

Exergetic Productivity approach for evaluating production factors in the industry sector

Abstract

The energy sector, a central lever for environmental sustainability, needs precise indicators to evaluate how production factors mitigate resource degradation. This study introduces the Exergetic Productivity (ExP) index to quantify the exergy-based utility of capital and labor across industries. We employ an analytical panel-data design covering fourteen industries in nine developed economies from ۲۰۰۰ to ۲۰۱۹, with data compiled from international statistical databases. ExP is derived from the marginal rate of technical substitution between exergy and the other production inputs (labor and capital) implied by a Cobb–Douglas production function, whose coefficients are estimated via panel regression. The results show that in energy-intensive industries, inputs exhibit higher exergetic productivity and thus greater effectiveness in preventing exergy destruction. Over time, this potential has trended downward for capital while remaining broadly stable for labor. These patterns highlight heterogeneity in how industries convert investments and work effort into avoided exergy loss. Overall, the ExP index offers a concise and policy-relevant metric for tracking energy policy performance, prioritizing technological upgrades, and steering sustainable industrial transformation.

Introduction

Energy systems are central to environmental sustainability, making it essential to evaluate how production inputs contribute to lowering resource degradation. Beyond first-law energy accounting, second-law analysis using exergy provides a physically grounded basis to value resource quality, irreversibility, and useful work. Extended Exergy Accounting (EEA) integrates not only physical energy flows but also labor, capital services, and environmental remediation into a single exergy-based metric, enabling whole-system assessments of resource costs over life cycles.

Despite these advances, a key knowledge gap persists: there has been no explicit empirical estimation of the marginal substitutability

between exergy and conventional inputs such as capital and labor. In microeconomic terms, it remains unclear how many joules of exergy could substitute for an hour of work or a unit of capital, and vice versa. Prior macro-production estimates that include energy often focus on quantities rather than quality (exergy), and rarely translate estimates into rates of technical substitution at the unit level. Related theoretical proposals, such as the exergetic opportunity cost frame input performance as capacity to substitute for one another in producing useful, exergy-oriented output, but these ideas have not been implemented empirically.

Addressing this gap, the paper develops and applies an Exergetic Productivity index that reorients analysis from exergy-based costs (as in EEA) to exergy-based benefits: how much exergy destruction can be avoided at the margin by providing an additional unit of labor or capital. By embedding exergy explicitly in a standard production function and deriving MRTS-based indices, the study links thermodynamics to production theory in an empirically tractable way, aiming to inform both academic debates and policy design on energy efficiency and industrial upgrading.

Methods and Material

The study adopts an aggregate Cobb–Douglas production function with exergy as a third factor: $Y_t = \theta e^{\lambda t} K_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma$, imposing constant returns to scale ($\alpha + \beta + \gamma = 1$). Here, Y denotes value added, K the productive capital stock, L labor input, and Ex the exergy input derived from final energy use. Time-varying technical progress is captured by $e^{\lambda t}$.

ExP is defined from the marginal rate of technical substitution between exergy and a non-exergy input. For capital, $Exp_K = -MRTS_{Ex,K}(t) = \frac{\beta_K}{\beta_{Ex}} \times \frac{Ex}{K}$, expressed in megajoules per unit currency [MJ/\$]. For labor, $Exp_L = -MRTS_{Ex,L}(t) = \frac{\beta_L}{\beta_{Ex}} \times \frac{Ex}{L}$, reported as megajoules per workhours [MJ/wh]; the paper uses “workhour” for labor units. Intuitively, these indices measure the marginal exergy savings (reduced exergy destruction) enabled by an additional unit of capital or labor while holding output and the other input constant.

The dataset spans fourteen industries in nine developed countries (United States, Germany, France, Japan, United Kingdom, Canada, Italy, Sweden, and Austria) over ۲۰۰۰–۲۰۱۹. Final energy consumption by carrier (e.g., natural gas, oil products, coal, electricity, heat, biomass) and sectoral value added are drawn from international energy statistics. Final energy is converted to exergy using standard second-law coefficients reported in the paper (e.g., electricity ≈ 1.0 , oil ≈ 0.98 , natural gas ≈ 0.94 , low-temperature heat at ۲۰۰ °C ≈ 0.37). Labor data (employment and hours) come from international labor statistics; labor is homogenized in hours using a uniform assumption of about ۲,۰۰۰ hours per person-year. Capital is treated as an accumulated stock and, where not directly available, is reconstructed via the permanent inventory method with a ۳% depreciation rate, consistent with the production and productivity literature.

The paper estimates panel regressions with country fixed effects to obtain output elasticities (α, β, γ) under constant returns to scale. The panel structure helps control for unobserved heterogeneity (e.g., technology levels) and mitigates edge-year data gaps without imputation. Model adequacy is assessed via F-tests (reported significant at the ۵% level across industries), and bivariate correlations among regressors are reported below ۰.۸, suggesting no severe multicollinearity. Parameter estimates are then used to compute ExP indices and to analyze their association with sectoral energy intensity (MJ per currency unit).

Results and Discussion

Across the fourteen industries, the Exergetic Productivity of both capital and labor is higher in energy-intensive sectors. Notably, basic metals and coke/refined petroleum show elevated ExP values relative to less energy-intensive industries such as machinery or transport equipment. This pattern is visually corroborated in the paper by plotting ExP against energy intensity, revealing a positive association: as sectoral MJ per currency unit increases, ExP for both inputs tends to rise. Two interpretations are considered. First, high energy intensity may signal technical and structural limits to direct energy reduction, ostensibly restricting optimization through input substitution; second, high intensity may indicate substantial untapped savings that become accessible through technological upgrading and structural

improvements. The paper's interpretation aligns with the second view: high intensity provides fertile ground for exergy-oriented productivity gains by capital deepening and process improvements.

The paper presents two complementary time-series perspectives. A case analysis for U.S. mining (used as a stylized example representative of broader industrial patterns) indicates rising ExPK over ۲۰۰۰–۲۰۱۹ with relatively stable ExPL. This is interpreted in light of growing automation, digitalization, and the declining marginal role of manual labor in capital-intensive production lines (features that enable additional capital to save more exergy at the margin). At the same time, in the cross-country aggregate, the conclusion section notes a declining trend for ExPK and stability ExPL across many industries and economies. Read together, these results suggest heterogeneity: some capital-intensive sectors and country–industry pairs experienced increases in capital's exergy-saving potency, while the broader average may reflect saturation effects, technology plateaus, or differing energy price environments.

The constant-returns restriction is reported as broadly consistent with the data; fixed-effects panel estimates are statistically significant across all fourteen industries. Pairwise correlations among inputs remain below common concern thresholds, supporting interpretability of elasticities. Nonetheless, the authors acknowledge simplifying assumptions that bound inference: a fixed ۳% depreciation rate for capital stock construction, uniform annual hours per worker, and the Cobb–Douglas form with constant elasticities. The inability to differentiate labor quality (e.g., skilled versus unskilled) or capital vintages may attenuate observed substitution patterns. Furthermore, exergy coefficients (particularly for low-temperature heat) introduce domain-specific uncertainty that future sensitivity analysis could explore.

The empirical association between energy intensity and ExP highlights a pragmatic diagnostic: energy-intensive industries offer disproportionately large marginal exergy-saving opportunities per additional unit of capital or labor. From a policy perspective, ExP can help prioritize technology modernization, target fiscal incentives toward high-leverage sectors (e.g., basic metals, refining), and inform redesign of energy subsidies to encourage exergy-efficient investment.

Methodologically, recasting MRTS in exergy terms bridges thermodynamic accounting with production theory, complementing EEA's cost orientation by providing a benefit-oriented index that is directly interpretable in units of avoided exergy destruction.

Data availability constrained the study horizon to ۲۰۱۹ for capital and labor, despite longer series for energy and value added. Combining sources with different statistical conventions required careful ISIC alignment. The paper notes that richer models (e.g., translog or CES) and explicit sensitivity checks (e.g., depreciation rates, exergy coefficients) could refine estimates of substitution and strengthen causal interpretation. Extending the framework to developing economies and finer industrial granularity may also reveal institution- and technology-specific substitution regimes.

Conclusion

The paper develops a physically grounded, empirically implementable Exergetic Productivity index that quantifies how much exergy destruction can be averted (at the margin) by supplying additional capital or labor. By embedding exergy as a production input and deriving MRTS-based measures from an estimated Cobb–Douglas function, the analysis links thermodynamics to production theory in a form suitable for cross-industry, cross-country comparison. Empirically, energy-intensive industries show higher ExP for both inputs, underscoring their priority for technology upgrading and productivity policy. Temporal patterns appear heterogeneous: a sectoral case demonstrates rising ExPK with stable ExPL, whereas aggregate results suggest a broader decline for capital and stability for labor. The index complements Extended Exergy Accounting by shifting focus from exergy-based costs to exergy-based benefits, offering a concise metric (MJ saved per unit of input) that is actionable for industrial policy, investment screening, and performance monitoring. The authors recommend institutionalizing ExP alongside energy and carbon intensity indicators, extending the framework to more flexible production forms (e.g., CES, translog), and deepening sensitivity analyses and labor-quality distinctions. Used in concert with EEA, ExP can support targeted, evidence-based pathways toward exergy-efficient, low-impact industrial systems.

