابت خرید سوخت و سایر حامل‌های انرژی درنظر گرفته شده است (کریستوبلوس، ۲۰۰۰ و بیونر و همکاران، ۲۰۰۱). متغیر قیمت سرمایه باتوجه به تفکیک هزینه انرژی از ارزش افزوده در بخش اول، به‌صورت زیر محاسبه شده است (وودلند[2]، ۱۹۹۷؛ ۳۵):

$$P_k = \frac{\text{ارزش افزوده} - \text{دستمزد و حقوق}}{\text{موجودی سرمایه}}$$

و هزینه کل (C) = هزینه انرژی + ارزش افزوده

که تابع هزینه به‌صورت رابطه ۱ و سهم هزینه عوامل به‌صورت روابط ۲ و ۳ می‌باشد.

۴. نتایج تحقیق

در پژوهش حاضر جهت محاسبه کشش جانشینی انرژی و سرمایه، سیستم معادلات سهم هزینه به‌صورت مقید و با ۵ متغیر توضیحی برآورد شده است. متغیرهای توضیحی استفاده‌شده در این مطالعه به‌صورت زیر هستند که در ادامه آزمون‌های همجمعی‌بودن برای هرکدام از متغیرهای یادشده و متغیرهای وابسته موجود در مدل انجام خواهد شد.

LnpKO: لگاریتم طبیعی قیمت سرمایه نسبت به سایر حامل‌های انرژی

LnpLO: لگاریتم طبیعی قیمت نیروی کار نسبت به سایر حامل‌های انرژی

LnpEO: لگاریتم طبیعی قیمت انرژی برق نسبت به سایر حامل‌های انرژی

LnpVA: لگاریتم طبیعی ارزش افزوده (ارزش افزوده اقتصادی شرکت مبتنی بر مطالعه رستمی و همکاران (۱۳۸۳) و

1. Bjørne et al.
2. Woodland

باتوجه به نرخ بازدهی شرکت، هزینه سرمایه و سرمایه به‌کار گرفته‌شده شرکت به‌دست آمده است) و t: پیشرفت فنی.

باتوجه به اینکه سیستم معادلات سهم هزینه از تابع هزینه‌ی کل به‌دست می‌آیند، اجزای اخلال مستقل از هم نبوده و همچنین لازم است که حتما قیود بین معادلات (جمعی‌سازی، همگنی نسبت به قیمت‌ها و تقارن) اعمال شود؛ بنابراین برآورد معادلات به‌صورت تکی کارایی لازم را نداشته و معادلات به‌صورت سیستمی و از روش رگرسیون‌های به ظاهر نامرتبط تکراری (ISUR) برآورد می‌شوند. البته به‌منظور آزمون قیود تقارن، ابتدا مدل به‌صورت نامقید و بدون اعمال قیود تقارن برآورد و سپس با استفاده از آماره‌ی آزمون والد درستی قیدها آزمون شده است. با واردکردن متغیر روند (t) در معادلات مدل به‌عنوان جایگزینی برای تأثیر پیشرفت فنی، امکان بررسی تأثیر پیشرفت فنی بر شدت استفاده از نهاده‌ها در طول دوره‌ی مورد بررسی فراهم می‌شود. همچنین واردکردن ارزش افزوده در معادلات برآوردشده، امکان آزمون همگن‌بودن تابع تولید نسبت به ستانده در صنایع مرتبط با خودرو سازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی را فراهم می‌کند. برای این آزمون‌ها از تابع آزمون والد استفاده گردیده است که نتایج آن به‌صورت زیر است، به‌طوری‌که فرضیه‌های صفر هموتتیک بودن تابع تولید (صفر بودن ضرایب مربوط به ضریب LnpVA)، عدم تأثیر متقابل پیشرفت فنی و قیمت‌ها در تابع هزینه و بنابراین عدم وجود روند در سهم هزینه‌ها هستند. برای تخمین تابع، در ابتدا نتایج قیدهای مدل آزمون می‌شوند که نتایج آن به‌صورت زیر می‌باشند.

