

## 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<sup>1</sup>, Nasrin Mansouri<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor of Economics,  
Shahid Chamran University of  
Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor of Economics,  
Payame Noor University, Tehran,  
Iran.

**Correspondence**  
Nasrin Mansouri  
Email: [n\\_mansouri90@pnu.ac.ir](mailto:n_mansouri90@pnu.ac.ir)

## A B S T R A C T

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.

## 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.

## K E Y W O R D S

Allen's Elasticity of Substitution, Entropy, Energy and Capita Inputs.

**JEL Classification:** L11, Q21, Q43, L51, P28.

نشریه علمی

## پژوهش‌های اقتصاد صنعتی

«مقاله پژوهشی»

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

بهروز صادقی عمروآبادی<sup>۱</sup>، نسرین منصوری<sup>\*۲</sup>

### 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، شیمیابی و خوارکی جانشین است. برای این‌منظور ضمن استفاده از داده‌های شرکت‌های نمایه شده 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. به عبارت دیگر در فرایند تولید صنایع فوق‌الذکر نهاده برق و سایر شفوق 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. با توجه 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 به واسطه 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

نویسنده مسئول:

نسرين منصورى

رایانامه: n\_mansouri90@pnu.ac.ir

استناد به این مقاله:

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

## ۱. مقدمه

طبيعت وجود خواهد داشت". به بيان ديجر همان طور که ديلي<sup>۵</sup> (۲۰۰۵) می‌گويد "حقیقت آن است که بیوسفر زمین محدود، بسته و غيرقابل رشد است (بهجز نهاده نور خورشید) و سیستم اقتصادي بهوسیله قوانین ترمودینامیکی محدود شده است." از طرف ديجر سورل<sup>۶</sup> (۲۰۰۷) در مورد محدودیت‌های محیط‌زیستی سیستم‌های اقتصادي بحث می‌کند که تعاریف چندگانه "کشش‌های جانشینی"<sup>۷</sup> می‌تواند منجر به ابهام شود و مدل‌های اقتصادسنجی فعلی نمی‌تواند به صورت 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 ديجر و در مقابل وضعیت صنعتی‌شدن، مبنای فيزيکی يك سیستم تولید صنعتی محدود به محدودیت‌های تکنولوژیکی می‌باشد (بروداستوک و همکاران<sup>۸</sup>). 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 ديجر با بررسی جانشینی انرژی و سرمایه در صنایع مختلف اقتصادي و در صورت 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.

يکی از مهم‌ترین چالش‌ها و مشکلات اقتصاد ایران همچون بسياری از اقتصادهای درحال توسعه ديجر، نداشتن يك ديد بلندمدت نسبت به مسائل زیستمحيطی در توسعه صنعتی می‌باشد. در واقع نیاز به بازنگری در نگاه به انرژی و سایر عوامل زیستمحيطی مبتنی بر يك توسعه پايدار می‌باشد. آيرس و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که انرژی مهم‌تر از يك عامل تولید بوده که عموماً در فرایند تولید به نسبت سهم هزينه کوچک آن مشخص شده است. اين نشان می‌دهد که فرایند رشد اقتصادي باتوجه به روند تاریخی آن نمی‌تواند مطمئن فرض شود. آن‌ها نشان داده‌اند که دو نوع محدودیت محیط‌زیستی در سیستم‌های اقتصادي وجود دارد: محدودیت‌های سخت که از دو نوع می‌باشند؛ اولی، درجه استفاده از ظرفیت می‌باشد که همیشه

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 این خصوص که آیا نهاده‌های فوق به بهترین نحو به عنوان جانشین توصیف می‌شوند یا مکمل، دست نیافه و درباره اینکه چگونه عوامل مختلف بر نتایج تجربی تأثیرگذارند، هیچ توافقی وجود ندارد. باتوجه به تحقیق برندت و وود<sup>۱۰</sup> (۱۹۷۵) و بخش زیادی از ادبیات تحقیق، انرژی و سرمایه مکمل‌های یکدیگر با توجه به کشش جانشینی AES و کشش قیمتی مقطعی و CPE<sup>۱۱</sup> 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، در صورتی که 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 نتیجه‌های مبین آن است که انرژی و سرمایه پیوند نزدیکی با تولید اقتصادي دارند و افزایش قیمت‌های انرژی می‌تواند رشد ستاده را کاهش دهد. تئوری نئوکلاسیک رشد اقتصادي، محیط زیست و انرژی را به عنوان عوامل مهم توابع تولید در نظر نمی‌گیرند و به جانشینی نسبی و یا کامل محیط‌زیست و دیگر عوامل تولید اعتقاد دارند (کوئیکس<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). در حقیقت، آن‌ها فرض می‌کنند که منابع طبیعی نامحدود می‌باشند و معتقدند که رشد اقتصادي می‌تواند به طور 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 به شدت مورد توجه قرار گرفته است، بحث بازیافت می‌باشد که می‌تواند زباله‌های تولیدی را کاهش دهد. همان‌طور که وار و آيرس<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۰) نشان داده است، "اگرچه ممکن است بیومس به سرعت بازیافت شود، اما این صحیح نیست که هیچ زباله غیربازیافتی در