Keywords: Exergy, Exergetic Productivity, Extended Exergy Accounting, production factors, capital, labor

JEL Classification: D۲۴, Q۴۱, Q۴۳, C۲۳, Q۰۱

رویکرد بهره‌وری اکسرژی محور برای ارزیابی نهاده‌های تولید در بخش صنعت

چکیده

بخش انرژی به عنوان یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر پایداری محیط زیستی، نیازمند شاخص هایی دقیق برای سنجش کارایی عوامل تولید در کاهش تخریب منابع است. هدف این پژوهش، معرفی و توسعه شاخص بهره‌وری اکسرژی محور به منظور سنجش فایده اکسرژی محور سرمایه و نیروی کار در صنایع مختلف بود. پژوهش حاضر به صورت تحلیلی-علی و در چارچوب طراحی داده‌های پنل انجام شد. جامعه آماری شامل چهارده صنعت منتخب در نه کشور توسعه یافته در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بود که با روش نمونه گیری هدفمند، داده‌های مورد نیاز از منابع آماری بین المللی گردآوری شد. شاخص بهره‌وری اکسرژی از طریق محاسبه نرخ نهایی جانشینی فنی بین اکسرژی و دیگر عوامل تولید شامل نیروی کار و سرمایه، در تابع کاب-داگلاس استخراج گردید و برای برآورد ضرایب تابع تولید از رگرسیون پنل استفاده شد. یافته‌ها نشان دادند در صنایع با شدت انرژی بالاتر، قدرت بهره‌وری اکسرژی نهاده‌ها بیشتر است و این صنایع، عملکرد مؤثرتری در جلوگیری از تخریب اکسرژی دارند؛ این پتانسیل با رشد بهره‌وری صنایع طی سال‌ها برای سرمایه کاهش یافته و برای نیروی کار ثابت مانده است. در مجموع، شاخص بهره‌وری اکسرژی می‌تواند به عنوان ابزاری دقیق برای پایش سیاست‌های انرژی، ارتقای فناوری و برنامه‌ریزی برای توسعه صنعتی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: اکسرژی، بهره‌وری اکسرژی محور، حسابداری اکسرژی بسط یافته، نهاده‌ی تولید، سرمایه

طبقه‌بندی JEL: D۲۴ و Q۴۱ و Q۴۳ و C۲۳ و Q۰۱

مقدمه

بخش انرژی مسئول بسیاری از اثرات محیط‌زیستی است که محدودیت های کلیدی برای رشد پایدار انسانی است. بنابراین دسترسی پایدار و انعطاف پذیر به خدمات انرژی مقرون به صرفه به یکی از دغدغه های اصلی بشر برای تامین رفاه در آینده تبدیل شده است. این حقایق، تحلیل گران را برانگیخته است تا یک سیستم انرژی پایدار را شناسایی کنند که در آن به ارکان مختلف پایداری (اجتماعی، محیط‌زیستی و اقتصادی) پرداخته شود. این تلاش‌ها

را می‌توان در توسعه فنی فناوری‌های کارآمدتر و کم‌آلاینده در بخش‌های عرضه و تقاضای انرژی و توسعه روش‌ها و ابزارهای تحلیلی مفهومی جدید برای بهینه‌سازی انتقال سیستم انرژی به منظور کاهش اثرات آن بر اکوسیستم طبقه‌بندی کرد (یی و همکاران^۱، ۲۰۰۴). از آنجایی که پایداری به عنوان یک محدودیت برای توسعه اقتصادی درک می‌شود، مدل‌های اقتصادی برای ارزیابی هزینه‌ها و ارزش‌های نهاده‌های مختلف تولید و خدمات اکوسیستمی اصلاح شده‌اند (ناکاتا^۲، ۲۰۰۴). به طور خاص در بخش انرژی، بسیاری از مدل‌های عرضه و تقاضای انرژی-اقتصادی برای در نظر گرفتن هزینه‌ها و محدودیت‌های مربوط به اکوسیستم ایجاد شده‌اند (د بروین و همکاران^۳؛ ۲۰۱۰، مارزلی و همکاران^۴، ۲۰۱۷). در نتیجه، در چنین مدل‌هایی، در صورت نیاز، ارزش‌های اقتصادی معادل (هزینه‌ها) به خدمات اکوسیستم در مقیاس محلی یا جهانی اختصاص داده شده‌است. در واقع، گسترش مدل‌های انرژی-اقتصادی برای در نظر گرفتن سایر جنبه‌های پایداری، به‌ویژه هزینه‌ها و محدودیت‌های محیط‌زیستی، گامی پر بار به سوی تصمیم‌گیری پایداری‌تر بوده است. در طول بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰، علاقه دولت‌ها به عرضه و تقاضای کارآمدتر انرژی، محققان را به سمت تعریف معیارهای معنادارتر برای مصرف منابع برانگیخت (شوبا و وال^۵، ۲۰۰۷). هدف این روش‌ها درک جامع‌تری از پایداری سیستم‌های انرژی است (رومرو و لینارس^۶، ۲۰۱۴؛ فون اسپاکوفسکی و همکاران^۷، ۲۰۰۹). نتایج این ابزارهای تحلیلی به عنوان مکمل روش‌های اقتصادی شناخته شده است (رومرو و لینارس^۸، ۲۰۱۴).

ریشه اصلی این روش‌ها در نظریه ارزش انرژی و این ایده نهفته است که مفاهیم ترمودینامیکی می‌تواند برای ارزیابی هزینه‌های فیزیکی یا مقادیر نهاده‌های تولید، انرژی، جریان‌های مواد و خدمات اکوسیستم به کار رود (فون اسپاکوفسکی و همکاران^۹، ۲۰۰۹). این مفهوم بر این فرض استوار است که "انرژی تنها منبع واقعاً محدود روی زمین است و

۱. Yi et al.

۲. Nakata

۳. De Bruyn et al.

۴. Marzelli et al.

۵. Sciubba and Wall

۶. Romero and Linares

۷. von Spakovsky et al.

۸. Romero and Linares

۹. von Spakovsky et al.

بنابراین باید تنها نهاده تعیین کننده ارزش باشد" و به طور گسترده‌ای مورد تایید قرار گرفته است (گلوشینا و مایومی^۱، ۲۰۱۰).

توسعه بیشتر کاربرد ترمودینامیک در بهینه‌سازی کل نگر سیستم‌های انرژی منجر به توسعه روش حسابداری اکسرژی بسط‌یافته^۲ شده‌است. روش حسابداری اکسرژی بسط‌یافته، به عنوان جامع‌ترین دیدگاه ترمودینامیکی برای بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی، تمام نهاده‌های تولید (کار، سرمایه و انرژی) و همچنین اثرات محیط‌زیستی را در یک دوره چرخه‌ی عمر در نظر می‌گیرد (روکو و همکاران^۳، ۲۰۱۴؛ شویبا^۴، ۲۰۰۸). اگر چه در مقایسه با انرژی، مفهوم اکسرژی درک مصرف منابع را بهبود بخشیده است، اما نمی‌تواند تمام ابعاد ارزشی منابع و حامل‌ها مانند اثرات محیط‌زیستی چرخه‌ی عمر یا سهولت ذخیره‌سازی را در نظر بگیرد (یان و همکاران^۵، ۲۰۱۹). در نتیجه، روش‌های تحلیل بهای تمام شده مبتنی بر اکسرژی به تدریج توسعه یافته‌اند تا جنبه‌های مختلف ارزش یا ایجاد هزینه را به شیوه‌ای واقعی‌تر در نظر بگیرند. هدف کار پژوهشی حاضر نیز کمک به توسعه بیشتر موضوع از طریق ارزیابی درون‌زا ارزش نهاده‌های تولید است.

توجه به این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که تاکنون هیچ مطالعه‌ای نرخ‌های نهایی جانشینی فنی میان اکسرژی و نهاده‌های تولید سنتی مانند سرمایه و نیروی کار را به طور صریح برآورد نکرده است. از منظر اقتصاد خرد، ما به‌طور کمی نمی‌دانیم که اکسرژی تا چه حد با نیروی کار یا سرمایه قابل جایگزینی است؛ برای مثال، چند ژول اکسرژی برای جایگزینی یک ساعت کاری نیروی انسانی نیاز است یا بالعکس. برآوردهای متعارف تابع تولید که انرژی را لحاظ کرده‌اند سرنخ‌هایی به ما می‌دهند؛ برای نمونه، کشش جانشینی کمتر از یک، نشان‌دهنده محدودیت در جایگزینی است. با این حال، این مطالعات معمولاً به مقدار انرژی می‌پردازند نه کیفیت انرژی، و به ندرت نتایج را از منظر نرخ‌های نهایی جانشینی فنی در سطح واحد تولید تفسیر می‌کنند. مفهوم هزینه فرصت اکسرژی^۶ به‌طور مشخص تلاش

۱. Glucina and Mayumi

۲. Extended Exergy Accounting (EEA)

۳. Rocco et al.

۴. Sciubba

۵. Yan et al.

۶. Exergetic Opportunity Cost (EOC)

می‌کند عملکرد نهاده‌های تولید را از منظر ظرفیت جایگزینی چارچوب‌بندی کند (خواجه-پور^۱، ۲۰۲۲)، اما هنوز به‌طور تجربی پیاده‌سازی نشده است. بنابراین، شکاف دانشی در فهم آزمون و خطا^۲ میان اکسرژی و دیگر نهاده‌های سرمایه و نیروی کار در فرآیند تولید وجود دارد. پُر کردن این خلأ مستلزم برآورد اقتصادسنجی توابع تولیدی است که اکسرژی (یا کار مفید) را به‌عنوان ورودی در نظر گیرد و سپس با محاسبه نرخ نهایی جانشینی فنی بر اساس ضرایب برآورد شده، روشی برای محاسبه بهره‌وری اکسرژی محور هر نهاده تولید ارائه کند. برخی کارهای پیشین به این هدف نزدیک شده‌اند؛ برای مثال، محاسبات مدل کومل نشان می‌دهد که کاهش در دسترس بودن انرژی، تاثیر بسیار بیشتری بر خروجی نسبت به کاهش نیروی کار دارد و این نشان‌دهنده نرخ نهایی جانشینی فنی پایین انرژی نسبت به نیروی کار است (کومل و همکاران^۳، ۲۰۲۲). با این حال، این پیامدها به‌طور مستقیم به یک معیار عملیاتی تبدیل نشده یا به‌طور گسترده در مجموعه داده‌های مختلف اعتبارسنجی نشده‌اند. نبود برآوردهای نرخ نهایی جانشینی فنی که اکسرژی را دربرگیرد، بدان معناست که سیاست‌گذاران دید روشنی از میزان سهولت جایگزینی بهبودهای کارایی یا تغییر منابع انرژی برای جبران کمبود نیروی کار یا سرمایه ندارند؛ این دقیقاً همان نوع بینشی است که پژوهش بهره‌وری اکسرژی می‌تواند ارائه کند.

