University of Sistan and Baluchestan

Stable Economy Journal

Online ISSN: 2821 - 1049

Iranian Scientific Social Welfare Association

The Impact of Carbon Market on the Iron and Steel Industry: A Case Study of Iran

Maryam Hosseinzadeh [1] | Alireza Shakibaei [2] | Mehdi Nejati [3]| Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi[4]

1. Ph.D. Candidate, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: m.hosseinzadeh@aem.uk.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: ashakibai@uk.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: mnejati@uk.ac.ir
4. Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: jalaee@uk.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:19 November2026
Revised in revised form: 4 May 2026 ,
Accepted: 16 May 2026
online: 1 July 2026,

JEL: Q40, C68, L61

ls:
Trading System,
le general equilibrium model,
teel industry.

ABSTRACT

Steel is one of the major industries that emit carbon and greenhouse gases. The need for carbon-reduction policies has received global attention. Carbon emissions trading is a market-based environmental policy and an alternative incentive mechanism designed to promote emissions reductions by imposing a price on carbon. This policy operates by allocating carbon emission allowances to firms and incorporating the external costs of environmental pollution into the pricing mechanism to reduce carbon emissions.

Using the dynamic GTAP-E-POWER model, this study simulates the formation of a regional carbon market between Iran and its major trading partners—China, India, Turkey, and the United Arab Emirates—over the period 2015–2050 and evaluates its impacts on the iron and steel industry.

The results for Iran indicate that by 2050, carbon emissions decrease by 49.46%, output by 9.4%, exports by 34.01%, and imports by 2.34%, while prices increase by 19.08%. These results indicate that the implementation of a carbon market not only leads to a significant reduction in carbon emissions but also generates negative effects on output, competitiveness, and the trade balance of Iran's steel sector. Under such circumstances, it is essential for governments and firms to adopt compensatory and supportive measures through industrial policies, including financial and credit incentives, taxation, technological support, and skills development. Such a response is a necessary condition for mitigating the negative impacts of these changes. In this context, establishing a green steel renovation fund from carbon market revenues, facilitating the import of low-carbon technologies, developing the steel recycling industry, and reforming energy pricing structures are recommended for Iran.

***This paper was extracted from the first author's doctoral dissertation**

Cite this article: Hosseinzadeh, M., Shakibaei, A., Nejati, M., & Jalaee Esfandabadi, S.M. (2026). The Impact of Carbon Market on the Iron and Steel Industry: A Case Study of Iran. *Stable Economy Journal, 7 (2), 45-87*
*DOI:10.*22111/sedj.2026.53886.1661.

© The Author(s).
Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI:10.22111/sedj.2026.53886.1661

Extended Abstract

Introduction

The continuous rise in greenhouse gas emissions—particularly carbon dioxide—constitutes one of the primary drivers of global warming and climate change, with far-reaching implications for the environment, economic activities, and international trade patterns. The iron and steel industry, due to its energy-intensive nature and high dependence on fossil fuels, is a major source of these emissions and plays a significant role in determining each country's total emission levels. In recent years, there has been growing attention to innovative policies aimed at controlling emissions and steering industries toward low-carbon technologies. Among these, the Emissions Trading System (ETS) is considered a key instrument for reducing pollution and enhancing environmental efficiency. The steel industry is one of the largest consumers of primary energy and is considered a key indicator of industrial development, closely linked to economic growth. The market value of the iron and steel sector in 2021 reached USD 1.51 trillion, making it one of the prominent industries globally and providing direct employment for over 6 million people worldwide. Steel production currently relies heavily on fossil fuels, resulting in increased CO_2 emissions from this sector. In 2022, approximately 1.4 tons of CO_2 were emitted into the atmosphere for every ton of steel produced. Environmental policies can act as a double-edged sword. Recent studies in China, the European Union, the United Kingdom, Canada, and Japan have focused on implementing the proposed policies of the Paris Agreement and mitigating their negative impacts by developing new pathways and technologies to reduce carbon emissions in the steel industry.

Method

This study examines the impact of establishing a regional carbon market between Iran and its main trading partners (China, India, Turkey, and the United Arab Emirates) on the iron and steel sector over the period 2015–2050. The research model is the dynamic GTAP-E-POWER, which is capable of simulating the price, production, trade, and environmental effects of carbon policies. This model utilizes a computable general equilibrium (CGE) framework. Data are extracted from the tenth version of the GTAP database and analyzed under the assumption of full implementation of the regional carbon market throughout the entire period.

Results

The findings indicate that, by the 2050 horizon, the implementation of a carbon market has had a significant impact on the iron and steel sector of the countries under study. Production has decreased in all countries, with the largest reduction observed in India at 29.92% and the smallest in China at 5.03%. Iran, Turkey, and the United Arab Emirates have experienced production declines of 9.4%, 14.8%, and 6.32%, respectively. Steel prices have increased in all countries, with the highest growth having been recorded in India at 23.23% and in Iran at 19.08%. In China and Turkey, prices rose by 14.07% and 13.92%, respectively, while the United Arab Emirates saw a 4.6% increase. In terms of exports, most countries have experienced a decline: India by 38.54%, Iran by 34.01%, Turkey by 14.26%, and China by 11.83%. However, the United Arab Emirates experienced an increase of 39.62%. Steel imports have increased in India and China, reaching 29.65% and 5.49%, respectively, while Iran, Turkey, and the United Arab Emirates experienced decreases of 2.34%, 6.07%, and 35.06%, respectively. Furthermore, carbon dioxide emissions have decreased in all countries, with the largest reduction observed in the United Arab Emirates at 54.67% and the smallest in Turkey at 40.07%, while Iran experienced a 49.46% decrease, and China and India faced reductions of 53.95% and 52.07%, respectively.

Conclusion

The results indicate that the carbon market policy leads to a reduction in carbon emissions in all countries under study. However, its effects on the production and exports of iron and steel are negative for all countries except the United Arab Emirates. In Iran, the implementation of this policy results in a 49.46% decrease in emissions, a 9.4% reduction in production, and a 34.01% decline in exports, respectively. The success of such a policy in Iran depends on the ability of this industry to adopt low-carbon technologies, improve energy efficiency, enhance competitiveness, and on the government's industrial public policy. Therefore, it is recommended that the ETS policy be implemented gradually and in a phased manner. This gradual design allows industries sufficient time to adapt and adjust, thereby avoiding sudden shocks. In formulating industrial policies and supporting industries, the government should prioritize attention to industries with low-carbon technologies and reduced energy consumption, particularly fossil fuels.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines: All applicable ethical guidelines were followed.

Funding: This research received no external funding.

Authors' contribution: This article is extracted from the PhD dissertation of Maryam Hosseinzadeh in Economic Sciences, conducted under the supervision of Dr. Alireza Shakibaei and the advisement of Dr. Mehdi Nejati and Dr. Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi at the Department of Economics, Shahid Bahonar University of Kerman.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.
Acknowledgments: Not applicable

اقتصاد باثبات
شاپا الکترونیکی: ۱۰۴۹-۲۸۲۱

اثر بازار کربن بر صنعت آهن و فولاد: مطالعه موردی ایران

مریم حسین‌زاده[۱] | علیرضا شکیبایی[۲] | مهدی نجاتی[۳]| سیدعبدالمجید جلائی اسفندآبادی[۴]

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: m.hosseinzadeh@aem.uk.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: ashakibai@uk.ac.ir

۳. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه:mnejati@uk.ac.ir

۴. استاد، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: jalaee@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۸
تاریخ ویرایش:۱۴۰۵/۲/۱۴
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۵/۲/۲۶
تاریخ انتشار:۱۴۰۵/۴/۱۰

JEL :Q40, C68, L61

واژه‌های کلیدی:
سیستم تجارت انتشار،
مدل تعادل عمومی
قابل‌محاسبه،
صنعت آهن و فولاد.

چکیده

فولاد یکی از صنایع اصلی منتشرکننده کربن و گازهای گلخانه‌ای است. ضرورت سیاست‌گذاری برای کاهش کربن موردتوجه جهانی است. تجارت انتشار کربن یک سیاست زیست‌محیطی مبتنی بر بازار و یک ساختار انگیزشی جایگزین است که برای ایجاد انگیزه کاهش انتشار با تحمیل هزینه کربن، طراحی و توصیه شده است. این سیاست از طریق تخصیص سهمیه‌های انتشار کربن به شرکت‌های تجاری و گنجاندن هزینه‌های خارجی آلودگی زیست‌محیطی در مکانیسم قیمت‌گذاری برای کاهش انتشار کربن عمل می‌کند.

این مطالعه، با استفاده از مدل *GTAP-E-POWER* پویا، تشکیل بازار کربن منطقه‌ای بین ایران و شرکای عمده تجاری آن (چین، هند، ترکیه و امارات متحده عربی) را طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ شبیه‌سازی و آثار آن را بر صنعت آهن و فولاد ارزیابی می‌کند.

نتایج برای ایران نشان می‌دهد که در افق ۲۰۵۰، به ترتیب انتشار کربن ۴۹/۴۶، تولید ۹/۴، صادرات ۳۴/۰۱ و واردات ۲/۳۴ درصد کاهش و قیمت ۱۹/۰۸ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج بیانگر آن است که اجرای بازار کربن، علاوه بر کاهش قابل‌توجه انتشار کربن، تغییرات منفی در تولید، رقابت‌پذیری و تراز بازرگانی بخش فولاد ایران ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، واکنش دولت‌ها و بنگاه‌ها در قالب اتخاذ تصمیمات جبرانی و حمایتی از طریق سیاست‌های صنعتی (از جمله: مشوق‌های مالی و اعتباری، مالیاتی، فناورانه و توانمندسازی مهارتی) ضرورت دارد. این واکنش شرط لازم برای کاهش آثار منفی ناشی از این تحولات است. در این راستا ایجاد صندوق نوسازی فولاد سبز از درآمد بازار کربن، تسهیل واردات فناوری کم‌کربن، توسعه‌ی صنعت بازیافت فولاد در کنار اصلاح ساختار قیمت‌گذاری انرژی برای ایران توصیه می‌شود.

* مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول است.

استناد: حسین زاده، مریم؛ شکیبایی، علیرضا؛ نجاتی، مهدی؛ و جلائی اسفندآبادی، سید عبدالمجید (۱۴۰۵). اثر بازار کربن بر صنعت آهن و فولاد: مطالعه موردی ایران. *اقتصاد باثبات*، ۷ (۲)، ۸۷-۴۵.
DOI: 10.22111/sedj.2026.53886.1661

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

حق‌مؤلف © نویسندگان.

۱. مقدمه

تغییر اقلیم به‌عنوان بزرگ‌ترین تهدید برای بشریت در سال‌های اخیر، به کانون اصلی دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی تبدیل شده است. بر اساس گزارش سازمان جهانی هواشناسی، بین سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۷، ۹۸ درصد احتمال دارد که میانگین سطح دمای زمین حداقل هر پنج سال یک‌بار رکوردها را بشکند (*Yadav,2020*). این تغییرات قابل‌توجه دما نگرانی‌های زیادی را در مورد تغییرات آب‌وهوایی ایجاد کرده و توجه جهانی به سمت توسعه پایدار و کربن صفر را تسریع کرده است (*Wang etal.,2024*). صنایع فولاد، مس، پتروشیمی و سیمان از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان اصلی انرژی در این بخش هستند. شاخص توسعه صنعتی در این بین، بخش فولاد است که ارتباط نزدیکی با نرخ رشد اقتصادی دارد، زیرا موجب می‌شود کشورها به مراحل بالاتر صنعتی‌شدن ارتقا پیدا کنند. همچنین فولاد یکی از پراستفاده‌ترین کالای واسطه‌ای در جهان بوده که از ابتدای انقلاب صنعتی جایگاه برجسته‌ای را در صنعت به خود اختصاص داده است؛ لذا یافتن راه‌حل‌های نوآورانه برای کربن‌زدایی تولید فولاد ضروری است.

درحالی‌که بسیاری از کشورهای مهم صنعتی تأثیرگذار از جمله چین، اتحادیه اروپا، کانادا، بریتانیا و ژاپن بر اجرای تعهدات توافق‌نامه پاریس و توسعه فناوری‌های کم‌کربن متمرکز شده‌اند، آمریکا به‌ویژه بعد از ریاست‌جمهوری ترامپ از برخی از تعهدات خود اجتناب می‌کند. ایران در چارچوب موافقت‌نامه پاریس، از طریق ارائه برنامه مشارکت ملی (*NDC*)[1]، متعهد به کاهش ۴ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ به‌صورت غیرمشروط و تا ۱۲ درصد به‌صورت مشروط (در صورت رفع تحریم‌ها و دسترسی به منابع مالی و فناوری) شده است. هرچند این تعهدات سقف مشخصی برای صنعت فولاد تعیین نمی‌کند، اما به طور ضمنی مستلزم کاهش انتشار در صنایع انرژی‌بر از جمله فولاد است (*Center for Climate and Energy Solutions, 2025*; *NDC Aspects, 2024*). شرکای اصلی تجاری ایران شامل چین، هند، ترکیه و امارات متحده عربی نیز NDCهای خود را ذیل توافق‌نامه پاریس ثبت کرده‌اند؛ به‌طوری که چین هدف اوج انتشار تا حدود ۲۰۳۰ و کربن صفر تا ۲۰۶۰، هند کاهش ۴۵ درصدی شدت انتشار تا ۲۰۳۰ و کربن صفر تا ۲۰۷۰، ترکیه کاهش ۴۱ درصدی انتشار تا ۲۰۳۰ و کربن صفر تا ۲۰۵۳، و امارات هدف کربن صفر تا ۲۰۵۰ را همراه با کاهش مرحله‌ای انتشار تا ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ دنبال می‌کنند (*Climate Action Tracker, 2024*). بر اساس گزارش انجمن جهانی فولاد، ده کشور برتر تولیدکننده فولاد خام به ترتیب چین، هند، ژاپن، آمریکا، روسیه، کره جنوبی، ترکیه، آلمان، برزیل و ایران در ژانویه ۲۰۲۵ می‌باشد. در این گزارش تولید جهانی فولاد خام برای ۶۹ کشور اصلی،

[1]- Nationally Determined Contributions

۱۵۱/۴ میلیون تن در ژانویه ۲۰۲۵ گزارش شده است (*World Steel Association, 2025*). از آن جا که ایران یکی از تولیدکنندگان اصلی فولاد است و سهم قابل توجهی در انتشار کربن دی-اکسید دارد و درعین‌حال با تعهدات بین‌المللی کاهش انتشار روبه روست، بررسی آثار تشکیل بازار کربن در کنار تغییرات فناوری تولید فولاد اهمیت دارد.

سیستم تجارت انتشار (*ETS*)[1] یک سیاست زیست‌محیطی مبتنی بر بازار و یک ساختار انگیزشی جایگزین است که برای ایجاد انگیزه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با تحمیل هزینه بر انتشاردهنده طراحی شده است. این سیاست با هدف تخصیص سهمیه‌های انتشار کربن به شرکت‌های تجاری و گنجاندن هزینه‌های خارجی آلودگی زیست‌محیطی از طریق مکانیسم قیمت‌گذاری برای کاهش انتشار کربن است. *ETS* با تعیین سقفی برای کل انتشار مجاز در یک منطقه یا صنعت عمل می‌کند. شرکت‌ها ملزم به داشتن مجوزهای مربوط به انتشار گازهای گلخانه-ای خود هستند و آنهایی که انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را کمتر از سقف اختصاص داده شده خود کاهش می‌دهند، می‌توانند مجوزهای اضافی را بفروشند و انگیزه‌های مالی برای کاهش بیشتر انتشار ایجاد کنند (*Cao et al., 2019; Li et al., 2022*).

سیستم تجارت انتشار اتحادیه اروپا (*EU-ETS*) موفقیت‌آمیز گزارش شده است (*Bayer & Aklin, 2020; Dechezleprêtre et al., 2023*). اما در دیگر کشورها به‌ویژه کشورهای متکی بر سوخت‌های فسیلی در موفقیت این سیاست دیدگاه محتاطانه‌ای وجود دارد. پاسخ به این دغدغه می‌تواند بخش زیادی از شکاف تحقیقاتی در این زمینه را مرتفع کند.

هدف مطالعه حاضر ارزیابی مکانیسم اجرای بازار انتشار کربن به‌عنوان یک سیاست جهت کاهش انتشار کربن با هدف کاهش آثار جانبی منفی بر تولید آهن و فولاد ایران است. باتوجه‌به اینکه تجارت انتشار کربن می‌تواند به اشکال مختلف اجرا شود و اثرات گسترده‌ای بر متغیرهای اقتصادی و چندین کشور یا منطقه داشته باشد، استفاده از مدل‌های تعادل عمومی برای ارزیابی تمامی این تأثیرات گزینه‌ای مناسب است. برای این منظور بازار انتشار کربن بین ایران و برخی از شرکای عمده تجاری آن (چین، هند، ترکیه و امارات متحده عربی) با استفاده از مدل *GTAP-E-Power* شبیه‌سازی می‌شود تا تأثیر این سیاست بر تولید، قیمت، صادرات، واردات و انتشار کربن-دی‌اکسید صنعت آهن و فولاد ایران ارزیابی شود.