5. Daly

6. Sorrell

7. elasticity's of substitution

8. Broadstock et al.

9. Ayres et al

1. Berndt & Wood

2. AES: Allen Elasticity of Substitution, CPE: Cross Price Elasticity

3. Couix

4. Warr & Ayres

موجود برنامه‌ریزان کشور را بر آن داشت که در سیاست‌های زیست‌محیطی کشور، رهیافت انگیزه‌های اقتصادی را جایگزین رهیافت «نظرارت و کنترل» نمایند. به همین منظور 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 مانع بر سر راه تخریب و آسودگی محیط‌زیست ایجاد نماید، برای اولین بار در ایران جرائم زیست‌محیطی {در قالب ماده ۱۳۴ و بند (ج) ماده ۱۰۴ برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی} مطرح شد و به دنبال آن آیین‌نامه اجرایی مواد یاد شده بالا تدوین گردید (عبدی و همکاران، ۱۳۹۳). در این باره ضعف برنامه‌های اجرایی، نبود آگاهی عمومی و شانه خالی کردن افراد و کارخانه‌ها از سیاست‌ها و قوانین، قراگرفتن اولویت‌های تخصیص بودجه‌های سالانه در عرصه‌های دیگری به غیر از محیط‌زیست باعث ناتوانی سیاست‌های کنترل محیط‌زیست در ایران شده است (جهانگرد، ۱۳۹۷). برای مثال آسودگی هوا یکی از مشکلات زیست‌محیطی ایران است که در سال‌های اخیر و همگام با توسعه جوامع، صنعتی‌شدن و رشد تکنولوژی به خطری جدی بدلت شده است. چنانچه آسودگی 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 توربیک مبتنی بر ضرورت توجه بیشتر منابع محیط‌زیستی با توجه 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 گستردۀ منابع محیط‌زیستی دارد و مسائل و مشکلات بسیاری را برای اقتصاد ایران و محیط‌زیست آن و حتی آینده و چشم‌انداز خود صنایع به وجود 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؛ بهنحوی که کمبود مصرف انرژی به عنوان یک عامل

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 نشان‌دهنده 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 ضروری بودن انرژی در پروسه تولید صنعتی در کشور و محدودبودن منابع انرژی، می‌توان گفت محدودیت‌های محیط‌زیستی در سیستم‌های اقتصادی به صورت معنادار وجود دارد که همگی نشان‌دهنده 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<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). بنابراین باید اقتصاد را به صورت 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 به معنای کمیابی محیط‌زیست در سیستم اقتصادی می‌باشد.

امروزه استفاده بی‌رویه از مواهب زیست‌محیطی و رقابت در به کارگیری منابع اکولوژیکی در کشور ما شتاب فرایاندهای به خود گرفته و ابزارهای اقتصادی بازدارنده و مناسب، باعث بروز آسودگی‌های 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 آسودگی و حفاظت محیط‌زیست با برنامه‌های جاری توسعه ترکیب شود تا اطمینان حاصل شود که 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 به جای ترویج رقابت، کارابی و حفاظت از طریق ساز و کار بازار، دستور و نظارت مستقیم بوده است. در دهه هفتاد شمسی، واقعیت‌های

زیستمحیطی خود را در ضروری و مکمل بودن انرژی در تابع تولید نشان خواهد داد. در حقیقت 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 انجام دادن کار بیشتر باشد آنتروپی کمتر است. آنتروپی خاصیتی از هر سیستم است که افزایش آن نشانه کاهش انرژی مفید در سیستم‌ها، بینظمی و تباہی است. بنابراین آنتروپی منفی به عنوان نشانه‌ای از پایداری یک سیستم در نظر گرفته می‌شود. جرجسکیو روگن، قانون دوم 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 به عنوان انرژی خارج از دسترس بیان کرد (نصاری فرد، ۱۳۹۱).

در مقابل، برخی افزایش کارایی انرژی و بهنوعی مقابله با آنتروپی انرژی را بیان می‌کنند. در واقع «اثر ریبوند یا معکوس»<sup>۲</sup> یک اصطلاح کلی برای انواع مختلف مکانیسم‌های اقتصادی می‌باشد که «صرفه‌جویی‌های انرژی» ناشی از کارایی انرژی بهودیافته را نشان می‌دهد (سورل، ۲۰۰۷). بهبود کارایی انرژی مقوله‌به صرفه برای تولیدکنندگان، مصرف بیشتر خدمات انرژی را تشویق می‌کند، بهره‌وری را ارتقا می‌دهد، بازده را افزایش می‌دهد و به طور بالقوه بر مصرف انرژی در سرتاسر اقتصاد اثرگذار است. اثر معکوس معمولاً به صورت درصد صرفه‌جویی‌های بالقوه انرژی که از طریق مکانیسم‌های مختلف فوق متعادل می‌شود تعریف می‌گردد (ساندرز، ۲۰۱۳). نتایج ساندرز دلالت بر آن دارد که مطالعات تجربی «سهولت جانشینی» بین انرژی و سایر نهاده‌ها باشیست بزرگی احتمالی اثرات معکوس در بخش‌های مختلف مورد بررسی را امکان‌پذیر سازد (استوک اتیوسکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کندي، ۲۰۲۰ و کوئنیکس، ۲۰۱۹).