جدول ۱. آزمون قیدهای همگنی، تقارن و وجود روند

آمارهٔ آزمون والد			H0
خودرو	پتروشیمی	خوراکی	
۰/۹۳۵	۰/۸۳۳	۰/۹۸۲	قیود تقارن
****۱۴/۰۰۱**	**۱۲/۰۷۴	**۱۷/۰۱۸	همگنی
****۱۵/۰۰۱**	**۱۴/۰۹۶	**۱۶/۷۵۵	عدم روند و پیشرفت فنی

مأخذ: محاسبات تحقیق؛ علامت ** معناداری در سطح ۱درصد را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که فرضیه‌های صفر هموتتیک بودن تابع تولید (صفر بودن ضرایب مربوط به ضریب LnpVA)، عدم تأثیر متقابل پیشرفت فنی و قیمت‌ها در تابع هزینه و بنابراین عدم وجود روند در سهم هزینه‌ها در شرکت‌های بورسی صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی رد می‌شوند. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که تکنولوژی تولید در این شرکت‌ها، نه همگن است و نه هموتتیک و بنابراین نمی‌توان متغیرهای مربوط به لگاریتم ارزش افزوده را از مدل حذف کرد. به‌عبارت دیگر با تغییر سطح تولید و ارزش افزودهٔ ایجادشده، هزینه‌های انجام‌شده بابت هرکدام از نهاده‌ها به‌صورت غیرهمگن تغییر می‌کند. علاوه بر آن باتوجه به احتمال معناداری کمتر از ۰,۰۵ فرضیه صفر عدم وجود روند تأثیر پیشرفت فنی و درنتیجه رد آن، تغییرات تکنولوژی در طی دوره مورد بررسی، روی تقاضای نهاده‌ها و سهم هزینه آنان از کل هزینه‌های تولید تأثیر معناداری دارد، به این‌ترتیب که در طی دوره مورد بررسی، تکنولوژی تولید به سمت استفاده بیشتر از نهاده انرژی و کمتر از نهاده سرمایه گام برداشته است. به‌عبارت دیگر در فرایند تولید در این دوره، نهاده‌ی برق جانشین سایر نهاده‌ها شده است. باتوجه به اینکه همه متغیرهای مورد استفاده در برآورد مدل‌داری جمعی از مرتبه صفر هستند، لذا با این‌وجود برای اطمینان از جعلی نبودن رگرسیون و قابلیت اطمینان به برآوردهای به‌دست‌آمده از پارامترها، ضروری است که آزمون هم‌جمعی برای هرکدام از معادلات انجام شود. برای این‌منظور آزمون ریشه واحد بر روی باقیمانده‌ها حاصل از برآورد هریک از معادلات برآورد شده با استفاده از روش‌های فیشر و Z انجام شده است.

جدول ۲. آزمون همجمعی معادلات مدل

متغیر	آزمون	آماره آزمون			نتیجه آزمون
		خودروسازی	پتروشیمی	خوراکی	
باقیمانده معادله اول	آزمون فیشر	۳۵/۱۲**	۲۵/۰۱**	۳۷/۰۷**	متغیرها همجمعند
	آزمون Z	-۲/۹۶	-۳/۰۹	-۳,۴۶	
باقیمانده معادله دوم	آزمون فیشر	۲۸/۰۲**	۹۱/۱۴**	۲۸,۷۴**	متغیرها همجمعند
	آزمون Z	-۳/۴۵	-۵/۰۱	-۳,۰۹	
باقیمانده معادله سوم	آزمون فیشر	۲۸/۱۴**	۸/۰۳**	۲۸/۱۲***	متغیرها همجمعند
	آزمون Z	-۲/۴۴	-۳/۹۶	-۲/۱۴	

مأخذ: محاسبات تحقیق؛ علامت‌های ** و *** به‌ترتیب بیانگر معناداری در سطح ۵ درصد و ۱ درصد را نشان می‌دهد.