پیشینه پژوهش

حسابداری اکسرژی بسط‌یافته یک چارچوب حسابداری مبتنی بر اکسرژی است که توسط شوبا^۴ در اواخر دهه ۱۹۹۰ به عنوان یک "الگوی تحلیلی جامع مبتنی بر اکسرژی" پیشگام شد (روکو و همکاران^۵، ۲۰۱۴). تجزیه و تحلیل اکسرژی مرسوم را با تخصیص مقادیر اکسرژی به ورودی‌های غیر انرژی، به ویژه نیروی انسانی، خدمات سرمایه، و اصلاح محیط-زیستی گسترش می‌دهد و با این کار، این "نهاده‌ها" را در قالب یک شاخص یکپارچه از هزینه منابع داخلی تلفیق می‌کند (روکو و همکاران، ۲۰۱۴). در عمل، مقادیر اکسرژی بسط‌یافته علاوه بر جریان‌های اکسرژی فیزیکی به شار نیروی کار و سرمایه اختصاص داده

۱. Khajepour

۲. trade-off

۳. Kümmel et al.

۴. Sciubba

۵. Rocco et al.

می‌شود (ارتسوواگ^۱، ۲۰۰۵). به بیان دیگر، مجموع اکسرژی انباشته‌شده در یک فرآیند یا محصول، تنها به اکسرژی مستقیم حاصل از سوخت‌ها و مواد محدود نمی‌شود، بلکه معادل اکسرژی نهاده‌هایی مانند نیروی کار انسانی (مثلاً ساعات کاری) و سرمایه مصرف‌شده نظیر ماشین‌آلات و زیرساخت‌ها را نیز در بر می‌گیرد (شوبا، ۲۰۰۸). همانطور که شوبا اشاره می‌کند، مزیت روش حسابداری اکسرژی بسط‌یافته این است که اجازه می‌دهد تا سه نهاده تولید شامل نیروی انسانی، سرمایه و هزینه‌های اصلاح محیط‌زیستی در تعادل سیستم گنجانده شود، که امکان ارزیابی کارایی جامع‌تری را فراهم می‌کند (شوبا، ۲۰۰۸). اساساً، حسابداری اکسرژی بسط‌یافته با تبدیل تمام ورودی‌ها به یک واحد مشترک اکسرژی، امکان سنجش یکپارچه آن‌ها را فراهم می‌سازد و هزینه‌های منابع پنهان در فعالیت‌های اقتصادی را نیز با در نظر گرفتن شرایط ترمودینامیکی در تحلیل وارد می‌کند (روکو و همکاران، ۲۰۱۴).

از زمان معرفی، حسابداری اکسرژی بسط‌یافته در زمینه‌های متعددی به کار گرفته شده و مورد آزمون قرار گرفته است. شوبا و همکارانش این روش را بر روی سیستم‌های منطقه‌ای و ملی، از جمله استان سیه‌نا در ایتالیا، به کار بردند و نشان دادند که چگونه می‌توان کارایی‌های بخشی را هنگامی که نیروی کار و سرمایه در قالب اکسرژی لحاظ می‌شوند، ارزیابی کرد (شوبا^۲، ۲۰۰۸). ارتسوواگ^۳ (۲۰۵۵) روش شوبا را بر اقتصاد نروژ اعمال کرد و مبادلات منابع بین‌بخشی را کمی‌سازی نمود و دریافت که کارایی‌های قانون دوم ترمودینامیک، پس از لحاظ کردن اکسرژی نیروی کار و سرمایه، به‌طور چشمگیری تغییر می‌کند (شوبا، ۲۰۰۸). چن و چن^۴ (۲۰۰۹) یک تحلیل اکسرژی بسط‌یافته برای جامعه چین انجام دادند که در آن به نیروی انسانی، سرمایه و هزینه‌های احیای محیط‌زیستی، مقادیر اکسرژی تخصیص داده شد. آن‌ها حسابداری اکسرژی بسط‌یافته را به‌عنوان توسعه‌ای از نظریه کلاسیک ارزش نیروی کار و همچنین به‌عنوان یک شاخص بالقوه برای سنجش پایداری مطرح کردند. مطالعه موردی آن‌ها برای چین (سال ۲۰۰۵) به‌عنوان «مطالعه مرجع برای تحقیقات تطبیقی آتی» در زمینه متابولیسم اجتماعی-اقتصادی مطرح شد (چن و چن، ۲۰۰۹). آن‌ها عملکرد اکسرژی بسط‌یافته چین را با نتایج موجود برای نروژ، بریتانیا، ایتالیا و حتی منطقه سیه‌نا مقایسه کردند تا یک «پایه محکم» برای مقایسه‌های بین‌المللی در زمینه

۱. Ertesvåg

۲. Sciubba

۳. Ertesvåg

۴. Chen and Chen

بهره‌وری منابع فراهم آورند (چن و چن، ۲۰۰۹). این کاربردها نکات قابل توجهی را آشکار می‌کنند. به‌عنوان مثال، وارد کردن نیروی کار و سرمایه در موازنه‌های اکسرژی باعث می‌شود کارایی ظاهری بخش‌های خدمات‌محور افزایش یابد، زیرا تولیدات این بخش‌ها سهم بالایی از نیروی کار دارند و این امکان را فراهم می‌کند که با لحاظ ساعات کاری خانوار به‌عنوان محصول نهایی، برای بخش خانوار نیز ارزشی از نظر بهره‌وری در نظر گرفته شود (شوبا، ۲۰۰۸)؛ چیزی که در تحلیل‌های متداول انرژی امکان‌پذیر نیست. در عین حال، حسابداری اکسرژی بسط‌یافته معمولاً کارایی‌های بیشتری را در بخش‌هایی مانند حمل‌ونقل آشکار می‌کند، جایی که ورودی‌های عظیم اکسرژی تنها منجر به تولید خروجی‌های مفید نسبتاً کم می‌شوند (شوبا، ۲۰۰۸). در مجموع، شواهد موجود در ادبیات نشان می‌دهد که حسابداری اکسرژی بسط‌یافته یک چارچوب قدرتمند برای ارزیابی هزینه کل منابع مصرفی در تولید کالاها و خدمات به شمار می‌رود، به گونه‌ای که ورودی‌های پولی و نیروی کار را به معادل‌های اکسرژی اولیه تبدیل کرده و بدین ترتیب پیوندی میان ترمودینامیک و اقتصاد برقرار می‌سازد (روکو و همکاران^۱، ۲۰۱۴).

حسابداری اکسرژی بسط‌یافته، بخشی از یک خانواده گسترده‌تر از رویکردهاست که اکسرژی و اقتصاد را به هم پیوند می‌دهند و غالباً تحت عنوان اکسرژی-اقتصاد^۲ یا ترمو-اقتصاد^۳ شناخته می‌شوند. در اکسرژی-اقتصاد سنتی که توسط مهندسانی همچون ساتسارونیس^۴ توسعه یافته است، به هر جریان انرژی در یک سیستم، هزینه اکسرژی‌محوری اختصاص داده می‌شود تا هزینه‌های مالی ناشی از ناکارآمدی‌ها تعیین گردد. حسابداری اکسرژی بسط‌یافته این رویکرد را گسترش داده و نه تنها به جریان‌های انرژی بلکه به نیروی کار و سرمایه نیز در قالب اکسرژی، هزینه اختصاص می‌دهد (روکو و همکاران^۵، ۲۰۱۴). مفهوم مرتبط دیگری تحت عنوان هزینه ترمواکولوژیکی^۶ توسط شارگوت^۷ معرفی شده است؛ هزینه ترمواکولوژیکی به‌عنوان «مصرف تجمعی اکسرژی غیرقابل تجدید» تعریف می‌شود که برای تولید یک محصول مورد نیاز است و همچنین شامل اکسرژی اضافی لازم

۱. Rocco et al.

۲. Exergoeconomics

۳. Thermoconomics

۴. Tsatsaronis

۵. Rocco et al.

۶. Thermo-Ecological Cost (TEC)

۷. Szargut

برای جبران آسیب‌های محیط‌زیستی وارد آمده نیز می‌گردد (مندتسکا و همکاران^۱، ۲۰۲۴). به بیان دیگر، روش هزینه ترمواکولوژیکی ردپای کامل اکسرژی یک محصول بر محیط طبیعی را محاسبه می‌کند، مشابه با رویکرد حسابداری اکسرژی بسط‌یافته که اکسرژی مرتبط با احیای محیط‌زیستی را در نظر می‌گیرد. رویکرد شارگوت، همراه با مفاهیم اولیه مصرف تجمعی اکسرژی، پیش از توسعه حسابداری اکسرژی بسط‌یافته مطرح شده و از نخستین تلاش‌ها برای ایجاد پیوند میان اکسرژی و حسابداری محیط‌زیستی به شمار می‌رود (مندتسکا و همکاران، ۲۰۲۴؛ استانک و چارنوفسکا^۲، ۲۰۱۸). این روش‌ها همگی در تلاش‌اند تا با بهره‌گیری از اکسرژی به‌عنوان یک شاخص مشترک، فراتر از تحلیل‌های سنتی مبتنی بر قانون اول انرژی حرکت کنند و استفاده از منابع، برون‌ریزی‌ها و برگشت‌ناپذیری‌ها را در فرایندهای اقتصادی به‌طور دقیق‌تر لحاظ نمایند (روکو و همکاران، ۲۰۱۴). چندین مرور ادبیات نشان می‌دهند که تحلیل‌های مبتنی بر اکسرژی می‌توانند معیاری یکپارچه برای حسابداری منابع و ارزیابی پایداری ارائه دهند، هرچند در عین حال به چالش‌های روش‌شناختی و انتخاب‌های ذهنی (مانند تعریف محیط مرجع یا تعیین ضرایب تبدیل نیروی کار به اکسرژی) نیز اشاره دارند (دوولف و همکاران^۳، ۲۰۰۸؛ ماس و وان‌پاسل^۴، ۲۰۱۴). با این وجود، ادبیات پژوهشی به‌طور فزاینده‌ای شاخص‌های مبتنی بر اکسرژی را به‌عنوان معیارهایی با مبنای فیزیکی مستحکم‌تر برای سنجش عملکرد پایداری، در مقایسه با شاخص‌های صرفاً اقتصادی یا مبتنی بر انرژی، پذیرفته است.