برخی از فروض اساسی این مدل عبارت‌اند از: ۱-تحرک عوامل تولید بین بخش‌ها، ۲-عدم تحرک بین‌المللی عوامل تولید، ۳-اقتصاد باز و کوچک، ۴-بازدهی ثابت نسبت به مقیاس، ۵-عرضه

[1]- Emissions Trading System

ثابت عوامل اولیه تولید و ۶-کشش جانشینی در لایه‌های تولید ثابت است. باتوجه‌به فروض فوق، مدل در سناریوی مختلف برای کشورها، پس از تعیین سقف انتشار سالانه کربن در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ برای ایران و شرکای تجاری آن حل می‌شود. در این مکانیسم، سقف انتشار سالانه ($gco2q$) هر کشور تعیین می‌شود. این سقف بیانگر حداکثر میزان مجاز انتشار CO_2 در یک دوره زمانی مشخص است. نرخ رشد انتشار کربن ($gco2t$) بعد از اجرای سناریو، با این سقف مقایسه می‌گردد. اگر عملکرد بیشتر از سقف باشد، کشور باید حق انتشار اضافی (مجوز) خریداری کند و هزینه پرداخت نماید و اگر کمتر از سقف باشد، می‌واند مازاد سهمیه خود را در بازار به فروش رسانده و درآمد کسب کند.

باتوجه‌به اینکه مدل مورداستفاده در این مقاله، مدل تعادل عمومی قابل محاسبه پویا است و ماهیت سیستمی و چندجانبه دارد سؤالات تحقیق عبارت است از: ایجاد بازار منطقه‌ای کربن، بین ایران و شرکای عمده تجاری آن چگونه توازن میان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص‌های رقابت‌پذیری (تولید و قیمت) صنعت آهن و فولاد ایران را در یک چارچوب تعادل عمومی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد؟ همچنین چه تغییرات ساختاری در الگوی تجارت بین‌الملل (صادرات و واردات) بخش فولاد ایران ایجاد خواهد کرد؟

در ادامه، در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه تحقیق مرور می‌شود؛ بخش سوم روش‌شناسی پژوهش، پایگاه داده و سناریوهای مورد بررسی را تشریح می‌کند؛ بخش چهارم نتایج تجربی تحقیق ارائه می‌شود؛ بخش پنجم به تحلیل حساسیت سیستماتیک می‌پردازد و در نهایت بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادهای سیاستی اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱. مبانی نظری

بازار انتشار کربن بر اساس نظریه‌ای اقتصادی و زیست محیطی شکل‌گرفته است. یکی از پایه‌ای‌ترین نظریات، نظریه شکست سیستم بازار و پیامدهای بیرونی است. طبق این نظریه، بازار در تخصیص منابع کارآمد نیست و شکست می‌خورد و ضرورت دارد دولت مداخلات سیاستی دراین‌خصوص انجام دهد. از طرفی نظریه توسعه پایدار تأکید می‌کند که پایداری رشد اقتصادی و برقراری عدالت بین‌نسلی باید به‌گونه‌ای باشد که توانایی نسل آینده برای تولید و تأمین نیازهایشان به خطر نیفتد. در نهایت نظریات توسعه پایدار بر ضرورت گذار انرژی و حرکت کشورها و صنایع به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی تأکید دارند.

سیستم تجارت انتشار کربن با ایجاد انگیزه‌های اقتصادی، شرکت‌ها را به سمت کاهش انتشار سوق می‌دهد. در سطح جهان، چندین بازار کربن وجود دارد، برای نمونه، اتحادیه اروپا از سال

۲۰۰۵ سیستم تجارت انتشار اتحادیه اروپا (*EU ETS*) را راه‌اندازی کرده است و در حال حاضر بزرگ‌ترین بازار کربن جهان محسوب می‌شود (*Pattak et al., 2023*). چین در سال ۲۰۲۱ بازار کربن خود را تأسیس کرده است که در حال حاضر صرفاً بخش برق را تحت پوشش قرار می‌دهد (*Cao et al., 2023*). کانادا دارای بازارهای منطقه‌ای کربن، از جمله در استان‌های کبک و آلبرتا، است (*Hanoteau & Talbot, 2019*). نیوزیلند از سال ۲۰۰۸ دارای بازار ملی کربن بوده (*Inderberg et al., 2017*) و کره جنوبی نیز از سال ۲۰۱۵ بازار کربن خود را راه‌اندازی کرده است (*Wei et al., 2022*).

اثربخشی سیاست سیستم تجارت انتشار کربن همچنان موضوعی بحث‌برانگیز در ادبیات علمی است. اکثریت پژوهشگران دیدگاهی مثبت به اثرات این سیاست دارند. آن‌ها تأکید می‌کنند که اجرای این سیاست می‌تواند: انتشار منطقه‌ای CO_2 را مهار کند، شدت کربن را کاهش دهد و بنگاه‌ها را به نوآوری و سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه تشویق کند که در نهایت به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند (*Huang & Yi, 2023; Xuan et al., 2020; Feng et al., 2024*). بااین‌حال، برخی از پژوهشگران نسبت به تأثیر این سیاست بر گذار سبز نگرش محتاطانه‌ای دارند. آن‌ها استدلال می‌کنند که بدون مدیریت مناسب و مشارکت فعال در بازار، اثربخشی این سیاست برای دستیابی به اهداف کاهش کربن ممکن است محدود شود (*Narassimhan et al., 2018*). علاوه بر این، این گروه استدلال می‌کنند که فرآیند کاهش انتشار می‌تواند اثرات منفی بر عملکرد اقتصادی داشته باشد، به‌طوری که توسعه بنگاه‌ها را مختل کرده و آن‌ها را با ریسک‌های بالاتری مواجه سازد (*Wang & Zhang, 2022*)؛ بنابراین، همچنان به طور دقیق مشخص نیست که سیستم تجارت انتشار چگونه بر عملکرد کربنی بنگاه‌ها اثر می‌گذارد و این موضوع نیازمند بررسی‌ها و پژوهش‌های عمیق‌تر و دقیق‌تر است (*Cheng et al., 2025*). بر اساس نظریه شکست بازار نئوکلاسیکی، مقررات زیست‌محیطی باعث می‌شوند که بنگاه‌ها هزینه‌های خارجی ناشی از آلودگی را درونی کنند. این موضوع می‌تواند هزینه‌های بنگاه‌ها را افزایش دهد و رقابت‌پذیری بین‌المللی آن‌ها را کاهش دهد و در نتیجه، اثرات منفی بر صادرات بنگاه‌ها داشته باشد (*Copeland & Taylor, 1994; Ollivier, 2016; Pattnayak & Chadha, 2022; Usman & Jahanger, 2021; Kamal et al., 2021*). زمانی که یک کشور سطح پایین‌تری از مقررات زیست‌محیطی نسبت به شرکای تجاری‌اش دارد، در تولید محصولات آلاینده دارای مزیت نسبی است. اما در کشورهایی که مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری دارند، هزینه‌های تولید صنایع آلاینده به طور نسبی بالاست و همین موضوع می‌تواند صادرات و جریان سرمایه خارجی به این صنایع را کاهش دهد (*Copeland & Taylor, 2004*). این پدیده را

فرضیه پناهگاه آلودگی می‌نامند. در مقابل، طرفداران مقررات زیست‌محیطی معتقدند که محیط‌زیست و صادرات می‌توانند از مقررات زیست‌محیطی بهره‌مند شوند. به این معنا که مقررات زیست‌محیطی بنگاه‌ها را وادار می‌کند که نوآوری کنند، فناوری‌های سبز را به کار بگیرند، محصولات پاک تولید کنند، موانع فنی تجارت بین‌المللی را کاهش دهند، مزیت رقابتی به دست آورند و در نهایت از افزایش صادرات بهره ببرند (*Porter & Linde, 1995*). بسیاری از پژوهش‌های تجربی از این فرضیه پشتیبانی می‌کنند (*Costantini & Mazzanti, 2012; Yang et al., 2012; Rubashkina et al., 2015; Zhang et al., 2017; Liu et al., 2022*). همچنین فرضیه پورتر بیان می‌کند که تنها مقررات زیست‌محیطی مناسب و مؤثر هستند که می‌توانند بنگاه‌ها را به سمت نوآوری فناورانه سوق دهند (*Yang et al., 2022*).

در *ETS* محدودیت‌هایی برای انتشار مجاز تعیین و سهمیه انتشار مربوطه بین شرکت‌ها توزیع می‌شود، سپس شرکت‌ها می‌توانند سهمیه‌های خود را در بازار معامله کنند (*Dai et al., 2018; Pollitt, 2019; Liu & Zhang, 2021*). طرح سقف و تجارت کربن یک ابزار بازار محور است که امکان داد و ستد سهمیه‌های انتشار کربن در بازار کربن را فراهم می‌کند. دولت سقف انتشار را برای هر نهاد شرکت‌کننده تعیین می‌کند. شرکت‌هایی که با موفقیت روش‌های سبزتر را اتخاذ کرده‌اند و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر از سقف تخصیص‌یافته‌شان دارند، می‌توانند سهمیه‌های انتشار مازاد خود را در بازار کربن بفروشند و از این طریق مزایای پولی کسب کنند. از سوی دیگر، واحدهایی با انتشار بیش از سقف تخصیص‌یافته خود ملزم به خرید سهمیه‌های انتشار اضافی از بازار کربن برای رعایت مقررات هستند. با تعیین سقف انتشار برای هر نهاد، دولت به طور مؤثر مقدار کل انتشار در سیستم را محدود می‌کند (*Ding et al., 2025*).

مکانیسم‌های موردانتظار در این پژوهش بر پایه درونی‌سازی هزینه‌های خارجی محیط‌زیستی استوار است. این درونی‌سازی منجر به افزایش هزینه‌های تولید به دلیل خرید سهمیه‌ی مازاد برای بنگاه‌های تقاضاکننده می‌شود. این افزایش هزینه، کاهش تولید و افزایش قیمت محصول مورد بررسی را در پی خواهد داشت. کاهش تولید، کاهش هزینه‌های خارجی (انتشار کربن) را نیز در بر-دارد. بنگاه‌های فروشنده‌ی سهمیه از طریق تجزیه و تحلیل منافع تولید و عدم تولید با هدف انگیزه‌ی مالی تولید خود را برنامه‌ریزی می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر سیستم تجارت انتشار با تعیین سقف برای آلایندگی و ایجاد قیمت برای هر واحد انتشار، ساختار هزینه‌های تولید را تغییر می‌دهد. این تغییر از طریق دو مسیر اصلی بر صنعت اثر می‌گذارد: نخست، سیگنال‌های قیمتی که منجر به تخصیص مجدد منابع از فعالیت‌های پرکربن به سمت تولیدات بهینه‌تر می‌شود. دوم، ایجاد

انگیزه‌های مالی (از طریق مکانیسم سقف و تجارت) که واحدهای صنعتی را به سمت جذب فناوری‌های پاک، ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش شدت کربن سوق می‌دهد.

صنعت آهن و فولاد با ارزش جهانی حدود ۱/۵۱ تریلیون دلار، حدود ۸ درصد از انتشار جهانی CO_2 مرتبط با انرژی و فرآیندها را به خود اختصاص داده و شدت کربن آن به طور متوسط ۱/۴ تن CO_2 به‌ازای هر تن تولید برآورد می‌شود (*Khalili et al., 2025*).

تولید جهانی فولاد عمدتاً بر دو مسیر فناورانه کوره بلند -کنورتور اکسیژنی (*BF-BOF*) [1] و کوره قوس الکتریکی (*EAF*) [2] استوار است. مسیر *BF-BOF* با سهمی حدود ۷۰ تا ۷۲ درصد از تولید جهانی، به دلیل اتکای شدید به زغال‌سنگ، از شدت مصرف انرژی (۲۰- ۲۵ گیگاژول بر تن) و انتشار کربن‌دی‌اکسید بالایی (۲/۳- ۲/۶ تن به ازای هر تن فولاد) برخوردار است. در مقابل، روش *EAF* که نزدیک به ۲۹ درصد تولید جهانی را شامل می‌شود، عمدتاً بر ذوب قراضه یا آهن احیای مستقیم متکی بوده و با مصرف انرژی کمتر (۱۰-۸ گیگاژول) و انتشار کربن به‌مراتب پایین‌تر (۷/۳-۰/۰ تن)، نقش محوری در اقتصاد چرخشی صنعت فولاد ایفا می‌کند. افزون بر این، میزان انتشار آلاینده‌هایی نظیر SO_2 و ذرات معلق در مسیر کوره بلند به طور معناداری بیش از روش قوس الکتریکی گزارش شده است. (*Andrade et al., 2024; Hasanbeigi, 2025*). ساختار تولید فولاد در ایران از منظر گذار به فولاد سبز اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا بخش عمده تولید بر کوره قوس الکتریکی و احیای مستقیم آهن (*DRI*) [3] مبتنی بر گاز طبیعی انجام می‌شود. بهره‌مندی از ذخایر گاز طبیعی استراتژی کشور را بر پایه *DRI* استوار کرده و توسعه فناوری بومی *PERED* [4] جایگاه ایران را پس از هند در تولید آهن اسفنجی تقویت کرده است. هرچند این مسیر هنوز به خنثی‌سازی کامل کربن نرسیده، اما ظرفیت بالایی برای گذار به فولاد سبز مبتنی بر گاز کم‌کربن، هیدروژن سبز و برق تجدیدپذیر دارد. (*Midrex, 2024*).

---

[1]- Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace

[2]- Electric Arc Furnace

[3]- Direct Reduced Iron

[4]- تکنولوژی *PERED* مخفف (*Persian Reduction*) یک فناوری بومی و ایرانی در فرآیند احیای مستقیم است که توسط مهندسان داخلی با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش بازدهی و کاهش اثرات زیست‌محیطی نسبت به نمونه‌های مشابه بین‌المللی طراحی شده است. این نوآوری که ایران را از واردکننده دانش فنی به صاحب فناوری تبدیل کرده، حدود ۳/۴ درصد از ظرفیت جهانی تولید آهن اسفنجی به روش کوره‌های عمودی را به خود اختصاص داده است.

فولاد سبز تحولی بنیادین در یکی از سنتی‌ترین صنایع جهان است و به تولید فولاد بدون اتکا به سوخت‌های فسیلی با استفاده از منابع کم‌کربن مانند هیدروژن سبز، برق تجدیدپذیر یا زیست‌توده اطلاق می‌شود. صنعت فولاد به دلیل وابستگی شدید به فرآیندهای مبتنی بر کربن و دمای بالا، بخش «سخت عبوری» است که ۹-۷ درصد از انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد. هدف فناوری‌های سبز رساندن انتشار کربن‌دی‌اکسید از حدود ۳/۲-۲/۱ تن به‌ازای هر تن فولاد در روش‌های سنتی به نزدیکی صفر و همسویی با اهداف توافق‌نامه پاریس تا ۲۰۵۰ است. (*Teixeira, 2025*).

۲-۲. پیشینه تحقیق

اکثر مطالعات ذیل بر اثر موفقیت‌آمیز ایجاد سیستم تجارت انتشار بر کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید تأکید دارند، ولی در مورد سایر آثار تفاوت‌هایی بین مطالعات وجود دارد این تفاوت‌ها به‌صورت ذیل دسته‌بندی شده‌اند:

۲-۲-۱-مطالعات اثر مثبت بر نوآوری و بهره‌وری

این گروه از پژوهش‌ها بر این باورند که سیاست‌های اقلیمی با تحریک نوآوری، نه تنها مانع اقتصادی نیستند، بلکه منجر به ارتقای کارایی و رقابت‌پذیری می‌شوند:

ژانگ و همکاران[1] (۲۰۱۹)، با به‌کارگیری مدل تفاوت در تفاوت‌ها(*DID*)[2] نشان دادند که طرح‌های پایلوت *ETS* در چین از طریق بهبود بهره‌وری و کاهش شدت انرژی، منجر به کاهش معنادار انتشار در زیربخش‌های صنعتی شده است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که اثربخشی بازار کربن تابعی از ظرفیت فناورانه است؛ به‌طوری‌که مناطق توسعه‌یافته‌تر در بازسازی فرآیندهای تولیدی و انطباق با الزامات زیست‌محیطی موفق‌تر عمل کرده‌اند.

یانگ و همکاران[3] (۲۰۲۲)، با به‌کارگیری روش *DID* در سطح بنگاه‌های صنعتی چین، نشان دادند که اجرای سیستم تجارت انتشار برخلاف تصورات رایج، منجر به رشد معنادار صادرات شده است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که سیاست‌های اقلیمی مانند سیستم تجارت انتشار لزوماً فشار منفی بر صنایع انرژی‌بر وارد نمی‌کنند؛ بلکه بنگاه‌ها با اتکا بر نوآوری‌های فناورانه و بهره‌وری محور، می‌توانند فشارهای کربنی را به فرصتی برای ارتقای جایگاه صادراتی خود تبدیل نمایند.