در ادامه نتایج تخمین‌ها و محاسبه کشش‌های جانشینی آلن برای شرکت‌های صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی آورده شده است:

جدول ۳. نتایج حاصل از برآورد پارامترهای مدل صنایع خودرو سازی، پتروشیمی و خوراکی؛ISUR

	ضریب متغیر		
	خودرو سازی و قطعات	شیمیایی و پتروشیمی	خودرو سازی و قطعات
LL	۰,۰۲۱**	۰/۰۸۹***	۳/۰۷۴*
LK	-۰/۲۲۱**	-۰/۰۱۵*	۳/۰۰۱***
LE	۰,۰۱۵**	۰/۰۳۷***	۰/۷۷۲***
LO	-۰/۰۰۱*	-۰/۰۵۴*	-۰/۱۳۵***
KK	۰/۰۳۵***	۰/۰۲۲***	۱,۵۲۴**
KE	-۰/۰۵۹*	-۰/۰۵۵*	-۰/۲۲۱***
KO	۰,۰۳۹	۰/۳۹۵***	۰/۰۹۱***
EE	۰/۰۰۱***	۰/۰۴۹***	۲/۴۱۵***
EO	-۰,۰۱۲	-۰/۰۲۷***	-۳/۹۹***
OO	۰/۰۶۹***	۰/۰۵۵***	۰/۰۰۶*
VL	۰,۰۰۱**	۰/۰۹***	۴/۴۱۵***
VK	۰,۰۰۳**	۰,۰۲۱**	۱,۹۶۳**
VE	-۰/۰۱۸***	-۰/۰۰۱***	-۳/۰۲۰*
VO	-۰/۰۰۱***	-۰/۰۳۹***	-۱/۸۹۵***
TL	-۰/۰۲۱***	-۰/۰۰۱***	-۲/۴۱۵*
TK	-۰/۰۰۱*	-۰/۰۰۲۳**	-۲,۰۱۰**
TE	-۰/۰۲۵***	-۰/۰۰۵۳***	-۰/۰۰۷۲***
TO	-۰/۰۰۸*	-۰/۰۰۲***	-۰/۰۰۴***

مأخذ: محاسبات تحقیق

کشش‌های تقاضای مشتقه

کشش‌های جانشینی آلن و کشش‌های قیمتی تقاضای مشتقه در جداول شماره‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در هر دو جدول کشش‌ها در میانگین سهم هزینه‌ها ارزیابی شده‌اند. منطبق بر جدول ۵، کشش خودی قیمت برای سرمایه کوچک بوده و برای خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی به‌ترتیب برابر (-۰,۰۹، -۰,۰۴ و -۰,۰۳) کمتر از قدر مطلق ۰,۱ است و نشان می‌دهد که تقاضای سرمایه نسبت به تغییرات قیمت کالاهای سرمایه‌ای حساسیت زیادی ندارد. نیروی کار هم کشش قیمتی خودی صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی (به‌ترتیب -۰,۳۷، -۰,۳۳ و -۰,۳۸) برابر ۰,۳- دارد که از معادل آن برای سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آلن معادل آن‌ها نیز

به‌ترتیب ۱٫۳۹- و ۰٫۳۱- است. منطبق بر رابطه ۴، کشش خودقیمتی برق برابر ۰٫۱۴- کمتر از سایر حامل‌های انرژی ۰٫۷۹- است و نشان می‌دهد این تابع نسبت به برق، سایر حامل‌های انرژی حساسیت بیشتری در این صنعت نسبت به تغییرات قیمت دارند. همچنین برای صنایع شیمیایی کشش خودی قیمت برای سرمایه کوچک بوده و حدود ۰٫۰۴- است و نشان می‌دهد که تقاضای سرمایه نسبت به تغییرات قیمت کالاهای سرمایه‌ای حساسیت زیادی ندارد. نیروی کار هم کشش قیمتی خودی صنایع شیمیایی و پتروشیمی برابر ۰٫۳۳- دارد که از معادل آن برای سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آلن معادل آن‌ها نیز به‌ترتیب ۱٫۲۹- و۰٫۱۷- است. کشش خودقیمتی برق برابر ۰٫۱۲- بزرگ‌تر از سایر حامل‌های انرژی ۰٫۷۲- است و نشان می‌دهد این تابع نسبت به برق، سایر حامل‌های انرژی حساسیت کمتری در این صنعت نسبت به تغییرات قیمت دارند. همچنین برای صنایع خوراکی کشش خودی قیمت برای سرمایه کوچک بوده و حدود ۰٫۲۹- است و نشان می‌دهد که تقاضای سرمایه نسبت به تغییرات قیمت کالاهای سرمایه‌ای حساسیت زیادی ندارد. نیروی کار هم کشش قیمتی خودی برابر ۱٫۵۱- دارد که از معادل آن برای سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آلن معادل آن‌ها نیز به‌ترتیب ۱٫۵۱- و ۰٫۲۹- است. کشش خودقیمتی برق برابر ۰٫۱۷- کوچک‌تر از سایر حامل‌های انرژی ۰٫۷۶- است و نشان می‌دهد این تابع نیز نسبت به برق، سایر حامل‌های انرژی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات قیمت دارند. کشش‌های جانشینی آلن و قیمتی متقاطع بین برق و سایر حامل‌های انرژی منفی هستند و نشان می‌دهند برق و سایر حامل‌های انرژی همیشه جانشین هم نیستند. لذا کلیه حالت‌های انرژی جهت پروسه تولید مورد نیاز می‌باشند. کشش‌های آلن و قیمتی متقاطع بین سرمایه و برق و سایر حامل‌های انرژی نیز منفی بوده و نشان می‌دهد سرمایه و برق نهاده‌های مکمل بوده و جانشین نمی‌باشند. در واقع سرمایه را نمی‌توان جانشین برق و یا سایر حامل‌های انرژی کرد و انرژی به‌عنوان یک نهاده ضروری تولید در شرکت‌های صنایع خوراکی و آشامیدنی مطرح می‌باشد. در واقع باتوجه به ضروری‌بودن نهاده انرژی، باید به محدودیت‌های این نهاده در محیط‌زیست توجه کرد و افق رشد بی‌نهایت را جهت حفاظت از محیط‌زیست محدود کرد.

