

Simulation of Dynamic Analysis of the Interaction between the Carbon and Electricity Markets in Iran

Hakimeh Aramesh¹| Zeinolabedin Sadeghi²| Seyyed Abdul Majid Jalaei³
 Salim Karimi Takalo⁴

¹. PhD Candidate in Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: hakimeh.aramesh@gmail.com

². Associate Professor of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran (Corresponding Author), Email: z_sadeghi@uk.ac.ir

³. Professor of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: jalaei@uk.ac.ir

⁴. Associate Professor of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran, Email: s.karimi@vru.ac.ir

Article Info.	ABSTRACT
Article type: Research Article	Given the significant reliance on fossil fuels in Iran's power plants for electricity generation, managing pollution within the power sector has become crucial for the country. This paper addresses the importance of carbon emissions by dynamically examining the relationship between carbon and electricity markets. The novelty of this research lies in its dynamic analysis of the interplay between carbon and electricity markets in Iran, considering the country's unique circumstances and employing different scenarios. The findings reveal a deep interdependence between Iran's carbon and electricity markets. Factors such as gas prices, carbon taxes, emission coefficients, and electricity demand exert mutual influence on both markets. An increase in gas prices or the implementation of a carbon tax raises electricity production costs, consequently driving up electricity prices and the demand for carbon allowances. This, in turn, enhances the effectiveness of the carbon market in reducing emissions. Conversely, growth in electricity demand and the emission coefficient place greater pressure on the carbon market, underscoring the necessity for investments in clean energy and emission reduction technologies. To achieve emission reduction targets and promote sustainability, a set of synergistic policies is proposed. These include promoting renewable energy sources, reforming electricity pricing mechanisms, phasing out fossil fuel subsidies, strengthening the carbon market, and implementing demand-side management strategies.
Article history: Received: 28-12-2024 Received in revised: 19-04-2025 Accepted: 27-05-2025 Published Online: 28-05-2025	
Keywords: Carbon Trading, Grandfathering Allocation, Electricity Market Reform, Dynamic Simulation.	
JEL: C53, E31, E38, F43.	
Cite this article: Aramesh, H., Sadeghi, Z., Jalaei S.A.M., & Karimi Takalo, S. (2024). Simulation of Dynamic Analysis of the Interaction between the Carbon and Electricity Markets in Iran. <i>Journal of Economics and Modelling</i> , 15(3), 137-177. DOI: 10.48308/jem.2025.238120.1963	



شبیه‌سازی تحلیل پویای تعامل بازارهای کربن و برق در ایران^۱

حکیمه آرامش^۱ | زین‌العابدین صادقی^{۲*} | سید عبدالمجید جلاتی^۳ | سلیم کریمی تکلو^۴

^۱. دانشجوی دکتری گروه اقتصاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: hakimeh.aramesh@gmail.com
^۲. دانشیار گروه اقتصاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: z_sadeghi@uk.ac.ir
^۳. استاد گروه اقتصاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: jalae@uk.ac.ir
^۴. دانشیار گروه مدیریت دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: s.karimi@vru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	به دلیل سهم به شدت بالای سوخت‌های فسیلی در سبد سوخت برق تولیدی نیروگاه‌های ایران، مدیریت آلودگی در بخش نیروگاهی ضروری است. این مقاله با توجه به اهمیت انتشار کربن، رابطه میان جفت بازارهای کربن و برق را به شکلی پویا بررسی کرده و سناریوهایی را در جهت تحلیل تعامل این جفت بازار مورد بررسی قرار داده است. نوآوری مقاله در تحلیل پویای تعامل جفت بازارهای کربن و برق در ایران، با تمرکز بر شرایط خاص کشور و استفاده از سناریوهای مختلف، است. تحلیل سناریوهای شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که بازارهای کربن و برق در ایران به‌طور عمیقی به یکدیگر وابسته‌اند و عواملی مانند قیمت گاز، مالیات کربن، ضریب انتشار و تقاضای برق بر هر دو بازار تأثیر متقابل دارند. افزایش قیمت گاز یا مالیات کربن هزینه‌های تولید برق را بالا برده و در نتیجه قیمت برق و تقاضا برای سهمیه‌های کربن را افزایش می‌دهد، که این امر به کارایی بیشتر بازار کربن در کاهش انتشار کمک می‌کند. از سوی دیگر، رشد تقاضای برق و ضریب انتشار، فشار بیشتری بر بازار کربن وارد کرده و نیاز به سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و فناوری‌های کاهش انتشار را برجسته می‌سازد. برای تحقق اهداف کاهش انتشار و پایداری، مجموعه‌ای از سیاست‌های هم‌افزا شامل ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر، اصلاح قیمت‌گذاری برق، حذف یارانه‌های سوخت فسیلی، تقویت بازار کربن و مدیریت تقاضا پیشنهاد می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش وابستگی به منابع فسیلی و توسعه برق پایدار شود.
واژه‌های کلیدی: مبادله انتشار کربن، تخصیص سهمیه، اصلاح توسعه بازار برق.	
طبقه‌بندی JEL: Q52, Q40, L94, G18	

استناد: آرامش، حکیمه؛ صادقی، زین‌العابدین؛ جلاتی، سید عبدالمجید؛ کریمی تکلو، سلیم (۱۴۰۳). شبیه‌سازی تحلیل پویای تعامل جفت بازارهای کربن و برق در ایران. *اقتصاد و الگوسازی*، ۱۵(۳)، ۱۷۷-۱۳۷. DOI: 10.48308/jem.2025.238120.1963



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه شهید بهشتی.

^۱. این مقاله مستخرج از پایان نامه دکتری علوم اقتصادی نویسنده اول است.

۱. مقدمه

در میان حامل‌های انرژی، برق برای اقتصاد دنیا یک عامل بسیار اساسی است (محقر و نجف‌زاده، ۱۳۹۶). امروزه صنعت برق ۲۵ درصد از انتشار کربن جهانی را تشکیل می‌دهد که نشان می‌دهد این صنعت یکی از بزرگترین منبع انتشار کربن است و ارتباط نزدیکی با بازار کربن دارد (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۳). انتشارات جهانی دی‌اکسید کربن (CO₂) از ۳۱۰۰۶۷ میلیون تن در سال ۲۰۱۱ به ۳۵۱۱۲۹ میلیون تن در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت، که نشان‌دهنده رشد ۱۳،۰۸ درصدی است. آسیا و اقیانوسیه (به‌ویژه چین و هند) شاهد افزایش چشمگیر انتشارات بودند، در حالی که اروپا و آمریکای شمالی کاهش قابل توجهی داشتند (بی پی^۲، ۲۰۲۴).

صنعت برق بخش مهمی برای کاهش انتشار کربن به شمار می‌رود، به ویژه برق حرارتی که از بزرگترین بخش‌های مصرف انرژی اولیه به شمار آمده و سهم زیادی در تولید CO₂ صنایع برق دارد. بنابراین قیمت‌گذاری انتشار کربن می‌تواند نقش بسزایی در تشویق شرکت‌های برق حرارتی به کاهش انتشار کربن داشته باشد (وانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۳). کارشناسان اغلب به قیمت‌گذاری کربن به عنوان مقرون به صرفه ترین ابزار برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره می‌کنند (تیونریم و مهلینگ^۴، ۲۰۱۸) و توسعه این بازار به دلیل وخامت اوضاع آب و هوا و محیط زیست جهانی در کشورها سرعت گرفته است (لی و همکاران، ۲۰۲۳) که منجر شده تا در مکان‌های مختلف به‌عنوان مهم‌ترین ابزار سیاستی برای رسیدگی به تغییرات آب‌وهوایی، تسلط بر بحث‌های سیاسی و بهره‌مندی از منابع عمومی شناخته شود.

تا کنون بازار برق دستخوش اصلاحات زیادی شده‌است که در نتیجه‌ی آن تغییر تدریجی از تعیین قیمت توسط دولت به تعیین قیمت توسط بازار شکل گرفته است.

¹. Li et al.

². BP

³. Wang et al.

⁴. Tvinnereim and Mehling

یافته‌های حاصل از مطالعات و گزارشات انجام شده نشان می‌دهد که افزایش قیمت کربن سبب افزایش قیمت برق می‌شود. همچنین یافته‌های مطالعات و گزارشات نشان از ارتباط جدایی ناپذیر و در هم تنیده این جفت بازار داده که در نتیجه‌ی آن امروزه کشورها از تعامل میان آن دو آگاهی لازم را داشته و بازار حاصل از این تعامل شکل گرفته است. همچنین قیمت‌گذاری کربن صورت گرفته و این کشورها سیاست‌هایی را در این زمینه به کار می‌گیرند به عنوان مثال می‌توان مطالعه‌های آندریانسیس و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، ژئو و جورجیو^۲ (۲۰۲۱) و کلودیوس و همکاران^۳ (۲۰۲۰) مورد توجه قرار داد. بنابراین و با توجه به تأثیر پذیری بازار برق از قیمت کربن و تحولات ایجاد شده در بازار برق، لازم است کشورها به اهمیت وجود این بازار پی برده تا از مزایای حاصل از آن بهره مند شده و بتوانند سیاست‌هایی را اتخاذ کنند که منجر به کاهش کربن انتشار یافته در صنعت برق شود.

کربن انتشاریافته در صنعت برق می‌تواند به موضوعی جدی در منطقه‌ی خاورمیانه تبدیل شود. ایران با تولید ۳۸۲.۹ تراوات ساعت برق، پس از عربستان سعودی (۴۲۲.۹ واحد)، دومین تولیدکننده بزرگ برق در خاورمیانه است. در سبد تولید برق ایران، گاز طبیعی با سهم ۸۴.۵٪ غالب است که از میانگین منطقه (۷۰.۳٪) بیشتر است، در حالی که سهم نفت (۷٪)، انرژی هسته‌ای (۱.۷٪) و انرژی‌های تجدیدپذیر (۰.۵٪) کمتر از میانگین خاورمیانه است. اما استفاده از برق آبی (۵.۹٪) در ایران از میانگین منطقه (۱.۹٪) بالاتر است. این وابستگی زیاد به گاز طبیعی ممکن است امنیت انرژی ایران را تهدید کند، و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به پایداری بیشتر کمک کند (بی‌پی، ۲۰۲۴).

شکل (۱) شدت کربن^۴ کشورهای خاورمیانه برای سال ۲۰۲۳ را به میلیارد تن CO₂

^۱. Andrianesis et al.

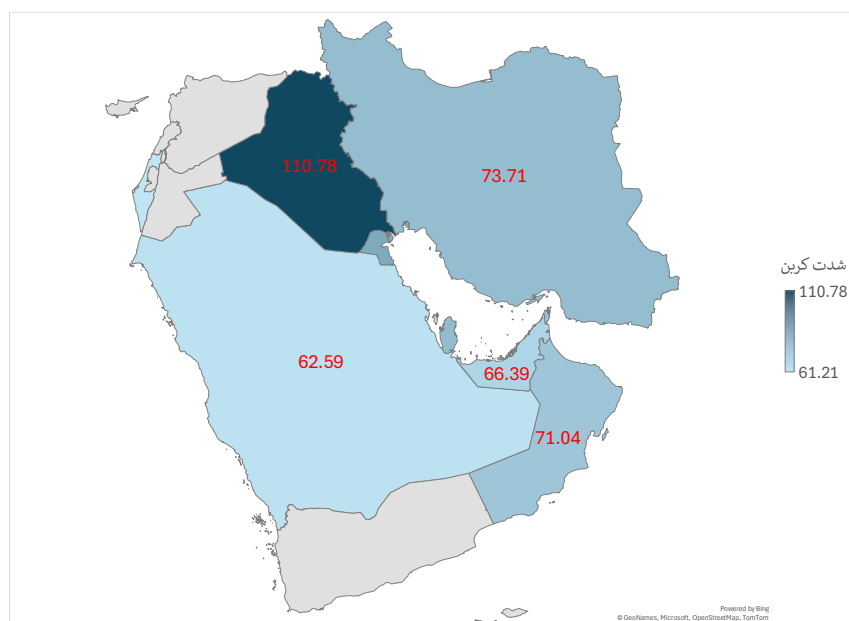
^۲. Guo and Giorgio

^۳. Cludius et al.

^۴. شکل (۱) شدت کربن کشورهای خاورمیانه را با رنگ‌بندی از آبی روشن (شدت کربن پایین) تا آبی تیره (شدت کربن بالا) نشان می‌دهد. محدوده شدت کربن در این منطقه بین ۶۱.۲۱ تا ۱۱۰.۷۸ میلیارد تن CO₂ به ازای هر

به ازای هر اگزاژول نشان می‌دهد.