یکی از شاخه‌های جدید در این حوزه، مفهوم هزینه فرصت اکسرژی^۵ است. رویکرد هزینه فرصت اکسرژی که برای نخستین بار توسط خواجه‌پور معرفی شد، پیشنهاد می‌دهد که عملکرد نهاده‌های تولید شامل نیروی کار و سرمایه، بر اساس ظرفیت آن‌ها برای جایگزینی یکدیگر در تولید خروجی مفید اکسرژی محور ارزیابی شود (خواجه‌پور^۶، ۲۰۲۲). به بیان دیگر، هزینه فرصت اکسرژی، ارزش اکسرژی محور هر نهاده تولید را در قالب هزینه فرصت ناشی از عدم استفاده از همان میزان اکسرژی در جای دیگر تعریف می‌کند. این رویکرد نوین، تلاشی محسوب می‌شود برای پیوند صریح حسابداری اکسرژی با مفهوم اقتصادی

۱. Mendecka et al.

۲. Stanek and Czarnowska

۳. Dewulf et al.

۴. Maes and Van Passel

۵. Exergetic Opportunity Cost (EOC)

۶. Khajepour

جانشینی و مبادله میان ورودی‌ها. این مفهوم به لحاظ نظری به بهینه‌سازی اکسرژی-اقتصادی مرتبط است، جایی که بررسی می‌شود هر نهاد چه میزان اکسرژی (یا هزینه) نسبت به نهاد دیگر صرفه‌جویی می‌کند. نوآوری هزینه فرصت اکسرژی، همان‌طور که پیشنهاددهندگان آن توضیح داده‌اند، در این است که "عملکرد اکسرژی‌محور نهاده‌های تولید به عنوان ظرفیت آن‌ها برای جایگزینی یکدیگر تعریف می‌شود" (خواجه‌پور، ۲۰۲۲). این وارونگی دیدگاه، یعنی نگاه به نهاده‌ها از منظر اکسرژی‌ای که می‌توانند صرفه‌جویی یا جایگزین کنند، رویکردی سودمحورتر را نسبت به انباشت هزینه در روش حسابداری اکسرژی بسط‌یافته القا می‌کند.

روش

مفهوم نهایی گرای^۱ باعث می‌شود نهاده‌های تولید برای هدف بهینه‌سازی کاربردی‌تر باشند. در دنیای واقعی، ارزش اکسرژی‌محور^۲ یک واحد نهاد تولید (نیروی کار و سرمایه) معادل مقدار افزوده‌ای از کاهش در تخریب اکسرژی است، درحالی که سطح تولید ثابت باقی می‌ماند. این مقدار ممکن است از طریق دسترسی به نهاد تولید در یک بخش صنعتی خاص، زمان و مکان جغرافیایی مشخص حاصل شود. بر اساس قاعده تولید بهینه در اقتصاد نئوکلاسیک، قیمت ایده‌آل یک نهاد تولید یا یک خدمت اکوسیستمی در یک سامانه (بازار) فرضی، معادل بهره‌وری نهایی آن نهاد خواهد بود. روش به کاررفته در این مطالعه برای ارزیابی نهاده‌های تولید در ادامه ارائه شده است.

یک رویکرد جدید در کار تحقیقی حاضر برای ارزیابی مقادیر اکسرژی‌محور نهاده‌های تولید، به عنوان جایگزینی برای هزینه‌های اکسرژی بسط‌یافته آن‌ها که در روش حسابداری اکسرژی بسط‌یافته پیشنهاد شده بود، توسعه یافته است. بهره‌وری اکسرژی‌محور نهاده‌های تولید، معادل فرصت بهره‌وری اکسرژی حاشیه‌ای (یعنی کاهش حاشیه‌ای در تخریب اکسرژی) ناشی از کاهش محدودیت‌ها بر روی نهاده‌های تولید در نظر گرفته می‌شود. کاربرد رویکرد جدید با کمک تعریف مقادیر اکسرژی‌محور^۳ نهاده‌های تولید به عنوان

۱. marginality

۲. exergetic

۳. اگرچه «اکسرژی» یک مفهوم ترمودینامیکی است که معمولاً برای ارزیابی هزینه‌ها به کار می‌رود و نه مقادیر، در اینجا از اصطلاح «ارزش اکسرژی‌محور» به عنوان شاخصی برای عملکرد اکسرژی‌محور یک نهاد تولید استفاده شده

پتانسیل نهاده‌ها برای جایگزینی تخریب‌های اکسرژی تضمین شده است. برخلاف روش اجرا شده در حسابداری اکسرژی بسط‌یافته، در رویکرد بهره‌وری اکسرژی پیشنهادی در کار پژوهشی حاضر، این نهاده‌ها می‌توانند به بررسی جزئی بخش صنعتی یا کشور مورد مطالعه بپردازند. برای بررسی این مفهوم پتانسیل نهاده‌های تولید، می‌توان آن‌ها را در قالب تابع تولید هر صنعت تعریف کرد و قدرت جانشینی نهایی آن‌ها را بررسی کرد.

توابع تولید به دنبال توضیح خروجی اقتصادی ناشی از نهاده‌های ورودی تولید هستند و در مطالعه اجزای رشد اقتصادی، تحقیقات تجربی در مقابل نظریه اقتصادی و مدل‌سازی کلان‌اقتصادی نقش مرکزی دارند. برای مقاصد ما، توابع تولید تجمیعی را به عنوان تابعی تعریف می‌کنیم که در بخش صنعتی (دیسو و همکاران^۱، ۲۰۱۵؛ اسمیت و همکاران^۲، ۲۰۱۱) یا در سطوح کلی اقتصاد (کندر و استرن^۳، ۲۰۱۴؛ نلسون^۴، ۱۹۶۴؛ سولو^۵، ۱۹۵۷) اعمال می‌شوند. تابع تولید تجمیعی رایج‌تر در ادبیات، تابع کاب-داگلاس^۶ است. تابع کاب-داگلاس در فرمول معروف ۱۹۲۸ خود (کاب و داگلاس^۷، ۱۹۲۸) در معادله (۱) داده شده است، که طبق نظریه اقتصادی متعارف، خروجی اقتصادی (Y_t) را به دو نهاده اصلی سرمایه

(K_t) و نیروی کار (L_t) نسبت می‌دهد.

$$Y_t = \theta e^{\lambda t} K_t^\alpha L_t^\beta \quad (1)$$

که در آن α و β ، کشش‌های خروجی (Y_t) نسبت به سرمایه و نیروی کار هستند و معمولاً فرض همگنی از درجه اول ($\alpha + \beta = 1$) برای رعایت فرض بازدهی ثابت به مقیاس رعایت می‌شود. در این معادله θ پارامتر مقیاس است، و $e^{\lambda t}$ باقی‌مانده سولو خارجی است، یعنی بخشی از خروجی اقتصادی که توسط نهاده‌های درونی تولید توضیح داده نمی‌شود. همچنین λ یک پارامتر است که رشد بهره‌وری (خارجی) را تعریف می‌کند.

است تا تغییر در دیدگاه‌های روش Exp نسبت به سایر روش‌های محاسبه هزینه اکسرژی‌محور (مانند EEA) برجسته شود.

۱. Dissou et al.

۲. Smyth et al.

۳. Kander, A., & Stern, D. I.

۴. Nelson, R. R.

۵. Solow, R. M.

۶. Cobb–Douglas (C-D)

۷. Cobb and Douglas

در سال‌های اخیر، افزودن انرژی به‌عنوان یک عامل تولید در توابع تولید کلان مجدداً مورد توجه قرار گرفته است (فان‌درورف^۱، ۲۰۰۸). این بازگشت از یک سو به دلیل کارکردگرایی آن است؛ یعنی تمرکز روزافزون بر مسائل انرژی و محیط‌زیست موجب احیای مدل‌سازی‌های کلان اقتصادی مرتبط شده است (ژا و ژو^۲، ۲۰۱۴). به بیان دیگر، بررسی آثار انرژی در مدل‌های انرژی-اقتصادی تنها زمانی امکان‌پذیر است که انرژی به‌عنوان یک نهاده درون‌زای تولید در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، شواهد فزاینده‌ای از رابطه تنگاتنگ انرژی و رشد اقتصادی گزارش شده است (برانس و همکاران^۳، ۲۰۱۴؛ کالیمیریس و همکاران^۴، ۲۰۱۴؛ استرن^۵، ۱۹۹۳). با این حال، توابع تولید کلان نئوکلاسیک که ترکیبی از سرمایه و نیروی کار را لحاظ می‌کنند، اغلب نقش انرژی را نادیده می‌گیرند، چرا که آن را محصولی واسطه‌ای حاصل از سایر نهاده‌ها می‌دانند، نه نهاده‌ای مستقل. بحران‌های نفتی دهه ۱۹۷۰ این نگرش را به چالش کشید و زمینه‌ساز ادغام صریح انرژی در مدل‌های رشد شد (برنت و وود^۶، ۱۹۷۵؛ رنشاو^۷، ۱۹۸۱). در ادامه این روند، با در نظر گرفتن نه تنها کمیت بلکه کیفیت انرژی، می‌توان به جای انرژی، از اکسرژی به‌عنوان سومین نهاده مؤثر بر تولید بهره گرفت، به‌طوری که تابع تولید کاب-داگلاس معادله (۱) در این مطالعه به شکل معادله (۲) اصلاح شده است.

$$Y_t = \theta e^{\lambda t} K_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma \quad (2)$$

که در آن، γ کشش تولید نسبت به انرژی است، و $(\alpha + \beta + \gamma = 1)$ به‌منظور برقراری فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس برقرار می‌شود.