---

[1]- Zhang et al.
[2]- The difference-in-differences
[3]- Yang et al.

لی و همکاران[1] (۲۰۲۳)، با به‌کارگیری مدل DID در چین نشان دادند که سیستم تجارت انتشار فراتر از کاهش آلایندگی، محرک بازسازی فرآیندها و بهبود کارایی صنعتی در صنایع انرژی‌بر بوده است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که موفقیت ETS پیوندی ناگسستنی با بستر نهادی و ظرفیت‌های فناورانه دارد؛ به‌گونه‌ای که مناطق توسعه‌یافته‌تر، با تبدیل هزینه‌های کربنی به بهره‌وری اقتصادی، نتایج مطلوب‌تری در صرفه‌جویی انرژی کسب کرده‌اند.

چن و همکاران[2] (۲۰۲۳)، با استفاده از مدل DID در چین نشان دادند که سیستم تجارت انتشار با تحریک سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک، منجر به افزایش معنادار بهره‌وری کل عوامل تولید شده است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که بازار کربن نه تنها مانعی برای رشد نیست، بلکه با اجبار صنایع انرژی‌بر به نوسازی فرآیندها، به فرصتی برای ارتقای رقابت‌پذیری و توسعه فناورانه تبدیل شده است.

ونگ و دوآن[3] (۲۰۲۵)، با به‌کارگیری روش DID در چین نشان دادند که سیستم تجارت انتشار در بخش برق، از طریق ارتقاء فناوری و تغییر الگوی مصرف سوخت، انتشار کربن را بدون تحمیل ضربه اقتصادی شدید به بنگاه‌ها کاهش داده است. این پژوهش نشان داد که سیاست سیستم تجارت انتشار لزوماً مانع بهره‌وری نیستند، بلکه می‌توانند محرک تحول مثبت صنعتی باشند.

۲-۲-۲- مطالعات متمرکز بر چالش‌های اقتصادی

این پژوهش‌ها بر پیامدهای منفی احتمالی افزایش هزینه‌های ناشی از قیمت‌گذاری کربن، کاهش تولید و رقابت‌پذیری تمرکز دارند:

فوره و همکاران[4] (۲۰۲۳)، با به‌کارگیری مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، نشان دادند که اجرای سیستم تجارت انتشار در مسیر گذار به انتشار خالص صفر، صنعت آهن و فولاد را با چالش جدی افزایش هزینه‌ها و افت تولید مواجه می‌کند. یافته‌های این پژوهش هشدار می‌دهد که ایران و شرکای تجاری عمده آن (چین، هند و ترکیه)، به دلیل تغییر در مزیت‌های رقابتی و الگوهای تقاضای جهانی، با ریسک جدی فرسایش تراز تجاری و انقباض در تولیدات صنعتی انرژی‌بر روبرو خواهند شد که ضرورت بازنگری در پایه‌های مالیاتی سنتی را دوچندان می‌کند.

---

[1]- Li et al.
[2]- Chen et al.
[3]- Wang & Duan
[4]- Fouré et al.

ونگ و کاسی[1] (۲۰۲۴)، با تحلیل صنایع فولاد و سیمان در اتحادیه اروپا نشان دادند که سیستم تجارت انتشار از طریق افزایش هزینه‌های تولید، موجب افت رقابت‌پذیری و کاهش صادرات شده است. نتایج این پژوهش بر وقوع پدیده «نشت کربن» تأکید دارد؛ به گونه‌ای که انتقال تولید به خارج و افزایش واردات از مناطق غیرمشمول، بخشی از کاهش انتشار داخلی را خنثی کرده و اثربخشی کلی سیاست‌های اقلیمی را محدود می‌سازد. این مطالعه در نهایت چالش‌های اقتصادی ناشی از ابزارهای بازارمحور را برای صنایع انرژی‌بر برجسته می‌کند.

ونگ و همکاران[2] (۲۰۲۴)، با استفاده از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه در چین نشان دادند که اگرچه ETS به تنهایی منجر به افت تولید و صادرات در صنایع آلاینده می‌شود، اما اجرای سیاست گواهی انرژی سبز با تحریک سرمایه‌گذاری در بخش پاک، این اثرات منفی را تعدیل می‌کند. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که اجرای همزمان این دو سیاست، علی‌رغم تحقق بیشترین میزان کاهش انتشار، همچنان با فشار قیمتی و افت تولید مشهود در صنایع آهن، فولاد و سیمان همراه است.

جیا و همکاران[3] (۲۰۲۵)، با به‌کارگیری مدل تعادل عمومی قابل محاسبه در چین نشان دادند که اجرای هم‌زمان سیستم تجارت انتشار و مالیات بر کربن، اثربخشی بالاتری در کاهش آلایندگی نسبت به اجرای مجزای آن‌ها دارد. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که این سیاست ترکیبی منجر به افزایش قیمت کالاهای انرژی‌بر (مانند محصولات فولادی)، کاهش تولید در صنایع آلاینده و افت صادرات در صنایع با شدت کربن بالا می‌شود.

حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۵)، با به‌کارگیری مدل تعادل عمومی پویا، نشان دادند که ایجاد بازار منطقه‌ای کربن تا افق ۲۰۵۰، ضمن کاهش ۴۰/۲۹ درصدی انتشار و ایجاد درآمد ۱۰ میلیارددلاری از فروش مجوزها، محرک تحول ساختاری در سبد انرژی ایران است. یافته‌های این پژوهش تایید می‌کند که با وجود افت ۳/۳۳ درصدی GDP ، سهم برق تجدیدپذیر ۲۲/۱ درصد افزایش‌یافته و وابستگی صنایع انرژی‌بر به سوخت‌های فسیلی به طور معناداری تعدیل می‌شود.

۳-۲-۲- مطالعات استراتژیک و ساختار نهادی (طراحی سیاست و نقشه راه)

این دسته به بررسی بسترها، الزامات اجرایی و ابزارهای مکمل برای موفقیت سیاست‌های اقلیمی می‌پردازند:

[1]- Wang & Kuusi
[2]- Wang et al.
[3]- Jia et al.

دایی و همکاران[1] (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه نشان دادند که تلفیق «توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر» و «تجارت انتشار کربن»، نسبت به اجرای انفرادی این سیاست‌ها، اثربخشی بیشتری در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در چین دارد. این رویکرد ترکیبی با تعدیل فشار قیمتی بر صنایع انرژی‌بر، اثرات منفی بر تولید و صادرات را کاهش داده و توازن بهتری میان رفاه اقتصادی و اهداف زیست‌محیطی برقرار می‌کند.

احمدی شادمهری و همکاران (۲۰۲۰)، با به‌کارگیری نظریه بازی‌های همکارانه، پیوستن ایران به بازار مشترک با بریکس را یک «استراتژی برتر» برای کاهش هزینه‌های نهایی انتشار (تا ۴۳۵ هزار دلار) معرفی می‌کنند. یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که استفاده از ابزارهای بازارمحور، مسیری بهینه و کم‌هزینه برای ارتقای منافع اقتصادی و تحقق توسعه پایدار در ایران فراهم می‌سازد.

هنگ و همکاران[2] (۲۰۲۲)، با به‌کارگیری مدل DID در چین نشان دادند که سیستم تجارت انتشار از طریق تحریک نوآوری‌های فناورانه و بازسازی فرآیندهای تولید، بهره‌وری انرژی را به طور معناداری ارتقا داده است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که موفقیت سیاست‌های اقلیمی تابعی از شرایط نهادی و ساختاری است؛ به‌طوری‌که اثرات مثبت در مناطقی با بازارگرایی و تمرکز صنعتی بالاتر، به‌مراتب چشمگیرتر بوده است.

دارگین[3] (۲۰۲۴) با واکاوی پتانسیل تشکیل بازار کربن در امارات، بر برتری مدل «سقف و تجارت» در دوران اصلاح یارانه‌های انرژی و انعطاف‌پذیری آن برای صنایع سنگین تأکید کرد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی گام‌به‌گام این بازار، علاوه بر تحقق هدف خالص انتشار صفر تا ۲۰۵۰، با جذب سرمایه‌گذاری خارجی و تبدیل امارات به قطب تجارت کربن، موجب ارتقای تاب‌آوری اقتصادی در دوران گذار انرژی می‌شود.

جنسن[4] (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری در صنایع ترکیه نشان داد که سیستم تجارت انتشار فراتر از یک ابزار رگولاتوری، موجب تغییرات فرهنگی و استقرار سیستم‌های خودمدیریتی در سازمان‌ها شده است. یافته‌های این پژوهش حاکی از کاهش بالقوه ۱۰ درصدی شدت انرژی و نوسازی تکنولوژیک از طریق واردات ماشین‌آلات با بهره‌وری بالا در پاسخ به فشار مکانیسم‌های بازار و حذف تخصیص‌های رایگان است. در نهایت، این مطالعه بر نقش ETS به‌عنوان

[1]- Dai et al.
[2]- Hong et al.
[3]- Dargin
[4]- Jensen

محرک اصلی رفتارهای سبز در صنایع انرژی‌بر ترکیه از طریق پیوند با سیاست‌های تجاری بین‌المللی تأکید می‌کند.

مدیرزاده و همکاران[1] (۲۰۲۵) با واکاوی ریشه‌ای ناترازی انرژی در ایران، نشان دادند که دسترسی به سوخت‌های فسیلی ارزان و عدم داخلی‌سازی هزینه‌های محیط‌زیستی، مانع اصلی ارتقای بهره‌وری و توسعه انرژی‌های پاک شده است. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که پیاده‌سازی سازوکارهای بازارمحور نظیر سیستم تجارت انتشار، می‌تواند از طریق همسو کردن منافع تجاری بنگاه‌ها با اهداف کلان اقلیمی، بستر لازم برای تحول ساختاری و عبور از بحران فعلی انرژی را فراهم سازد.

جمع‌بندی سوابق نشان می‌دهد که ارزیابی آثار اجرایی سیاست *ETS* برای اغلب کشورها دغدغه بوده و در اغلب مطالعات آثار مثبت بر کاهش انتشار کربن را پس از اجرای آن تأیید کرده‌اند. اما در مورد آثار اقتصادی تردید و دغدغه‌هایی وجود دارد. مطالعات نشان داد که موفقیت سیاست بازار کربن بر اقتصاد به دو عامل مهم بستگی دارد: اول، توسعه‌یافتگی کشور و بازارها و مؤسسات مالی آن که توانسته‌اند از طریق نهادسازی، ارتقاء فناوری، بهبود بهره‌وری و تغییر در الگوی مصرف سوخت (گذار انرژی) هزینه اضافی ناشی از سیاست بازار کربن را مدیریت کنند. دوم، کشورهایی که سیاست بازار کربن را به‌صورت ترکیبی اجرا کرده‌اند شواهد موفقیت‌آمیزتری را گزارش کرده‌اند. نکته دیگر اینکه مطالعات کمتری در خصوص کشورهایی با تمرکز بر صادرات انرژی فسیلی وجود دارد. ولی با فشارهای بین‌المللی، این گروه نیز در آینده نزدیک باید به فرآیند کاهش کربن جهانی بپیوندند؛ لذا بررسی آثار آن برای چنین کشورهایی نیز ضرورت دارد. مقاله حاضر با بهره‌گیری از مدل *GTAP-E-POWER* پویا و تمرکز بر دوره‌ی بلندمدت ۲۰۵۰-۲۰۱۵ این شکاف را برای بررسی آثار زیست‌محیطی و اقتصادی بازار کربن بر صنعت آهن و فولاد به دلیل انرژی بری زیاد آن در ایران و شرکای عمده تجاری آن مورد بررسی قرار می‌دهد.

۳-روش‌شناسی پژوهش

۳-۱ مدل تحقیق

روش تحقیق این پژوهش مدل *GTAP-E-POWER* پویا است. فعالیت‌های رفتاری و مبادلات بین بخشی و بین‌منطقه‌ای در مدل *GTAP* از دو جز شامل روابط حسابداری و معادلات رفتاری تشکیل شده است. روابط حسابداری دربردارنده‌ی داده‌های موجود در جداول ماتریس حسابداری اجتماعی و داده - ستانده بوده و معادلات رفتاری نشانگر رفتار عوامل اقتصادی مدل در زمینه

[1]- Modirzadeh et al.

تولید، مصرف، پس‌انداز و سرمایه‌گذاری منطقه‌ای است؛ همچنین، مدل ریاضی آن مشتمل بر مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی است که از نظریه‌ی حداکثرسازی اقتصاد خرد استخراج شده است. هر منطقه مشتمل بر چهار عامل اقتصادی شامل خانوار منطقه‌ای نمونه، خانوار خصوصی، دولت و بنگاه است. این الگو توسط توماس هرتل[1] (۱۹۹۷) ارائه شده است (*Nejati et al., 2021*). الگوی *GTAP-E* به‌عنوان بسطی از الگوی *GTAP* برای تحلیل اثرات سیاست‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی در سطح بین‌الملل طراحی شد. تفاوت این الگو با الگوی هرتل در آن است که نهاده مرکب سرمایه - انرژی به ساختار تولیدی افزوده شده و انتشار کربن حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی به‌عنوان نهاده در فرآیند تولید مربوط به تولیدکنندگان منطقه r یا به‌عنوان ستاده حاصل از مصرف کالاها توسط خانوار خصوصی و دولتی در نظر گرفته می‌شود (*Burniax & Truong, 2002; Nijkamp et al., 2005*). الگوی *GTAP-E* بنیان ایده‌آلی را برای معرفی امکان جانشینی در انرژی الکتریکی فراهم کرد و آغازگر تحلیل با جزئیات انرژی الکتریکی در الگوهای تعادل عمومی محسوب می‌شود. بخش الکتریسیته در الگوی *GTAP-E* با کالایی تحت عنوان کالای مجازی الکتریسیته در الگوی *GTAP-E-Power* جانشین شده است که این کالا ترکیبی از انتقال، توزیع، انرژی هسته‌ای، زغال‌سنگ، مصرف گاز جهت تولید الکتریسیته در زمان پیک مصرف برق، مصرف گاز جهت تولید الکتریسیته در زمان مصرف معمول برق، نفت مصرفی در زمان اوج و در زمان غیر اوج مصرف برق، انرژی برقابی در زمان پیک و غیرپیک، انرژی برق تولیدی از باد، نور خورشید و دیگر تکنولوژی‌های تولید برق است (*Peters, 2016*). باتوجه‌به تمرکز اصلی این پژوهش بر تحلیل بخش خاصی از اقتصاد، یعنی صنعت آهن و فولاد، لازم است که ساختار و لایه‌های تولید این صنعت به طور دقیق‌تر و جزئی‌تر بررسی و تشریح شود تا زمینه لازم برای تحلیل اثرات بازار کربن بر این صنعت فراهم گردد. در مدل *GTAP-E-POWER*، ساختار تولید بنگاه‌ها به‌صورت سلسله‌مراتبی و بر پایه‌ی تابع با کشش جانشینی ثابت طراحی شده است. در این ساختار، هر لایه بیانگر ارتباط میان نهاده‌ها و ستاده در مرحله‌ای مشخص از فرآیند تولید است. این سلسله‌مراتب از لایه تولید کل آغاز می‌شود و به ترتیب شامل لایه کالاهای واسطه‌ای، لایه ارزش افزوده-انرژی و در ادامه، در درون لایه انرژی، ترکیب انرژی الکتریسیته و غیر الکتریسیته می‌باشد.

در لایه ارزش افزوده -انرژی، نهاده سرمایه و ترکیب انرژی به‌عنوان یک گروه ترکیبی در کنار هم قرار گرفته و به طور هم‌زمان در تابع تولید نقش دارند. سپس، نهاده انرژی الکتریسیته به دو

[1]-Hertel

بخش برق حاصل از منابع تجدیدپذیر و برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی تفکیک می‌شود. همچنین نهاده انرژی غیر الکتریسیته به دو بخش زغال‌سنگ و غیر زغال‌سنگ تقسیم شده که بخش غیر زغال‌سنگ شامل نفت، گاز و فرآورده‌های نفتی است. در هر یک از این لایه‌ها، با فرض کشش جانشینی ثابت و بر اساس اصل حداقل‌سازی هزینه، تابع تقاضای نهاده‌ها استخراج می‌شود. در برخی از لایه‌ها مانند لایه تولید کل، مقدار کشش جانشینی برابر با صفر است و در نتیجه، تابع CES به ساختار لئونتیف تبدیل می‌گردد. لازم به ذکر است: متغیرهای این معادلات در قالب درصد تغییرات نسبت به مقدار پایه (فرم رشد) تعریف شده‌اند. (جزئیات معادلات در پیوست گزارش شده است).