شکل (۱). شدت کربن کشورهای خاورمیانه (میلیارد تن CO₂ به ازای هر اگزاژول در ۲۰۲۳)



منبع: یافته‌های پژوهش

بنابراین با توجه به مطالب مطرح شده، مطالعه‌ی حاضر با هدف شبیه‌سازی تحلیل پویای تعامل جفت بازارهای کربن و برق در ایران و نحوه تأثیر شیوه‌های قیمت‌گذاری انتشار کربن بر پیاده سازی تکنولوژی کاهش انتشار دی اکسید کربن و عملکرد شرکت‌ها در ساخت‌وساز نیروگاه‌های و تولید برق در زمینه اصلاح توسعه بازار برق شکل گرفته است. در پژوهش حاضر سناریوهایی به منظور بررسی دقیق ارتباطات میان این

اگزاژول است. این اختلاف قابل توجه، تفاوت در منابع انرژی، فناوری‌های مورد استفاده، و سیاست‌های مدیریت انرژی در کشورهای منطقه را نشان می‌دهد. عراق با شدت کربن ۱۱۰.۷۸، نیاز به اصلاحات جدی در بخش انرژی دارد، در حالی که عربستان سعودی با شدت کربن ۶۲.۵۹ می‌تواند الگویی برای کاهش انتشارات باشد. ایران با ۷۳.۷۱ در میانه قرار دارد و با سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و بهبود فناوری‌ها می‌تواند وضعیت خود را بهبود بخشد.

دوبازار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ساختار مقاله به این صورت است که پس از مقدمه به بررسی ادبیات تجربی در زمینه مورد مطالعه پرداخته شده است. در بخش سوم روش انجام پژوهش و ساخت الگوی دینامیک سیستم، تشریح ترکیب الگو و طراحی سناریوهای شبیه‌سازی الگو ارائه شده است؛ در بخش چهارم شبیه‌سازی و سناریوها آورده شده‌اند و نهایتاً در بخش آخر نتیجه‌گیری و پیامدهای سیاست مرتبط به آن ارائه شده است.

۲. پیشینه پژوهش

در این قسمت به بررسی مطالعات داخلی و خارجی انجام شده در حوزه‌ی مورد بررسی پژوهش پرداخته شده‌است که می‌تواند روشن‌کننده‌ی مسیر پژوهش فعلی باشد.

۲-۱. مطالعات انجام شده داخلی

با بررسی منابع داخلی صورت گرفته روشن می‌شود که تاکنون پژوهشی که به شبیه‌سازی تعامل جفت بازارهای کربن و برق پرداخته باشد صورت نگرفته است که این موضوع نشان‌دهنده نوآوری، تازگی و جدید بودن مطالعه‌ی حاضر در میان مطالعات داخلی است؛ اما با این حال مطالعات انجام شده اندکی وجود دارد که به صورت غیر مستقیم اشاراتی به موضوع مورد بررسی مطالعه‌ی حاضر داشته که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته و می‌تواند کمک‌کننده و راهنمای مطالعه‌ی حاضر باشد.

محقر و نجف‌زاده (۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان الگوی مبتنی بر پویایی سیستم برای توسعه‌ی ظرفیت تولید برق در کشور و برای پاسخگویی به چالش‌های سمت عرضه سعی شده تا با ارائه‌ی یک الگو بر مبنای سیستم‌های پویا به این مسئله پاسخ داده شود. برای الگو ارائه شده در این مطالعه افق ۴۰ ساله‌ی آینده در نظر گرفته شده است تا همه تغییرات و پویایی حاکم بر سیستم واقعی بتواند خود را نشان دهد. مقایسه‌ی روندهای تقاضای برق، میزان عرضه سالانه برق به بخش تقاضا و انرژی الکتریکی تولیدی سالیانه

و انطباق زیادی که بین آنها وجود دارد نشان دهنده‌ی سازگاری الگو با شرایط واقعی است. همچنین مقایسه‌ی میان روند توسعه‌ی موجود و روند توسعه مبتنی بر الگو نشان دهنده آن است که می‌توان با استفاده از الگو مبتنی بر پویایی سیستم ارائه شده به صرفه جویی اقتصادی در تولید برق دست یافت.

غفوری و محتوی‌پور (۱۴۰۰) در مقاله‌ای تحت عنوان استفاده از روش الگوسازی پویا شناسی سیستم‌ها برای شناخت تأثیر سیاست‌های کاهش انتشار کربن بر رقابت در بازار برق به این مهم می‌پردازد در الگو ارائه شده در این مطالعه ویژگی رفتار محوری و تأثیرات متقابل اقدامات بازیگران بازار برق بر روی یکدیگر به طور مناسب بازتاب داده شده است همچنین اعتقاد بازیگران از سیگنال بازخوردی قیمت برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه قرار دادن پیشنهادهای فروش مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصله از اعمال سناریوی حضور و عدم حضور سیاست‌های کاهش کربن برای یک سال نشان می‌دهد مقادیر انرژی عرضه شده در این دو سناریو، با تقاضاهای یکسان تفاوت زیادی دارد. که این اختلاف با مالیات کربن پدیدار گشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی دوم عرضه انرژی توانسته خود را به مصرف آن نزدیک‌تر کند بدین معنی که در حضور سیاست کاهش کربن در ابتدا تولید برق کم شده و باعث افزایش قیمت برق می‌شود. بنابراین می‌توان گفت حضور این سیاست و حتی سیاست‌های پیچیده‌تر می‌تواند موثر بوده و در تولید و تعیین قیمت‌ها نقش مهمی را ایفا نماید.

مرادیان دقیق (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای با عنوان آینده پژوهی بازار کربن در ایران با بررسی بازار کربن اتحادیه اروپا و با استفاده از محرک‌های قیمت کربن به همراه معرفی روش جداسازی دو قسمتی متغیرها به بررسی این موضوع می‌پردازد. این مطالعه با عنوان کردن این موضوع که کشورهای زیادی در حال بررسی بازار کربن جهت راه اندازی آن هستند به آینده پژوهی بازار کربن در این کشور می‌پردازد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد قیمت کربن مرتبط با قیمت‌های برق و سهام شرکت‌های نفت و گاز است

به همین ترتیب در ایران بعد از قیمت‌های برق و سهام شرکت‌های گاز و نفت قیمت گاز طبیعی و نفت مهم‌ترین محرک‌های قیمت کربن برآورده می‌شود. همچنین این پژوهش در پایان جهت ایجاد بازار کربن کارا در ایران، توجه به اثر درآمدی و اثر جایگزینی محرک‌های قیمت کربن و امتیازات جهت استفاده از منابع تجدید پذیر را لازم می‌داند. نجاتی و همکاران (۱۴۰۱) در طی پژوهشی با تاکید بر افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای که باعث نگرانی‌های زیادی برای بسیاری از جوامع و دوستداران محیط زیست شده است؛ با استفاده از متغیرها و شاخص‌های مهم اقتصادی و مجموعه داده‌های سری زمانی سال ۱۹۷۰-۲۰۱۸ که آن‌ها را به ۵ گروه مجزا به همراه یک گروه کل داده‌ها، تقسیم و به پیش بینی میزان انتشار CO₂ در ایران پرداخته شد. برای این موضوع از الگوهای یادگیری عمیق زیرمجموعه یادگیری ماشین استفاده شده است. نتایج به دست آمده برای هر ۶ گروه مورد آزمایش نشان می‌دهد که مقدار انتشار CO₂ در ایران برای سالیان آینده یک روند صعودی را در پی خواهد داشت و برای سال ۲۰۲۳ مقدار انتشار CO₂ به محدوده ۸۵۰ الی ۹۰۰ میلیون تن خواهد رسید که می‌تواند یک فاجعه زیست‌محیطی و خطری برای انسان‌ها باشد.

راسخی و قنبرتبار (۱۴۰۴) به بررسی اثر ابعاد سه گانه جهانی شدن بر جداسازی رشد اقتصادی از مصرف انرژی و آلودگی پرداختند. پژوهش حاضر به بررسی اثر ابعاد سه گانه جهانی شدن (اقتصادی، اجتماعی و سیاسی) بر جداسازی رشد اقتصادی از مصرف انرژی و آلودگی در ۹۴ کشور منتخب طی دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۰۰ می‌پردازد. با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم یافته و رویکرد تاپیو، بازه جداسازی برای کشورهای منتخب مشخص شده و اثرات مولفه‌های جهانی شدن بر این بازه آزمون شده است. نتایج نشان می‌دهد که جهانی شدن در هر سه بعد اقتصادی، اجتماعی و سیاسی موجب بهبود جداسازی رشد اقتصادی از مصرف انرژی می‌شود، اما جهانی شدن اجتماعی نتوانسته است موجب جداسازی رشد اقتصادی از انتشار دی‌اکسید کربن شود.

این یافته می‌تواند ناشی از تسلط روحیه مصرف‌گرایی، الگوی مصرفی انرژی بر و عدم توجه کامل به چالش‌های جهانی محیط زیست باشد. در نهایت، توصیه می‌شود که سیاستگذاران به ابعاد مختلف جهانی شدن با محوریت بعد اقتصادی، اصلاحات اجتماعی و ارتقای تکنولوژی توجه ویژه‌ای داشته باشند تا به جداسازی نسبی رشد اقتصادی از مصرف انرژی و آلودگی دست یابند.

۲-۲. مطالعات انجام شده خارجی

برون و همکاران^۱ (۲۰۱۸) به قیمت‌گذاری کربن با یارانه مبتنی بر تولید تحت رقابت ناقص در مورد بازار تجدید ساختار شده برق آلبرتا پرداختند. یک سیاست قیمت‌گذاری کربن دو مرحله در بازار برق آلبرتا در نظر گرفتند. در مرحله اول، قیمت کربن با یارانه مبتنی بر تولید که براساس کسری از شدت انتشار در سطح تاسیسات است، دو برابر می‌شود. در مرحله دوم، قیمت کربن ثابت می‌ماند، در حالی که یارانه تولید تغییر می‌کند. با استفاده از الگوی رقابت انحصاری، اثرات کوتاه مدت دو مرحله بر قیمت برق، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سود شرکت‌ها شبیه‌سازی می‌کنند و متوجه شدند که مکانیسم‌هایی که توسط آن قیمت برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای در پاسخ به قیمت‌گذاری کربن تغییر می‌کند، بسته به این که بازار کاملاً رقابتی یا انحصاری است، متفاوت است و همچنین نشان می‌دهند که صرف نظر از ساختار بازار، تغییر مبنا یارانه تولید تأثیرات بسیار بزرگ‌تری نسبت به دو برابر شدن قیمت کربن دارد.

بروورز و شوبن^۲ (۲۰۱۸) بررسی تأثیر هزینه کربن بر ارتباط بین انتشار کربن و عملکرد مالی شرکت در چارچوب طرح مبادله انتشار اتحادیه اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که کنترل رابطه درون‌زا بین انتشار کربن و عملکرد مالی نشان می‌دهد که عملکرد انتشار کربن همیشه جواب نمی‌دهد. در واقع، سطوح پایین‌تر انتشار کربن تنها

^۱. Braun et al.

^۲. Bruser and Chopin

زمانی پاداش می‌گیرد که شرکت‌ها نتوانند هزینه‌های کربن را به دلیل ویژگی‌های صنعت یا به دلیل کارایی خاص کربن به مصرف‌کنندگان منتقل کنند. نتایج این پژوهش با این دیدگاه مطابقت دارد. بنابراین از آنجایی که آلودگی با افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط است، این تأثیر منفی آلودگی بر عملکرد مالی برای «انتقال هزینه کربن» کاهش می‌یابد.

بست و همکاران^۱ (۲۰۲۰) به اثربخشی قیمت‌گذاری کربن پرداختند در این مقاله، تخمین‌هایی از سهم قیمت‌گذاری کربن در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ملی (CO₂) ناشی از احتراق سوخت، با استفاده از چندین رویکرد الگوسازی اقتصادسنجی که سایر سیاست‌های کلیدی و عوامل ساختاری مرتبط با انتشار را کنترل می‌کنند، ارائه می‌کنند. این مطالعه از داده‌های ۱۴۲ کشور در بیست سال استفاده شده است نتایج مطالعه نشان می‌دهد که متوسط نرخ رشد سالانه انتشار CO₂ ناشی از احتراق سوخت در کشورهایی که قیمت‌گذاری کربن داشته‌اند در مقایسه با کشورهای بدون آن، حدود ۲ واحد درصد کمتر بوده است. یک یورو اضافی به ازای هر تن CO₂ در قیمت کربن با کاهش نرخ رشد سالانه بعدی تقریباً ۰.۳ واحد درصد همراه است که همه آنها برابر هستند. در حالی که کنترل کامل همه تأثیرات مرتبط بر رشد انتشار غیرممکن است، تخمین‌ها نشان می‌دهد که مسیر انتشار کشورهای دارای و بدون قیمت کربن در طول زمان متفاوت است.