جدول ۴. کشش‌های جانشینی آلن برای صنایع خودروسازی، پتروشیمی و خوراکی

کشش قیمتی	L			K			E			O		
	خودرو	پتروشیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی
L	-۰/۳۷	-۰/۳۳	-۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۷	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۱
K	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۰	-۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴
E	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۹	-۰/۱۴	-۰/۱۲	-۰/۱۷	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۴
O	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۰۶	۱/۰۹	۱/۰۹	۱/۰۷	-۰/۰۸	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۷۹	-۰/۷۲	-۰/۷۶

مأخذ: محاسبات تحقیق

جدول ۵. کشش‌های قیمتی و متقاطع برای شرکت‌های صنایع خودروسازی، پتروشیمی و خوراکی

کشش AES	L			K			E			O		
	خودرو	پترو شیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی	خودرو	پتروشیمی	خوراکی
L	۱/۳۹	-۱/۲۹	-۱/۵۱	۰/۵۱	۰/۲۹	۰/۴۹	۱/۷۵	۱/۶۵	۱/۹۸	-۰/۱۵	-۰/۱۲	-۰/۳۲
K				-۰/۳۱	-۰/۱۷	-۰/۲۹	-۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۲۸	۱/۹۹	۱/۴۷	۱/۸۹
E							-۶/۰۹	-۵/۱۲	-۶/۰۳	-۲/۰۵	-۲/۲۸	-۲/۲۴
O										-۴۲/۴	-۴۱/۴	-۴۲/۴

مأخذ: محاسبات تحقیق

کشش‌های جانشینی آلن و قیمتی متقاطع در جدول (۵) بین برق و سایر حامل‌های انرژی منفی هستند و نشان می‌دهند برق و سایر حامل‌های انرژی همیشه جانشین هم نیستند. لذا کلیه حالت‌های انرژی جهت پروسه تولید مورد نیاز می‌باشند. کشش‌های آلن و قیمتی متقاطع بین سرمایه و برق و سایر حامل‌های انرژی نیز منفی بوده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