۲-۳ داده‌ها، مجموعه‌ها و تجمیع

داده‌های به‌کاررفته در این تحقیق، باتوجه‌به چارچوب روش‌شناسی مطالعه، به سه دسته کلی تفکیک می‌شوند. دسته نخست مربوط به اطلاعات مورداستفاده در مدل تعادل عمومی قابل‌محاسبه با رویکرد محیط‌زیستی و سیاست بازار کربن است که از پایگاه داده نسخه دهم $GTAP$ استخراج شده‌اند. این مجموعه شامل ماتریس حسابداری اجتماعی سال ۲۰۱۴ برای ۱۴۱ کشور یا منطقه، در برگیرنده ۶۵ بخش اقتصادی و ۸ عامل اولیه تولید می‌باشد. به‌منظور آماده‌سازی داده‌ها برای استفاده در ساختار مدل‌سازی، از نرم‌افزار $GTAPagg$ جهت تجمیع ساختاریافته اطلاعات بهره گرفته شده است. داده‌ها متناسب با اهداف پژوهش در قالب ۱۳ بخش، ۵ عامل تولید و ۶ منطقه جغرافیایی دسته‌بندی و تجمیع شده‌اند.

جدول (۳) :تجمیع بخش‌ها و عوامل تولید

بخش‌ها	عوامل تولید	مناطق
کشاورزی، زغال سنگ، نفت، گاز، فرآورده‌های نفتی، توزیع و انتقال برق، برق حاصل از انرژی‌های تجدیدپذیر با بار پیک، برق حاصل از انرژی-های تجدیدپذیر با بار پایه، برق حاصل از انرژی‌های فسیلی با بار پیک، برق حاصل از انرژی‌های فسیلی با بار پایه، صنایع انرژی‌بر، آهن و فولاد، خدمات	نیروی کار ماهر نیروی کار غیرماهر زمین منابع طبیعی سرمایه	ایران، شرکای عمده تجاری: چین، ترکیه، هند، امارات متحده عربی و سایر کشورها

منبع: یافته‌های پژوهش

دسته دوم، شامل پارامترهای فنی مدل است که در توابع تولید و مصرف کالاهای مختلف در مدل لحاظ می‌گردند.

دسته سوم به داده‌های پیش‌بینی اختصاص دارد، از جمله: تولید ناخالص داخلی، جمعیت، عرضه عوامل اولیه تولید، میزان انتشار کربن، مصرف انرژی و... . این اطلاعات از پایگاه آماری *CEPII* استخراج شده‌اند که توسط فونتاگنه و همکاران[1] (۲۰۲۲)، گردآوری و ارائه شده است.

۳-۳ سناریوها

در این پژوهش، سال پایه ۲۰۱۴ و سال هدف ۲۰۵۰ در نظر گرفته شده است. براین‌اساس مسیر زمانی متغیرها برای مناطق تحقیق در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ شبیه‌سازی می‌شود. برای ۶ منطقه ایران و شرکای تجاری آن (چین، هند، ترکیه، امارات متحده عربی و سایر کشورها) سناریوها بر اساس سهمیه‌های انتشار کربن برای هر کشور تعیین و تنظیم می‌شود. [2] این سناریوها

---

[1]- Fontagné et al

[2]- از آن جا که نظام تجارت انتشار کربن در این مطالعه بر مبنای مکانیسم «سقف و تجارت» است. دراین مکانیسم، سقف انتشار سالانه (gco2q) بر اساس سهمیه هر کشورتعیین می‌شود. این سقف بیانگر حداکثر میزان مجاز انتشار CO_2 در یک دوره زمانی مشخص است. نرخ رشد انتشار کربن (gco2t) بعد از اجرای سناریو، با این سقف مقایسه میگردد. اگر عملکرد بیشتر از سقف باشد، کشور باید حق انتشار اضافی(مجوز) خریداری کند و هزینه پرداخت نماید و اگر کمتر از سقف باشد، می تواند مازاد سهمیه خود را در بازار به فروش برساند. برای روشن شدن نحوه عملکرد بازار انتشار کربن به به عنوان مثال: انتشارکربن ایران در سال پایه ۲۰۱۴ برابر با ۵۳۷/۰۷ میلیون تن است. بافرض کاهش سالانه ۱/۱۴٪، سقف مجاز سال ۲۰۱۵ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

gco2q = ۵۳۷/۰۷ × ۰/۹۸۸۶ = ۵۳۰/۹۴ میلیون تن

بر اساس نتایج حاصل شده از وضع بازار کربن، (gco2t) نشان دهنده میزان انتشار ایران در سال ۲۰۱۵ است که با توجه به کاهش ۲/۱۴ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۱۴ محاسبه شده است:

gco2t = ۵۳۷/۰۷ × (۰-۱/۰۲۱۴) =۵۲۵/۵۷ میلیون تن

بنابراین:

سقف مجاز: ۵۳۰/۹۴ میلیون تن

عملکرد: ۵۲۵/۵۷ میلیون تن

نتیجه آنکه ایران کمتر از سقف منتشر کرده و در نتیجه دارای مازاد مجوز است که قابلیت فروش در بازار و ایجاد درآمد دارد. این سیستم انگیزه اقتصادی ایجاد می‌کند؛ به طوری که هر چه عملکرد کمتر از سقف باشد، کشور درآمد بیشتری کسب می‌کند.

*نکته: در هر سال، سقف جدید بر اساس سناریوهای تعریف شده تعیین می‌شود. اختلاف بین عملکرد و سقف، مبنای تصمیم گیری برای خرید یا فروش مجوز است.

برای: ۱-چین، کاهش سالانه ۱/۵ درصد، برگرفته از مطالعه هوانگ و همکاران[1] (۲۰۱۹)؛ ۲-هند، کاهش سالانه ۳/۶ درصد، بر اساس مطالعه گامبیر و همکاران[2] (۲۰۱۴)؛ ۳-ترکیه، کاهش سالانه ۱/۶ درصد، طبق مطالعه کت و همکاران[3] (۲۰۱۸)؛ ۴-امارات متحده عربی؛ کاهش سالانه ۹ درصد، بر اساس تعهدات *COP28* (هدف کاهش ۹۰ درصد انتشار کربن تا سال ۲۰۵۰ را تعهد کرده است)؛ ۵-ایران، کاهش سالانه ۱/۱۴ درصد (هدف کاهش انتشار ۲۵ درصد تا سال ۲۰۵۰) در نظر گرفته شده‌اند.

۴- نتایج تجربی

۴-۱ اثر بازار کربن بر تولید صنعت آهن و فولاد

نتایج نشان می‌دهد که اجرای سیاست تجارت انتشار کربن در بخش آهن و فولاد، به‌طورکلی باعث افزایش هزینه نهایی تولید در کشورهای مشمول این سیاست شده و این افزایش هزینه که ناشی از پرداخت برای انتشار کربن است، منجر به کاهش تولید می‌شود. بر اساس نتایج، مسیر این اثر در کشورهای مختلف متفاوت است. در بین کشورهای موردمطالعه، هند بیشترین کاهش تولید را تجربه می‌کند که دلیل آن وابستگی بسیار بالای صنعت فولاد این کشور به زغال‌سنگ و شدت بالای کربن در فرآیند تولید آن است؛ این موضوع باعث شده است که با برقراری بازار کربن، شوک هزینه‌ای ناشی از قیمت‌گذاری کربن برای تولیدکنندگان هند بسیار سنگین‌تر از سایر رقبا باشد. کشورهای ترکیه و چین نیز روند نزولی در تولید را دارند و درصد کاهش تولید در ترکیه از چین بیشتر است. ترکیه وابستگی شدیدی به واردات سوخت‌های فسیلی برای تولید آهن و فولاد دارد. این وابستگی قدرت تعدیل و انطباق‌پذیری صنعت آهن و فولاد در ترکیه را پس از افزایش هزینه-های کربن کمتر می‌کند. کشور ایران در ابتدا کاهش تولید را تجربه می‌کند، اما پس از آن تا حدود سال ۲۰۴۰، افزایش مختصری را نشان می‌دهد، بااین‌حال پس از این دوره مجدد شاهد کاهش هستیم و پیش‌بینی می‌شود کاهش تولید در افق زمانی ۲۰۵۰ به ۹/۴ درصد برسد. در تحلیل روند تولید صنعت فولاد ایران، بهبود نسبی و موقت در بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰، باتوجه‌به ساختار واقعی و حمایتی صنعت در ایران، دور از انتظار نیست. دولت ایران همواره برای حمایت از صنعت و جلوگیری از شوک ناگهانی به آن، ابزارهایی مانند اعتبارات مالی، معافیت‌های مالیاتی و.. را به کار می‌گیرد که به صنعت فرصت می‌دهد تا با جذب فناوری‌های بالاتر و کاهش شدت انرژی، بخشی از هزینه‌های کربن را خنثی کرده و سطح تولید خود را به طور موقت بهبود ببخشد. بااین‌حال، در افق

[1]- Huang et al.
[2]- Gambhir et al.
[3]- Kat et al.

۲۰۵۰ به دلیل سخت‌گیرانه‌تر شدن سقف‌های انتشار و ضرورت گذار به فناوری‌های کاملاً پاک، دوباره شاهد روند کاهشی در تولید هستیم.

براساس مبانی نظری، کاهش تولید ناشی از درونی‌سازی هزینه‌های خارجی است. بازار کربن هزینه‌های آلودگی را که قبلاً در قیمت تمام‌شده لحاظ نمی‌شد، به تولیدکننده تحمیل کرده و با افزایش هزینه نهایی تولید در یک صنعت متکی به انرژی‌های فسیلی ارزان، سطح تولید را کاهش می‌دهد.

امارات متحده عربی در دهه‌های نخست افزایش تولید را تجربه می‌کند و این روند تا سال ۲۰۴۴ ادامه می‌یابد، اما از سال ۲۰۴۶ به بعد روند نزولی شده و در افق ۲۰۵۰، کاهش شدیدتری را تجربه می‌کند. کاهش نسبتاً کمتر تولید در امارات در مقایسه با کشورهایی نظیر هند و ترکیه، نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر این کشور در تطبیق با هزینه‌های کربنی است. این عملکرد که ناشی از سرمایه‌گذاری پیشین در فناوری‌های پاک و ارتقای بهره‌وری است، تأییدکننده فرضیه پورتر (یا فرضیه هاله آلودگی) می‌باشد؛ چرا که نوآوری‌های سبز در امارات توانسته فشار ناشی از درونی‌سازی هزینه‌های کربن را تعدیل کرده و تولید را با کمترین آسیب در مقایسه با سایر اعضا حفظ کند. در مجموع در مورد همه کشورهای نمونه، نظریات نئوکلاسیک (شکست سیستم بازار) همخوانی دارد؛ چرا که سخت‌گیرانه شدن مقررات زیست‌محیطی در قالب تشکیل بازار کربن منطقه‌ای، منجر به خروج منابع از صنایع آلاینده و کاهش سطح تولید در کشورهای نمونه شده است.

لازم به ذکر است که کشورهای موردمطالعه در چندین دهه گذشته اغلب کشورهایی هستند که بر اساس فرضیه پناهگاه آلودگی، کشور میزبان برای انتقال تکنولوژی از کشورهای توسعه‌یافته و کشورهایی که مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری را بر صنایع خود اعمال کرده‌اند؛ بوده‌اند. به همین دلیل این کشورها جزء انتشاردهنده‌های اصلی کربن در نمونه موردمطالعه محسوب می‌شوند (چین - هند - ایران).

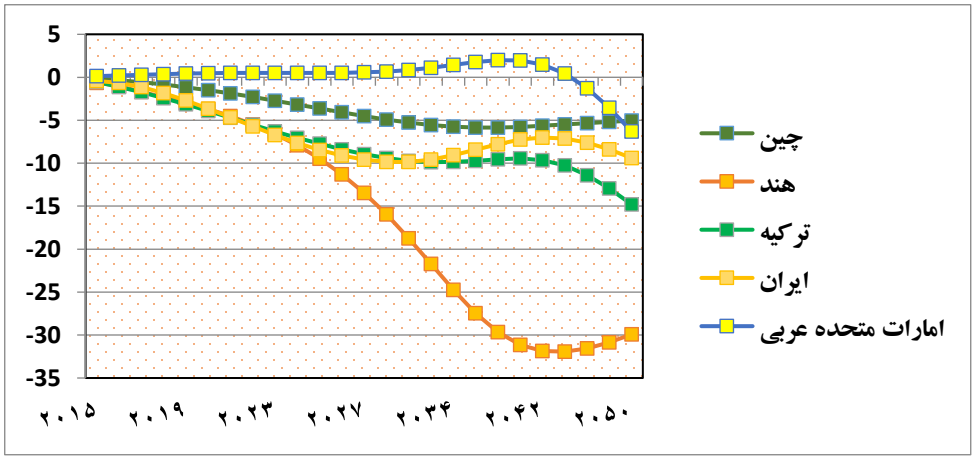
یادآوری می‌شود که وابستگی اقتصاد ایران با چین بیشتر از کانال نفت و مواد خام است. ایران نفت و مواد خام را به چین صادر می‌کند و کالاهای ساخته شده صنعتی نهایی را وارد می‌کند. صنایع آهن و فولاد یک کالای واسطه‌ای است که در تراز بازرگانی این دو کشور کمتر مبادله می‌گردد. اما ازآنجاکه چین یک اقتصاد بزرگ است و آثار تغییرات تولید، صادرات و واردات و فناوری آن بر همه کشورهای جهان منعکس خواهد شد، ایران نیز بی‌تأثیر از آن نخواهد بود. باتوجه‌به شرایط خاص ایران و روابط تجاری خود با چین، می‌تواند از تغییرات فناوری در صنایع انرژی‌بر به‌ویژه صنایع آهن و فولاد از کانال سرمایه‌گذاری خارجی و انتقال تکنولوژی به بهبود فناوری خود کمک کند.

باتوجه‌به اینکه چین یکی از مهم‌ترین شرکای تجاری ایران است، بخش مهمی از نوسانات تولید و صادرات ایران تحت‌تأثیر مکانیسم‌های انتقال شوک از سوی چین نیز قرار دارد. این انتقال از سه کانال مهم صورت می‌گیرد؛ اول، کانال قیمت جهانی فولاد: چین تعیین‌کننده مهم قیمت جهانی و تقاضای واردات در جهان است، برقراری سقف‌های انتشار در این کشور و افزایش هزینه‌های تولید فولاد چین، منجر به تغییر در قیمت‌های بین‌المللی می‌شود که مستقیماً بر درآمد صادراتی ایران اثر می‌گذارد. دوم، کانال نشت کربن: با سخت‌گیرانه شدن مقررات در چین، احتمال انتقال بخشی از تقاضا به سمت تولیدات ایران وجود دارد، هرچند که تشکیل بازار منطقه‌ای در این مطالعه باعث شده تا هر دو کشور به طور همزمان تحت‌فشار هزینه کربن قرار گیرند و این پدیده تعدیل شود. سوم، کانال جانشینی تجاری: کاهش ۵/۰۳ درصدی تولید در چین و تغییر در مزیت رقابتی این کشور، فضای جدیدی برای جانشینی تجاری ایجاد می‌کند؛ بااین‌حال، به دلیل وابستگی تکنولوژیک ایران به واردات کالاهای سرمایه‌ای از چین، هرگونه شوک منفی بر تولید چین می‌تواند از طریق سرریز تکنولوژی وارداتی، هزینه‌های تولید در ایران را تعدیل کند.

جدول (۴): اثر وضع بازار انتشار کربن بر تولید صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

تولید	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
چین	-۰/۱۵	-۱/۵	-۵/۲۷	-۵/۷۷	-۵/۰۳
هند	-۰/۶۳	-۳/۷	-۱۸/۷۳	-۳۱/۱۵	-۲۹/۹۲
ترکیه	-۰/۵۳	-۳/۹۳	-۹/۷۲	-۹/۴۴	-۱۴/۸
ایران	-۰/۴۳	-۳/۶۶	-۹/۸۶	-۷/۲۴	-۹/۴
امارات متحده عربی	۰/۱۲	۰/۴۸	۰/۸۴	۱/۹۷	-۶/۳۲

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۱): اثر وضع بازار انتشار کربن بر تولید صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۲ اثر بازار کربن بر قیمت صنعت آهن و فولاد

اجرای بازار انتشار کربن به‌عنوان یک سیاست زیست‌محیطی، باعث درونی‌سازی هزینه‌های خارجی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، تولیدکنندگان فولاد مجبور می‌شوند هزینه‌های زیست‌محیطی تولید خود را پرداخت کنند. این امر باعث افزایش هزینه متوسط تولید فولاد می‌شود. طبق نظریه اقتصادی، افزایش قیمت تمام شده، افزایش قیمت تعادلی را به دنبال دارد. اگرچه این افزایش قیمت در کوتاه‌مدت تهدیدی برای رقابت‌پذیری محسوب می‌شود، اما مطابق فرضیه پورتر، این سیگنال‌های قیمتی در بلندمدت صنعت فولاد را به خروج از فناوری‌های فرسوده و حرکت به‌سوی بهره‌وری بالاتر و تولید فولاد سبز سوق می‌دهد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده؛ تشکیل بازار کربن، قیمت فولاد در تمامی کشورهای مورد بررسی را افزایش داده است، اما میزان این افزایش قیمت، متفاوت است. بر اساس نتایج، کشورهای هند و ایران بیشترین افزایش قیمت را تجربه می‌کنند. به‌طوری که در افق ۲۰۵۰ افزایش قیمت فولاد در هند ۲۳/۲۳ درصد و در ایران ۱۹/۰۸ درصد برآورد می‌شود. این ارقام نشان‌دهنده آن است که در این دو کشور، مکانیسم درونی‌سازی هزینه‌های خارجی با شدت بیشتری عمل کرده است؛ زیرا هزینه پرداخت برای آلودگی، به دلیل شدت بالای کربن در فرآیند تولید، مستقیماً به هزینه نهایی تولید و سپس به قیمت محصول منتقل شده است. درچین و ترکیه شدت افزایش قیمت کمتر و ملایم‌تر است و به ترتیب در سال ۲۰۵۰ به ۱۴/۰۷ و ۱۳/۹۲ درصد می‌رسد. علت اینکه ایران و هند شاهد جهش قیمتی بزرگ‌تری نسبت به چین (۱۴٪/۰۷) و ترکیه (۱۳٪/۹۲) هستند، وابستگی شدید زیرساخت‌های این صنعت در ایران و هند به سوخت‌های فسیلی (مانند زغال‌سنگ در هند و گاز ارزان در ایران) و پایین‌بودن بهره‌وری انرژی است. وابستگی به زغال‌سنگ درهند امکان جانشینی و گذار انرژی را پرهزینه و زمان‌بر خواهد کرد که باتوجه‌به ظرفیت اقتصادی محدود این کشور در تأمین مالی قابل‌پیش‌بینی است.