تواضع تولید نئوکلاسیک حاکی از حداقل ستاده اقتصادی ممکن ( $Y$ ) به دست آمده از سرمایه ( $K$ )، کار ( $L$ ) و نهاده‌های واسطه برای یک سازمان یا بخش با توجه به فناوری موجود در زمانی خاص ( $t$ ) است. واسطه‌ها معمولاً به انرژی ( $E$ ) و سرمایه گذاری تحقیق و توسعه ( $M$ ) تجزیه می‌شود:

$$\ln Y = f(\ln K, \ln L, \ln E, \ln M, \ln t) \quad (1)$$

تواضع تولید معمولاً فراینده، دوبار مشتق‌پذیر و نیمه‌مقعر با

تولید می‌تواند رشد اقتصادی را محدود کند (صادقی عمرآبادی 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 مکمل بودن انرژی و سرمایه مورد توجه قرار گرفته که می‌تواند تأییدکننده محدودیت‌های زیستمحیطی بر توابع تولید باشد که درنهایت تأییدکننده 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 به عنوان 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 به عنوان یکی از عوامل مهم تولید که از محیط‌زیست گرفته می‌شود و کارایی آن، رابطه نزدیکی با قانون آنتروپی دارد. قانون دوم ترمودینامیک به عنوان قانون آنتروپی شناخته می‌شود که مطابق با آن تمام فرایندهای فیزیکی از طریق حرکت می‌کنند که انرژی در دسترس کاهش می‌یابد و این به بدین معنی است که آنتروپی در سیستم افزایش می‌یابد. مقدار کل انرژی مفید که قابلیت تبدیل به کار را دارد در یک سیستم متزوی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. مطابق با بیان کلوین-پلانک<sup>۳</sup> از قانون دوم ترمودینامیک؛ ساخت یک موتور گرمایی سیکلی (چرخه‌ای) که جز جذب گرما از منبع و انجام کار، مساوی با گرمایی جذب شده 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 در حال کاهش می‌باشد و این محدودیت‌های

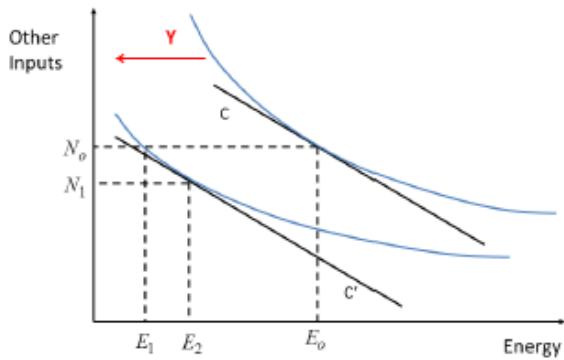
2. rebound effects

3. Saunders

4. Skorek-Osikowska et al.

1. Kelvin-Planck

انرژی ( $E$ ) و «دسته‌ای» از سایر نهاده‌ها ( $N$ ) جهت تولید  $Y$  برای هزینه  $C$  از طریق محل تقاطع تولیدهای یکسان با خط هزینه یکسان ( $N_0$ ,  $E_0$ ) به دست 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 این حال، 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  $((E_0-E_1)/(E_0-E_2))$  بستگی به سهولت جانشینی بین انرژی و نهاده‌های دیگر دارد که با خمیدگی تولید یکسان نشان داده می‌شود.



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 به دست 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 می‌گیرد که به نظر 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  $\sigma = 1/(1-\rho)$  کشش جانشینی هیکس (HES) بین ترکیب سرمایه-کار و انرژی مؤثر به عنوان معیار استاندارد