لیو و جین^۲ (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با استفاد از اطلاعات موجود و با رویکرد اقتصاد سنجی و مجموعه داده‌های سری زمانی به تعلّمات بین قیمت‌های بازار برق، سوخت فسیلی و کربن در گواندونگ چین می‌پردازد. نتایج نشان دهنده‌ی ارتباطی عمیق و طولانی مدت بین قیمت‌های بازار کربن و زغال سنگ، گازوئیل و گاز طبیعی را نشان می‌دهد اما در مقابل، قیمت سوخت‌های فسیلی هیچ تأثیری بر پویایی کوتاه مدت

^۱. Best et al.

^۲. Liu and Jin

قیمت کربن ندارد، قیمت برق در بازار آتی ماهانه به طور قابل توجهی با اولین تفاوت‌های قیمت زغال سنگ مرتبط است اما هیچ رابطه‌ی معنی داری با اولین تفاوت قیمت کربن، گازوئیل و گاز طبیعی ندارد. همچنین در نهایت پیامدهای خاصی برای اصلاحات در حال انجام بخش برق و توسعه‌ی بازار مانند پیشرفت در آزاد سازی صنعت برق و اعمال معیارهای ساده تر و سخت گیرانه تری را برای تخصیص سهمیه انتشار برق ارائه می‌دهد.

ما و کو^۱ (۲۰۲۱) به دنبال پاسخ به این سوال بودند که " آیا قیمت‌گذاری داخلی کربن می‌تواند عملکرد مالی را افزایش دهد؟". قیمت‌گذاری داخلی کربن یک مکانیسم خود تنظیمی ابتکاری است که در آن شرکت‌ها قیمت کربن خود را در عملیات تجاری برای کاهش تغییرات آب و هوا و دستیابی به توسعه پایدار تعیین می‌کنند. این پژوهش شواهد نظری و تجربی جدیدی در مورد این که چگونه قیمت کربن داخلی به عنوان یک جزء هزینه می‌تواند به رشد سودآوری کمک کند، ارائه می‌دهد. آن‌ها مجموعه داده پانلی از ۱۳۲ شرکت چند ملیتی را در سراسر اروپا، آمریکای شمالی و آسیا با ردیابی استفاده آن‌ها از قیمت‌گذاری داخلی کربن از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ بر اساس سوابق آن‌ها در پروژه افشای کربن ایجاد می‌کنند. برای درون‌زایی، از روش تطبیق امتیاز در یک الگوی اثرات ثابت استفاده می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از قیمت‌گذاری کربن داخلی می‌تواند بازده دارایی‌ها را ۱.۱ درصد افزایش دهد. شرکت‌هایی که قیمت‌های کربن داخلی دارند، احتمالاً بهای تمام شده کالاهای فروخته شده را برای بهبود بازده دارایی‌ها کاهش می‌دهند. آن‌ها نشان دادند که قیمت‌گذاری داخلی کربن به عنوان خودتنظیمی محیطی می‌تواند سودآوری را از طریق کاهش هزینه ایجاد کند. این پژوهش همچنین به پتانسیل قیمت‌گذاری داخلی داوطلبانه کربن برای تکمیل مقررات قیمت‌گذاری کربن کنترلی اشاره می‌کند.

^۱. Ma and Ko

وانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ی صورت گرفته به بررسی و تجزیه و تحلیل رابطه‌ی جفت بازار کربن و برق در کشور چین با استفاده از یک الگوی رگرسیونی آستانه‌ای می‌پردازد و علاوه بر آن یک الگوی سیستم دینامیک را بر اساس بازارهای برق و کربن ایجاد می‌کند یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بازار برق و کربن به طور مستقل نسبت به یکدیگر عمل کرده اما به هم مرتبط هستند همچنین از آنجا که مکانسیم شکل‌گیری قیمت برق عمدتاً توسط دولت تنظیم می‌شود قیمت کربن از زمان بهره‌برداری از سیستم ملی مبادله کربن تأثیر منفی قابل توجهی بر قیمت برق دارد و هیچ اثر آشکاری بین هزینه CO_2 و قیمت برق وجود ندارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد مکانسیم مزایده و انتقال مستقیم هزینه‌ی کربن می‌تواند به ۲۰٪ طور موثر هزینه CO_2 را در قیمت برق منعکس کند و در بازه زمانی بلند مدت، معرفی حراج در بازار کربن و اصلاح شکل‌گیری قیمت برق در بخش برق از پتانسیل کاهش انتشار کربن بهره‌می‌برد.

ژائو و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به طور مبتکرانه به مطالعه‌ای عمیق در مورد اثر سرریز بین بازار کربن و بازار برق می‌پردازد و نقش واسطه‌ای بازار انرژی در هم‌افزایی کربن و الکتریسیته را با استفاده از الگوهای خودرگرسیونی برداری^۲ (VAR)، الگوی BEKK^۳ و الگوی GARCH^۴ مورد بررسی قرار می‌دهد. در نهایت رابطه‌ی بین بازارهای نفت، گاز طبیعی، کربن و برق تحلیل می‌شود نتایج نشان می‌دهد که تأثیر بین بازار کربن و بازار برق بیشتر از انتقال نوسانات قیمت تا تأثیر مستقیم بازده است. همچنین بازارهای انرژی نقش پلی را در ترویج جفت بازارهای کربن و برق ایفا می‌کنند و نتایج این گونه عنوان می‌کنند که تقویت پیشگیری از خطرات خارجی و بهبود سیستم سیاست‌گذاری به دلیل عملکرد شفاف و پایدار بازار ضروری است.

^۱. Zhao et al.

^۲. the vector autoregressive (VAR)

^۳. Baba–Engle–Kraft–Kroner (BEKK)

^۴. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH)

لو و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در مقاله‌ای به تجزیه و تحلیل وضعیت توسعه بازار برق پکن-تیانجین-هبی^۲ پرداخته می‌شود و مکانیسم جفت بازار کربن و برق برای ایجاد یک الگوی هم افزایی از بازار کربن و بازار برق پکن-تیانجین-هبی براساس پویایی سیستم ترکیب می‌شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهد بازار برق پکن - تیانجین - هبی با شدت مصرف انرژی و نسبت بالایی از انتشار کربن همراه است و جفت شدن بازار کربن و بازار برق، صنعت برق را مجبور به کاهش انتشار کربن از طریق انتقال موثر هزینه‌های کربن به قیمت برق می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد قیمت کربن در چارچوب سناریوی سیاست فعلی روند صعودی را نشان می‌دهد که می‌تواند نقش سیگنال قیمت را در آینده ایفا کند همچنین در قسمت آخر عنوان می‌شود که پیشرفت فنی نیروگاه‌های حرارتی، معرفی مکانیزم حراج، افزایش تنظیمات اولیه قیمت کربن و انتقال مستقیم هزینه‌های کربن، همه عواملی هستند که اثر بخشی ابزارهای سیاست مبادله کربن را در بازار برق پکن - تیانجین - هبی را ارتقا می‌دهند.

دو و همکاران^۳ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای با استفاده از الگوی دینامیک سیستم‌ها به بررسی تأثیر سیاست‌های زیست‌محیطی بر کاهش انتشار کربن در زنجیره تأمین ساختمان‌های پیش‌ساخته^۴ (PBSC) پرداخته و نشان داده است که منافع اقتصادی کم‌کربن تحت سیاست‌های کنونی ضعیف هستند. نتایج حاکی از آن است که افزایش یارانه‌ها، نسبت سرمایه‌گذاری شرکت‌ها و قیمت کربن می‌توانند منافع اقتصادی را بهبود دهند، در حالی که کاهش سهم رایگان تأثیر منفی دارد. یارانه‌های دولتی به‌عنوان عامل کلیدی در کاهش انتشار کربن شناسایی شده‌اند. همچنین، ترکیب طرح مبادله انتشار (ETS)، یارانه‌های دولتی و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کم‌کربن به‌عنوان راهکاری اقتصادی و سازگار با محیط زیست معرفی شده است. این پژوهش راهنمایی‌های

^۱. Lu et al.

^۲. Beijing-Tianjin-Hebei

^۳. Du et al.

^۴. Prefabricated Building Supply Chain

کاربردی برای شرکت‌ها و سیاست‌گذاران در جهت بهبود پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه می‌دهد.

ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۴) با عنوان کردن این موضوع که انتشار کربن صنعت برق به عنوان یک عامل اصلی در انتشار کلی کربن دی اکسید کربن و سیستم انرژی برجسته است به بررسی چالش‌های موجود ناشی از پیوند بازارهای برق و کربن پرداخته و وضعیت فعلی بازارهای مبادله عمده انتشار کربن را در سطح جهانی روشن می‌سازد و همچنین در ادامه به بررسی جامعی در سه سطح شرکت کنندگان در بازار، الگوهای عملیاتی و مکانیسم بازار می‌پردازد در ادامه مطالعه بعد از مشخص شدن چالش‌های موجود در پیوند این دو بازار این مطالعه با استفاده از دو الگوی مختلف آماری و الگوهای بهینه سازی به پیچیدگی‌های این دو بازار می‌پردازد و در نهایت این مقاله نقشه راه آینده و چشم اندازهای تحقیقاتی در رابطه با این جفت بازار را ارائه می‌دهد.

ژو و ژو^۲ (۲۰۲۴) این مقاله به بررسی تأثیر محدودیت‌های سهمیه انتشار کربن بر قیمت کربن در چارچوب مبادله سهمیه تولید برق در چین می‌پردازد. با توجه به افزایش قیمت سهمیه‌ها و سخت‌گیرانه‌تر شدن محدودیت‌ها، هزینه‌های عملیاتی تولیدکنندگان برق، به‌ویژه نیروگاه‌های حرارتی، افزایش یافته است. مطالعه با الگوسازی یک زنجیره تأمین شامل تولیدکنندگان برق، پلتفرم معاملاتی و خرده‌فروش، سه سناریو را تحلیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که مبادله سهمیه تولید برق می‌تواند به کاهش انتشار کربن و افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر کمک کند و سودآوری برخی تولیدکنندگان را افزایش دهد. همچنین، با تنظیم مناسب ضریب تخصیص سهمیه‌ها، هزینه کربن به شکل موثرتری در قیمت برق منعکس می‌شود.

با بررسی مطالعات صورت گرفته در این قسمت و همچنین همسو بودن مطالعات یو

^۱. Zhang et al.

^۲. Xu and Xu

و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، زو و ژونگ^۲ (۲۰۲۲) و شی و همکاران^۳ (۲۰۲۲)، می‌توان با صراحت این گونه عنوان کرد که مبادله انتشار کربن، و قیمت‌گذاری آن وسیله‌ای موثر برای دستیابی به کاهش انتشار کربن و توسعه پایدار هستند که می‌تواند مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرد. بنابراین با بیان پیشینه پژوهش حاضر، در قسمت سوم به روش‌شناسی پژوهش، طراحی و تحلیل چارچوب الگو پرداخته می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه برای تحلیل داده‌ها از تکنیک پویای سیستم استفاده شد که بر این اساس طراحی بازار مبادله کربن و تأثیر مکانیزم انتقال هزینه کربن بر قیمت تمام شده برق انجام گردید. نوآوری این پژوهش در تحلیلی پویا از تعامل جفت بازارهای کربن و برق در ایران است

پویایی‌های سیستمی^۴ رویکردی برای درک رفتار غیرخطی سیستم‌های پیچیده در طول زمان با استفاده از حلقه بازخورد است. این روش در سال ۱۹۶۱ توسط فارستر^۵ در کتاب پویایی صنعتی معرفی گردید و به سرعت گسترش یافت. این روش دو تفاوت اساسی با روش‌های آماری در حل مسائل دارد. نخست آنکه برخلاف روش‌های آماری قصد محدود کردن متغیرها را ندارد و کوشش می‌شود تا تمامی عناصر دخیل در رفتار پدیده در یک مرز بسته مورد تحلیل قرار گیرند. همچنین تمامی روابط اثر گذار در نظر گرفته شده و بر حلقه‌های بازخور تاکید می‌شود.

پویایی‌های یک سیستم براساس نمودار علت و معلولی و نمودار حالت و جریان پیاده

^۱. Yu et al.

^۲. Zou and Zhong

^۳. Shi et al.

^۴. System Dynamics

^۵. Forrester

سازی می‌شود. براساس نمودار علی و معلولی تمامی متغیرها و روابط یک سویه و دوسویه آنها طراحی می‌شود. همچنین متغیرهای نهایی با استفاده از حلقه بازخورد به متغیرهای آغازین متصل می‌شود. ویژگی‌های روش پویایی سیستم سبب شده است تا با سایر روش‌های شبیه سازی متفاوت باشد و کاربردهای ویژه ای برای آن پدید آورد که برخی از مهمترین آنها عبارتند از: بررسی نتایج همزمان با تغییر پارامترها، تمرکز و توجه بر ساختار و رفتار سیستم، همچنین فرایند الگوسازی و خود الگو، پتانسیل یادگیری بالایی را در روش پویایی سیستم داراست (هاسرت^۱، ۲۰۰۷).