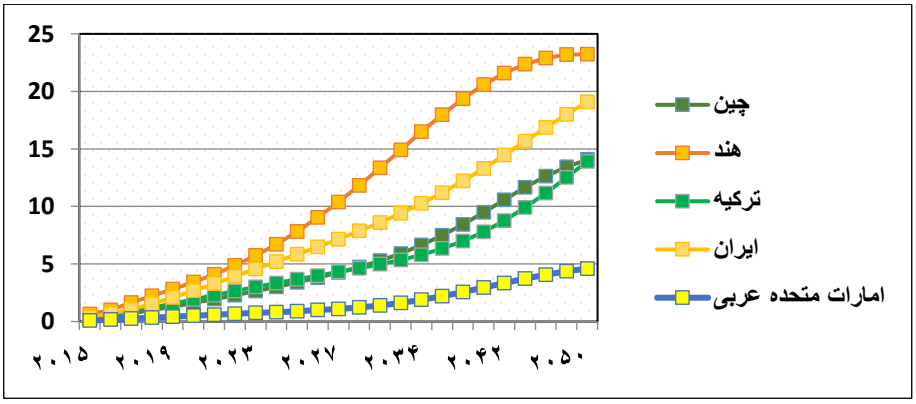
در امارات متحده عربی نیز گرچه قیمت فولاد طی دوره افزایش یافته است، اما این افزایش نسبت به سایر کشورها محدودتر بوده و در پایان دوره ۴/۶ درصد است. این رفتار متفاوت ناشی از سرمایه‌گذاری‌های پیشین این کشور در فناوری‌های نوین، انرژی‌های تجدیدپذیر و ارتقای کارایی انرژی است. از منظر اقتصادی، صنعت فولاد امارات به دلیل برخورداری از تکنولوژی‌های سبزتر، هزینه کربن کمتری را به قیمت نهایی محصول خود تحمیل کرده و در نتیجه، کمترین آسیب را از

سیگنال‌های قیمتی بازار کربن دیده است. به دلیل سهولت تأمین مالی پروژه‌ها در امارات امکان سرمایه‌گذاری جانشینی و توسعه‌ای در بخش صنعت آهن و فولاد فراهم‌تر است.

جدول (۵): اثر وضع بازار انتشار کربن بر قیمت صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

قیمت	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
چین	۰/۲۲	۱/۶۱	۵/۲۸	۹/۴۸	۱۴/۰۷
هند	۰/۶۴	۳/۴۲	۱۳/۳۴	۲۰/۵۸	۲۳/۲۳
ترکیه	۰/۲۶	۱/۹۱	۴/۹۷	۷/۷۹	۱۳/۹۲
ایران	۰/۳۹	۲/۶۷	۸/۶	۱۳/۳	۱۹/۰۸
امارات متحده عربی	۰/۰۸	۰/۵۱	۱/۴	۲/۹۵	۴/۶

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۲): اثر وضع بازار انتشار کربن بر قیمت صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۳ اثر بازار کربن بر صادرات صنعت آهن و فولاد

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که صادرات صنعت آهن و فولاد در اکثر کشورها طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ کاهش یافته است، اما شدت و روند این کاهش متفاوت است. کشور چین کمترین افت نسبی را در بین کشورها دارد و از ۰/۵۴- درصد در سال ۲۰۱۵ به ۱۱/۸۳- درصد در سال ۲۰۵۰ می‌رسد. چین با در اختیار داشتن تکنولوژی‌های بالاتر نسبت به ایران و هند، شوک هزینه‌ای کربن را بهتر مدیریت کرده و توانسته است بخشی از این هزینه را در قیمت‌های جهانی تخلیه کند، لذا افت صادرات کمتری را تجربه کرده است. کشور هند با کاهش شدید و مستمر صادرات مواجه می‌شود؛ این کاهش در سال ۲۰۱۵، ۲/۸۷ درصد است و پیش‌بینی می‌شود در افق ۲۰۵۰ به ۳۸/۵۴ درصد برسد. روند کاهش صادرات کشور ترکیه در مقایسه با هند کمتر است، به‌گونه‌ای که

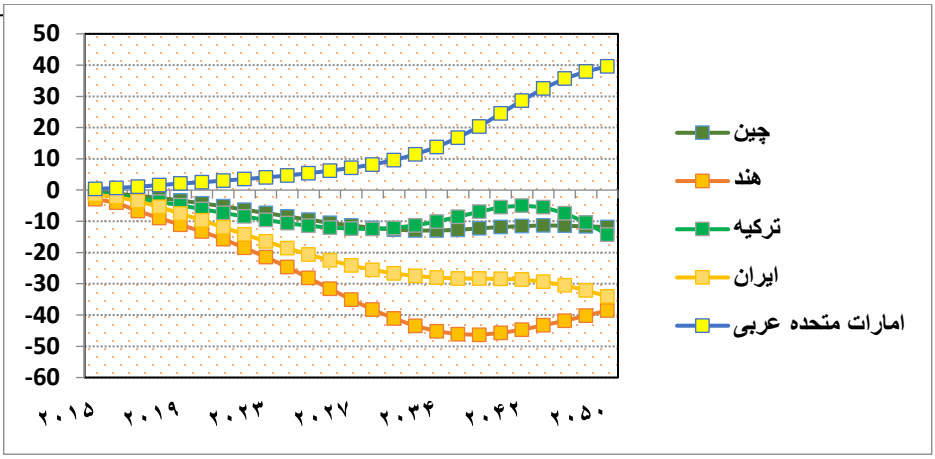
در سال ۲۰۵۰ به ۱۴/۲۶- درصد می‌رسد. این وضعیت نشان‌دهنده آن است که صنعت فولاد ترکیه در مقایسه با ایران و هند، وابستگی کمتری به سوخت‌های فسیلی پرکربن (مانند زغال‌سنگ) داشته و از نظر فناوری در سطح بالاتری از کارایی انرژی قرار دارد؛ به همین دلیل، حساسیت صادرات این کشور به قیمت‌گذاری کربن کمتر از ایران و هند است. کاهش صادرات کشور ایران قابل‌توجه است این کاهش در سال ۲۰۱۵، ۱/۴۶ درصد است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، حداکثر ۳۴/۰۱ درصد کاهش داشته باشد. ساختار انرژی محور صنایع فولادی و محدودیت‌های فناورانه از دلایل اصلی آسیب‌پذیری ایران در برابر بازار کربن هستند. در کشورهایی مانند هند که تولید فولاد به‌شدت به زغال‌سنگ وابسته است و ایران که از فناوری‌های با شدت انرژی بالا استفاده می‌کند، این شوک هزینه‌ای باعث جهش قیمت داخلی (۲۳٪/۲۳ در هند و ۱۹٪/۰۸ در ایران) و در نتیجه ازدست‌رفتن مزیت رقابتی قیمتی در بازارهای جهانی شده است.

تنها کشوری که با افزایش صادرات مواجه شده، امارات متحده عربی است. صادرات این کشور از ۰/۳۸ درصد در سال ۲۰۱۵ به ۳۹/۶۲ درصد در سال ۲۰۵۰ رشد می‌کند. این نتیجه، تأییدکننده فرضیه پورتر است. امارات به دلیل سرمایه‌گذاری‌های پیشین در فناوری‌های سبز، انرژی‌های تجدیدپذیر و ارتقای کارایی انرژی، توانسته است سیگنال‌های قیمتی بازار کربن را به فرصتی برای نوآوری تبدیل کند. درحالی‌که رقبای منطقه‌ای (ایران و هند) با فشار هزینه درگیر هستند، امارات باتکیه‌بر تولیدات کم‌کربن، سهم بازار جهانی خود را افزایش داده و جایگزین محصولات پرکربن سایر رقبا شده است.

جدول (۶): اثر وضع بازار انتشار کربن بر صادرات صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

صادرات	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
چین	-۰/۵۴	-۴/۲۴	-۱۲/۶۷	-۱۱/۷۹	-۱۱/۸۳
هند	-۲/۸۷	-۱۳/۲۷	-۴۱/۱۵	-۴۵/۷۶	-۳۸/۵۴
ترکیه	-۰/۸	-۶/۰۹	-۱۲/۱۱	-۵/۴۸	-۱۴/۲۶
ایران	-۱/۴۶	-۹/۷	-۲۶/۶۹	-۲۸/۳۸	-۳۴/۰۱
امارات متحده عربی	۰/۳۸	۲/۴۹	۹/۵۸	۲۴/۴۹	۳۹/۶۲

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۳): اثر وضع بازار انتشار کربن بر صادرات صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۴ اثر بازار کربن بر واردات صنعت آهن و فولاد

در حوزه واردات، بازار کربن باعث بروز تغییرات در الگوهای واردات کشورها شده است. افزایش هزینه‌های تولید داخلی در نتیجه اعمال قیمت بر کربن، کشورها را به اتخاذ رویکردهای متفاوت در خصوص واردات سوق داده است. چین با روندی آرام اما پیوسته، شاهد افزایش واردات فولاد بوده است؛ به‌گونه‌ای که میزان واردات این کشور از ۰/۳۰ درصد در سال ۲۰۱۵ به ۵/۴۹ درصد در سال ۲۰۵۰ افزایش‌یافته است. در مقابل، هند با جهشی چشمگیر در واردات مواجه بوده و واردات آن از ۱/۲۷ درصد در سال ۲۰۱۵ به ۲۹/۶۵ درصد در سال ۲۰۵۰ رسیده است. افزایش واردات در چین و هند، مصداق اثر جایگزینی واردات به‌جای تولید داخل است؛ چرا که با درونی‌سازی هزینه‌های کربن، قیمت تولید داخلی (به‌ویژه در هند به دلیل وابستگی شدید به زغال‌سنگ) از قیمت‌های جهانی فراتر رفته و تقاضا به سمت واردات سوق یافته است. در واقع، با سخت‌گیرانه شدن قوانین زیست‌محیطی در بازار کربن، این دو کشور بخشی از مزیت رقابتی خود را ازدست‌داده و با پدیده نشت کربن روبرو شده‌اند؛ به این معنا که تقاضای داخلی به‌جای تولیدات پرکربن داخلی، به سمت واردات ارزان‌تر از کشورهایی سوق یافته است که خارج از سقف‌های انتشاری بازار کربن قرار دارند. علت اینکه هند جهش وارداتی بسیار بزرگ‌تری نسبت به چین تجربه کرده، وابستگی شدید صنعت فولاد هند به زغال‌سنگ و بهره‌وری پایین‌تر انرژی در مقایسه با چین است که باعث شده شکاف قیمت تولید داخلی و محصولات جهانی در هند بسیار عمیق‌تر شود. وضعیت ترکیه متفاوت است؛ این کشور در ابتدا شاهد افزایش اندک واردات بوده؛ اما سپس با کاهش تدریجی و منفی‌شدن تراز وارداتی، خود را با شرایط جدید بازار وفق داده است. روند واردات ترکیه از مثبت به منفی متمایل

شده و در سال ۲۰۵۰ به ۶/۰۷- درصد رسیده است. در مورد ترکیه، این روند نزولی نشان‌دهنده موفقیت تدریجی صنعت این کشور در انطباق با شرایط بازار کربن و جایگزینی تولیدات داخلی به‌جای واردات پس از یک دوره گذار است. در مورد ایران، روند واردات کاهشی و نسبتاً باثبات بوده است. واردات از ۰/۱۹ درصد در ۲۰۱۵ به ۲/۳۴- درصد در ۲۰۵۰ رسیده است.

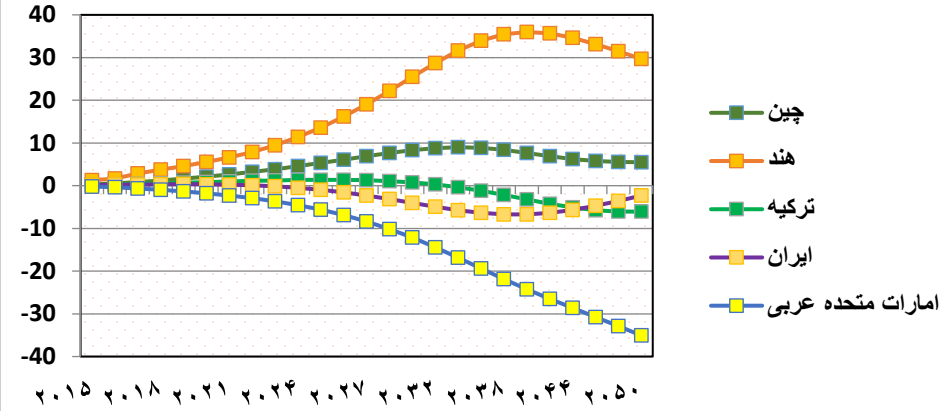
در مورد ایران، این کاهش ملایم واردات عمدتاً تحت‌تأثیر مکانیسم درونی‌سازی هزینه‌های خارجی است. این فرایند با انتقال هزینه‌های زیست‌محیطی به قیمت تمام‌شده، منجر به انقباض کلی فعالیت‌های صنعتی و کاهش تقاضای واسطه‌ای در بخش‌های پایین‌دستی (مانند ساختمان و خودروسازی) شده است؛ انتظار می‌رود این بخش‌ها تحت‌تأثیر شوک قیمتی فولاد، تقاضای خود را برای این کالا (چه داخلی و چه وارداتی) کاهش دهند و فشار بر واردات را کمتر کنند. همچنین، محدودیت‌های ارزی و سیاست‌های حمایتی دولت برای جایگزینی محصولات داخلی در دوره تطبیق، از دیگر عوامل بازدارنده کاهش واردات در ایران محسوب می‌شود.

در نهایت، امارات متحده عربی با کاهش چشمگیر واردات از ۰/۲۰- درصد در سال ۲۰۱۵ به ۳۵/۰۶- درصد در سال ۲۰۵۰، مواجه می‌شود. این نتیجه در کنار رشد ۳۹ درصدی صادرات این کشور، نشان‌دهنده یک تحول موفق است. امارات با بهره‌گیری از فرضیه پورتر و ارتقای فناوری‌های سبز، توانسته است نیاز داخلی خود را با محصولات کم‌کربن داخلی تأمین کرده و وابستگی به واردات فولاد پرکربن از رقبایی نظیر هند را به‌شدت کاهش دهد.