بازده‌های ثابت نسبت به مقیاس فرض می‌شود. به موجب فرضیات استاندارد، یک تابع هزینه دوگانه را می‌توان تعریف کرد که حداقل هزینه ممکن ( $C$ ) ستاده حاصل  $Y$  را با توجه به قیمت‌های هر نهاده ( $i$ ) و حالت فعلی فناوری ( $t$ ) نشان می‌دهد:

$$C = g(pK, pL, pE, pM, Y, t) \quad (2)$$

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، ۲۰۲۰). اما مطالعات تجربی احتمالاً به طور مستقیم این شکل از تغییر فنی را برآورد نمی‌کنند، ممکن است مدل‌های اقتصادی انرژی آن را شبیه‌سازی نکنند و مطالعات اثرات معکوس می‌توانند متغیر مستقل مختلف را انتخاب کند. همچنانی مجزا کردن تغییر فنی انرژی افزا به این طریق تا حدودی ساختگی است؛ چراکه فناوری‌های جدید غالباً بهره‌وری چندین نهاده را به طور همزمان بهبود می‌بخشند. به طور کلی، تغییر فنی انرژی افزا منجر به بهبود مناسب بهره‌وری انرژی جمعی ( $\theta_E$ ) 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 به طور ترکیبی، مصرف انرژی را بیشتر از آنچه که در صورت عدم وجود واکنش‌های فوق خواهد بود، افزایش خواهد داد. مجموع این دو، اثر معکوس مستقیم برای تولیدکنندگان است. به علاوه، اثرات معکوس مختلف غیرمستقیم و گسترده در اقتصاد نیز وجود خواهد داشت. به عنوان مثال اگر محصول مربوطه، یک نهاده واسطه برای سایر بخش‌ها تشکیل دهد (مثلاً فولاد در تولید خودرو) کاهش قیمت‌های محصول می‌تواند محرك ستاده بیشتر از آن بخش‌ها و درنتیجه، افزایش بیشتر مصرف انرژی گسترده در اقتصاد باشد (دونگ و همکاران، ۲۰۲۰). نقش جانشینی در اثر 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» شوند. شکل زیر یکتابع تولید قراردادی با دو نهاده را نشان می‌دهد که ترکیب بهینه

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

هستند. محقق به دنبال نشان دادن این مطلب که چگونه یک مدل رشد ساخته‌شده براساس اقتصاد زیست‌محیطی و استخراج پرهزینه منابع می‌تواند رشد های متفاوت و نابرابری اقتصادی را توضیح دهد رابطه ریاضی تابع تولید را ارائه کرده است. سزک (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای خود رشد اقتصادی را به عنوان عامل محدود کننده محافظت از محیط‌زیست دسته‌بندی می‌کند. ژیان و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که براساس تئوری ساختار اسراف‌آمیز<sup>۵</sup> و فرمان‌شناسی زیست‌محیطی<sup>۶</sup>، 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<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) بیان می‌کنند که با توجه به نظریه‌های اقتصادی نئوکلاسیک، رشد اقتصادی می‌تواند بدون توجه به در دسترس بودن و یا قیمت انرژی در نزخ 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 به سادگی فرض نمود که رشد آینده به صورت دائمی خواهد بود. سنازیوهای 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 مطالعه 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.<sup>۸</sup> ۳. دستیابی به بهره‌وری بهبودیافته باید توسط روحیه و اخلاق قناعت تکمیل گردد.<sup>۹</sup> پایداری با ادامه رشد اقتصادی در کشورهای ثروتمند ناسازگار می‌باشد.<sup>۱۰</sup> 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 ایران‌لند طی دوره زمانی ۱۹۹۱-۲۰۰۹ 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

سهولت جانشینی است. اگر  $\Delta E > 0$  باشد هیچ اثر معکوسی وجود ندارد؛ در حالی که چنانچه  $\Delta E < 0$  باشد تغییر فنی انرژی افزایش می‌دهد ( $\Delta \theta < 0$ ) و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد ( $\Delta E < 0$ ). این وضعیت غیرمحتمل به نظر می‌رسد؛ زیرا حاکی از آن است که انرژی یک نهاده غیرضروری است. اما ساندرز (۱۹۹۲) اذعان می‌کند که «ساختارهای تو در تو» توابع (یعنی  $L(KE)$  و  $L(EK)$ ) همواره منتهی به اثرات معکوس بزرگ‌تر، صرف‌نظر از HES بین دسته‌ها می‌شوند. لذا به نظر می‌رسد بزرگی برآورد شده اثرات معکوس نسبت به ساختار تو در تو و شکل تابعی حساس است. با توجه به بحث فوق‌الذکر، بخش‌هایی که در آن‌ها جانشینی به سوی انرژی آسان‌تر است (یعنی  $\Delta E < 0$  است) دربرابر اثرات معکوس آسیب‌پذیرتر خواهند بود. هوگان و مان<sup>۱۱</sup> (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 افزایشی در بخش‌های مختلف را مشخص می‌کنند. وزنا<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۶) در مطالعه خود، نتایج و تحلیل‌های فوق را تأیید می‌کند.