در این پژوهش محقق با استفاده از روش الگوسازی استرمن^۲ که در شکل (۲) قابل مشاهده است به طراحی الگو بازار برق و کربن پرداخته شده است.



شکل (۲). گام‌های الگوسازی سیستم پویا

منبع: یافته‌های پژوهش

۳-۱. تحلیل چارچوب الگو

الگوی سیستم دینامیک طراحی شده در این مقاله به شبیه‌سازی بازار مبادله انتشار کربن، نیروگاه‌های حرارتی و بازار برق می‌پردازد که هدف آن شناسایی مکانیسم تأثیرات متقابل و پیاده سازی نمودار حلقه‌های بازخورد اصلی سببی^۳ است. در (شکل ۲) این بخش تمامی اجزای الگوی سیستم دینامیک و رابطه متقابل همه جانبه میان آنها

^۱. Hasret

^۲. Sterman Modeling

^۳. Causal Feedback Loops

توضیح داده خواهد شد و اصول مفروضه در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

اولاً الگوی سیستم دینامیک در مطالعه پیش رو فقط تولیدکنندگان برق حرارتی را به عنوان تأمین‌کنندگان برق لحاظ می‌کند؛ که این تولیدکنندگان با حامل‌های انرژی فسیلی مثل گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت به عنوان سوخت، برق را تولید می‌نمایند. بازارهای برق حرارتی و مبادله انتشار کربن دارای تأثیر تعاملی بر توسعه بازار برق از طریق تصمیمات رفتاری همچون مبادله انتشار کربن و معاملات بازار در میان تولیدکنندگان هستند. ثانیاً امروزه با وجود مطالعات و پژوهش‌های انجام شده، قوانین وضع شده و سیاست‌های اتخاذ شده در خصوص انتشار CO_2 توسعه و گسترش یافته است. اما با این حال چالش‌هایی نیز در عمل دیده می‌شود. عمده بازارهای مبادله انتشار کربن برای امتناع از تکانه‌های وارده به شرکت‌ها، در فاز اولیه توسعه تخصیص‌های غیر پرداختی با نسبت بالا را اتخاذ می‌نمایند در عرضه و تقاضای مبادله انتشار کربن، شرکت‌ها باید با توجه به میزان انتشار دی‌اکسید کربن خود، تصمیم به خرید یا فروش این سهمیه بگیرند. اگر یک شرکت انتشار کربن زیادی داشته باشد، باید سهمیه اضافی (انتشار کربن) خریداری کند تا از جریمه جلوگیری کند، در حالی که شرکت‌هایی با انتشار کمتر می‌توانند سهمیه اضافی (انتشار کربن) خود را بفروشند. این فرآیندها منجر به تغییرات در قیمت‌های مبادله انتشار کربن می‌شود.

برای تخصیص غیرپرداختی از شیوه‌های معیار محور و پدربرزگان^۱ استفاده می‌کنند.

^۱. Grandfathering and Benchmark-Based Methods

در بازارهای کربن، مانند سیستم تجارت انتشار اتحادیه اروپا (EU ETS) یا سایر طرح‌های مشابه، هدف اصلی کاهش تدریجی انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق ایجاد سقف مجاز انتشار (Cap) و امکان خرید و فروش مجوزهای انتشار (Trade) است. Grandfathering به عنوان یکی از روش‌های تخصیص اولیه مجوزهای انتشار به کار می‌رود و معمولاً در مراحل اولیه اجرای این سیستم‌ها استفاده می‌شود. در این روش:

۱. تخصیص رایگان مجوزها: شرکت‌های موجود بر اساس میانگین انتشارات تاریخی خود (مثلاً میانگین انتشار CO_2 در یک دوره چندساله (مجوزهای رایگان دریافت می‌کنند. این امر به آن‌ها امکان می‌دهد بدون هزینه

روش پدربزرگان بر اساس مقدار انتشار آلودگی گذشته شرکت‌ها، نسبت انتشار دوره بعدی را نیز از نظر کمیت بیان می‌کند. این مطالعه به بررسی دو روش برای تجارت انتشار کربن، یعنی روش معیار محور و روش پدربزرگان، می‌پردازد. هر دو روش مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش پدربزرگان کارایی بالاتری دارد، اما ممکن است به دلیل نقض شرایط اقتصادی، منجر به تخصیص مازاد شود. در مقابل، روش معیار محور مشکلات کمتری دارد، اما به داده‌های دقیق و پایدار نیاز دارد که به‌دست آوردن آن دشوار و هزینه‌بر است. در این مطالعه، هر دو روش در شبیه‌سازی بازار مبادله انتشار کربن کشور اعمال می‌شوند.

الگوی سیستم دینامیک مطالعه‌ی حاضر دو ویژگی کلی را در بازار برق در نظر می‌گیرد: (۱) قیمت ثابت دولتی برای برق نیروگاه‌های حرارتی، و (۲) قیمت متغیر بازار برق بر اساس عرضه و تقاضا. همچنین، نیروگاه‌ها ملزم به کاهش انتشار کربن هستند و باید برای خرید یا فروش سهمیه انتشار کربن وارد بازار شوند. این فرآیندها باعث ایجاد بازخورد در قیمت و عرضه و تقاضای مبادله انتشار کربن می‌شود. فرض دیگر در این الگو این است

اولیه اضافی به فعالیت خود ادامه دهند.

۲. انتقال تدریجی به قوانین جدید Grandfathering: اغلب به صورت موقت یا با محدودیت زمانی اعمال می‌شود تا شرکت‌ها فرصت تطبیق با مقررات جدید را داشته باشند. برای مثال، ممکن است پس از چند سال، تخصیص رایگان کاهش یابد و شرکت‌ها ملزم به خرید مجوزها از بازار شوند.

۳. حفظ رقابت‌پذیری: این روش به ویژه برای صنایع انرژی‌بر (مانند فولاد، سیمان یا نیروگاه‌ها) که در معرض رقابت جهانی هستند، استفاده می‌شود تا از تحمیل هزینه‌های ناگهانی جلوگیری کند و خطر انتقال تولید به کشورهای با قوانین زیست‌محیطی ضعیف‌تر (Carbon Leakage) کاهش یابد.

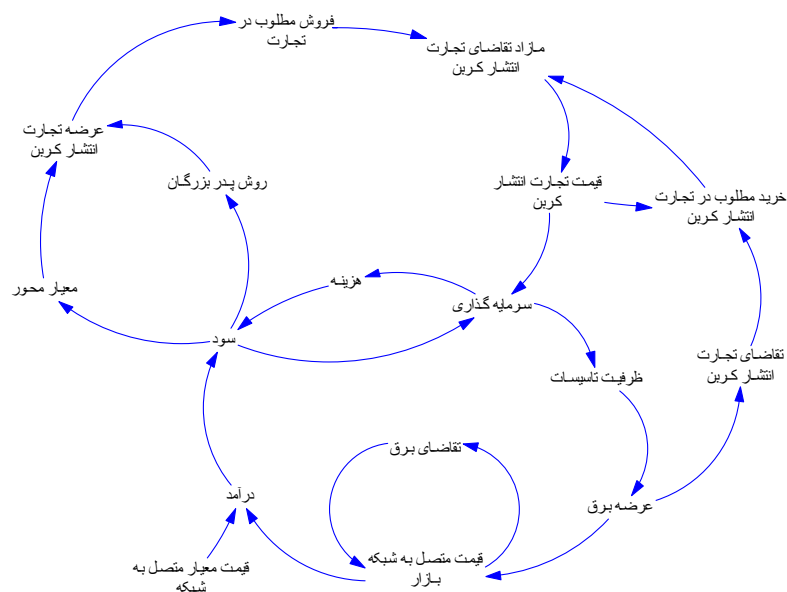
جایگزین‌های Grandfathering

۱. تخصیص مبتنی بر معیارها (Benchmarking): در این روش، مجوزها بر اساس بهترین عملکرد صنعت یا استانداردهای کارایی تخصیص می‌یابد، که انگیزه نوآوری را افزایش می‌دهد.

۲. حراج (Auctioning): فروش مجوزها از طریق حراج، رقابت را افزایش می‌دهد و درآمد دولت را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز فراهم می‌کند.

۳. ترکیب روش‌ها: بسیاری از سیستم‌های ETS از ترکیبی از Grandfathering، Benchmarking و حراج استفاده می‌کنند تا تعادل بین عدالت، کارایی و پذیرش ایجاد شود (چی و چنگ، ۲۰۱۸).

که اختلاف بین درآمد و هزینه برابر با سود نیروگاه‌هاست. نیروگاه‌ها برای افزایش سود خود از سه روش استفاده می‌کنند: (۱) سرمایه‌گذاری در تکنولوژی کاهش انتشار کربن، (۲) افزایش تعداد نیروگاه‌ها برای تولید بیشتر برق، و (۳) کاهش هزینه‌های برق. همچنین، تخصیص سهمیه‌های انتشار کربن به‌عنوان یک چالش بزرگ مطرح است که باید عوامل مختلفی از جمله کاهش کربن و توسعه اجتماعی-اقتصادی در نظر گرفته شود.



شکل (۳). نمودار حلقه‌های بازخورد اصلی سببی

منبع: یافته‌های پژوهش

۳-۲. طراحی الگو

در خصوص طراحی الگو و مشخص نمودن مرزهای سیستم فرض‌های دیگری نیز مورد توجه قرار می‌گیرند همانطور که اشاره شد هدف از ساخت الگوی سیستم دینامیک در این مطالعه شبیه‌سازی تأثیر قیمت کربن بر قیمت برق متصل به شبکه است و در

راستای ترکیب تحقیقات تئوری و الگو عملی و اطمینان از معقولیت و اعتبار الگوی سیستم دینامیک، قبل از ساخت و ایجاد الگو ۴ فرض اساسی نیز در نظر گرفته می‌شود. اولین فرض این است که سیستم ملی مبادله انتشار (مفروض در این پژوهش) در حال حاضر فقط قسمتی از نیروگاه‌های شامل کنترل انتشار در تولید برق می‌شود؛ از این رو، حوزه برق تنها مربوط به نیروگاه‌های تولید برق حرارتی است. فرض دوم مبادله بازار کربن تنها در بازار برق صورت می‌گیرد و دو فرض دیگر نیز به ترتیب معین شدن قیمت برق طبق عرضه و تقاضا و دیگری سهمیه اولیه مقدار انتشار کربن در ایران در فاز اولیه سیستم مبادله انتشار به صورت دارایی اولیه^۱ توزیع می‌گردد و مکانیسم مزایده نیز در تنظیم سناریو معرفی می‌شود.

۳-۳. رابطه حلقه علی بازارهای کربن و برق^۲

برای ساخت نمودار حلقه سببی از نرم افزار Vensim PLE 7.3.5 استفاده می‌گردد؛ که به زیرسیستم‌های بازار کربن و بازار برق تقسیم‌بندی می‌شود که متشکل از پنج حلقه بازخورد منفی همچون حلقه تعادل عرضه و تقاضا، حلقه تولید برق مربوط به خریداران سهمیه انتشار کشور ایران^۳، حلقه مبادله خریداران سهمیه انتشار کشور ایران، حلقه

^۱. Endowment

^۲. بازار مبادله انتشار کربن: طرح و نقشه ساخت و ساز بازار ملی مبادله انتشار کربن (صنعت تولید برق) طبق اقدامات صورت گرفته در راستای مدیریت مبادله انتشار کربن (در اجرای آزمایشی) و مطالعات پیشین انجام شده در رابطه با اتخاذ ساختار سببی بازار مبادله انتشار کربن، حلقه سببی بازار مبادله انتشار کربن و عملکرد آن ایجاد شده است. تولید ناخالص داخلی، میزان کربن و صنعت تولید برق با هم نسبتی را مشخص می‌کنند که تعیین کننده بیشینه مقدار ناخالص مبادله انتشار کربن است؛ که این نسبت نیز متأثر از هر دو روش تخصیص یعنی روش پدربزرگان و معیار محور است. حجم فروش و خرید مورد نظر (مطلوب) در مبادله انتشار کربن طبق قیمت مبادله انتشار کربن و مقادیر مبادله انتشار کربن نیز بوسیله فروشندگان و خریداران تعیین می‌گردد. در مواقع بالاتر بودن قیمت مبادله انتشار کربن، با انتشار کمتر کربن شرکت‌ها قادر به کسب سود زیادتری خواهند بود. در نیروگاهی با توسعه مثبتی در راستای تکنولوژی کاهش انتشار کربن، میزان معامله در مبادله انتشار کربن و در نهایت میزان کسب درآمد بیشتر خواهد بود. در حالت برعکس نیز، برای کارخانه‌ای که توسعه غیرفعالی در راستای تکنولوژی کاهش انتشار کربن دارد، میزان هزینه خرید مبادله انتشار کربن به دلیل شدیدتر بودن محدودیت انتشار بیشتر خواهد بود. طبق نظریه عرضه و تقاضا، در صورت بیشتر بودن از عرضه، قیمت مبادله انتشار کربن افزایش خواهد

تولید برق مربوط به فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران^۱ و حلقه مبادله مربوط به فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران است. الگوی سیستم دینامیک مربوط به تعامل میان بازار کربن و برق طبق رابطه سببی میان متغیرهای الگوی بازارهای کربن و برق ایجاد می‌شود. قسمت بالای شکل (۴) مربوط به بازار کربن و بخش پایینی آن هم مربوط به بازار برق است. مکانیسم عملکرد هر دو بازار شبیه‌سازی شده برای پیش‌بینی قیمت‌های کربن، برق و ساختار منابع تأمین برق از طریق این شکل صورت می‌گیرد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین برای درک بهتر رابطه ی جفت بازار کربن و برق می‌توان به شکل (۱) توجه کرد.