یکی از پارامترهای مهم در اقتصاد، نرخ نهایی جانشینی فنی^۸ است که معیاری از سهولت جایگزینی نهاده‌ی تولید اکسرژی (Ex) با نهاده‌های تولید کار (L)، به عنوان مثال نفر_ساعت، یا سرمایه (K)، در واحدهای پولی به عنوان مثال دلار است. با تشکیل دادن تابع

۱. van der Werf

۲. Zha, D., & Zhou, D.

۳. Bruns et al.

۴. Kalimeris et al.

۵. Stern, D. I.

۶. Berndt and Wood

۷. Renshaw, E. F.

۸. Marginal Rate of Technical Substitution (MRTS)

تولید بخش مورد مطالعه، نرخ نهایی جانشینی فنی طبق معادلات (۳) و (۴) می‌تواند سودآوری نهایی هر واحد کار یا سرمایه و تغییرات آن در طول زمان را نشان دهد. با فرض ارزش افزوده تولید (Y) به عنوان تابعی از نهاده‌های تولید، نرخ نهایی جانشینی فنی، معادل تغییر نسبی در محصولات حاشیه‌ای^۱ نهاده‌های تولید خواهد بود، و بهره‌وری اکسرژی‌محور هر نهاده تولید غیر اکسرژی، برابر منفی نرخ نهایی جانشینی فنی آن نهاده با نهاده‌ی اکسرژی تعریف خواهد شد.

$$ExP_K = -MRTS_{Ex,K}(t) = \left(\frac{\partial Ex}{\partial K} \right)_{t(Y,L=cte)} = \left(\frac{\frac{\partial Y}{\partial K}}{\frac{\partial Y}{\partial Ex}} \right)_{t(Y,L=cte)} = \frac{\beta_K}{\beta_{Ex}} \times \frac{Ex}{K} \cong \left(\frac{MP_K}{MP_{Ex}} \right) \left[\frac{MJ}{\$} \right] \quad (۳)$$

$$ExP_L = -MRTS_{Ex,L}(t) = \left(\frac{\partial Ex}{\partial L} \right)_{t(Y,K=cte)} = \left(\frac{\frac{\partial Y}{\partial L}}{\frac{\partial Y}{\partial Ex}} \right)_{t(Y,K=cte)} = \frac{\beta_L}{\beta_{Ex}} \times \frac{Ex}{L} \cong \left(\frac{MP_L}{MP_{Ex}} \right) \left[\frac{MJ}{WH} \right] \quad (۴)$$

قابلیت جایگزینی انرژی و سایر نهاده‌های تولید در بسیاری از مطالعات اقتصادسنجی کلان، به عنوان مثال (استرن^۲، ۲۰۱۱؛ فان در ورف^۳، ۲۰۰۸)، و اقتصادسنجی خرد بخش انرژی، به عنوان مثال (دیسو و همکاران^۴، ۲۰۱۵؛ فیوریتو و فان دن برگ^۵، ۲۰۱۵؛ خیابانی و حسنی^۶، ۲۰۱۰؛ ژا و ژو^۷، ۲۰۱۴) مورد بررسی قرار گرفته است.

اساساً انتظار می‌رود که با توجه به توسعه فنی در طول زمان، سرمایه‌گذاری‌های بیشتر سرمایه بتواند منجر به تولید کارآمدتر با تخریب کمتر اکسرژی یا انرژی مفید شود. همچنین، با توجه به اثر خودکارسازی^۸، استفاده از ماشین آلات قدرت‌محور به جای نیروی کار در تولید می‌تواند منجر به جایگزینی تخریب اکسرژی و نیروی کار شود. طبق تعریف، نرخ نهایی جانشینی فنی می‌تواند بر اساس این فرض محاسبه شود که تنها دو نهاده تولید به صورت فنی قابل جایگزینی هستند و در عین حال نهاده تولید دیگر و همچنین سطح تولید ثابت نگه‌داشته می‌شود. همچنین، بسته به نوع تابع تولید، نرخ نهایی جانشینی فنی معمولاً تابعی از

۱. Marginal Productivity

۲. Stern, D.I.

۳. van der Werf, E.

۴. Dissou et al.

۵. Fiorito and van Den Bergh

۶. Khiabani and Hasani

۷. Zha and Zhou

۸. Automation

کشش‌های جانشینی و سطح تولید و مصرف منابع است. کشش‌های جانشینی، اندازه‌گیری‌های دارای بُعد از قابلیت جایگزینی بین نهاده‌ها و برای انواع معمولی توابع تولید در نظر گرفته می‌شوند که فرض می‌شود ثابت هستند.

تخمین توابع تولید معمولاً با استفاده از تکنیک‌های اقتصادسنجی بر داده‌های سری‌زمانی یا پنل انجام می‌شود. برای یک کشور یا صنعت خاص، می‌توان از رگرسیون سری‌زمانی برای برآورد کشش‌های بلندمدت استفاده کرد. همچنین، با گردآوری داده‌های مقطعی کشورها و صنایع مختلف، رگرسیون پنل با روش اثرهای ثابت قابل اجراست؛ چراکه علاوه بر افزایش درجات آزادی، امکان کنترل ناهمگونی‌های^۱ غیرمشاهده‌شده را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، داده‌های پانل سرمایه، نیروی کار و مصرف انرژی چند کشور برای تخمین تابع تولید تجمعی جمع‌آوری شد. کشش‌ها بین کشورها یکسان فرض شد، اما عرض از مبدأ (اثرهای ثابت) برای هر کشور مجاز به تغییر بود. با این حال، گردآوری داده‌های هماهنگ از سرمایه، نیروی کار و اکسرژی برای هر واحد پانل کاری دشوار است که در ادامه بررسی می‌شود. اقتصادسنجی پنل امکان تخمین میانگین کشش‌ها و اثرات جانشینی را فراهم می‌کند، در حالی که ناهمگونی فردی مانند سطح فناوری کشورها لحاظ می‌شود.

برای محاسبه شاخص بهره‌وری اکسرژی و تخمین تابع تولید، گردآوری داده‌های دقیق در زمینه‌های مصرف اکسرژی، نیروی کار، سرمایه انباشته و ارزش افزوده ضروری بود. در گام نخست، داده‌های مصرف انرژی صنایع منتخب در نه کشور توسعه‌یافته شامل ایالات متحده، آلمان، فرانسه، ژاپن، انگلستان، کانادا، ایتالیا، سوئد و اتریش، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ از پایگاه داده‌ی IEA استخراج شد. این کشورها علاوه بر جامعیت آماری، دارای ویژگی‌های مشترکی همچون ساختار صنعتی متنوع، سابقه اجرای سیاست‌های بهره‌وری انرژی، و تفاوت در شدت انرژی صنایع هستند که تحلیل تطبیقی و استنتاج از مدل را ممکن می‌سازد.

داده‌های مذکور شامل مقادیر مصرف انرژی نهایی به تفکیک حامل‌های انرژی مانند گاز طبیعی، فرآورده‌های نفتی، زغال‌سنگ، برق، حرارت و زیست‌توده برای هر یک از صنایع هدف می‌باشد. برای تبدیل انرژی قانون اول به مقادیر اکسرژی (بر اساس قانون دوم

۱. اثر ناهمگونی (Heterogeneity Effect) در اقتصاد به تفاوت‌های ذاتی یا ساختاری میان واحدهای مورد بررسی (مانند افراد، خانوارها، بنگاه‌ها، صنایع یا کشورها) اشاره دارد که می‌تواند بر رفتار اقتصادی یا نتایج مدل‌سازی تأثیر بگذارد.

ترمودینامیک)، ضرایب استاندارد نسبت اکسرژی به انرژی برای هر حامل انرژی استفاده شده است. در این میان، گرچه برای حامل‌هایی مانند سوخت‌های فسیلی و برق نسبت اکسرژی به انرژی نزدیک به یک است، اما در حامل‌هایی نظیر حرارت دماپایین، این نسبت به مراتب کمتر است و در محاسبات لحاظ شده است. ضرایب تبدیل مورد استفاده در جدول ۱ گزارش شده‌اند. همچنین داده‌های ارزش افزوده سالانه هر صنعت نیز از همان پایگاه داده‌ی مذکور استخراج شده است.

در خصوص نیروی کار، داده‌ها از پایگاه سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^۱ استخراج شد. این داده‌ها در دو قالب تعداد شاغلان در صنعت و ساعات کاری گزارش شده‌اند. با توجه به اینکه در تحلیل بهره‌وری اکسرژی، نیروی کار به صورت نفر_ساعت لحاظ می‌شود، برای همگن‌سازی داده‌ها از یک ضریب تبدیل یکنواخت استفاده شد. بر این اساس، فرض گردید هر نفر ۵ روز در هفته و روزانه ۸ ساعت مشغول به کار باشد و به‌طور میانگین سالانه معادل حدود ۲۰۰۰ ساعت کار مفید انجام دهد^۲؛ بنابراین داده‌های شاغلان به واحد میلیون نفر_ساعت همگن شدند.

جدول ۱. نسبت اکسرژی به انرژی حامل‌های انرژی (منبع: دینچر و روزن^۳، ۲۰۱۱)

نسبت اکسرژی به انرژی	حامل انرژی
۰/۹۸	نفت و فراورده‌های نفتی
۰/۹۴	گاز طبیعی
۱	زغال‌سنگ و فراورده‌های زغال سنگ
۰/۷۵	زیست توده و زباله
۰/۳۷	حرارت (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) ^۴
۱	برق

۱. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

۲. با توجه به تفاوت‌های موجود میان کشورها و صنایع، ممکن است این مقدار با بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی همراه باشد؛ با این حال، از آن به‌عنوان یک تقریب استاندارد در بسیاری از مطالعات مبتنی بر اکسرژی (انریکو، ۱۹۹۱) استفاده شده است.

۳. Enrico, S.

۴. Dincer & Rosen

۵. نسبت ۰/۳۷ از رابطه $1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{Ex}{En}$ مربوط به قانون دوم ترمودینامیک توسط نگارندگان محاسبه شده است، که در آن دمای منبع گرما (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۴۷۳/۱۵ کلوین) و دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۲۹۸/۱۵ کلوین) در نظر گرفته شده است. این نسبت بیانگر سهم قابل تبدیل انرژی حرارتی به کار مفید است.

گردآوری داده‌های سرمایه نیز با چالش‌هایی همراه بود، چراکه برخلاف انرژی و نیروی کار که متغیرهای جریان محسوب می‌شوند، سرمایه یک متغیر انباشتی است که نیازمند ساختاردهی به صورت موجودی سرمایه است؛ در عموم ادبیات پژوهش، میزان سرمایه انباشته در دسترس تولید^۱ نسبت به میزان سرمایه‌گذاری سالانه^۲ به عنوان نهاده موثر در تابع تولید ترجیح داده شده است (مایرس و ساسنوو^۳، ۱۹۹۱؛ پوکروفسکی^۴، ۲۰۰۳). در مواردی که داده‌های موجودی سرمایه به صورت سالانه در دسترس نبود، از روش موجودی دائمی^۵ برای برآورد آن استفاده شد. این روش شامل انباشت سرمایه‌گذاری سال‌های گذشته و کسر استهلاک سالانه است که به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود که در آن K_t ، میزان سرمایه انباشته در دسترس تولید در سال t ، I_t ، میزان سرمایه‌گذاری سالانه، و δ ، نرخ استهلاک صنعتی است که برابر با ۳ درصد فرض شده است.

$$K_t = I_t + (1 - \delta)I_{t-1} + (1 - \delta)^2 I_{t-2} + \dots = I_t + (1 - \delta)K_{t-1} \quad (5)$$

برای سال اول برازش ($t = 1$) سرمایه انباشته از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود که در آن‌ها نرخ متوسط رشد سالانه سرمایه (g) برای محاسبه میزان سرمایه موجود در سال پیش از شروع برازش، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$K_1 = \frac{I_1}{(g + \delta)} \quad (6)$$

$$g = \left(\frac{K_t - K_{t-1}}{K_{t-1}} \right)_{ave} = \left(\frac{I_t + (1 - \delta)K_{t-1} - K_{t-1}}{K_{t-1}} \right)_{ave} = \left(\frac{I_t}{K_{t-1}} \right)_{ave} - \delta \quad (7)$$

۱. Accumulative capital inventory

۲. Annual investment

۳. Mairesse and Sassenou

۴. Pokrovski, V.N.

۵. perpetual inventory method (PIM)

خوشبختانه برای بسیاری از کشورهای مورد مطالعه، داده‌های موجودی سرمایه توسط منبع آماری معرفی شده تأمین شده بود و در موارد فاقد داده، با دقت کافی بر اساس روش یادشده بازسازی شد.