اسمولدرز<sup>۱۳</sup> (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 با توجه به وابستگی فعالیت اقتصادی به محیط‌زیست از منظر مواد اولیه یا زیست اجتماعی و فضای تولیدی، رشد اقتصادی وابسته به رشد فیزیکی به شدت کاهش خواهد یافت (وزنا، ۲۰۱۶). هنریک هرمانسون (۲۰۰۷) به دنبال 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 در ارتباط با استخراج منابع طبیعی نیز لحاظ گردیده است. دیدگاه‌هایی که در این مدل به کار 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

4. Xuan et al.

5. dissipative structure theory

6. ecological cybernetics

7. Ayres et al.

1. Hogan & Manne

2. Vozna

3. Smulders

### ۳. روش تحقیق

در این مطالعه از روش استنادی و همچنین مدل‌های اقتصادستنجی 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، شیمیابی / پتروشیمی و خوارکی / 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 با توجه به مدل شریفی و یالمارسون (۲۰۰۰) استفاده شده که به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\begin{aligned} \ln C_{nt} = & 0 + \gamma V_{nt} + \sum_{i=1}^m b_{in} \ln P_{int} + 0.5 \alpha_{iv} V_{nt}^2 + \alpha_t T \\ & + 0.5 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \ln P_{int} \ln P_{jnt} + \sum_{i=1}^m \alpha_{ii} \ln P_{int} T + \alpha_{yt} V_{nt} T \end{aligned} \quad (1)$$

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 به صورت  $N, n=1, 2, \dots, N$  می‌باشد.  $C_{nt}$  هزینه کل شرکت  $n$  در سال  $t$  و  $V_{nt}$  لگاریتم طبیعی ارزش افزوده فعالیت  $n$  در سال  $t$  می‌باشد. اندیس‌های  $j$ ،  $I$ ،  $M$  مربوط به نهاده‌ها است که  $1=$  نیروی کار،  $2=$  سرمایه،  $3=$  برق و  $4=$  سایر حامل‌های انرژی (فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی) است. در این مطالعه از سه صنعت مجزای خودروسازی / قطعات، شیمیابی / پتروشیمی و خوارکی / آشامیدنی استفاده شده و سه مدل رگرسیونی مجزا با داده‌های پانلی در این صنایع استفاده شده است. معادلات سهم هزینه با استفاده از مشتق‌گیری تابع هزینه و  $\ln$  شفارد به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$\begin{aligned} S_i = & \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} = \frac{P_i X_i}{C} \\ \Rightarrow S_{int} = & b_{in} + \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \ln P_{jnt} + \alpha_{vi} V_{nt} + \alpha_{it} T + u_{int} \end{aligned} \quad (2)$$

قیمت نهاده  $i$  برای شرکت  $n$  در سال  $t$  است و متغیر  $P_{jnt}$  روند نیز با  $T$  نشان داده شده است و  $u_{int}$  هم جمله خطای نامشهود است. در نهایت با توجه به اعمال شرایط جمع‌پذیری و همگنی نسبت به قیمت‌ها،  $m=4$  معادله (به ازای هر نهاده یک معادله) وجود دارد که نیاز به برآورد  $m-1$  معادله مستقل خطی به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

درصد در تقاضا برای سرمایه همراه خواهد بود. کشش موریشیما که منعکس‌کننده پتانسیل جانشینی تکنولوژیکی می‌باشد بیان می‌کند که ۱ درصد افزایش در قیمت انرژی باعث می‌شود که نسبت ورودی سرمایه به انرژی در حدود  $1/5$  درصد افزایش پیدا کند. هریس<sup>۱</sup> (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 بیست و یکم این امکان را نخواهند داشت. شکیبایی و همکاران (۱۳۸۸) به صورت موردی در کارگاه‌های صنعتی ۵۰ نفر کارکن و بیشتر در دوره 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 اسلام‌ملویان 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 به صورت 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<sup>۲</sup> (۲۰۱۳)، هالر و هیلن<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) و کاستانتینی و مزانتی<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) در مطالعات تجربی خود جانشینی ضعیف عوامل تولید با عوامل محیط‌زیستی و انرژی را نشان دادند. تاور و ایگل‌سیاس<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) مکمل‌بودن عوامل تولید انرژی و سرمایه را نشان داده‌اند. سیحانی ثابت و منظور (۳۹۳)، کریمی و نوفرستی (۱۳۹۵) و مران<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) جانشینی انرژی در فرایند تولید را تأیید کرده‌اند.

در کل با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت جانشینی انرژی به عنوان یک عامل تولید از طرف محیط‌زیست با سایر عوامل تولید ضعیف بوده و درنتیجه عوامل محیط‌زیستی و فیزیکی سیستم اقتصادی به عنوان عوامل تأثیرگذار بر تولید می‌باشند که با توجه 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 بخش‌های بعدی به طور مفصل بحث می‌گردد.