قانون دوم ترمودینامیک و یا آنتروپی به افزایش بی‌نظمی و کاهش انرژی در دسترس سیستم اشاره دارد. اهمیت این قانون باتوجه به مکمل‌بودن انرژی در فرایند تولید و پذیرش محدودیت در منابع طبیعی، اهمیت خود را بیش از پیش نشان می‌دهد. در واقع عوامل نهاده‌ای مبتنی محدودیت‌های محیطزیستی، چنانچه به‌خوبی مدیریت نشوند، می‌تواند فرایند صنعتی‌شدن را با مشکل مواجه کرده و آنتروپی سیستم را افزایش دهد. این قانون محدودیت منابع طبیعی و محیطزیستی در مسیر رشد اقتصادی و توسعه صنعتی را هدف قرار داده است. از طرف مقابل جانشینی و مکمل‌بودن نهاده‌های محیطزیستی همچون انرژی با سایر نهاده‌های نیروی کار و انرژی به‌طور مستقیم با این محدودیت مرتبط می‌باشد. لذا برای ورود به بحث آنتروپی، جانشین و مکمل‌بودن انرژی و درنتیجه ضروری‌بودن انرژی برای پروسه تولید مطرح می‌باشد و با ضروری و مکمل‌بودن انرژی از یک طرف و محدودیت منابع و انرژی در سیستم اقتصادی از طرف دیگر، قانون آنتروپی به‌خوبی خود را نشان داده و محدودیت‌های جدی در پروسه رشد اقتصادی به‌وجود خواهد آمد. در این مطالعه به برآورد کشش‌های جانشینی و مکمل انرژی و سایر نهاده‌های تولید همچون نیروی کار و سرمایه در صنایع مختلف بورس اوراق بهادار تهران طی دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰، وضعیت جانشینی و یا مکمل‌بودن انرژی و سرمایه مورد توجه قرار گرفته که می‌تواند تأییدکننده‌ی محدودیت‌های زیست‌محیطی بر توابع تولید باشد که درنهایت تأییدکننده‌ی دیدگاه آنتروپی اقتصادی به یک سیستم اقتصادی می‌باشد.

جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که سرمایه را نمی‌توان جانشین برق و یا سایر حامل‌های انرژی کرد و انرژی به‌عنوان یک نهاده ضروری تولید در شرکت‌های صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوراکی و آشامیدنی مطرح می‌باشد. در واقع کشش‌های جانشینی آلن و قیمتی متقاطع بین برق و سایر حامل‌های انرژی منفی هستند و نشان می‌دهند برق و سایر حامل‌های انرژی همیشه جانشین هم نیستند. لذا کلیه حالت‌های انرژی جهت پروسه تولید مورد نیاز می‌باشند. همچنین کشش‌های آلن و قیمتی متقاطع بین سرمایه و برق و سایر حامل‌های انرژی نیز منفی بوده و نشان می‌دهد سرمایه و برق نهاده‌های مکمل هستند. آنتروپی انرژی به‌عنوان مانع و محدودیتی در سیستم اقتصادی، باتوجه به مکمل و ضروری‌بودن نهاده انرژی در پروسه صنعتی کشور، پررنگ‌تر خواهد شد. به بیان دیگر باتوجه به ضروری‌بودن نهاده انرژی، باید به محدودیت‌های این نهاده در محیطزیست توجه کرد و افق رشد اقتصادی بی‌نهایت را جهت حفاظت از محیطزیست محدود کرد. اگر بنگاه بخواهد به‌دلیل ارزان‌شدن برخی نهاده‌ها یا افزایش تقاضای محصول یا هر دلیل دیگر سطح فعالیت و تولید خود را افزایش دهد، اما منابع مالی کافی برای سرمایه‌گذاری نداشته باشد، بنگاه برای افزایش تولید از تمام ظرفیت‌های ممکن استفاده کرده و نهاده انرژی را هم بیشتر مورد استفاده قرار می‌دهد و هزینه سرمایه نیز بالاتر می‌رود.

باتوجه به مکمل و ضروری‌بودن نهاده‌های انرژی در صنایع مختلف، توجه به محدودیت‌های این منابع محیطزیستی در مسیر توسعه پایدار، استفاده از تکنولوژی‌های با مصرف کمتر انرژی، سیاست‌گذاری مناسب و واقعی قیمت انرژی و سیاست‌گذاری‌های مالیاتی مناسب (مالیات سبز و... جهت کاهش تخریب محیطزیستی) جهت مصرف بهینه‌تر از انواع انرژی پیشنهاد می‌شود. باتوجه به نتایج این مطالعه پیشنهاد می‌شود به مکمل‌بودن نهاده انرژی در پروسه تولید و محدودیت آنچه در دیدگاه کلان و چه در دیدگاه خرد بنگاه توجه شود و برای مقابله با کمبود آن، پیش‌بینی‌های لازم جهت کاهش آنتروپی در سیستم اقتصادی درنظر گرفته شود. در واقع با نقد دیدگاه کلاسیک می‌توان گفت، لزوما نمی‌توان رشد اقتصادی همیشگی و فزاینده برای سیستم اقتصادی درنظر گرفت و باید به فکر پارادایم‌های جایگزین یک رشد اقتصادی پایدار با لحاظ‌کردن قوانین ترمودینامیکی و محدودیت‌های زیست‌محیطی درنظر گرفت.