در مجموع، این فرآیند به تشکیل یک پایگاه داده پانل کامل برای صنایع منتخب در کشورهای هدف طی دو دهه انجامید که امکان تخمین تجربی توابع تولید، نرخ‌های نهایی جانشینی فنی، و شاخص بهره‌وری اکسرژی را فراهم ساخت؛ هرچند چالش‌هایی نیز در مسیر گردآوری داده‌ها وجود داشت که در ادامه بررسی می‌شود.

برخی متغیرهای مورد نیاز، به‌ویژه برای نهاده‌های سرمایه و نیروی کار، در سطح صنعت و کشور با خلاهای جزئی مواجه بودند. این خلاها عمدتاً به یکی دو سال ابتدایی یا انتهایی بازه‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ مربوط بوده و در میانه سری‌های زمانی رخ ندادند؛ از این‌رو، نیازی به درونیابی یا برون‌یابی آماری احساس نشد. برای کاهش آثار داده‌های ناقص، مطالعه بر پایه داده‌های پانل طراحی شد تا امکان مقایسه عرضی میان کشورها و صنایع فراهم باشد. در موارد نادری که داده‌های یک نهاد برای یک صنعت-کشور خاص کامل نبود، نبود آن ترکیب به‌سادگی در رگرسیون پنل مدیریت شد.

همچنین با توجه به استخراج داده‌های انرژی و ارزش افزوده از IEA و داده‌های سرمایه و نیروی کار از OECD، تطبیق دقیق کدهای ISIC برای سازگاری ساختاری انجام گرفت. از آنجا که داده‌ها در قالب قیمت‌های ثابت و واحدهای استاندارد ارائه شده‌اند، نیازی به تعدیل قیمتی یا هم‌مقیاس‌سازی بیشتر نبود.

درخصوص نرخ استهلاک سرمایه، مقدار ۳ درصد به‌عنوان نرخ مرجع در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت؛ انتخابی که مطابق با مطالعات مشابه در ادبیات اقتصاد تولید و بهره‌وری بوده است. برای مثال، این نرخ در منابعی نظیر (تیمر و همکاران^۱، ۲۰۱۰) توصیه شده است. با این حال، با توجه به تفاوت‌های بالقوه در ساختار سرمایه‌ای کشورها و صنایع، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات نرخ استهلاک نیز در دستور کار قرار گیرد تا دقت نتایج افزایش یابد.

یافته‌ها

۱. Timmer et al

در این پژوهش، نرخ‌های نهایی جانشینی فنی سرمایه و نیروی کار نسبت به اکسرژی، برابر معکوس مقادیر شاخص بهره‌وری اکسرژی محور سرمایه و نیروی کار طبق تعریف معادلات (۳) و (۴)، تحت توابع کاب-داگلاس برای صنایع منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ محاسبه گردید. داده‌های مورد تحلیل از رگرسیون پنل در دو سطح کشور و صنعت استخراج شد و با شاخص شدت انرژی صنایع مقایسه گردید. نتایج حاصل، مطابق جدول ۲ و نمودار ۱، نشان دادند که در صناعی با شدت انرژی بالا، همچون فلزات اساسی و فرآورده‌های نفتی، مقادیر بهره‌وری اکسرژی برای نیروی کار و سرمایه به‌طور معناداری بیشتر از سایر صنایع بوده است. در تفسیر این الگو، می‌توان دو رویکرد را در نظر گرفت: نخست آنکه در صنایع انرژی‌بر که امکان کاهش مستقیم مصرف انرژی به دلایل فنی و ساختاری محدود است، بهینه‌سازی از مسیر جایگزینی نیروی کار یا ارتقای سرمایه قابل دستیابی نیست؛ و دوم اینکه مصرف انرژی بالا، به‌ویژه در اقتصادهایی با قیمت پایین انرژی، نشان‌دهنده وجود ظرفیت صرفه‌جویی گسترده و امکان بهره‌وری‌پذیری بالا از طریق بهبود فناوری و ساختار تولید است. یافته‌های این پژوهش از منظر تحلیلی، با رویکرد دوم همخوانی دارند و نشان می‌دهند که شدت بالای مصرف انرژی در این صنایع نه تنها مانع بهره‌وری نیست، بلکه بستر مساعدی برای افزایش بازدهی اکسرژی محور نهاده‌ها فراهم می‌آورد.

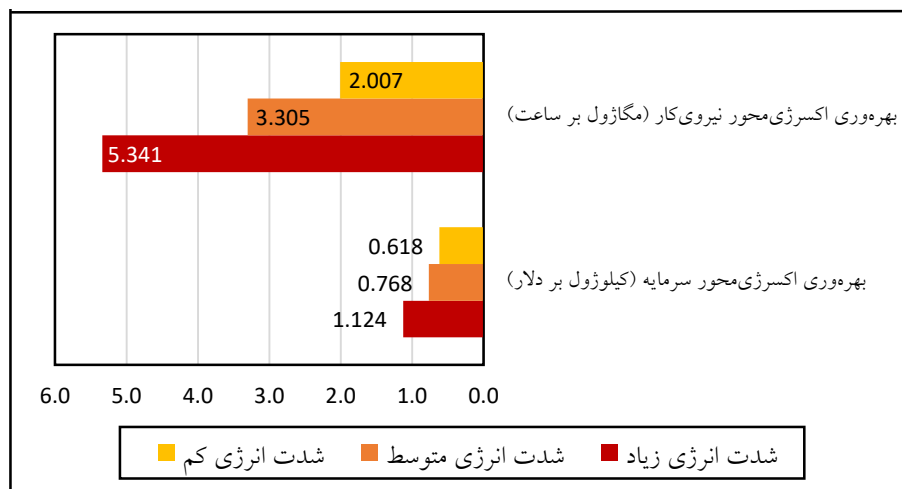
جدول ۲. محاسبه مقادیر شاخص بهره‌وری اکسرژی محور نهاده‌های تولید صنایع و مقایسه با مقادیر شدت انرژی صنایع (منبع: نتایج محاسبات نگارندگان)

صنایع	مقادیر بهره‌وری اکسرژی محور				شدتِ انرژی
	(نرخ‌های جانشینی نهایی)				
	سرمایه ($kJ/\$$)		نیروی کار (MJ/hr)		($MJ/\$$)
	مقادیر	میانگین	مقادیر	میانگین	
فلزات اساسی	۰/۶۴۲	۱/۱۲۴	۳/۸۹۹	۵/۳۴۱	۲۶/۵۱۶
کک و فرآورده‌های نفتی تصفیه شده	۱/۶۰۷		۶/۷۸۲		۲۲/۱۰۶
کاغذ، خمیر و چاپ	۱/۴۴۶		۳/۳۰۵		۱۹/۹۵۱
معادن	۰/۷۶۸		۲/۶۲۹		۱۳/۰۹۳
کانی‌های غیرفلزی	۰/۷۶۳	۰/۷۶۸	۳/۴۲۰	۳/۳۰۵	۱۲/۵۸۷
چوب و محصولات چوبی	۰/۹۱۰		۲/۵۸۹		۱۲/۲۰۳
مواد شیمیایی و محصولات شیمیایی	۰/۷۱۱		۳/۳۸۵		۸/۹۲۶

۲۳ | رویکرد بهره‌وری اکسرژی محور برای ارزیابی نهاده‌های تولید در بخش صنعت | خواجه پور و همکاران

۵/۵۰۵	۲/۶۵۹	۰/۶۶۳	غذا و تنباکو
۴/۹۳۸	۲/۴۰۰	۰/۶۱۸	کشاورزی، جنگلداری و ماهیگیری
۴/۶۱۰	۲/۰۰۷	۰/۷۸۴	منسوجات و چرم
۴/۱۷۸	۲/۰۰۷	۰/۶۹۳	لاستیک و پلاستیک
۱/۵۴۴	۲/۰۹۴	۰/۵۳۰	ماشین‌آلات
۱/۳۰۱	۱/۹۹۹	۰/۳۷۹	تجهیزات حمل‌ونقل
۰/۹۷۵	۱/۴۵۵	۰/۵۷۰	ساخت‌وساز

این یافته در نمودار ۱ نیز به صورت بصری قابل مشاهده است، به گونه‌ای که با افزایش شدت انرژی، مقادیر بهره‌وری اکسرژی و قدرت جانشینی هر دو نهاده تولید افزایش می‌یابد.