جدول (۷): اثر وضع بازار انتشار کربن بر واردات صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

واردات	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
چین	۰/۳	۲/۰۹	۸/۳۳	۷/۶۴	۵/۴۹
هند	۱/۲۷	۵/۵۳	۲۵/۴۹	۳۵/۹۷	۲۹/۶۵
ترکیه	۰/۱۱	۰/۸۴	۰/۷۶	-۳/۲۱	-۶/۰۷
ایران	۰/۱۹	۰/۳۵	-۴/۰۳	-۶/۷	-۲/۳۴
امارات متحده عربی	-۰/۲	-۱/۷۷	-۱۲/۱۶	-۲۴/۲۳	-۳۵/۰۶

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۴): اثر وضع بازار انتشار کربن بر واردات صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۴ اثر بازار کربن بر انتشار کربن‌دی‌اکسید صنعت آهن و فولاد

نتایج نشان می‌دهد که اجرای بازار کربن منطقه‌ای میان ایران و شرکای عمده تجاری، طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ منجر به کاهش مستمر انتشار کربن‌دی‌اکسید در بخش آهن و فولاد همه کشورها شده است و این موفقیت، نشان‌دهنده اثرگذاری سیاست سیستم تجارت انتشار است. هرچند شدت کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید بین کشورها متفاوت بوده است. این دستاورد کارایی مکانیسم درونی‌سازی هزینه‌های خارجی را در هدایت صنایع به سمت کاهش آلایندگی تأیید می‌کند. مقادیر نهایی کاهش تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد که امارات متحده عربی با کاهش ۵۴/۶۷ درصدی، بیشترین کاهش را تجربه کرده است. این عملکرد موفقیت‌آمیز امارات در کاهش انتشار، در کنار رشد صادرات این کشور (که در بخش‌های قبل ذکر شد)، مصداق بارز فرضیه پورتر است؛ به این معنا که سیاست‌های زیست‌محیطی سخت‌گیرانه، منجر به نوآوری و استفاده از فناوری‌های سبز شده است. چین با کاهش ۵۳/۹۵ درصدی در جایگاه دوم قرار دارد، هند با کاهش ۵۲/۰۷ درصدی روندی مشابه چین داشته است. نکته حائز اهمیت در مورد هند این است که بخش بزرگی از این کاهش انتشار، نه صرفاً از طریق بهبود تکنولوژی، بلکه به دلیل کاهش شدید تولید (۲۹/۹۲ درصد) ناشی از وابستگی بالای ساختار تولید این کشور به زغال‌سنگ رخ داده است. ایران با کاهش ۴۹/۴۶ درصدی، عملکردی نزدیک به میانگین کشورهای موردمطالعه داشته است. این کاهش نشان‌دهنده اثرگذاری قابل‌توجه بازار کربن بر بخش فولاد از طریق سیگنال‌دهی قیمت است، هرچند محدودیت‌های ناشی از وابستگی بالای این صنعت به انرژی فسیلی و هزینه‌های بالای کاهش انتشار، مانع از کاهش بیشتر کربن‌دی‌اکسید شده است. در مقابل، ترکیه با ۴۰/۰۷ درصد کمترین

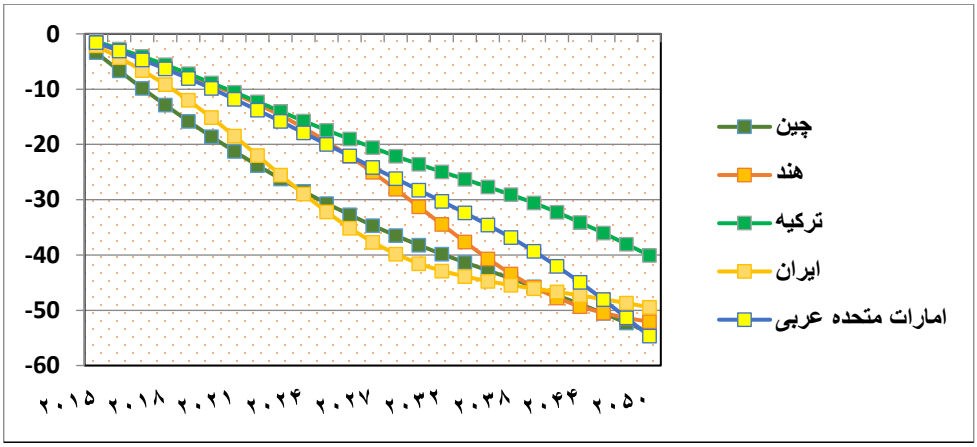
کاهش را ثبت کرده است. دلیل این امر پتانسیل کمتر ترکیه برای کاهشِ «یکباره» انتشار به دلیل بهره‌وری بالاتر انرژی و شدت کربن کمترِ اولیه در مقایسه با رقبایی همچون هند است.

در مجموع نتایج بیانگر آن است که در کنار موفقیت زیست‌محیطی همه کشورها پس از اجرای سیاست نتایج به تفاوت در سطح توسعه، فناوری و ویژگی‌های صنعتی کشورها بستگی دارد.

جدول (۸): اثر وضع بازار انتشار کربن بر انتشار کربن‌دی‌اکسید صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

انتشار کربن‌دی‌اکسید	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
چین	-۳/۳۹	-۱۸/۶	-۳۸/۲۱	-۴۵/۷۳	-۵۳/۹۵
هند	-۱/۵۸	-۹/۱۴	-۳۱/۲۵	-۴۵/۸۵	-۵۲/۰۷
ترکیه	-۱/۳۶	-۸/۸۵	-۲۳/۵۵	-۳۰/۶	-۴۰/۰۷
ایران	-۲/۱۴	-۱۵/۱۳	-۴۱/۵۶	-۴۶/۰۶	-۴۹/۴۶
امارات متحده عربی	-۱/۵۵	-۹/۸۵	-۲۸/۲۳	-۳۹/۳۱	-۵۴/۶۷

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۵): اثر وضع بازار انتشار کربن بر انتشار کربن‌دی‌اکسید صنعت آهن و فولاد (درصد تغییر)

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-تحلیل حساسیت سیستماتیک

به‌منظور ارزیابی اعتبار نتایج حاصل از مدل‌های تعادل‌عمومی‌قابل‌محاسبه، تحلیل حساسیت نقش مهمی در بررسی میزان اتکاپذیری یافته‌های شبیه‌سازی ایفا می‌کند؛ زیرا نتایج این مدل‌ها به طور ذاتی به مقادیر پارامترهای رفتاری، به‌ویژه کشش‌ها، وابسته‌اند و این پارامترها معمولاً با عدم

قطعیت همراه هستند. تحلیل حساسیت امکان بررسی واکنش متغیرهای درون‌زای مدل نسبت به تغییر در پارامترهای کلیدی را فراهم می‌سازد. در این مطالعه، تحلیل حساسیت به‌صورت سیستماتیک برای تمامی متغیرهای مدل شامل تولید، قیمت، صادرات، واردات و انتشار کربن‌دی‌اکسید در اقتصاد ایران انجام شده است. بدین منظور، مقادیر کشش‌های منتخب شامل کشش آرمینگتون، کشش جانشینی بین عوامل اولیه تولید و انرژی، و کشش جانشینی در لایه‌های الکتریسیته در بخش بار پایه، در بازه‌ای معادل ۰/۵ تا ۱/۵ برابر مقدار مبنا تغییر داده شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، میانگین و انحراف معیار هر متغیر محاسبه و فاصله اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نابرابری چبیشف به‌صورت «میانگین ± ۴/۴۷ × انحراف معیار» تعیین شده است. قرارگرفتن نتایج در این بازه نشان می‌دهد که یافته‌های مدل از اعتبار قابل‌قبول برخوردار هستند.

جدول (۹): تحلیل حساسیت سیستماتیک

نتایج تحلیل حساسیت متغیرها							
متغیرها		۲۰۲۵			۲۰۳۰		
		کشش آرمینگتون	کشش جانشینی بین عوامل اولیه تولید و انرژی	کشش جانشینی در لایه‌های الکتریسیته در بخش بار پایه	کشش آرمینگتون	کشش جانشینی بین عوامل اولیه تولید و انرژی	کشش جانشینی در لایه‌های الکتریسیته در بخش بار پایه
تولید	میانگین	-۸/۴۲	-۸/۳۶	-۸/۴۴	-۹/۸۴	-۹/۶۴	-۹/۸۴
	انحراف معیار	۰/۹۸	۰/۳۵	۰/۱۱	۱/۴۱	۰/۷۰	۰/۱۷
	فاصله اطمینان	(-۱۲/۸۰۰، -۴/۰۳۹)	(-۹/۹۲۴، -۶/۷۹۵)	(-۸/۹۳۱، -۷/۹۴۸)	(-۱۶/۱۴۲، -۳/۵۳۷)	(-۱۲/۷۶۹، -۶/۵۱۱)	(-۱۰/۵۹۹، -۹/۰۸۰)
	خروجی اصلی مدل	-۸/۴۵			-۹/۸۶		
قیمت	میانگین	۵/۸۲	۵/۸۳	۵/۸۳	۸/۵۹	۸/۵۵	۸/۵۹
	انحراف معیار	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۵۴	۰/۲۹	۰/۱۲
	فاصله اطمینان	(۴/۵۲۳، ۷/۱۱۶)	(۵/۰۲۵، ۶/۶۳۴)	(۵/۴۷۲، ۶/۱۸۷)	(۶/۱۷۶، ۱۱/۰۰۳)	(۷/۲۵۳، ۹/۸۴۶)	(۸/۰۵۳، ۹/۱۲۶)
	خروجی اصلی مدل	۵/۸۴			۸/۶		
صادرات	میانگین	-۲۰/۵۳	-۲۰/۵۸	-۲۰/۵۸	-۲۶/۵۰	-۲۶/۴۹	-۲۶/۶۵
	انحراف معیار	۰/۹۸	۰/۷۵	۰/۳۳	۱/۹۷	۱/۰۶	۰/۴۴

	فاصله اطمینان	(-۱۶/۱۴۹، -۲۴/۹۱۰)	(-۲۳/۹۳۲، -۱۷/۲۲۷)	(-۱۹/۱۰۴، -۲۲/۰۵۵)	(-۳۵/۳۰۵، -۱۷/۶۹۴)	(-۳۱/۲۲۸، -۲۱/۷۵۱)	(-۲۴/۶۸۳، -۲۸/۶۱۶)
	خروجی اصلی مدل	-۲۰/۶			-۲۶/۶۹		
واردات	میانگین	-۱/۰۷	-۰/۸۸	-۰/۹۹	-۴/۲۸	-۳/۹۲	-۴/۰۴
	انحراف معیار	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۱۲	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۱۵
	فاصله اطمینان	(-۴/۱۹۹ ،۲/۰۵۹)	(-۳/۷۸۵ ،۲/۰۲۵)	(-۱/۵۲۶، -۰/۴۵۳)	(-۸/۳۹۲، -۰/۱۶۷)	(-۸/۲۵۵ ،۰/۴۱۵)	(-۴/۷۱۰، -۳/۳۶۹)
	خروجی اصلی مدل	-۰/۹۹			-۴/۰۳		
انتشار کربن دی اکسید	میانگین	-۳۲/۱۲	-۳۲/۱۲	-۳۲/۲۳	-۴۰/۴۹	-۴۱/۴۶	-۴۱/۵۷
	انحراف معیار	۴/۶۸	۰/۴۵	۰/۱۸	۴/۰۹	۰/۵۶	۰/۱۶
	فاصله اطمینان	(-۵۳/۰۳۹، -۱۱/۲۰۰)	(-۳۴/۱۳۱، -۳۰/۱۰۸)	(-۳۱/۴۲۵، -۳۳/۰۳۴)	(-۵۸/۷۷۲، -۲۲/۲۰۷)	(-۴۳/۹۶۳، -۳۸/۹۵۶)	(-۴۰/۸۵۴، -۴۲/۲۸۵)
	خروجی اصلی مدل	-۳۲/۲۱			-۴۱/۵۶		

منبع: یافته‌های پژوهش

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی

باتوجه‌به فرآیند اجرای تغییرات اقلیمی جهانی در بین کشورها، کاهش گازهای گلخانه‌ای و کربن‌دی‌اکسید هدف اجلاس‌های متعدد می‌باشد. اگرچه ناهماهنگی بین کشورهای اصلی و بزرگ انتشاردهنده کربن‌دی‌اکسید همواره یک چالش بزرگ محسوب می‌شود، ولی تلاش‌ها برای هماهنگی و اجرای سیاست‌های اجلاس‌های بین‌المللی و متعهد کردن کشورها به‌شدت ادامه دارد. این هماهنگی‌ها در کنفرانس *COP26*، *COP28* و *COP30* به همراه برنامه زمان‌بندی به کشورها انجام شده است. یکی از این اقدامات که همه‌ی کشورها متعهد شده‌اند تا ۲۰۳۵، انجام دهند تشکیل بازار کربن است.

صنعت آهن و فولاد یکی از انرژی‌برترین بخش‌ها است و تمرکز کشورها برای کربن‌زدایی در تولید فولاد ضروری است. ارزیابی اجرای بازار کربن بر تولید، قیمت، صادرات، واردات و انتشار کربن در بخش صنعت آهن و فولاد ایران و شرکای عمده تجاری ایران، هدف و سؤالات این تحقیق است.

برای پاسخ به سؤالات فوق در صنعت آهن و فولاد از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه استفاده می‌شود. نتایج نشان داد تأثیرات بر صنعت فولاد کشور ایران و شرکای تجاری آن متفاوت است.

بررسی نتایج تحقیق از اثر بازار انتشار کربن بر تولید، قیمت، صادرات و واردات نشان می‌دهد که ایران در بیشتر ابعاد با نتایج منفی روبرو می‌شود. ازآنجاکه صنعت فولاد به‌عنوان صنعت واسطه‌ای نقش پشتیبان برای اکثر صنایع و بخش ساختمان و خودرو را دارا می‌باشد، هرگونه کاهش تولید می‌تواند تأثیر جدی بر اقتصاد ایران را ایفا کند. از منظر زیست‌محیطی، نتایج نشان می‌دهد که اجرای بازار کربن می‌تواند باعث کاهش انتشار CO_2 شود؛ و این یک نتیجه مثبت برای ایران و شرکای تجاری آن است. یافته‌ها با مطالعات دایی و همکاران (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، لی و همکاران (۲۰۲۳)، ونگ و همکاران (۲۰۲۴)، ونگ و دوآن (۲۰۲۵)، جیا و همکاران (۲۰۲۵) و حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. در بعد تولید، اجرای سیاست منجر به کاهش شدید تولید در هند (به دلیل وابستگی شدید تولید آهن و فولاد به زغال‌سنگ) می‌شود. تولید در ترکیه، ایران و چین با شدت کمتر از هند کاهش پیدا می‌کند، تولید کشور امارات با افزایش اندکی روبرو است؛ ولی در دوره ۲۰۴۶ تا ۲۰۵۰ نیز کاهشی خواهد شد. یافته‌های این مقاله با مطالعه فوره و همکاران (۲۰۲۳)، ونگ و همکاران (۲۰۲۴) و جیا و همکاران (۲۰۲۵)، نیز همخوان است.

قیمت آهن و فولاد نیز به دنبال اجرای این سیاست افزایش می‌یابد. افزایش قیمت، ناشی از افزایش چشمگیر هزینه‌ها به دلیل اعمال هزینه‌های کربنی است که این نتیجه ممکن است باعث کاهش رقابت‌پذیری داخلی صنعت آهن و فولاد شود. این نتیجه با مطالعه‌های فوره و همکاران (۲۰۲۳)، ونگ و کاسی (۲۰۲۴)، ونگ و همکاران (۲۰۲۴) و جیا و همکاران (۲۰۲۵)، هم راستا است.

در بخش صادرات، افت بیش از ۳۴ درصدی بیانگر کاهش صادرات ایران در بازارهای منطقه‌ای است. نتایج در این زمینه با مطالعه‌های فوره و همکاران (۲۰۲۳)، ونگ و کاسی (۲۰۲۴)، ونگ و همکاران (۲۰۲۴) و جیا و همکاران (۲۰۲۵)، مطابقت دارد. از سوی دیگر، واردات ایران به‌صورت ملایم کاهشی است. واردات چین افزایش پیدا می‌کند (بزرگی اقتصاد چین و واسطه‌ای بودن آهن و فولاد به‌عنوان یک کالای وارداتی جانشین تولید داخلی به صنعت چین نیاز به واردات را شدیدتر می‌کند). یافته‌های این قسمت با نتایج تحقیق ونگ و کاسی (۲۰۲۴)، در مورد ایران در تضاد قرار دارد. زیرا آنها نشان دادند که اجرای سیستم تجارت انتشار اتحادیه اروپا منجر به افزایش واردات فولاد و سیمان به اروپا و بروز پدیده نشت کربن شده است، درحالی‌که مطالعه حاضر برای ایران کاهش واردات و صادرات را در نتیجه فشارهای بازار کربن گزارش کرده است. این اختلافات می‌تواند ناشی از تفاوت در سطح توسعه فناوری، سیاست‌های حمایتی و ساختار بازار بین دو منطقه و

انتقال سرمایه‌گذاری صنایع آلاینده به دیگر کشورها باشد. درحالی‌که برخی کشورها مانند امارات با سیاست‌گذاری هوشمندانه، از بازار کربن برای افزایش مزیت رقابتی بهره‌برداری کرده‌اند؛ بنابراین، اگر ایران خواهان حفظ جایگاه خود در بازار منطقه‌ای فولاد و کاهش تبعات اقتصادی ناشی از سیاست‌های اقلیمی بین‌المللی است، ضروری است که تحولاتی بنیادین در حوزه انرژی، فناوری، و حکمرانی زیست‌محیطی در دستور کار قرار دهد. باتوجه‌به نتایج تحقیق، پیشنهادهای سیاستی زیر ارائه می‌شود:

این پیشنهادها بر اساس «واقعیت‌های ساختاری اقتصاد ایران» و با هدف جلوگیری از رکود تورمی در صنعت فولاد برای ایران توصیه شده‌اند.