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

همانند مطالعات بیورنر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) و... برای هر شرکت و هر سال به صورت 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 به صورت قیمت یک مگاژول انرژی به دست آمده است که وزن هر حامل انرژی، میزان انرژی آزادشده از آن حامل انرژی در نظر گرفته شده است. کل هزینه پرداختی برای هر شرکت نیز به صورت حاصل جمع ارزش افزوده و پرداختی بابت خرید سوخت و سایر حامل‌های انرژی در نظر گرفته شده است (کریستوبوس، ۲۰۰۰ و بیورنر و همکاران، ۲۰۰۱). متغیر قیمت سرمایه با توجه به تفکیک هزینه انرژی از ارزش افزوده در بخش اول، به صورت زیر محاسبه شده است (وولدند، ۱۹۹۷؛ ۳۵):

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

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

#### ۴. نتایج تحقیق

در پژوهش حاضر جهت محاسبه کشش جانشینی انرژی و سرمایه، سیستم معادلات سهم هزینه به صورت مقید و با ۵ متغیر توضیحی برآورد شده است. متغیرهای توضیحی استفاده شده در این مطالعه به صورت زیر هستند که در ادامه آزمون‌های هم‌جمعی بودن برای هر کدام 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))

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

از آنجاکه به طور متوسط نهاده‌ی چهارم (سایر حامل‌های انرژی) دارای کمترین سهم هزینه‌ی در میان نهاده‌ها بوده است، به عنوان نهاده مبنا مورد استفاده قرار گرفته و قیمت سایر نهاده‌ها به صورت قیمت نسبی بر حسب 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:  $\sum b_i = \sum \alpha_{ij} = 0$  و  $\alpha_{Vi} = 0$  و شرط هموتونیک بودن:  $\alpha_{Vi} = 0$ ، می‌باشد (۳۳). یک راه مناسب برای تفسیر قابلیت جانشینی بین نهاده‌های تولید، استفاده از کشش جزئی جانشینی آن (AES) است. این کشش درصدی در نسبت دو نهاده‌ی تولید را که ناشی از یک درصد تغییر در قیمت‌های نسبی آن هاست، اندازه می‌گیرد. اوزاوا (۱۹۶۲) نشان می‌دهد که می‌توان کشش‌های جانشینی آن را برای یک تابع هزینه‌ی عمومی C از فرمول

$$C_i = \frac{\partial C}{\partial P_i} AES_{ij} = \frac{CC_{ij}}{C_i C_j}$$

$$C_{ij} = \frac{\partial^2 C}{\partial P_i \partial P_j}$$

می‌باشد. اگر بخواهیم این رابطه را در تابع هزینه ترانسلوگ استفاده کنیم به صورت

$$AES_{ii} = \frac{(\alpha_{ij} + S_i(S_i - I))}{S_i^2}$$

$$AES_{jj} = \frac{(\alpha_{ij} + S_i S_j)}{S_i S_j}$$

خودقیمتی و متقاطع بر حسب کشش‌های جانشینی آن به صورت

$$AES_{ij} = \frac{E_{ij}}{S_j}$$

هزینه می‌باشد (کوئیکس، ۲۰۱۹). مفهوم آنتروپی با توجه 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، با توجه به محدودیت منابع زیست‌محیطی، قانون آنتروپی در اقتصاد و صنعت پر رنگ تر خواهد شد.

داده‌های تحقیق از صورت‌های مالی شرکت‌های بورسی و همچنین ترازنامه انرژی کشور گرفته شده است. قیمت نیروی کار

پیشرفت فنی بر شدت استفاده از نهاده‌ها در طول دوره‌ی مورد بررسی فراهم می‌شود. همچنین واردکردن ارزش افزوده در معادلات برآورده شده، امکان آزمون همگن بودن تابع تولید نسبت به ستانده در صنایع مرتبط با خودرو سازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوارکی و آشامیدنی را فراهم می‌کند. برای این آزمون‌ها از تابع آزمون والد استفاده گردیده است که نتایج آن به صورت زیر است، به طوری که فرضیه‌های صفر هموتیک 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 به صورت زیر می‌باشند.

باتوجه به نرخ بازدهی شرکت، هزینه سرمایه و سرمایه به کار گرفته شده شرکت به دست آمده است) و  $t$ : پیشرفت فنی.  
باتوجه به اینکه سیستم معادلات سهم هزینه از تابع هزینه‌ی کل بدست می‌آیند، اجزای اخلال مستقل از هم نبوده و همچنین لازم است که حتماً قیود بین معادلات (جمعی‌سازی، همگنی نسبت به قیمت‌ها و تقارن) اعمال شود؛ بنابراین برآورده معادلات به صورت تکی کارایی لازم را نداشته و معادلات به صورت سیستمی و از روش رگرسیون‌های به ظاهر نامرتبط تکراری (ISUR) برآورده می‌شوند. البته به منظور آزمون قیود تقارن، ابتدا مدل به صورت نامقید و بدون اعمال قیود تقارن برآورده و سپس با استفاده از آماره‌ی آزمون والد درستی قیدهای آزمون شده است. با واردکردن متغیر روند ( $t$ ) در معادلات مدل به عنوان جایگزینی برای تأثیر پیشرفت فنی، امکان بررسی تأثیر