با تعیین فرضیه‌های دینامیکی با استفاده از روابط تأثیرگذاری و تأثیرپذیری نمودار علی معلولی مسئله مورد بررسی، مطابق با شکل (۴) رسم گردید.

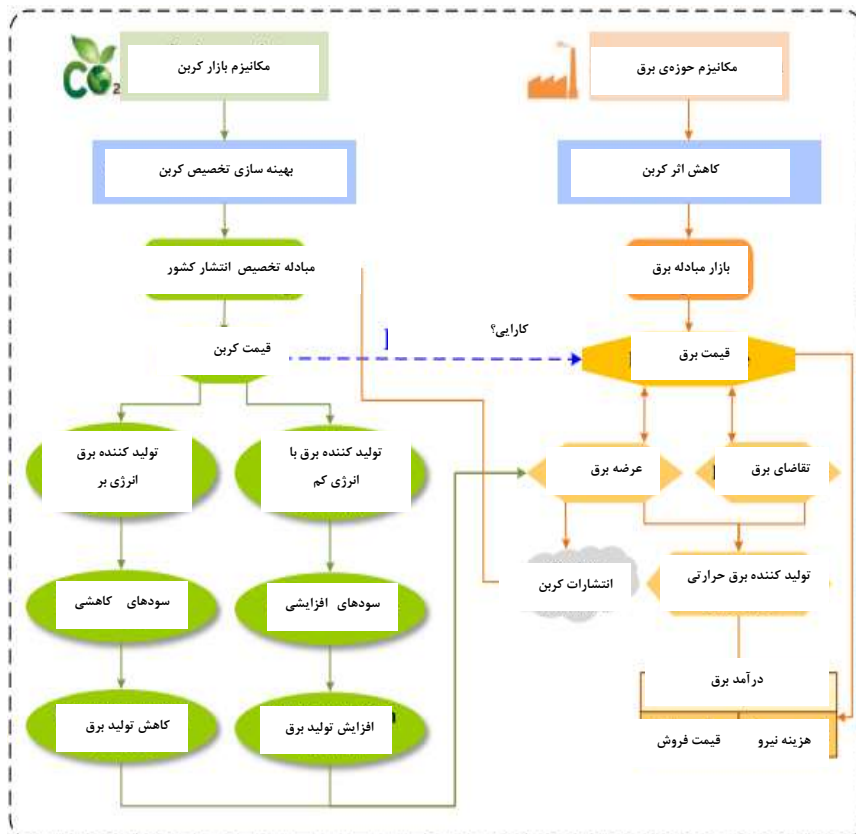
پس از رسم نمودار علت و معلولی، با شناسایی متغیرهای حالت، جریان، کمکی و حلقه‌های مثبت و منفی نمودار جریان مطابق شکل (۵)، (۶)، (۷) و (۸) رسم شد. متغیرهای اصلی حالت این الگو عبارتند از: قیمت کربن، قیمت برق، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAS، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAB، ساخت تاسیسات برق CEAS حرارتی، ساخت تاسیسات برق CEAB حرارتی، اعمال CEA توسط خریداران و اعمال CEA توسط فروشندگان هستند. همچنین اجزای هر یک از پنج حلقه مورد بررسی در نمودار حلقوی علی و معلولی شکل (۵)، در جدول (۱) مورد تجزیه قرار می‌گیرد و در ادامه در نمودارهای حلقوی جداگانه ارتباط متغیرهای درون هر چرخه

یافت که باعث کاهش تقاضا در دستیابی به تعادل دینامیکی (پویا) خواهد شد؛ برای حالت بیشتر بودن عرضه نیز شرایط مشابهی وجود دارد. برای تشریح مناسب این شرایط، الگوی معرفی شده در این بخش تقاضای مازاد و تغییر قیمت در مبادله انتشار کربن برابر با قیمت مبادله انتشار کربن را ارائه می‌کند. متفاوت بودن مکانیسم‌های تخصیص تأثیرات متفاوتی بر بازار برق، قیمت کالا، عرضه برق، قیمت مبادله انتشار کربن و تولید ناخالص داخلی خواهد داشت. در این مقاله سهمیه‌های تخصیصی غیر پرداختی متفاوتی در راستای ارزیابی نحوه تأثیر بازار مبادله انتشار کربن بر متغیرهای دیگر معرفی شده است.

^۳. Iran Emission Allowance Buyer's (CEAB)

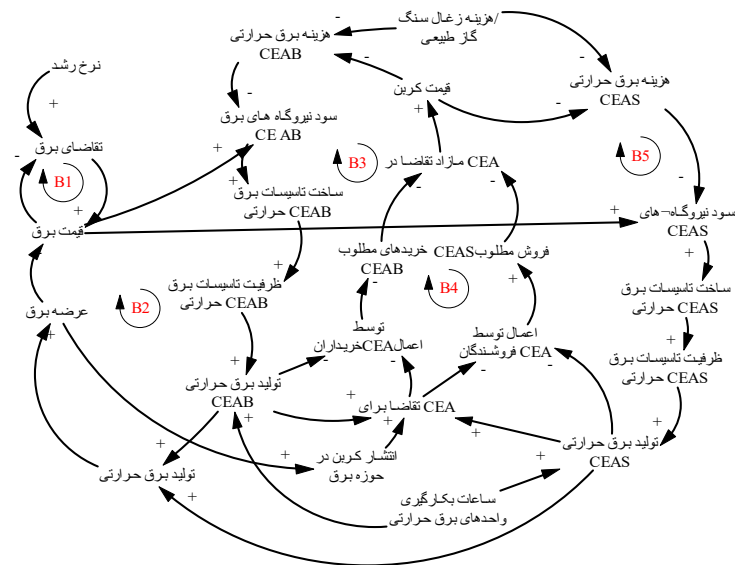
^۱. Iran Emission Allowance Seller's (CEAS)

مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۴). رابطه و اجزای جفت بازار کربن و برق

منبع: وانگ و همکاران (۲۰۲۱)



شکل (۵). نمودار حلقوی علی و معلولی

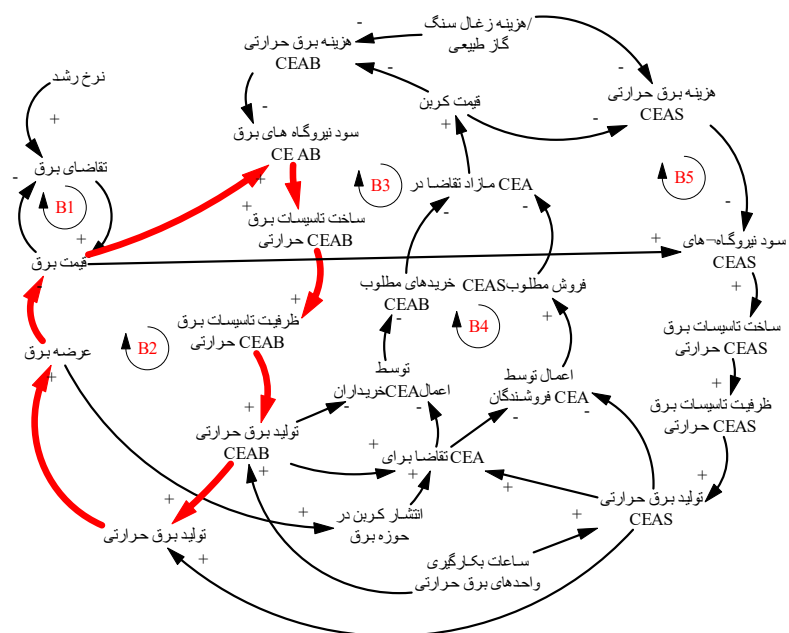
منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۱). حلقه‌های نمودار علی معلولی

نام حلقه	متغیرها
B1 حلقه تعادل عرضه و تقاضا	تقاضای برق، قیمت برق
B2 حلقه تولید برق مربوط به خریداران سهمیه انتشار کشور ایران	تولید برق، عرضه برق، قیمت برق، تولید برق حرارتی CEAB، سود نیروگاه‌های برق حرارتی CEAB، ساخت تاسیسات برق حرارتی CEAB، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAB
B3 حلقه مبادله خریداران سهمیه انتشار کشور ایران	هزینه برق حرارتی CEAB، سود نیروگاه‌های برق CEAB، ساخت تاسیسات برق حرارتی CEAB، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAB، تولید برق حرارتی CEAB، اعمال CEAs توسط خریداران، خرید مطلوب CEAs، مازاد تقاضا CEAs، قیمت کربن
B4 حلقه تولید برق فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران	قیمت برق، سود نیروگاه‌های برق حرارتی CEAS، ساخت تاسیسات برق حرارتی CEAS، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAS، تولید برق حرارتی CEAS، تولید برق حرارتی، عرضه برق
B5 حلقه مبادله فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران	هزینه برق حرارتی CEAS، سود نیروگاه‌های برق حرارتی CEAS، ساخت تاسیسات برق حرارتی CEAS، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی CEAS، تولید برق حرارتی CEAS، اعمال CEAs توسط فروشندگان، فروش مطلوب CEAs، مازاد تقاضا CEAs، قیمت کربن

منبع: یافته‌های پژوهش

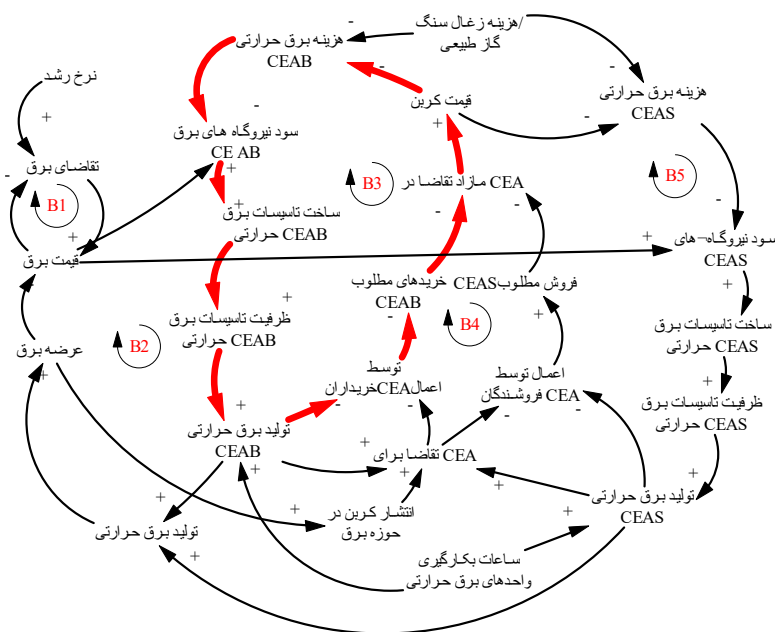
همان گونه که روشن است حلقه B1 که حلقه تعادل عرضه و تقاضا نام دارد، طبق نظریه عرضه و تقاضا در صورت بیشتر بودن تقاضای برق، قیمت برق افزایش می یابد و افزایش قیمت برق باعث کاهش تقاضای برق می شود. حلقه B2 حلقه تولید برق مربوط به خریداران سهمیه انتشار کشور ایران است و به واسطه آنالیز شاخص های عرضه و تقاضا مشخص می شود که میان تولید برق حرارتی و قیمت برق رابطه مثبت معناداری برقرار است و قیمت برق بیشتر متأثر از عرضه است. افزایش قیمت برق موجب افزایش سود و افزایش سود روی ساخت تاسیسات حرارتی تأثیر مثبت دارد که افزایش ساخت تاسیسات، ظرفیت تاسیسات برق حرارتی را بالا می برد که در نهایت افزایش تولید برق حرارتی را در پی دارد.