اول: مدیریت شوک و حفظ رقابت‌پذیری صادراتی ایران

باتوجه‌به پیش‌بینی افت شدید ۳۴/۰۱ درصدی صادرات ایران، اقدامات زیر برای جلوگیری از شوک ناگهانی ضروری است:

- **تخصیص سهمیه‌های رایگان مبتنی بر عملکرد:** به‌جای وضع کامل قیمت کربن از ابتدا، برای جلوگیری از «نشت کربن» و خروج صنعت از بازار بین‌المللی، سهمیه‌های انتشار در سال‌های نخست (۲۰۳۰-۲۰۲۵) باید به‌صورت رایگان اما مشروط به رعایت استانداردهای بهره‌وری تخصیص یابد.
- **استرداد هزینه کربن برای صادرات:** برای مقابله با کاهش قدرت رقابتی در برابر رقبای غیرعضو در بازار کربن، دولت باید مکانیسمی طراحی کند که هزینه‌های کربن پرداخت شده توسط صادرکنندگان فولاد در مرزها به‌صورت مشوق‌های مالیاتی به آن‌ها بازگردانده شود.

دوم: گذار تکنولوژیک و تحقق فرضیه پورتر

برای معکوس کردن روند کاهشی تولید (۹/۴- درصد) و تبدیل تهدید به فرصت، باید از الگوی امارات در سرمایه‌گذاری سبز الگوبرداری کرد:

- **ایجاد «صندوق نوسازی فولاد سبز» از درآمد بازارهای کربن:** درآمدهای حاصل از فروش مجوزهای انتشار نباید صرف بودجه عمومی شود؛ بلکه باید مستقیماً برای تأمین مالی پروژه‌های فولاد با پایه هیدروژن یا تأمین برق از منابع تجدیدپذیر (تغییر ورودی برق کوره قوس الکتریکی) صرف شود. کوره قوس الکتریکی به‌شدت به انرژی الکتریکی وابسته است. برای «سبز» شدن تولید، برق مصرفی این کوره‌ها نباید از نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی تأمین شود. الگوبرداری از امارات متحده عربی در سرمایه‌گذاری بر روی انرژی‌های خورشیدی و تجدیدپذیر برای تأمین برق صنایع سنگین، یکی از راهکارهای اصلی برای حفظ رقابت‌پذیری در بازار کربن است.

- **تسهیل واردات کالاهای سرمایه‌ای کم‌کربن :**باتوجه‌به وابستگی تکنولوژیک ایران به چین، دولت باید تعرفه واردات تجهیزات بهینه‌سازی مصرف انرژی و فناوری‌های جذب کربن (CCS) [1] را به صفر برساند تا هزینه نهایی تولید (که ۱۹/۰۸ درصد رشد داشته) تعدیل شود.

سوم: دیپلماسی تجاری و استانداردهای منطقه‌ای

باتوجه‌به اینکه چین بزرگ‌ترین شریک تجاری ایران است و خود نیز بازار کربن دارد:

- **هماهنگی استانداردهای کربن در قالب «بازار منطقه‌ای»:** ایران باید برای جلوگیری از تبعیض تجاری، استانداردهای اندازه‌گیری و گزارش‌دهی انتشار (MRV) [2] خود را با چین و ترکیه هماهنگ کند تا از وضع تعرفه‌های اضافی بر فولاد ایران در بازارهای هدف جلوگیری شود.
- **توسعه صنعت بازیافت قراضه:** باتوجه‌به اینکه بازیافت فولاد انرژی و کربن بسیار کمتری نسبت به تولید اولیه دارد، سیاست‌گذاری برای ایجاد زنجیره تأمین منظم قراضه می‌تواند شدت کربن صنعت را کاهش داده و ایران را در برابر قیمت‌گذاری کربن مصون کند.

چهارم: اصلاح ساختار قیمت‌گذاری انرژی (پیش‌نیاز اجرایی)

- **حذف تدریجی یارانه‌های انرژی همگام با وضع قیمت کربن:** اجرای بازار کربن در محیطی که انرژی دارای یارانه سنگین است، سیگنال اشتباه به تولیدکننده می‌دهد. دولت باید به‌جای تحمیل هزینه کربن، یارانه انرژی را به سمت اعتبارات مالیاتی برای بهره‌وری هدایت کند تا «درونی‌سازی هزینه‌ها» به‌درستی صورت گیرد.
- دولت باید از طریق اعتبارات نوسازی و معافیت‌های مالیاتی، راه را برای واردات کالاهای سرمایه‌ای با تکنولوژی بالا هموار کند. حذف تعرفه واردات تجهیزاتی که مصرف انرژی را در کوره‌ها بهینه‌سازی می‌کنند، می‌تواند شوک قیمتی ناشی از بازار کربن را تعدیل کند.

پیشنهاد برای مطالعات آتی

باتوجه‌به آثار مثبت (کاهش کربن‌دی‌اکسید) و آثار منفی (کاهش تولید، صادرات و افزایش قیمت) برای ارزیابی نهایی بررسی اثرات خالص رفاهی جامعه در قالب مقایسه‌ی افزایش رفاه ناشی از کاهش کربن‌دی‌اکسید و بازتوزیع درآمد بازار کربن با کاهش رفاه ناشی از کاهش تولید در قالب یک مدل تعادل عمومی پیشنهاد می‌شود.

[1]- Carbon Capture and Storage
[2]- Monitoring, Reporting, and Verification

References

Ahmadishadmehri, M., Mohamadbagheri, A., Houshmand, M., & Kazemi, M. (2020). Investigation of trading greenhouse gas emissions permits, between Iran and BRICS member countries. *Journal of Environmental Science Studies*, *5*(2), 2581-2588(In Persian).

Andrade, C., Desport, L., & Selosse, S. (2024). Net-negative emission opportunities for the iron and steel industry on a global scale. *Applied Energy*, *358*, 122566 https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122566

Bayer, P., & Aklin, M. (2020). The European Union emissions trading system reduced CO2 emissions despite low prices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(16), 8804-8812. https://doi.org/10.1073/pnas.1918128117

Burniaux, J. M., & Truong, T. P. (2002). GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model. *GTAP technical papers*, 18. https://EconPapers.repec.org/RePEc:gta:techpp:923

Cao, J., Ho, M. S., Jorgenson, D. W., & Nielsen, C. P. (2019). China's emissions trading system and an ETS-carbon tax hybrid. *Energy Economics*, *81*, 741-753. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.04.029

Cao, R., Xiao, Y., & Yin, F. (2023). Spatio-temporal evolution of high-quality development and the impact of carbon emissions trading schemes. *Sustainability*, *15*(4), 2900. https://doi.org/10.3390/su15042900.

Center for Climate and Energy Solutions. (2025). 10 Years of the Paris Agreement: Progress Toward Achieving Key Goals.

Chen, Y., Liu, J., & Guo, F. (2023). Does the carbon emission trading scheme foster the development of enterprises across various industries? An empirical study based on micro data from China. *Carbon Management*, *14*(1), 2259864. https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2259864

Cheng, X. J., Li, X. W., Wang, H., & Guo, M. (2025). Towards sustainable development: The role of the carbon emission trading scheme in improving energy enterprises' carbon performance. *Journal of Environmental Management*, *380*, 125001. 10.1016/j.jenvman.2025.125001

Climate Action Tracker. (2024). Global Update - November 2024. Climate Analytics & NewClimate Institute.

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic literature*, *42*(1), 7-71. https://doi.org/10.1257/002205104773558047

Copeland, B., and Taylor, S. (1994). North-south trade and the environment. Q. J. Econ. 109 (3), 755–787. https://doi.org/10.2307/2118421

Costantini, V., & Mazzanti, M. (2012). On the green and innovative side of trade competitiveness? The impact of environmental policies and innovation

on EU exports. *Research policy*, *41*(1), 132-153. https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.08.004

Dai, H., Xie, Y., Liu, J., & Masui, T. (2018). Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve China's INDCs: A general equilibrium assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 4121-4131. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.061

Dargin, J. (2024). Trading Towards Tomorrow: The Design Metrics of a UAE Carbon Market. *Centre for Climate Diplomacy*.

Dechezleprêtre, A., Nachtigall, D., & Venmans, F. (2023). The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, *118*, 102758. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102758

Ding, Y., Jian, S., & Yu, L. (2025). How to reduce carbon emissions in the urban transportation systems through carbon markets? Balancing the monetary and environmental benefits. *Applied Energy*, *377*, 124454. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124454

Feng, X., Zhao, Y., & Yan, R. (2024). Does carbon emission trading policy has emission reduction effect?—An empirical study based on quasi-natural experiment method. *Journal of Environmental Management*, *351*, 119791. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119791

Fontagné, L., Perego, E., & Santoni, G. (2022). Mage 3.1: Long-term macroeconomic projections of the world economy. *International Economics*, *172*, 168-189. https://doi.org/10.1016/j.inteco.2022.08.002

Fouré, J., Dellink, R., Lanzi, E., & Pavanello, F. (2023). Public finance resilience in the transition towards carbon neutrality: Modelling policy instruments in a global net-zero emissions scenario.*OECD Environment Working Papers*. https://dx.doi.org/10.1787/7f3275e0-en

Gambhir, A., Napp, T. A., Emmott, C. J., & Anandarajah, G. (2014). India's CO2 emissions pathways to 2050: Energy system, economic and fossil fuel impacts with and without carbon permit trading. *Energy*, *77*, 791-801. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.055

Hanoteau, J., & Talbot, D. (2019). Impacts of the Québec carbon emissions trading scheme on plant-level performance and employment. *Carbon Management*, *10*(3), 287-298. https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1595154

Hasanbeigi, A. (2025). Steel Climate Impact 2025: An International Benchmarking of Energy and GHG Intensities. *Global Efficiency Intelligence.*

Hong, Q., Cui, L., & Hong, P. (2022). The impact of carbon emissions trading on energy efficiency: Evidence from quasi-experiment in China's carbon

emissions trading pilot. *Energy Economics*, *110*, 106025. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106025

Hosseinzadeh, M. , Shakibaee, A. , Nejati, M. and Jalaee, S. A. (2025). Simulating The Effects of Emission Trading on The Structural Change in The Iran's Economy. *Iranian Journal of Economic Studies*, *14*(1), 201-242(In Persian). 10.22099/ijes.2025.54213.2059

Huang, H., & Yi, M. (2023). Impacts and mechanisms of heterogeneous environmental regulations on carbon emissions: An empirical research based on DID method. *Environmental Impact Assessment Review*, *99*, 107039. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107039

Huang, H., Roland-Holst, D., Springer, C., Lin, J., Cai, W., & Wang, C. (2019). Emissions trading systems and social equity: A CGE assessment for China. *Applied Energy*, *235*, 1254-1265. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.056

Inderberg, T. H. J., Bailey, I., & Harmer, N. (2017). Designing New Zealand's emissions trading scheme. *Global Environmental Politics*, *17*(3), 31-50. https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00414

Jensen, C. (2024). What is in the Emissions Trading System (ETS) for Turkey?:-A Model of Green Behaviour with Enterprise Survey (Green Module+) Data for Turkey

Jia, Z., Wen, S., & Wu, R. (2025). Synergistic effect of emission trading scheme and carbon tax: A CGE model-based study in China. *Environmental Impact Assessment Review*, *110*, 107699. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107699

Kamal, M., Usman, M., Jahanger, A., & Balsalobre-Lorente, D. (2021). Revisiting the role of fiscal policy, financial development, and foreign direct investment in reducing environmental pollution during globalization mode: evidence from linear and nonlinear panel data approaches. *Energies*, *14*(21), 6968. https://doi.org/10.3390/en14216968

Kat, B., Paltsev, S., & Yuan, M. (2018). Turkish energy sector development and the Paris Agreement goals: A CGE model assessment. *Energy Policy*, *122*, 84-96. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.030

Khalili, A., Bahmani, M., & Nejati, M. (2025). Evaluation of the effect of environmental indicators on the energy transition in Iran using the dynamic model. Master Thesis. Department of Economics. Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian).

Li, C., Chen, Z., Hu, Y., Cai, C., Zuo, X., Shang, G., & Lin, H. (2023). The energy conservation and emission reduction co-benefits of China's emission trading system. *Scientific Reports*, *13*(1), 13758. 10.1038/s41598-023-40811-4

Li, C., Qi, Y., Liu, S., & Wang, X. (2022). Do carbon ETS pilots improve cities' green total factor productivity? Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Energy Economics*, *108*, 105931. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105931

Liu, D., Ren, S., & Li, W. (2022). SO2 emissions trading and firm exports in China. *Energy Economics*, *109*, 105978. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105978

Liu, J. Y., & Zhang, Y. J. (2021). Has carbon emissions trading system promoted non-fossil energy development in China?. *Applied Energy*, *302*, 117613. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117613

Midrex Technologies, Inc. (2024). 2024 World Direct Reduction Statistics.

Modirzadeh, S. A., Abolghasemzadeh, H., & Nasseri, M. (2025). A Conceptual Review of Emission Trading Schemes: Lessons for Iran's Energy Market. *International Journal of Environmental Research*, *19*(2), 43. https://doi.org/10.1007/s41742-024-00709-z

Narassimhan, E., Gallagher, K. S., Koester, S., & Alejo, J. R. (2018). Carbon pricing in practice: A review of existing emissions trading systems. *Climate Policy*, *18*(8), 967-991. https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1467827

NDC Aspects. (2024). Iran country fiche: Nationally Determined Contribution and Paris Agreement alignment. NDC Aspects Project.

Nejati, M., Bahmani, M., & Esfandabadi, S. J. (2021). The effects of trade liberalization on agricultural sector of Eurasian Economic Union and Iran: multi-regional computable general equilibrium approach. *Quarterly Journal of Agricultural Economics and Development*, 29(3), 123-154. 10.30490/aead.2021.351973.1270

Nijkamp, P., Wang, S., & Kremers, H. (2005). Modeling the impacts of international climate change policies in a CGE context: The use of the GTAP-E model. *Economic modelling*, *22*(6), 955-974. https://doi.org/10.1016/j.econmod.2005.06.001

Ollivier, H. (2016). North–south trade and heterogeneous damages from local and global pollution. *Environmental and Resource Economics*, *65*, 337-355. https://doi.org/10.1007/s10640-015-9902-4

Pattak, D. C., Tahrim, F., Salehi, M., Voumik, L. C., Akter, S., Ridwan, M., ... & Zimon, G. (2023). The driving factors of Italy's CO2 emissions based on the STIRPAT model: ARDL, FMOLS, DOLS, and CCR approaches. *Energies*, *16*(15), 5845. https://doi.org/10.3390/en16155845

Pattnayak, S. S., & Chadha, A. (2022). Servicification and manufacturing exports: Evidence from India. *Economic Modelling*, *108*, 105756. https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105756

Peters, J. C. (2016). GTAP-E-Power: an electricity-detailed economy-wide model. *Journal of Global Economic Analysis*, *1*(2), 156-187. https://doi.org/10.21642/JGEA.010204AF

Pollitt, M. G. (2019). A global carbon market?. *Frontiers of Engineering Management*, *6*, 5-18. 10.1007/s42524-019-0011-x

Porter, M. E., & Linde, C. V. D. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of economic perspectives*, *9*(4), 97-118. https://www.jstor.org/stable/2138392

Rubashkina, Y., Galeotti, M., & Verdolini, E. (2015). Environmental regulation and competitiveness: Empirical evidence on the Porter Hypothesis from European manufacturing sectors. *Energy policy*, *83*, 288-300. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.014

Teixeira, R. L. P. (2025). Advancing green steel technologies for sustainable and low-carbon steel production. *International Journal of Professional Business Review: Int. J. Prof. Bus. Rev.*, *10*(10), 3. https://doi.org/10.26668/businessreview/2025.v10i10.5666

Usman, M., & Jahanger, A. (2021). Heterogeneous effects of remittances and institutional quality in reducing environmental deficit in the presence of EKC hypothesis: a global study with the application of panel quantile regression. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(28), 37292-37310. 10.1007/s11356-021-13216-x

Wang, B., & Duan, M. (2025). Have China's emissions trading systems reduced carbon emissions? Firm-level evidence from the power sector. *Applied Energy*, *378*, 124802. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124802

Wang, H., Feng, T., Kong, J., Cui, M., & Xu, M. (2024). Grappling with the trade-offs of carbon emission trading and green certificate: Achieving carbon neutrality in China. *Journal of environmental management*, *360*, 121101. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121101

Wang, M., & Kuusi, T. (2024). Trade flows, carbon leakage, and the EU Emissions Trading System. *Energy Economics*, *134*, 107556. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107556

Wang, S., Kim, J., & Qin, T. (2024). Mineral carbonation of iron and steel by-products: State-of-the-art techniques and economic, environmental, and health implications. *Journal of CO2 Utilization*, *81*, 102707. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102707

Wang, W., & Zhang, Y. J. (2022). Does China's carbon emissions trading scheme affect the market power of high-carbon enterprises?. *Energy Economics*, *108*, 105906. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105906

Wei, Y., Li, Y., & Wang, Z. (2022). Multiple price bubbles in global major emission trading schemes: Evidence from European Union, New Zealand,

South Korea and China. *Energy economics*, *113*, 106232. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106232

World Steel Association. (2025, February 25). January 2025 crude steel production. Brussels: World Steel Association.