**جدول ۱. آزمون قیدهای همگنی، تقارن و وجود روند**

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

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

روی تفاضای نهاده‌ها و سهم هزینه آنان از کل هزینه‌های تولید تأثیر معناداری دارد، به این ترتیب که در طی دوره مورد بررسی، تکنولوژی تولید به سمت استفاده بیشتر از نهاده انرژی و کمتر از نهاده سرمایه گام برداشته است. به عبارت دیگر در فرایند تولید در این دوره، نهاده‌ی برق جانشین سایر نهاده‌ها شده است. باتوجه به اینکه همه متغیرهای مورد استفاده در برآورده مدل داری جمعی از مرتبه صفر هستند، لذا با این وجود برای اطمینان از جعلی نبودن رگرسیون و قابلیت اطمینان به برآوردهای به دست آمده از پارامترها، ضروری است که آزمون هم‌جمعی برای هر کدام از معادلات انجام شود. برای این منظور آزمون ریشه واحد بر روی باقیمانده‌ها حاصل از برآوردهای ریکیک از معادلات برآورده شده با استفاده از روش‌های فیشر و Z انجام شده است.

نتایج نشان می‌دهد که فرضیه‌های صفر هموتیک 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 خوارکی و آشامیدنی رد می‌شوند. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که تکنولوژی تولید در این شرکت‌ها، نه همگن است و نه هموتیک و بنابراین نمی‌توان متغیرهای مربوط به لگاریتم ارزش افزوده را از مدل حذف کرد. به عبارت دیگر با تغییر سطح تولید و ارزش افزوده ایجاد شده، هزینه‌های انجام شده بابت هر کدام از نهاده‌ها به صورت غیرهمگن تغییر می‌کند. علاوه بر آن باتوجه به احتمال معناداری کمتر از ۵٪، فرضیه صفر عدم وجود روند تأثیر پیشرفت فنی و در نتیجه رد آن، تغییرات تکنولوژی در طی دوره مورد بررسی،

## جدول ۲. آزمون همگمی معادلات مدل

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

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

پتروشیمی و خوارکی و آشامیدنی آورده شده است:

در ادامه نتایج تخمین‌ها و محاسبه کشش‌های جانشینی آن برای شرکت‌های صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و

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

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

مأخذ: محاسبات تحقیق

(-۰,۰۹ و -۰,۰۳ و -۰,۰۴) کمتر از قدر مطلق ۱,۰ 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 خوارکی و آشامیدنی (به ترتیب -۰,۳۷، -۰,۳۳ و -۰,۳۸) برابر ۳,۰- دارد که از معادل آن برای سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آن معادل آن‌ها نیز

### کشش‌های تقاضای مشتقه

کشش‌های جانشینی آن 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 خوارکی و آشامیدنی به ترتیب برابر

سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آن معادل آن‌ها نیز بهترتبیب ۱-۰،۳۹ و ۱-۰،۳۱ است. کشش خودقیمتی برق برابر ۰،۱۷-۰،۱۵ است. کشش خودقیمتی از سایر حامل‌های انرژی ۰،۷۶-۰،۷۶ است و نشان می‌دهد این تابع نیز از سایر حامل‌های انرژی بیشتری حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات قیمت دارد. کشش‌های جانشینی آن 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 چهت پروسه تولید مورد نیاز می‌باشند. کشش‌های آن 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 به عنوان یک نهاده ضروری تولید در شرکت‌های صنایع خوارکی و آشامدنی مطرح می‌باشد. در واقع با توجه به ضروری بودن نهاده انرژی، باید به محدودیت‌های این نهاده در محیط‌زیست توجه کرد و افق رشد بی‌نهایت را چهت حفاظت از محیط‌زیست محدود کرد.

به ترتیب ۱-۰،۳۹ و ۱-۰،۳۱ است. منطبق بر رابطه ۴، کشش خودقیمتی برق برابر ۰،۱۴-۰،۱۴ است کمتر از سایر حامل‌های انرژی ۰،۷۶-۰،۷۶ است و نشان می‌دهد این تابع نسبت به برق، سایر حامل‌های انرژی حساسیت بیشتری در این صنعت نسبت به تغییرات قیمت دارد. همچنین برای صنایع شیمیابی کشش خودی قیمت برای سرمایه کوچک بوده و حدود ۰،۰۴-۰،۰۴ است و نشان می‌دهد که تقاضای سرمایه نسبت به تغییرات قیمت کالاهای سرمایه‌ای حساسیت زیادی ندارد. نیروی کار هم کشش قیمتی خودی صنایع شیمیابی و پتروشیمی برابر ۰،۳۳-۰،۳۳ دارد که از معادل آن برای سرمایه بزرگ‌تر است. کشش‌های آن معادل آن‌ها نیز به ترتیب ۱-۰،۲۹ و ۱-۰،۱۷ است. کشش خودقیمتی برق برابر ۰،۱۲-۰،۱۲ بزرگ‌تر از سایر حامل‌های انرژی ۰،۷۲-۰،۷۲ است و نشان می‌دهد این تابع نسبت به برق، سایر حامل‌های انرژی حساسیت کمتری در این صنعت نسبت به تغییرات قیمت دارد. همچنین برای صنایع خوارکی کشش خودی قیمت برای سرمایه کوچک بوده و حدود ۰،۲۹-۰،۲۹ است و نشان می‌دهد که تقاضای سرمایه نسبت به تغییرات قیمت کالاهای سرمایه‌ای حساسیت زیادی ندارد. نیروی کار هم کشش قیمتی خودی برابر ۱-۰،۵۱-۱-۰،۵۱ دارد که از معادل آن برای