شکل (۶). بررسی حلقه B2

منبع: یافته‌های پژوهش

حلقه B3 که حلقه مبادله خریداران سهمیه انتشار کشور ایران در شکل شش مشاهده می‌شود که با تولید بیشتر برق حرارتی، تخصیص انتشار کربن کمتری خواهند داشت و خرید مطلوب سهمیه تخصیص انتشار کربن برای آن‌ها افزایش می‌یابد و مازاد تقاضا تخصیص انتشار کربن کاهش و در نتیجه قیمت کربن افزایش، هزینه برق کاهش می‌یابد.

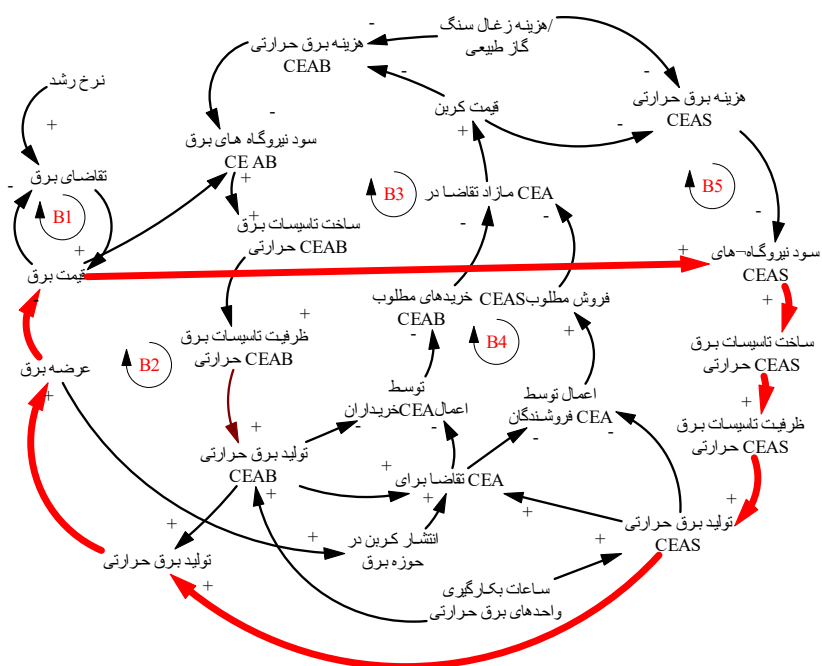


شکل (۷). بررسی حلقه B3

منبع: یافته‌های پژوهش

شکل (۸) حلقه B4 را نشان می‌دهد که حلقه تولید برق فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران است. که افزایش قیمت برق، سود نیروگاه‌های فروشندگان تخصیص انتشار کربن را افزایش می‌دهد که این باعث افزایش ساخت تاسیسات برق حرارتی و افزایش ساخت تاسیسات، ظرفیت تاسیسات برق را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش تولید و

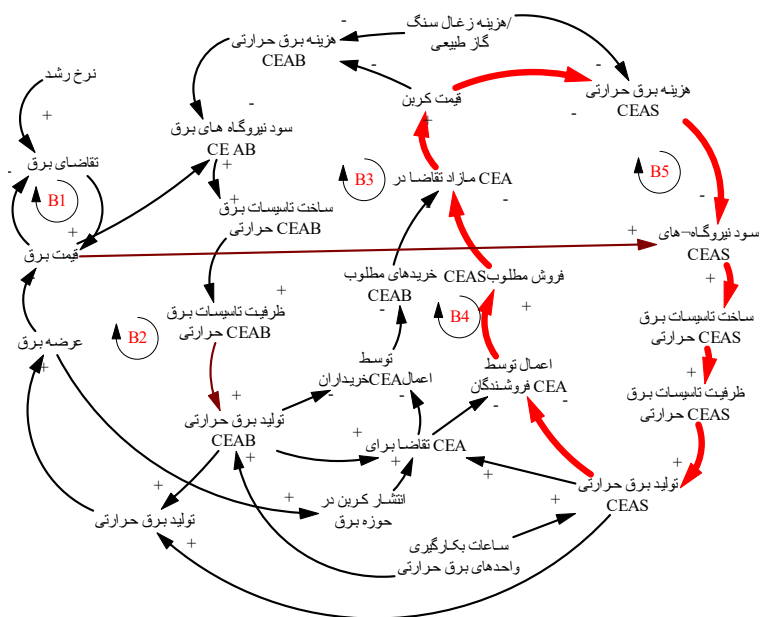
عرضه برق می‌شود و عرضه برق، قیمت برق را کاهش می‌دهد تا به تعادل می‌رسد.



شکل (۸). بررسی حلقه B4

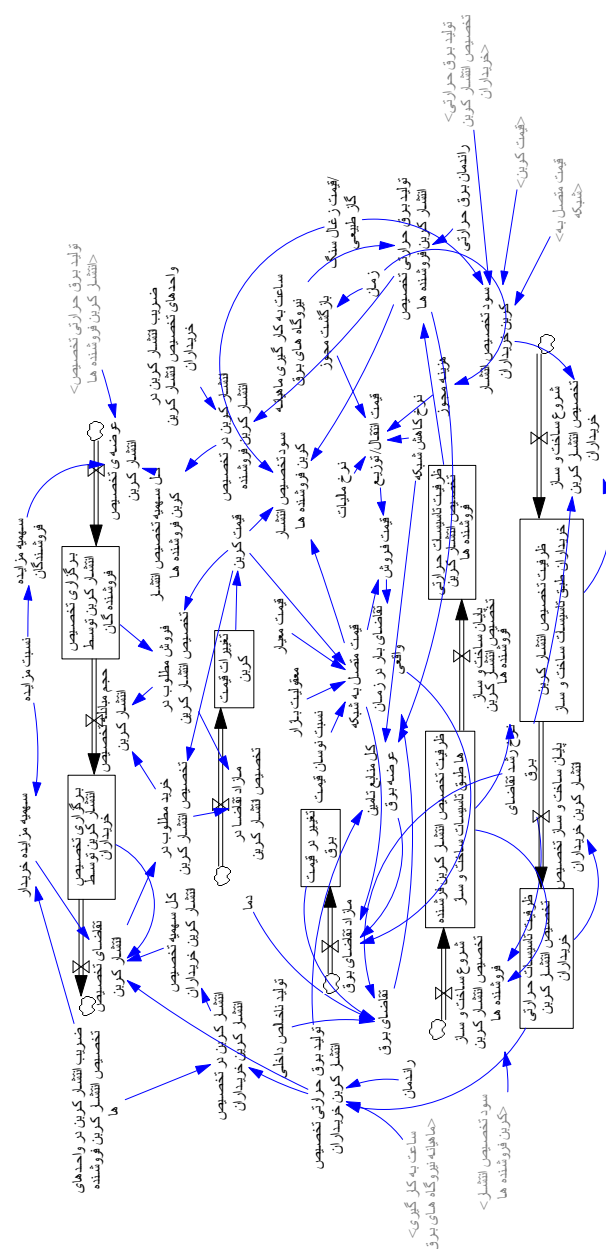
منبع: یافته‌های پژوهش

شکل (۹) نشان دهنده ی حلقه B5 است که حلقه مبادله فروشندگان سهمیه انتشار کشور ایران است که بیان می‌کند که در صورت کاهش هزینه برق، سودنیروگاه افزایش و این باعث افزایش ساخت تاسیسات برق حرارتی و افزایش ظرفیت تاسیسات می‌شود که نتیجه آن افزایش تولید برق است که اعمال تخصیص سهمیه انتشار کربن توسط فروشندگان را کاهش می‌دهد و فروش مطلوب تخصیص انتشار هم برای آن‌ها کاهش می‌یابد و مازاد تقاضا تخصیص انتشار کربن افزایش می‌یابد.



منبع: یافته‌های پژوهش

در ادامه پژوهش به منظور اعمال سناریوها و شبیه‌سازی الگو مطابق شکل (۱۰) نمودار حالت-جریان مورد بررسی در این پژوهش رسم شده است، نمودار حالت-جریان بازار برق و کربن در این راستا تا حدود زیادی به توانایی الگوساز در درک روابط بین متغیرها وابسته است. تست‌های اعتبار در این الگوها برای ساختار، رفتار و استنتاج‌های خطمشی در سه رده تناسب، سازگاری و اثربخشی صورت می‌پذیرد که برای این کار تحلیل سناریو در این مقاله انجام شده است.



شکل (۱۰). نمودار حالت-جریان در این پژوهش

منبع: یافته‌های پژوهش

با بررسی ساختار حلقه‌های بازخوردی و رسم نمودار حالت-جریان در افق زمانی ۱۰ ساله شبیه‌سازی الگو انجام شد. همچنین برای مقدار دهی پارامترها از داده‌های رسمی منتشر شده در ترازنامه انرژی، گزارش‌های وزارت نیرو و وبسایت بانک مرکزی استفاده شده است. یکی از مباحث عمده در الگوسازی پویایی سیستم، اندازه‌گیری اعتبار سنجی الگو طراحی شده است. الگوی طراحی شده با انجام آزمون‌های مربوطه از لحاظ ساختاری و از لحاظ ابعادی دارای اعتبار بوده است. در این پژوهش بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۴۰۲^۱ تا سال ۱۴۱۲ برای پیش‌بینی و نمایش روندها و تحلیل پویای بازار به هنگام اعمال سناریوها انتخاب شده است که در بخش ۴ به بررسی و تحلیل هرکدام می‌پردازیم.

۴. تحلیل نتایج شبیه‌سازی سناریوهای پژوهش

۴-۱. سناریو قیمت گاز طبیعی

افزایش ۵۰ درصدی قیمت گاز طبیعی تأثیری بر متغیرهای حالت (مانند ظرفیت تولید یا ساختار عرضه) ندارد.

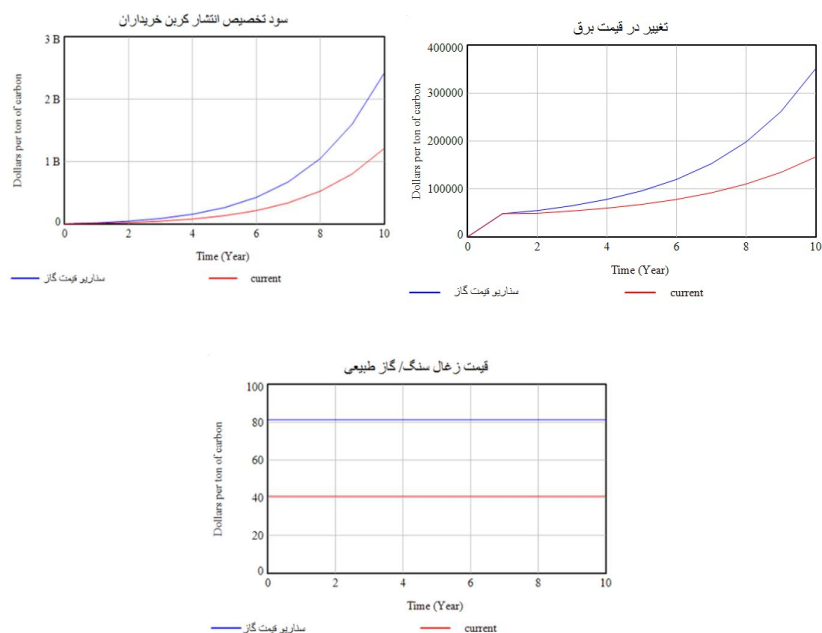
سود تخصیص انتشار کربن برای خریداران: این سناریو منجر به افزایش سود تخصیص انتشار کربن برای خریداران می‌شود. این افزایش نشان‌دهنده وجود مزایای اقتصادی برای مشارکت‌کنندگان فعال در بازار کربن است.

با افزایش قیمت گاز طبیعی، قیمت برق نیز افزایش می‌یابد، زیرا تولید برق در ایران به‌طور عمده وابسته به گاز طبیعی (با سهم ۸۴.۵٪ در سبد سوخت) است.

افزایش قیمت گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اصلی نیروگاه‌ها، هزینه‌های تولید برق را بالا می‌برد و این هزینه به قیمت برق منتقل می‌شود. این وضعیت می‌تواند انگیزه‌ای برای سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر ایجاد کند تا وابستگی به سوخت‌های

^۱. سال ۱۴۰۲ به روزترین سالی هست که گزارش‌های صنعت برق ایران موجود هست.

فسیلی کاهش یابد. از سوی دیگر، افزایش سود خریداران در بازار کربن نشان‌دهنده کارایی این بازار در تشویق به کاهش انتشار کربن است. در بلندمدت، این سناریو می‌تواند به بهبود ساختار تأمین انرژی و کاهش آلودگی کمک کند.