منابع و مآخذ

انصاری فرد، محمد. (۱۳۹۱). تحلیل رابطه بین جهانی‌شدن و آنتروپی اقتصادی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد توسعه و برنامه‌ریزی اقتصادی دانشگاه اصفهان.

سلاطین، پروانه؛ اسلامبولچی؛ سحر. (۱۳۹۵). تأثیر کیفیت محیطزیست بر اقتصاد سلامت در گروه کشورهای منتخب. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیطزیست، (۱)۱۸، ۱۲۱-۱۰۷.

عابدی، زهرا؛ ریاحی، مهدی؛ صالحی، صالح. (۱۳۹۳). تجزیه و تحلیل اقتصادی جرایم زیست‌محیطی در ایران و مشکلات اجرایی آن فصلنامه علوم و تکنولوژی محیطزیست، (۴)۱۶، ۱۸۷-۱۷۵.

جهانگرد، اسفندیار. (۱۳۹۷). محیطزیست و برنامه‌های توسعه در ایران. *فصلنامه اقتصاد محیطزیست و منابع طبیعی، ۲(۲)، ۱۴۲-۱۰۵.*

صادقی عمروآبادی، بهروز ؛ رنانی، محسن. (۱۳۹۹). طبقه‌بندی شاخص آنتروپی اقتصادی در یک مدل کلان اقتصادی *فصلنامه علمی مدلسازی اقتصادی، ۱۴(۵۲)، ۲۴-۱.*

رستمی، علی اصغر انواری؛ تهرانی، رضا؛ سراجی، حسن. (۱۳۸۳). بررسی ارتباط میان ارزش افزوده اقتصادی. سود قبل از بهره و مالیات. جریان نقدی فعالیت‌های عملیاتی با ارزش بازار سهام شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران. *بررسی‌های حسابداری و حسابرسی، ۱۱(۳).*

شهیکی تاش، محمد نبی؛ موسوی، هانیه؛ خواجه حسنی، مصطفی. (۱۳۹۹). برآورد پارامتریک تابع تقاضای شرطی آب در صنایع کارخانه‌ای ایران. فصلنامه پژوهش‌های اقتصاد صنعتی. (۱۱)۴، ۳۸-۲۵.

Bjørner T.B., M. Togeby H.H. Jensen (2001) ‘‘Industrial companies’ demand for electricity: evidence from a micro panel’’. Energy Economics. 595–617.

Berndt, E.R.; Wood, D.O(1975). Technology, prices, and the derived demand for energy. **Rev. Econ. Stat.** *57*, 259–268.

Berndt, E.R. (1990). Energy use, technical progress and productivity growth: A survey of economic issues**. *J. Product. Anal***. *2*, 67–83.

Couix, Q. (2018). The role of natural resources in production: Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz.

Couix, Q. (2019). Natural resources in the theory of production: the Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz controversy. The European Journal of the History of Economic Thought. 26(6), 1341-1378.

Warr, B., Ayres, R., (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth. Energy. 35, 1688–1693.

Sorrell, S. (2007). *The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-Wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*; UK Energy Research Centre: London, UK.

Broadstock, D.; Hunt, L.; Sorrell, S. (2007). *UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect:Technical Report 3—Elasticity of Substitution Studies*; UK Energy Research Centre: London,UK,.

Ayres, R. U., Van den Bergh, J. C., Lindenberger, D., & Warr, B. (2013). The underestimated contribution of energy to economic growth. Structural Change and Economic Dynamics. 27, 79-88.

Kim, J., Heo, E., (2013). Asymmetric substitutability between energy and capital: Evidence from the manufacturing sectors in 10 OECD countries. Energy Economics. 40, 81-89.

Haller Stefanie A. and, Marie Hyland (2014). Capital–energy substitution: Evidence from a panel of Irishmanufacturing firms. Energy Economics 45.501–510

Costantini V., Mazzanti, M., (2013). The Dynamics of Environmental and Economic Systems. Innovation, Environmental Policy and Competitiveness, Springer-Verlag, Berlin, pp. 3-24.