جدول ۴. کشش‌های جانشینی آن برای صنایع خودروسازی، پتروشیمی و خوارکی

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

مأخذ: محاسبات تحقیق

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

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

مأخذ: محاسبات تحقیق

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 به عنوان مانع و محدودیتی در سیستم اقتصادی، با توجه به مکمل و ضروری بودن نهاده انرژی در پروسه صنعتی کشور، پررنگ‌تر خواهد شد. به بیان دیگر با توجه به ضروری بودن نهاده انرژی، باید به محدودیت‌های این نهاده در محیط‌زیست توجه کرد و افق رشد اقتصادی بین‌نهایت 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 ضروری بودن 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. با توجه به نتایج این مطالعه پیشنهاد می‌شود به مکمل بودن 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، لزوماً 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.

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 بین‌نظمی و کاهش انرژی در دسترس سیستم اشاره دارد. اهمیت این قانون با توجه به مکمل بودن انرژی در فرایند تولید و پذیرش محدودیت در منابع طبیعی، اهمیت خود را بیش از پیش نشان می‌دهد. در واقع عوامل نهاده‌های مبتنی محدودیت‌های محیط‌زیستی، چنانچه به خوبی 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 مکمل بودن نهاده‌های محیط‌زیستی همچون انرژی با سایر نهاده‌های نیروی کار و انرژی به طور مستقیم با این محدودیت مرتبط می‌باشد. لذا برای ورود به بحث آنتروپی، جانشین و مکمل بودن انرژی و درنتیجه ضروری بودن انرژی برای پروسه تولید مطرح می‌باشد و با ضروری و مکمل بودن انرژی از یک طرف و محدودیت منابع و انرژی در سیستم اقتصادی از طرف دیگر، قانون آنتروپی به خوبی خود را نشان داده و محدودیت‌های جدی در پروسه رشد اقتصادی به وجود 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 بهادران تهران طی دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰، وضعیت جانشینی و یا مکمل بودن انرژی و سرمایه مورد توجه قرار گرفته که می‌تواند تأیید‌کننده‌ی محدودیت‌های زیست‌محیطی بر توابع تولید باشد که در نهایت 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 به عنوان یک نهاده ضروری تولید در شرکت‌های صنایع خودروسازی و قطعات، شیمیایی و پتروشیمی و خوارکی 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

- 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.

## منابع و مأخذ

- انصاری فرد، محمد. (۱۳۹۱). تحلیل رابطه بین جهانی شدن و آنتروپی اقتصادی. پایان نامه کارشناسی ارشد توسعه و برنامه ریزی اقتصادی دانشگاه اصفهان.
- سلاطین، پروانه؛ اسلامبولچی؛ سحر. (۱۳۹۵). تأثیر کیفیت محیط‌زیست بر اقتصاد سلامت در گروه کشورهای منتخب. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*, ۱۸(۱)، ۱۰۷-۱۲۱.
- عبادی، زهرا؛ ریاحی، مهدی؛ صالحی، صالح. (۱۳۹۳). تجزیه و تحلیل اقتصادی جرایم زیست‌محیطی در ایران و مشکلات اجرایی آن *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*, ۱۶(۴)، ۱۷۵-۱۸۷.
- جهانگرد، اسفندیار. (۱۳۹۷). محیط‌زیست و برنامه‌های توسعه در ایران. *فصلنامه اقتصاد محیط‌زیست و منابع طبیعی*, ۲(۲)، ۱۰۵-۱۴۲.
- صادقی عمروآبادی، بهروز؛ رنانی، محسن. (۱۳۹۹). طبقه‌بندی شاخص آنتروپی اقتصادی در یک مدل کلان اقتصادی *فصلنامه علمی مداسازی اقتصادی*, ۱۴(۵۲)، ۱-۲۴.
- رسمی، علی اصغر انواری؛ تهرانی، رضا؛ سراجی، حسن. (۱۳۸۳). بررسی ارتباط میان ارزش افزوده اقتصادی. سود قبل از بهره و مالیات. *جربان 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*, ۴(۱۱)، ۲۵-۳۸.
- 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.

- 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., Nzhou, 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.