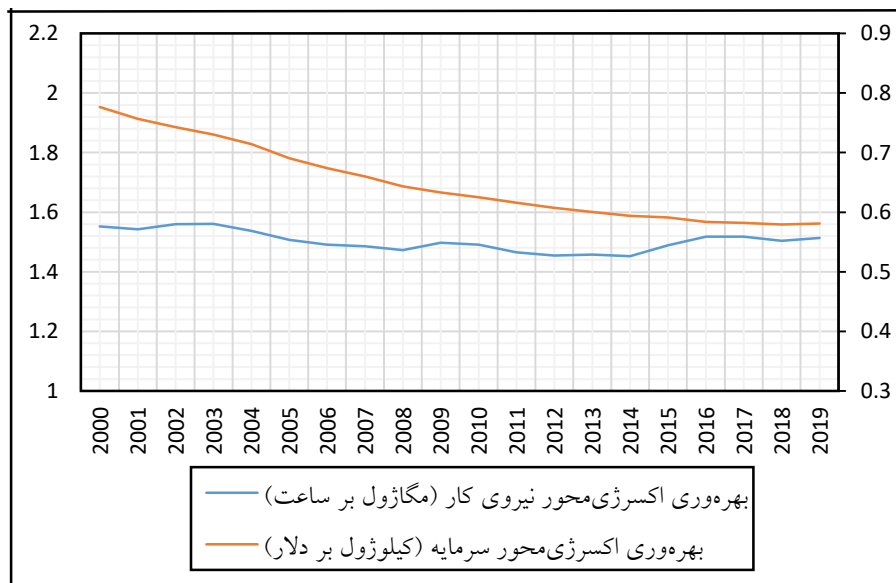


نمودار ۱. افزایش مقادیر بهره‌وری اکسرژی صنایع با افزایش شدت انرژی آن‌ها
(منبع: یافته‌های تحقیق)

همچنین، تحلیل روند تاریخی صنعت منتخب معدن کاوی در ایالات متحده، به عنوان الگویی که در تمامی صنایع کشورهای مورد بررسی تکرار می‌شود، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (نمودار ۲) نشان می‌دهد که بهره‌وری اکسرژی سرمایه روندی فزاینده داشته، در حالی که بهره‌وری اکسرژی نیروی کار در همان دوره نسبتاً پایدار باقی مانده است. این روند را می‌توان در چارچوب تغییرات ساختاری صنایع سرمایه‌بر در کشورهای توسعه یافته

تفسیر کرد؛ از جمله رشد خودکارسازی، دیجیتالی سازی و کاهش نقش نیروی انسانی در فرآیندهای تولیدی. بدین ترتیب، فناوری های نوین موجب افزایش بهره وری سرمایه شده اند، در حالی که ظرفیت ارتقاء بهره وری نیروی کار در این صنایع به سطحی از اشباع رسیده است. از سوی دیگر، مقایسه نتایج رگرسیون ها با و بدون اعمال قید همگنی نشان داد که فرض بازدهی ثابت به مقیاس در بیشتر صنایع قابل اعمال و از نظر آماری معنادار است؛ که این امر اعتبار تحلیل نرخ های جانشینی فنی را افزایش داده است.

از طرفی، کاهش بهره وری سرمایه نشان دهنده آن است که با گذشت زمان، ابزارها و تجهیزات تولیدی در این صنایع به گونه ای طراحی شده اند که انرژی را با راندمان بالاتری مصرف می کنند. این موضوع، علاوه بر تأکید بر لزوم ارتقاء فناوری در صنایع انرژی بر، جایگاه ویژه ای برای سیاست گذاری های تشویقی در مسیر نوسازی تجهیزات صنعتی و افزایش سهم سرمایه های فیزیکی کارآمد در تولید فراهم می آورد.



نمودار ۲. افزایش بهره وری اکسرژی محور سرمایه و ثبات بهره وری اکسرژی محور نیروی کار برای

صنعت منتخب معدن کاوی در ایالات متحده طی سال های مورد بررسی

(منبع: یافته های تحقیق)

در ادامه تحلیل تجربی مدل، لازم به ذکر است کلیه رگرسیون‌ها بر اساس ساختار داده‌های پنل ایستا با استفاده از مدل اثرات ثابت تخمین زده شد. نتایج آزمون F برای برازش مدل و مقدار سطح احتمال^۱ متناظر با آن در تمامی ۱۴ صنعت منتخب به‌طور معناداری کمتر از سطح خطای ۵ درصد گزارش شد؛ موضوعی که بیانگر کفایت مدل و معناداری آماری ضرایب برآورد شده است. به‌منظور بررسی هم‌خطی میان متغیرهای مستقل، ضریب همبستگی پیرسون برای هر جفت متغیر محاسبه شد که در تمامی موارد، مقدار آن کمتر از ۰/۸ بود و از این حیث، مسأله هم‌خطی چندگانه جدی وجود نداشت. این یافته‌ها اطمینان‌بخش بودن فروض زیرساختی مدل و پایداری نتایج به‌دست‌آمده در تحلیل شاخص بهره‌وری اکسرژی را تقویت می‌کنند.

در نهایت، بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان چنین نتیجه گرفت که شاخص بهره‌وری اکسرژی به‌عنوان رویکردی نوین، توانایی تبیین نقش واقعی نهاده‌های تولید در بهینه‌سازی مصرف انرژی را دارد و از طریق سنجش فایده اکسرژی‌محور نهاده‌های تولید می‌تواند به‌عنوان مکملی برای تحلیل‌های سنتی انرژی، ابزاری مؤثر در طراحی سیاست‌های بهره‌وری انرژی و برنامه‌های بهینه‌سازی صنعتی باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شاخصی مفهومی و کاربردی تحت عنوان «بهره‌وری اکسرژی» توسعه داده شد که با هدف ارزیابی نقش نهاده‌های سنتی تولید، یعنی سرمایه و نیروی کار، در کاهش تخریب اکسرژی در فرآیندهای صنعتی طراحی گردید. این شاخص، با الهام از چارچوب تحلیل هزینه اکسرژی بسط‌یافته اما با رویکردی معکوس، به‌جای سنجش بهای اکسرژی‌محور نهاده‌ها، میزان فایده آن‌ها در ارتقای کارایی ترمودینامیکی تولید را می‌سنجد. ساختار تحلیلی شاخص بر پایه تابع تولید کاب_داگلاس و نرخ‌های نهایی جانشینی فنی میان اکسرژی و نهاده‌ها تدوین شده و بر مجموعه‌ای از داده‌های پنل صنایع منتخب در نه کشور توسعه‌یافته طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ اعمال گردید.

نتایج حاصل از برآورد مدل نشان داد که شاخص بهره‌وری اکسرژی‌محور نیروی کار و سرمایه، به‌طور معناداری با شدت انرژی صنعت هم‌بستگی مستقیم دارد. به‌ویژه در صنایع انرژی‌بر مانند فلزات اساسی و کک و فرآورده‌های نفتی تصفیه‌شده، مقدار این شاخص در

۱. P-value

مقایسه با سایر صنایع بالاتر است. با توجه به تعریف شاخص، این به معنای آن است که این صنایع نیاز بیشتری به مداخلات بهره‌وری دارند و در اولویت طراحی و اجرای سیاست‌های کاهش تخریب اکسرژی قرار می‌گیرند تا منجر به ایجاد ارزش افزوده بیشتر از طریق کاهش هزینه‌های انرژی شوند.

از منظر زمانی، روند شاخص سرمایه در اغلب کشورها کاهشی و شاخص نیروی کار تقریباً ثابت بوده است؛ روندی که احتمالاً ناشی از خودکارسازی و تحول ساختار فناوری است. در سطح بین‌کشوری، کشورهایی مانند انگلیس، ایتالیا و سوئد شاخص‌های بالاتری داشتند که نشان‌دهنده فرصت‌های بهبود بهره‌وری و اهمیت استمرار سیاست‌های فناورانه در آن‌هاست.

اما با وجود تلاش برای طراحی چارچوبی جامع، این پژوهش نیز با محدودیت‌هایی همراه بوده است. در برخی کشورها و برای برخی متغیرها، داده‌های سالانه به‌طور کامل در دسترس نبود؛ با این حال، استفاده از ساختار پانل تا حدی این محدودیت را جبران کرد. همچنین، اگرچه داده‌های اکسرژی و ارزش افزوده تا سال ۲۰۲۱ موجود بود، داده‌های سرمایه و نیروی کار تنها تا سال ۲۰۱۹ در دسترس قرار داشت و این امر موجب محدود شدن دوره مطالعه گردید. علاوه بر این، داده‌های مورد استفاده از منابع مختلف آماری (OECD و IEA) استخراج شد که ممکن است تفاوت‌هایی در تعاریف یا روش‌های جمع‌آوری داده ایجاد کرده باشد.

در بُعد مدل‌سازی نیز فروض ساده‌سازی‌شده‌ای نظیر نرخ استهلاک ثابت (۳ درصد)، نرخ یکنواخت ۲۰۰۰ ساعت کار سالانه برای هر نفر، و فرم تابع کاب-داگلاس با کشش‌های ثابت و بازدهی ثابت به مقیاس مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، تمایزات کیفی در ترکیب نیروی کار (مانند تمایز میان نیروی کار متخصص و غیرمتخصص) به دلیل نبود داده‌های قابل اتکا در سطح بین‌المللی، لحاظ نشده است که در صورت دسترسی به داده‌های دقیق‌تر می‌تواند به غنای تحلیل بیفزاید.

با وجود این محدودیت‌ها، شاخص بهره‌وری اکسرژی می‌تواند به‌عنوان ابزاری هدفمند در شناسایی صنایع یا کشورهایی که بیشترین نیاز به مداخلات بهره‌وری دارند مورد استفاده قرار گیرد. در سطح بخشی، استفاده از این شاخص می‌تواند به تعیین اولویت برای صنایع پرمصرف انرژی مانند فلزات اساسی و کک و پالایش نفت کمک کرده و آن‌ها را در

کانون سیاست‌های نوسازی، فناوری و سرمایه‌گذاری قرار دهد. در این راستا، بهره‌گیری از ابزارهایی مانند مشوق‌های مالیاتی برای توسعه فناوری‌های کم‌اکسرژی، بازنگری در سوبسیدهای انرژی با هدف افزایش اثربخشی، و توانمندسازی نیروی کار از طریق برنامه‌های آموزشی تخصصی، می‌تواند در ارتقاء کارایی اکسرژی این صنایع مؤثر باشد. در سطح کلان نیز پیشنهاد می‌شود این شاخص در نظام آماری کشورها نهادینه شود و در کنار شاخص‌هایی همچون شدت انرژی و شدت کربن، به‌عنوان ابزاری مکمل در ارزیابی اثربخشی سیاست‌های انرژی، طراحی سازوکارهای مالیات‌گذاری زیست‌محیطی، و هدایت منابع تحقیق و توسعه صنعتی به کار گرفته شود. بدین ترتیب، شاخص بهره‌وری اکسرژی می‌تواند نقش مهمی در ارتقای سیاست‌گذاری هدفمند و پایدار در حوزه انرژی و صنعت ایفا نماید.