Tovar, M.A., Iglesias, E.M., (2013). Capital-Energy Relationships: An Analysis when Disaggregating by Industry and Different Types of Capital. The Energy Journal. 34 (4), 129-150.

Karimi Rahjerdi, Abazar. And Mohammad Nofaresti. (1395). Estimation of energy input substitution elasticities in macroeconomic function of Iran's economy by two-step CES method. Economics and Modeling. (26) 7. 96-71. (in persian)

Meran, G. (2019). Thermodynamic constraints and the use of energy-dependent CES-production functions A cautionary comment. Energy Economics. 81, 63-69.

Mayumi, K. T. (2017). Thermodynamics: Relevance, implications, misuse and ways forward. *Routledge Handbook of Ecological Economics*, 89-98.

Saunders, H.D. (2013). Historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors and a toolkit for rebound analysts. **Technol. Forecast. Soc**. Chang. 80, 1317–1330.

Turner, K. (2009). Negative rebound and disinvestment effects in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy. Energy Econ. 31, 648–666.

Grepperud, S.; Rasmussen, I. (2004). A general equilibrium assessment of rebound effects. Energy Econ. 26, 261–282.

Skorek-Osikowska, A., Martin-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J.

Harris J. M. (2013) « Population, Resources, and Energy in the Global Economy: A Vindication of Herman Daly's Vision", Global Development And Environment Institute, Working Paper No. 13-03.

Islamluyan, K. And Ostadzad, A. (1393). Estimation of substitution elasticity between energy and other inputs in Iran using CES multi-stage production function. Iranian Journal of Applied Economic Studies. (9) 3. 47-25. (in persian)

Samadi, S. Sharifi, A. Ahmadzadeh, A. And Azad Khanzadi (1388). Substitution between energy input and capital in the base metals sector. Journal of Economic Research, 89. 155-130. (in persian)

Shakibaei, A., Sadeghi, Z. And Hassan Ammi Bandeh Qarai (1388). The effect of realizing energy prices on the elasticity of energy demand and estimating the elasticity of energy institution substitution in the industrial sector in the long run. Bi-Quarterly Journal of Economic Research. (11) 6. 155-133. (in persian)

Meran, G. (2019). Thermodynamic constraints and the use of energy-dependent CES-production functions A cautionary comment. Energy Economics, 81, 63-69.

Stöckl, F. (2020). Is substitutability the new efficiency? Endogenous investment in the elasticity of substitution between clean and dirty energy.

Lecca, P.; Swales, K.; Turner, K. (2012). An investigation of issues relating to where energy should enter the production function. Econ. Model. 28, 2832–2841.

Stern, D.; Kander, A. (2012). The role of energy in the industrial revolution and modern economic growth. Energy J., 33, 125–152.

(2020). Thermodynamic, economic and environmental assessment of energy systems including the use of gas from manure fermentation in the context of the Spanish potential. Energy. 117452.

Kennedy, C. (2020). Energy and capital. Journal of Industrial Ecology, 24(5), 1047-1058.

Couix, Q. (2019). Natural resources in the theory of production: the Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz controversy. The European Journal of the History of Economic Thought, 26(6), 1341-1378.

Dong, J., Jeswani, H. K., Nzihou, A., & Azapagic, A. (2020). The environmental cost of recovering energy from municipal solid waste. Applied Energy. 267, 114792.

Hogan, W.W.; Manne, A.S. (1970). Energy-the Economy Interactions: A Fable of the Elephant and the Rabbit; Energy and the Economy: Report 1 of the Energy Modelling Forum; Stanford University: Palo Alto, CA, USA,.

Vozna, L. Y. (2016). The Notion of Entropy in an Economic Analysis: the Classical Examples and New Perspectives. Journal of Heterodox Economics. 3(1), 1-16.

Smulders, S. (1995). "Entropy, Environment and Endogenous Economic Growth. Journal of International Tax and Public Finance. No.2, PP. 317-338.

Saunders, H.D. (2000). A view from the macro side: Rebound, backfire, and Khazzoom–Brookes. Energy Policy. 28, 439–449.

Xuan, W., Jieqiong, S., Shan, S., & Yan, Z. (2012). Urban ecological regulation based on information entropy at the town scale A case study on Tongzhou district, Beijing City. Procedia Environmental Sciences. 13, 1155-1164.