شکل (۱۱). اعمال سناریوی افزایش ۵۰ درصدی قیمت گاز

منبع: یافته‌های پژوهش

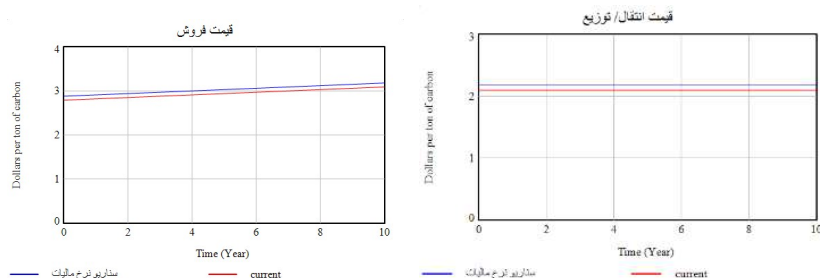
۲-۴. سناریو نرخ مالیات بر کربن

این سناریو نیز تأثیری بر متغیرهای حالت ندارد.

افزایش نرخ مالیات بر کربن باعث بالا رفتن قیمت انتقال/توزیع و در نتیجه قیمت فروش برق می‌شود.

با افزایش قیمت برق، مصرف‌کنندگان به سمت استفاده از منابع انرژی ارزان‌تر و پاک‌تر تمایل پیدا می‌کنند.

اعمال مالیات بیشتر بر کربن، هزینه‌های تولید برق را افزایش می‌دهد و این افزایش به مصرف‌کنندگان منتقل می‌شود. این تغییر در قیمت‌ها می‌تواند مصرف‌کنندگان را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ترغیب کند، به شرط این که این منابع در دسترس و مقرون به صرفه باشند. این سناریو نشان‌دهنده اهمیت سیاست‌گذاری مناسب در قیمت‌گذاری انرژی و ارائه گزینه‌های جایگزین پاک است تا از افزایش بار مالی بر مصرف‌کنندگان جلوگیری شود و همزمان انتشار کربن کاهش یابد.



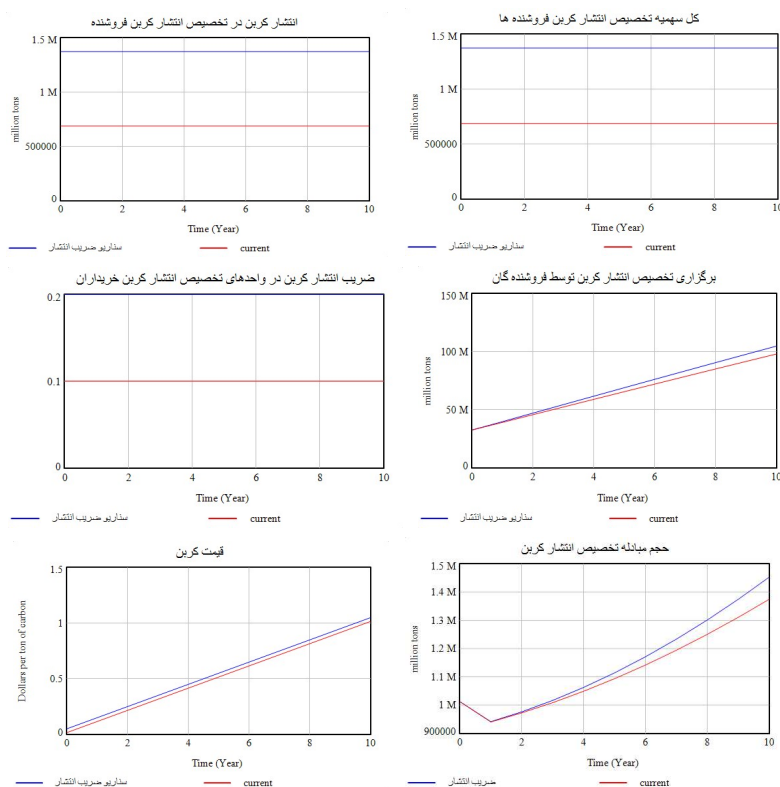
شکل (۱۲). اعمال سناریو ۵۰ درصدی افزایش نرخ مالیات

منبع: یافته‌های پژوهش

۳-۴. سناریو ضریب انتشار کربن

افزایش ضریب انتشار کربن، میزان انتشار کربن فروشندگان را بالا می‌برد و حضور آن‌ها در بازار کربن را افزایش می‌دهد، که نتیجه آن افزایش حجم مبادلات است. افزایش حجم مبادلات در بازار کربن منجر به بالا رفتن قیمت کربن می‌شود. ضریب انتشار کربن نشان‌دهنده میزان کربن منتشرشده به ازای هر واحد تولید است. افزایش این ضریب، تقاضا برای سهمیه‌های کربن را بالا می‌برد و در نتیجه قیمت کربن افزایش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند تولیدکنندگان را به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک‌تر تشویق کند تا انتشار کربن خود را کاهش دهند. همچنین، سیاست‌گذاران می‌توانند با وضع قوانین سخت‌گیرانه‌تر، این افزایش را کنترل کنند و از تأثیرات منفی

زیست‌محیطی جلوگیری کنند.



شکل (۱۳). اعمال سناریوی افزایش ۵۰ درصدی ضریب انتشار کربن

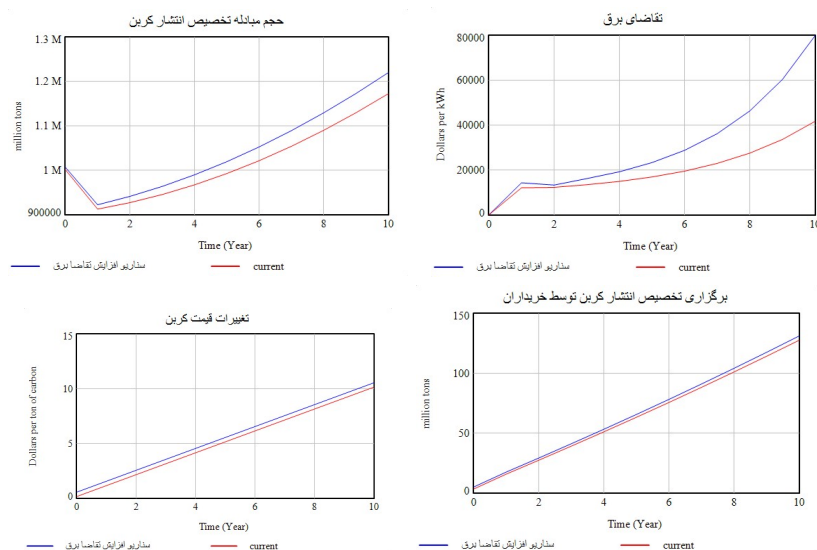
منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۴. سناریو افزایش تقاضای برق

افزایش تقاضای برق باعث بالا رفتن قیمت کربن می‌شود. حجم مبادلات سهمیه‌های کربن افزایش می‌یابد. خریداران تمایل بیشتری به دریافت سهمیه‌های کربن نشان می‌دهند و میزان برگزاری تخصیص توسط آن‌ها افزایش می‌یابد.

افزایش تقاضای برق، فعالیت نیروگاه‌ها را بیشتر می‌کند و این امر انتشار کربن را افزایش می‌دهد. در نتیجه، تقاضا برای سهمیه‌های کربن بالا می‌رود و قیمت کربن

افزایش می‌یابد. خریداران برای تأمین نیاز خود به سهمیه‌های بیشتری نیاز دارند، که این موضوع حجم مبادلات را بالا می‌برد. این سناریو بر ضرورت مدیریت تقاضای برق و توسعه منابع انرژی پاک تأکید دارد تا از افزایش بی‌رویه انتشار کربن جلوگیری شود.



شکل ۱۲: نتایج حاصل از اعمال سناریو افزایش تقاضای برق

در بررسی پیشینه داخلی هیچ مطالعه‌ای دقیقاً با همین عنوان یا تمرکز یافت نشد. مطالعه غفوری و محتوی‌پور ۱۴۰۰ نزدیک‌ترین کار مرتبط است، اما به‌جای تحلیل جفت بازارها، بر تأثیر سیاست‌های کربنی بر رقابت بازار برق تمرکز دارد. سایر مطالعات فارسی مرتبط، مانند الگوی مبتنی بر پویایی سیستم برای توسعه ظرفیت تولید برق در کشور (محقر و نجف‌زاده، ۱۳۹۶) یا الگوسازی پویای بهینگی زنجیره تأمین صنعت برق کشور (۲۰۲۱)، به جنبه‌های دیگر بازار برق پرداخته‌اند و مستقیماً به تعامل بازارهای کربن و برق مرتبط نیستند. مطالعه ونگ و همکاران (۲۰۲۴) با طراحی یک مکانیسم مبادله اعتبارات کربنی، نتایج مشابهی را در چین نشان می‌دهد، که این مکانیسم

قیمت‌های برق را تحت تأثیر قرار داده و کارایی بازار را بهبود می‌بخشد. مطالعه اروپایی چو و همکاران^۱ (۲۰۲۵) بر تعامل بازارهای کربن، برق و گاز طبیعی در اروپا تمرکز دارد و نشان می‌دهد که قیمت گاز طبیعی بر قیمت کربن تأثیر می‌گذارد، به‌ویژه تحت تأثیر رویدادهای ژئوپلیتیکی منطقه اروپا است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات سیاستی

این مقاله به شبیه‌سازی رابطه بین بازارهای کربن و برق و انتقال هزینه کربن به قیمت‌های برق با استفاده از الگوی سیستم دینامیک پرداخته است. تحلیل سناریوهای شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده وابستگی عمیق بازارهای کربن و برق در ایران است که از طریق متغیرهایی مانند قیمت برق، قیمت کربن و انتشار کربن به هم پیوند خورده‌اند. به عنوان مثال، افزایش قیمت گاز طبیعی باعث بالا رفتن هزینه تولید برق و در نتیجه افزایش قیمت برق می‌شود، که این امر سود خریداران در بازار کربن را بیشتر کرده و کارایی این بازار را در کاهش انتشار کربن نشان می‌دهد. همچنین، بالا رفتن مالیات کربن هزینه‌های تولید را افزایش داده و قیمت برق را بالا می‌برد، اما در عین حال مصرف‌کنندگان را به استفاده از انرژی‌های پاک ترغیب می‌کند. از سوی دیگر، افزایش ضریب انتشار کربن تقاضا و قیمت کربن را بالا برده و تولیدکنندگان را به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کاهش انتشار تشویق می‌کند، در حالی که رشد تقاضای برق نیز به افزایش انتشار کربن و قیمت کربن منجر شده و نیاز به مدیریت تقاضا و توسعه منابع پایدار را برجسته می‌سازد.

بازارهای کربن و برق در ایران به شدت به یکدیگر وابسته‌اند و تغییرات در عواملی چون قیمت گاز، مالیات کربن، ضریب انتشار و تقاضای برق بر هر دو بازار تأثیر می‌گذارد. بازار کربن، در صورت طراحی مناسب مکانیسم‌های آن، ابزاری مؤثر برای

^۱. Chu et al.

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، اما نیازمند سیاست‌گذاری متعادل است تا هم انتشار کربن کاهش یابد و هم فشار مالی بر مصرف‌کنندگان کنترل شود. در این راستا، سرمایه‌گذاری در منابع انرژی پاک مانند خورشیدی، بادی و برق‌آبی برای کاهش وابستگی به گاز طبیعی از اهمیت حیاتی برخوردار است. این وابستگی متقابل نشان می‌دهد که هرگونه تغییر در یکی از این بازارها، اثرات زنجیره‌ای بر دیگری خواهد داشت و لزوم هماهنگی بین سیاست‌های این دو حوزه را بیش از پیش آشکار می‌کند.

برای دستیابی به اهداف کاهش انتشار کربن و پایداری تولید برق، مجموعه‌ای از پیشنهادات سیاستی ارائه می‌شود که به صورت هم‌افزا عمل می‌کنند. این پیشنهادات شامل ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق یارانه و معافیت مالیاتی، اصلاح قیمت‌گذاری برق بر اساس هزینه واقعی و اثرات زیست‌محیطی، تنوع‌بخشی به سبد انرژی با سرمایه‌گذاری در منابع هسته‌ای و تجدیدپذیر، و حذف تدریجی یارانه‌های سوخت فسیلی برای واقعی شدن قیمت‌ها است. علاوه‌براین، تقویت بازار کربن با مزایده‌های شفاف، مدیریت تقاضای برق از طریق برنامه‌های تشویقی برای کاهش مصرف در زمان اوج، و حمایت از فناوری‌های کاهش انتشار با ارائه تسهیلات مالی، از دیگر اقدامات کلیدی هستند. این سیاست‌ها نه تنها به کاهش انتشار کربن کمک می‌کنند، بلکه زمینه‌ساز تولید برق پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در ایران خواهند شد.