Xuan, D., Ma, X., & Shang, Y. (2020). Can China's policy of carbon emission trading promote carbon emission reduction?. *Journal of cleaner production*, *270*, 122383. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122383

Yadav, S. (2020). Carbon storage by mineral carbonation and industrial applications of CO2. *Materials Science for Energy Technologies*, *3*, 494-500. https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.03.005

Yang, C. H., Tseng, Y. H., & Chen, C. P. (2012). Environmental regulations, induced R&D, and productivity: Evidence from Taiwan's manufacturing industries. *Resource and Energy Economics*, *34*(4), 514-532. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2012.05.001

Yang, S., Shen, Q., Jahanger, A., Ye, P., Zhang, H., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). The impact of carbon emission trading scheme on export: Firm-level evidence from China. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1035650. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1035650

Zhang, H., Duan, M., & Deng, Z. (2019). Have China's pilot emissions trading schemes promoted carbon emission reductions?–the evidence from industrial sub-sectors at the provincial level. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 912-924. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.247

Zhang, Y. J., Peng, Y. L., Ma, C. Q., & Shen, B. (2017). Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? Evidence from China. *Energy policy*, *100*, 18-28. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.005

پیوست شماره ۱

۱-۱ لایه تولید کل

$$q_{str}^{f} = q_{tr}^{o} + \sigma_SVA_{tr}\left(\dot{\Phi}_{str} + p_{tr}^{s} - p_{str}^{f}\right) + (\sigma_SVA_{tr} - 1)\Omega_{tr} \quad (۱)$$

$$q_{str}^{f} = q_{tr}^{o} - \Omega_{tr} - a_{str}^{f} + \sigma_SVA_{tr}\left(\Omega_{tr} + a_{str}^{f} + p_{tr}^{s} - p_{str}^{f}\right) \quad (۲)$$

معادلات (۱) و (۲) تقاضای مرکب برای نهاده‌های واسطه‌ای و ترکیب ارزش افزوده - انرژی را نشان می‌دهند. متغیرهای q_{str}^{f}، p_{str}^{f}، q_{tr}^{o} و p_{tr}^{s} به ترتیب نشان‌دهنده تقاضای نهاده، قیمت نهاده، مقدار خروجی نهایی و قیمت عرضه کالا در بخش t و منطقه r هستند. $\dot{\Phi}_{str}$ نشان‌دهنده تغییر فناورانه اریب به نهاده s در بخش t و منطقه r است. تغییرات بهره‌وری کل عوامل تولید با Ω_{tr} نشان داده می‌شود، این پارامتر یک تغییر فناورانه خنثی هیکس است که به‌صورت یکنواخت بر

تمامی نهاده‌ها اثر دارد. σ_SVA_{tr}کشش جانشینی بین نهاده‌های واسطه‌ای و ترکیب ارزش افزوده- انرژی است.

در لایه دوم ساختار تولید، تقاضا برای منابع اولیه و ترکیب سرمایه - انرژی بر اساس معادلات (۳) و (۴) تعیین می‌شود. در مدل *GTAP-E-POWER*، نهاده‌های انرژی در لایه ارزش افزوده قرار می‌گیرند تا امکان جانشینی میان سرمایه و انرژی فراهم گردد.

۲-۱ لایه ارزش افزوده انرژی

$$q^{f}_{str} = \mathrm{q}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}} - a^{f}_{str} + \sigma_\mathrm{SVAE}_{tr}\left(\dot{\Phi}_{str} + \mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}} - p^{f}_{str}\right) \quad (۳)$$

$$q^{f}_{str} = \mathrm{q}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}} + \sigma_\mathrm{SVAE}_{tr}(\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}} + a^{f}_{str} - p^{f}_{str}) \quad (۴)$$

$$\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}} = \sum_{\mathrm{s=VAE}} \mathrm{SHVA_EN}_{str} \times [p^{f}_{str} - a^{f}_{str}] \quad (۵)$$

$$p^{s}_{tr} = -\Omega_{tr} + \sum_{\mathrm{s=OUT-COMM}} \mathrm{SHCST}_{str} \times [p^{f}_{str} - a^{f}_{str}] \quad (۶)$$

$\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}}$ نشان‌دهنده قیمت مرکب ارزش افزوده-انرژی است و میانگین وزنی قیمت عوامل اولیه تولید (به‌جز سرمایه) و ترکیب انرژی- سرمایه است (بر اساس معادله ۵).

$\mathrm{SHVA_EN}_{str}$: نشان‌دهنده سهم هزینه هر نهاده در این لایه است.$\mathrm{q}^{\mathrm{f}}_{\text{"vae"tr}}$ تقاضای مرکب ارزش افزوده-انرژی را نشان می‌دهد. بر اساس معادله (۶) شاخص درصد تغییر در قیمت عرضه ستاده تعیین می‌شود. این شاخص میانگین وزنی قیمت تمام نهاده‌ها شامل نهاده‌های واسطه‌ای و ترکیب عوامل اولیه تولید و انرژی است.SHCST_{str} : سهم هزینه نهاده s از کل هزینه تولید خروجیt در منطقهr را نشان می‌دهد. باتوجه‌به معادله (۶)، ارتقاء بهره‌وری نهاده‌ها و کل عوامل تولید موجب کاهش قیمت عرضه کالاها می‌شود. کشش جانشینی بین نهاده‌های اولیه و ترکیب سرمایه-انرژی با نماد $\sigma_\mathrm{SVAE}_{tr}$تعریف شده است. این پارامتر میزان انعطاف‌پذیری بنگاه را در جایگزینی بین این دو دسته نهاده تعیین می‌کند و نقش مهمی در واکنش آن به تغییرات قیمتی و فناورانه ایفا می‌نماید.

۳-۱ لایه نهاده‌های واسطه‌ای

$$\mathrm{q}^{\mathrm{fd}}_{\mathrm{str}} = \mathrm{q}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}} + \sigma_\mathrm{ARM}_{tr}\ (\mathrm{p}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}} - p^{f}_{str}) \quad (۷)$$

$$\mathrm{q}^{\mathrm{fm}}_{\mathrm{str}} = \mathrm{q}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}} + \sigma_\mathrm{ARM}_{tr}\ (\mathrm{p}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}} - \mathrm{p}^{\mathrm{fm}}_{\mathrm{str}}) \quad (۸)$$

$$\mathrm{p}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}} = \mathrm{SHIMT}_{\mathrm{str}} \times \mathrm{p}^{\mathrm{fm}}_{\mathrm{str}} + (1 - \mathrm{SHIMT}_{\mathrm{str}}) \times \mathrm{p}^{\mathrm{fd}}_{\mathrm{str}} \quad (۹)$$

قیمت مرکب نهاده‌های واسطه‌ای ($\mathrm{p}^{\mathrm{ft}}_{\mathrm{str}}$) برابر با میانگین وزنی قیمت نهاده‌های واسطه‌ای داخلی ($\mathrm{p}^{\mathrm{fd}}_{\mathrm{str}}$) و نهاده‌های واسطه‌ای خارجی ($\mathrm{p}^{\mathrm{fm}}_{\mathrm{str}}$) است. $\mathrm{SHIMT}_{\mathrm{str}}$: سهم هزینه نهاده وارداتیs

استفاده‌شده در بخش t در منطقه r است. σ_ARM_{tr} : کشش جانشینی بین کالاهای داخلی و وارداتی است که به‌عنوان کشش آرمینگتون شناخته می‌شود.

۴-۱ لایه سرمایه - انرژی

$$q^{f}_{str} = q^{f}_{"cae"tr} - a^{f}_{str} + \sigma_SCAE_{tr}(p^{f}_{"cae"tr} + a^{f}_{str} - p^{f}_{str}) \qquad (۱۰)$$

$$p^{f}_{"cae"tr} = \sum_{s\epsilon CAE} SHCAE_{str} \times (p^{f}_{str} - a^{f}_{str}) \qquad (۱۱)$$

در لایه ترکیب سرمایه - انرژی، تقاضای بهینه برای ترکیب سرمایه و انرژی تابعی از قیمت‌های نسبی و تغییر فناورانه اریب نسبت به نهاده‌ها است. $p^{f}_{"cae"tr}$: قیمت مرکب سرمایه-انرژی در بخش t ، منطقه r و $q^{f}_{"cae"tr}$: مقدار مرکب سرمایه-انرژی در همان بخش و منطقه است که قیمت مرکب سرمایه-انرژی برابر با میانگین وزنی قیمت سرمایه و انرژی است. $SHCAE_{str}$ نشان‌دهنده سهم هزینه هر نهاده در این لایه است. بر اساس رابطه (۱۱)، افزایش بهره‌وری انرژی($a^{f}_{"engy"tr}$)، منجر به کاهش قیمت ترکیب انرژی می‌شود. در نتیجه با کاهش قیمت، تقاضا برای انرژی از طریق کانال اثر جانشینی افزایش می‌یابد. همچنین، طبق معادلات (۱۰) و (۱۲) این تغییرات به طور مستقیم بر تقاضای انرژی اثر می‌گذارند. σ_SCAE_{tr} نشان‌دهنده کشش جانشینی بین سرمایه و انرژی در لایه سرمایه-انرژی در بخش t و منطقه r است.

۵-۱ لایه انرژی

$$q^{f}_{str} = q^{f}_{"engy"tr} - a^{f}_{str} + \sigma_SENG_{tr}(p^{f}_{"engy"tr} + a^{f}_{str} - p^{f}_{str}) \qquad (۱۲)$$

$$p^{f}_{"engy"tr} = \sum_{s\epsilon ENG} SHENG_{str} \times (p^{f}_{str} - a^{f}_{str}) \qquad (۱۳)$$

طبق معادله (۱۲)، تقاضای مرکب برای الکتریسیته و غیر الکتریسیته محاسبه می‌شود و بر اساس معادله (۱۳)، قیمت مرکب انرژی $p^{f}_{"engy"tr}$ به دست می‌آید. $SHENG_{str}$: سهم هزینه انرژی الکتریسیته و انرژی غیر الکتریسیته در بخش t ، منطقه r است. کشش جانشینی بین الکتریسیته و غیر الکتریسیته با نماد σ_SENG_{tr} نمایش‌داده‌شده است. این پارامتر نشان می‌دهد که بنگاه‌ها تا چه اندازه توانایی جایگزینی برق با حامل‌های غیر الکتریسیته (و بالعکس) رادارند.

۶-۱ لایه غیر الکتریسیته

$$q^{f}_{str} = q^{f}_{"nel"tr} - a^{f}_{str} + \sigma_SNEL_{tr}(p^{f}_{"nel"tr} + a^{f}_{str} - p^{f}_{str}) \qquad (۱۴)$$

$$p^{f}_{"nel"tr} = \sum_{s\epsilon NEL} SHNEL_{str} \times (p^{f}_{str} - a^{f}_{str}) \qquad (۱۵)$$

در لایه غیر الکتریسیته، تقاضای بهینه برای ترکیب زغال‌سنگ و غیر زغال‌سنگ بر اساس معادله (۱۴)، استخراج می‌شود. این تقاضا تابعی از قیمت‌های نسبی انرژی است. قیمت مرکب غیر الکتریسیته ($p^{f}_{"nel"tr}$) برابر با میانگین وزنی قیمت زغال‌سنگ و انرژی غیر زغال‌سنگ است.

SHNEL_{str}: سهم هزینه هر یک از نهاده‌های انرژی در این لایه است. $\sigma_\mathrm{SNEL}_{tr}$ نشان‌دهنده کشش جانشینی بین زغال‌سنگ و انرژی غیر زغال‌سنگ در بخش t و در منطقه r است.

۷-۱ لایه غیر زغال‌سنگ

$$q^f_{str} = \mathrm{q^f_{"ncl"tr}} - a^f_{str} + \sigma_\mathrm{SNCL_{tr}}(\mathrm{p^f_{"ncl"tr}} + a^f_{str} - p^f_{str}) \qquad (۱۶)$$

$$\mathrm{p^f_{"ncl"tr}} = \sum_{s\epsilon \mathrm{NCL}} \mathrm{SHNCL}_{str} \times (p^f_{str} - a^f_{str}) \qquad (۱۷)$$

نفت، گاز و فرآورده‌های نفتی، سه نهاده‌ای هستند که غیر از زغال‌سنگ در این مدل لحاظ می‌شوند. معادله (۱۶) نشان‌دهنده تقاضای بهینه برای این نهاده‌ها را مشخص می‌کند و قیمت ترکیب آن‌ها نیز بر اساس معادله (۱۷) تعیین می‌شود. SHNCL_{str} : سهم هزینه حامل انرژی غیر زغال‌سنگ در این ترکیب است. $\sigma_\mathrm{SNCL_{tr}}$: نشان‌دهنده کشش جانشینی بین حامل‌های انرژی غیر زغال‌سنگ است. هرچه کشش جانشینی بین این نهاده‌ها افزایش یابد، تأثیر تغییرات قیمت نسبی بر تقاضای نهاده‌ها بیشتر و قوی‌تر خواهد بود.

۸-۱ لایه بار پایه - بار اوج

$$q^f_{str} = \mathrm{q^f_{"bpl"tr}} - a^f_{str} + \sigma_\mathrm{SBPL_{tr}}(\mathrm{p^f_{"bpl"tr}} + a^f_{str} - p^f_{str}) \qquad (۱۸)$$

$$\mathrm{p^f_{"bpl"tr}} = \sum_{s\epsilon \mathrm{BPL}} \mathrm{SHBPL}_{str} \times (p^f_{str} - a^f_{str}) \qquad (۱۹)$$

بار پایه و بار اوج بر اساس یک تابع CES و کشش $\sigma_\mathrm{SBPL_{tr}}$، می‌توانند جایگزین یکدیگر شوند. نتیجه‌ی فرآیند حداقل‌سازی هزینه به‌صورت: تابع تقاضای معادله (۱۸) ارائه می‌شود. شاخص قیمت مرکب برق بار پایه و بار اوج $\mathrm{p^f_{"bpl"tr}}$ بر اساس رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. سهم هزینه‌ای هر یک از این دو نوع برق در مصرف نهایی، با SHBPL_{str} در مدل لحاظ شده است. کشش جانشینی بین برق بار پایه و برق بار اوج با پارامتر $\sigma_\mathrm{SBPL_{tr}}$ تعریف شده است. این کشش مشخص می‌کند بنگاه‌ها تا چه حد می‌توانند در واکنش به تغییرات قیمت یا محدودیت‌های فنی، میان استفاده از برق بار پایه و اوج جابه‌جا شوند.

۹-۱ لایه بار اوج

$$q^f_{str} = \mathrm{q^f_{"pkl"tr}} - a^f_{str} + \sigma_\mathrm{SPKL}_{tr}(\mathrm{p^f_{"pkl"tr}} + a^f_{str} - p^f_{str}) \qquad (۲۰)$$

$$\mathrm{p^f_{"pkl"tr}} = \sum_{s\epsilon \mathrm{PLN}} \mathrm{SHPLN}_{str} \times (p^f_{str} - a^f_{str}) \qquad (۲۱)$$

$\sigma_\mathrm{SPKL}_{tr}$کشش جانشینی بین حامل‌های انرژی مورداستفاده برای تولید برق بار اوج را نشان می‌دهد. این پارامتر میزان انعطاف‌پذیری بنگاه‌ها را در تغییر ترکیب مصرفی خود میان سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدپذیر در واکنش به تغییرات قیمت یا سیاست‌های زیست‌محیطی تعیین می‌کند. شاخص قیمت مرکب حامل‌های انرژی مورداستفاده برای تولید برق در ساعات اوج مصرف

در بخش t و منطقه r ($\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"pkl"tr}}$) بر اساس رابطه (۲۱) و با درنظرگرفتن وزن SHPLN_{str} محاسبه می‌شود. SHPLN_{str} سهم هزینه‌ای هر حامل انرژی در ترکیب برق بار اوج است.

۱۰-۱ لایه بار پایه

$$q^{f}_{str} = \mathrm{q}^{\mathrm{f}}_{\text{"bsl"tr}} - a^{f}_{str} + \sigma_\mathrm{SBSL}_{\mathrm{tr}}(\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"bsl"tr}} + a^{f}_{str} - p^{f}_{str}) \qquad (۲۲)$$

$$\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"bsl"tr}} = \sum_{\mathrm{s}\epsilon\mathrm{BLN}} \mathrm{SHBLN}_{str} \times (p^{f}_{str} - a^{f}_{str}) \qquad (۲۳)$$

در آخرین لایه فناوری، تقاضای برق بار پایه بر اساس یک تابع CES با کشش جانشینی $\sigma_\mathrm{SBSL}_{\mathrm{tr}}$ (بر اساس معادله ۲۲) به دست می‌آید.

شاخص قیمت مرکب حامل‌های انرژی در این لایه با $\mathrm{p}^{\mathrm{f}}_{\text{"bsl"tr}}$ نشان داده می‌شود. SHBLN_{str} : سهم هزینه هر یک از نهاده‌های انرژی در این لایه را نشان می‌دهد. $\sigma_\mathrm{SBSL}_{\mathrm{tr}}$ کشش جانشینی بین حامل‌های انرژی در لایه بار پایه است.

در نسخه استاندارد مدل، تمام ضرایب فناوری از جمله Ω و p^{f} برون‌زا هستند، درحالی‌که قیمت‌ها و مقادیر درون‌زا محسوب می‌شوند.