افزون بر این، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مقایسه‌ای میان این رویکرد فایده‌محور و رویکردهای هزینه‌محور نظیر پژوهش‌های شویا انجام شود تا تحلیل «هزینه-فرصت اکسرژی‌محور» توسعه یابد. همچنین استفاده از توابع پیچیده‌تر مانند ترنسلاگ یا CES می‌تواند دقت تحلیل را افزایش دهد.

در نهایت، توصیه می‌شود این شاخص در سطوح جزئی‌تر صنعتی و منطقه‌ای توسعه یابد و با تلفیق آن با شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، تحلیل‌های چندبعدی‌تری از پایداری صنعتی ارائه گردد. بررسی تفاوت کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه و استفاده از داده‌های خرد و ترکیب سیاست‌های نهادی نیز می‌تواند به تعمیق این رویکرد کمک کند.

تعارض منافع

این اثر تعارض منافی ندارد.

ORCID

Hossein Khajepour



<https://orcid.org/0000-0002-0692-0145>

Mohammad Vesal



<https://orcid.org/0000-0003-3088-7936>

Mohanna Khatami



<https://orcid.org/0009-0006-4348-6372>

References

- Berndt, E. R., & Wood, D. O. (۱۹۷۵). Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy. *The Review of Economics and Statistics*, ۵۷(۳), ۲۵۹-۲۶۸. <https://doi.org/10.2307/1923910>.
- Bruns, S. B., Gross, C., & Stern, D. I. (۲۰۱۴). Is there really Granger causality between energy use and output? *The Energy Journal*, ۳۵(۴), ۱۰۱-۱۳۴.
- Chen, G. Q., & Chen, B. (۲۰۰۹). Extended-exergy analysis of the Chinese society. *Energy*, ۳۴(۹), ۱۱۲۷-۱۱۴۴.
- Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (۱۹۲۸). A theory of production. *The American Economic Review*, ۱۸(۱), ۱۳۹-۱۶۵.
- De Bruyn, S. M., Korteland, M. H., Markowska, A. Z., Davidson, M. D., De Jong, F. L., Bles, M., & Sevenster, M. N. (۲۰۱۰). *Shadow prices handbook. Valuation and weighting of emissions and environmental impacts*.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B. R., Grubb, G. F., Paulus, D. M., & Sciubba, E. (۲۰۰۸). Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. *Environmental Science & Technology*, ۴۲(۷), ۲۲۲۱-۲۲۳۲.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (n.d.). *EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development*.
- Dissou, Y., Karnizova, L., & Sun, Q. (۲۰۱۵). Industry-level econometric estimates of energy-capital-labor substitution with a nested CES production function. *Atlantic Economic Journal*, ۴۳, ۱۰۷-۱۲۱.
- Enrico, S. (۲۰۰۱). Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy, An International Journal*, ۲, ۶۸-۸۴. [https://doi.org/10.1016/S1164-0230\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1164-0230(01)00012-7)
- Ertesvåg, I. S. (۲۰۰۵). Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society ۲۰۰۰. *Energy*, ۳۰(۵), ۶۴۹-۶۷۵.
- Fiorito, G., van Den Bergh, J.C.J.M., (۲۰۱۵). Capital-energy substitution in manufacturing for seven OECD countries: learning about potential effects of climate policy and peak oil. *Energy Efficiency*.
- Glucina, M. D., & Mayumi, K. (۲۰۱۰). Connecting thermodynamics and economics: Well-lit roads and burned bridges. *Annals of the New York Academy of Sciences*, ۱۱۸۵(۱), ۱۱-۲۹.
- Kalimeris, P., Richardson, C., & Bithas, K. (۲۰۱۴). A meta-analysis investigation of the direction of the energy-GDP causal relationship: implications for the growth-degrowth dialogue. *Journal of Cleaner Production*, ۶۷, ۱-۱۳. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.040>
- Kander, A., & Stern, D. I. (۲۰۱۴). Economic growth and the transition from traditional to modern energy in Sweden. *Energy Economics*, ۴۶, ۵۶-۶۵.
- Khajepour, H. (۲۰۲۲). ۱۹th International Conference on Sustainable Energy Technologies ۱۶th to ۱۸th August ۲۰۲۲, Turkey, Sustainable Energy Technologies ۲۰۲۲ Conference Proceedings – Volume ۴.

- Khiabani, N., Hasani, K., (۲۰۱۰). Technical and allocative inefficiencies and factor elasticities of substitution: An analysis of energy waste in Iran's manufacturing. *Energy Economics* ۳۲(۵), ۱۱۸۲-۱۱۹۰.
- Kümmel, R., Grahl, J., & Lindenberg, D. (۲۰۲۲). What if calculations of the economic effects for Germany of a stop of energy imports from Russia are misled by the neoclassical cost-share theorem? Available at SSRN ۴۱۲۷۷۶۴.
- Maes, D., & Van Passel, S. (۲۰۱۴). Advantages and limitations of exergy indicators to assess sustainability of bioenergy and biobased materials. *Environmental Impact Assessment Review*, ۴۵, ۱۹-۲۹. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.11.002>
- Mairesse, J. and Sassenou, M. (۱۹۹۱) 'R&D productivity: A survey of econometric studies at the firm level', National Bureau of Economic Research Working Paper Series [Preprint], (w۳۶۶۶).
- Marzelli, S., Moning, C., Daube, S., Offenberger, M., Grêt-Regamey, A., Rabe, S.-E., Köllner, T., Poppenborg, P., Hansjürgens, B., & Ring, I. (۲۰۱۷). The value of nature for economy and society: an introduction.
- Mendecka, B., Czerwińska, K., Lombardi, L., Śliz, M., & Wilk, M. (۲۰۲۴). Thermoecological Cost Analysis of Hydrothermal Carbonization for Valorization of Under-Sieve Fraction from Municipal Solid Wastes. *Energies*, ۱۷(۱۶), ۴۰۹۰.
- Nakata, T. (۲۰۰۴). Energy-economic models and the environment. *Progress in Energy and Combustion Science*, ۳۰(۴), ۴۱۷-۴۷۵.
- Nelson, R. R. (۱۹۶۴). Aggregate production functions and medium-range growth projections. *The American Economic Review*, ۵۴(۵), ۵۷۵-۶۰۶.
- Odum, H. T. (۲۰۰۷). *Environment, power, and society for the twenty-first century: the hierarchy of energy*. Columbia University Press.
- Pokrovski, V.N. (۲۰۰۳) 'Energy in the theory of production', *Energy*, ۲۸(۸), pp. ۷۶۹-۷۸۸.
- Renshaw, E. F. (۱۹۸۱). Energy efficiency and the slump in labour productivity in the USA. *Energy Economics*, ۳(۱), ۳۶-۴۲. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-9883\(81\)90005-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-9883(81)90005-0)
- Rocco, M. V., Colombo, E., & Sciubba, E. (۲۰۱۴a). Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting method. *Applied Energy*, ۱۱۳, ۱۴۰۵-۱۴۲۰.
- Romero, J. C., & Linares, P. (۲۰۱۴). Exergy as a global energy sustainability indicator. A review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۳۳, ۴۲۷-۴۴۲.
- Sciubba, E. (۲۰۰۸). Exergy destruction as an ecological indicator.
- Sciubba, E., Bastianoni, S., & Tiezzi, E. (۲۰۰۸). Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy. *Journal of Environmental Management*, ۸۶(۷), ۳۷۲-۳۸۲.
- Sciubba, E., & Wall, G. (۲۰۰۷). A brief commented history of exergy from the beginnings to ۲۰۰۴. *International Journal of Thermodynamics*, ۱۰(۱), ۱-۲۶.

- Smyth, R., Narayan, P. K., & Shi, H. (۲۰۱۱). Substitution between energy and classical factor inputs in the Chinese steel sector. *Applied Energy*, ۸۸(۱), ۳۶۱-۳۶۷.
- Solow, R. M. (۱۹۵۷). Technical change and the aggregate production function. *The Review of Economics and Statistics*, ۳۹(۳), ۳۱۲-۳۲۰.
- Stanek, W., & Czarnowska, L. (۲۰۱۸). Thermo-ecological cost – Szargut's proposal on exergy and ecology connection. *Energy*, ۱۶۵, ۱۰۵۰-۱۰۵۹. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.040>
- Stern, D. I. (۱۹۹۳). Energy and economic growth in the USA: A multivariate approach. *Energy Economics*, ۱۵(۲), ۱۳۷-۱۵۰. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-9883\(93\)90033-N](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90033-N)
- Stern, D.I., (۲۰۱۱). Elasticities of substitution and complementarity. *Journal of Productivity Analysis* ۳۶(۱), ۷۹-۸۹.
- Timmer, M. P., Inklaar, R., O'Mahony, M., & Van Ark, B. (۲۰۱۰). *Economic growth in Europe: A comparative industry perspective*. Cambridge University Press.
- van der Werf, E. (۲۰۰۸). Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis. *Energy Economics*, ۳۰(۶), ۲۹۶۴-۲۹۷۹. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.05.008>
- von Spakovsky, M. R., Frangopoulos, C. A., & Frangopoulos, C. (۲۰۰۹). Analysis and optimization of energy systems with sustainability considerations. *Exergy, Energy System Analysis and Optimization-Volume III: Artificial Intelligence and Expert Systems in Energy Systems Analysis Sustainability Considerations in the Modeling of Energy Systems*, ۳, ۲۵۲.
- Yan, J., Feng, L., Steblyanskaya, A., Sokolov, A., & Iskritskaya, N. (۲۰۱۹). Creating an energy analysis concept for oil and gas companies: The case of the Yakutiya company in Russia. *Energies*, ۱۲(۲), ۲۶۸.
- Yi, H., Hau, J. L., Ukidwe, N. U., & Bakshi, B. R. (۲۰۰۴). Hierarchical thermodynamic metrics for evaluating the environmental sustainability of industrial processes. *Environmental Progress*, ۲۳(۴), ۳۰۲-۳۱۴.
- Zha, D., & Zhou, D. (۲۰۱۴). The elasticity of substitution and the way of nesting CES production function with emphasis on energy input. *Applied Energy*, ۱۳۰, ۷۹۳-۷۹۸. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.093>

استناد به این مقاله: نام خانوادگی نویسنده اول، نام. (سال). عنوان مقاله. عنوان نشریه (ایتالیک)، سال (شماره)، ص آغاز-ص پایان.



Name of Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴.۰ International License.