پیوست:

جدول (۲). ساختار و معرفی متغیرها

ردیف	نام متغیر	فرمول	واحد	نوع متغیر
۱	سهمیه مزایده خریدار	ضریب انتشار کربن در واحدهای تخصیص انتشار کربن فروشندگان*نسبت مزایده	درصد	متغیر کمکی
۲	نسبت مزایده	0.5	درصد	متغیر بیرونی
۳	سهمیه مزایده	نسبت مزایده	درصد	متغیر کمکی

ردیف	نام متغیر	فرمول	واحد	نوع متغیر
	فروشنندگان			
۴	ضریب انتشار کربن در واحدهای تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	10	Nvwn	متغیر بیرونی
۵	تقاضای تخصیص انتشار کربن	(تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران * ۰.۷۸ + سهمیه مزایده خریدار + کل سهمیه تخصیص انتشار کربن خریداران + برگزاری تخصیص انتشار کربن توسط	میلیون تن	متغیر نرخ
۶	برگزاری تخصیص انتشار کربن توسط خریداران	حجم مبادله تخصیص انتشار کربن - تقاضای تخصیص انتشار کربن (۰.۲۸)	میلیون تن	متغیر سطح
۷	حجم مبادله تخصیص انتشار کربن	خرید مطلوب در تخصیص انتشار کربن + فروش مطلوب در تخصیص انتشار کربن	میلیون تن	متغیر نرخ
۸	برگزاری تخصیص انتشار کربن توسط فروشنده گان	عرضه ی تخصیص انتشار کربن - حجم مبادله تخصیص انتشار کربن	میلیون تن	متغیر سطح
۹	عرضه ی تخصیص انتشار کربن	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها + سهمیه مزایده فروشنندگان + کل سهمیه تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	میلیون تن	متغیر نرخ
۱۰	ضریب انتشار کربن در واحدهای تخصیص انتشار کربن خریداران	۱۰	درصد	متغیر بیرونی
۱۱	کل سهمیه تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	انتشار کربن در تخصیص انتشار کربن فروشنده	میلیون تن	متغیر کمکی
۱۲	فروش مطلوب در تخصیص انتشار کربن	برگزاری تخصیص انتشار کربن توسط فروشنده گان * قیمت کربن / ۳۶۵	میلیون تن	متغیر کمکی
۱۳	خرید مطلوب در تخصیص انتشار کربن	IF THEN ELSE (تقاضای تخصیص انتشار کربن / قیمت کربن * ۱۰) < 1e+06, 1e+06, 900000	میلیون تن	متغیر کمکی
۱۴	کل سهمیه تخصیص انتشار کربن خریداران	انتشار کربن در تخصیص انتشار کربن خریداران	میلیون تن	متغیر کمکی

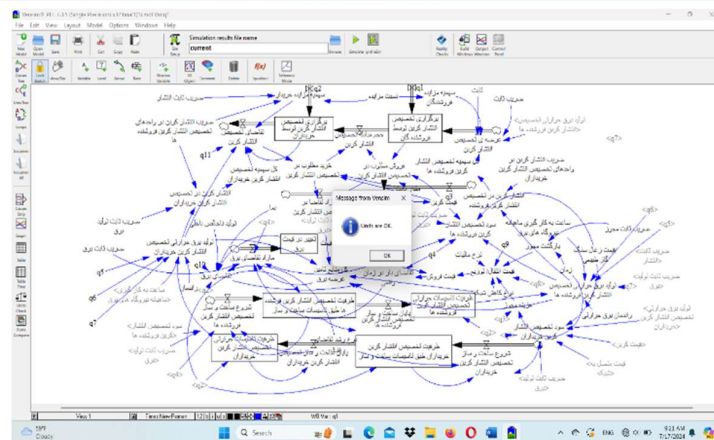
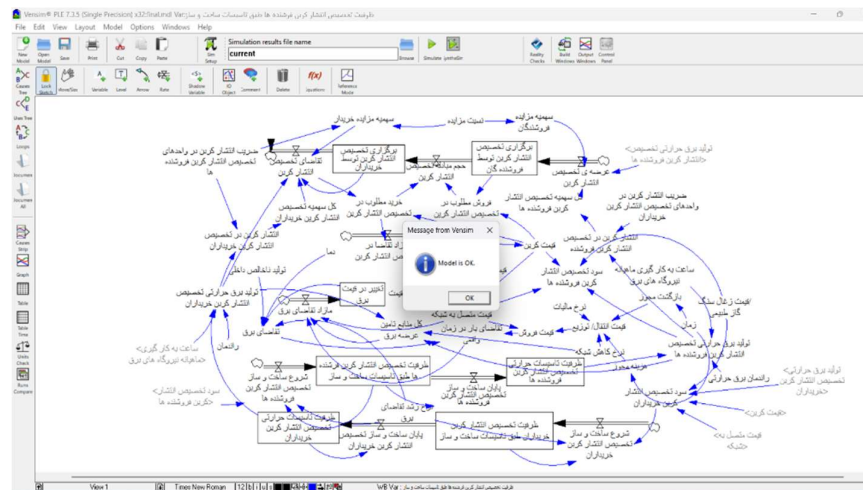
ردیف	نام متغیر	فرمول	واحد	نوع متغیر
۱۵	انتشار کربن در تخصیص انتشار کربن خریداران	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران*ضریب انتشار کربن در واحدهای تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	میلیون تن	متغیر کمکی
۱۶	دما	۱۹	درجه	متغیر بیرونی
۱۷	مازاد تقاضا در تخصیص انتشار کربن	خرید مطلوب در تخصیص انتشار کربن-فروش مطلوب در تخصیص انتشار کربن	میلیون تن	متغیر نرخ
۱۸	تغییرات قیمت کربن	IF THEN ELSE (مازاد تقاضا در تخصیص انتشار کربن < ۱, ۱, ۰.۱۵)	دلار به ازای هر تن کربن	متغیر سطح
۱۹	رشد قیمت کربن	تغییرات قیمت کربن + قیمت کربن دوره گذشته	دلار به ازای هر تن کربن	متغیر کمکی
۲۰	انتشار کربن در تخصیص انتشار کربن فروشنده	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها*ضریب انتشار کربن در واحدهای تخصیص انتشار کربن خریداران	میلیون تن	متغیر کمکی
۲۱	ساعت به کار گیری ماهیانه نیروگاه‌های برق	۰.۵۳*۳۰*۲۴	ساعت	متغیر کمکی
۲۲	سود تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	IF THEN ELSE (قیمت کربن*تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها- "قیمت زغال سنگ/ گاز طبیعی" + قیمت متصل به شبکه < ۶۴۶۴۴۰, ۶۸۶۸۴۰, ۶۴۶۴۴۰)	دلار به ازای هر تن کربن	متغیر کمکی
۲۳	قیمت معیار	۰.۳۸	دلار به ازای کیلو وات ساعت	متغیر بیرونی
۲۴	تولید ناخالص داخلی	۰.۰۴* تولید ناخالص داخلی دوره گذشته + تولید ناخالص داخلی دوره گذشته	میلیارد دلار	متغیر بیرونی
۲۵	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران	راندمان*ساعت به کار گیری ماهیانه نیروگاه‌های برق*ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران	میلیارد دلار	متغیر کمکی
۲۶	راندمان	۴۰ درصد		متغیر بیرونی
۲۷	تقاضای برق	(نرخ تغییرات تولید ناخالص داخلی+نرخ تغییرات دما+نرخ رشد تقاضای برق+ نرخ تغییر در قیمت برق)/۴		متغیر کمکی

ردیف	نام متغیر	فرمول	واحد	نوع متغیر
۲۹	تغییر در قیمت برق	تغییرات مازاد تقاضای برق		متغیر سطح
۳۰	نسبت نوسان قیمت	۱۰ درصد		متغیر بیرونی
۳۱	معقولیت بازار	۰.۴		متغیر بیرونی
۳۲	کل منابع تأمین عرضه برق	(تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران+تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها)-نرخ تلفات شبکه		متغیر کمکی
۳۳	قیمت متصل به شبکه	۰.۵*قیمت معیار+۰.۳*قیمت کربن+معقولیت بازار+تغییرات قیمت برق	دلار به ازای کیلو وات ساعت	متغیر کمکی
۳۴	تقاضای بار در زمان واقعی	تقاضای برق*(قیمت فروش/۳۸۰۰-۸)-(۰.۲۵)		متغیر کمکی
۳۵	قیمت فروش	قیمت انتقال برق -قیمت توزیع+قیمت متصل به شبکه	دلار به ازای کیلو وات ساعت	متغیر کمکی
۳۶	نرخ مالیات	۰.۰۹		متغیر بیرونی
۳۷	قیمت انتقال / توزیع	نرخ مالیات+بازگشت مجوز+نرخ کاهش شبکه+هزینه مجوز	دلار به ازای کیلو وات ساعت	متغیر کمکی
۳۸	نرخ کاهش شبکه	۰.۰۰۸	۰	متغیر بیرونی
۳۹	هزینه مجوز	زمان	دلار به ازای کیلو وات ساعت	متغیر کمکی
۴۰	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	ساعت به کار گیری ماهیانه نیروگاه‌های برق*ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها*راندمان برق حرارتی	مگاوات	متغیر کمکی
۴۱	زمان	۱		متغیر بیرونی
۴۲	بازگشت مجوز	زمان		متغیر کمکی
۴۳	قیمت زغال سنگ / گاز طبیعی	۴۰.۷۳	مگاوات	متغیر بیرونی
۴۴	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	ساعت به کار گیری ماهیانه نیروگاه‌های برق*ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها*راندمان برق حرارتی	مگاوات	متغیر کمکی
۴۵	سود تخصیص انتشار کربن خریداران	تولید برق حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران*قیمت زغال سنگ/ گاز طبیعی*قیمت متصل به شبکه*قیمت کربن	دلار به ازای هر تن کربن	متغیر کمکی

ردیف	نام متغیر	فرمول	واحد	نوع متغیر
۴۶	شروع ساخت و ساز تخصیص انتشار کربن فروشنده	(سود تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها+نرخ رشد تقاضای برق*ظرفیت تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها طبق تاسیسات ساخت و ساز)۰.۰۲۸		متغیر نرخ
۴۷	ظرفیت تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها طبق تاسیسات ساخت و ساز	شروع ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها-پایان ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها		متغیر سطح
۴۸	پایان ساخت و ساز تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	ظرفیت تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها طبق تاسیسات ساخت و ساز*۱		متغیر نرخ
۴۹	ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	پایان ساخت و ساز تخصیص انتشار کربن فروشنده‌ها	کیلو وات	متغیر سطح
۵۰	شروع ساخت و ساز تخصیص انتشار کربن خریداران	(نرخ رشد تقاضای برق*سود تخصیص انتشار کربن خریداران*ظرفیت تخصیص انتشار کربن خریداران طبق تاسیسات ساخت و ساز)		متغیر نرخ
۵۱	ظرفیت تخصیص انتشار کربن خریداران طبق تاسیسات ساخت و ساز	(شروع ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن خریداران-پایان ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن خریداران)*۰.۰۴	تن	متغیر سطح
۵۲	پایان ساخت و ساز تخصیص انتشار کربن خریداران	ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران		متغیر نرخ
۵۳	ظرفیت تاسیسات حرارتی تخصیص انتشار کربن خریداران	(شروع ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن خریداران-پایان ساخت و ساز نیروگاه تخصیص انتشار کربن خریداران)*۰.۰۴	مگاوات	متغیر سطح

منبع: مطالعات خارجی در این حوزه و اطلاعات و آمار وزارت نیرو

شبیه‌سازی تحلیل پویای تعامل بازارهای کربن و برق در ایران □ ۱۷۵



تعارض منافع:

تعارض منافع وجود ندارد.

سپاسگزاری:

از دانشگاه شهید باهنر کرمان جهت حمایت، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع:

- Best, R., Burke, P. J., & Jotzo, F. (2020). Carbon pricing efficacy: Cross-country evidence. *Environmental and Resource Economics*, 77(1), 69–94. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00436-x>
- BP. (2024). *Statistical review of world energy 2023*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Brouwers, R., Schoubben, F., & Van Hulle, C. (2018). The influence of carbon cost pass through on the link between carbon emission and corporate financial performance in the context of the European Union Emission Trading Scheme. *Business Strategy and the Environment*, 27(8), 1422–1436. <https://doi.org/10.1002/bse.2199>
- Brown, D.P., Eckert, A., & Eckert, H. (2018). Carbon pricing with an output subsidy under imperfect competition: The case of Alberta's restructured electricity market. *Resource and Energy Economics*, 52, 102–123. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2017.11.002>
- Chu, W., Fan, L., & Zhou, P. (2025). Examining the interactions of carbon, electricity, and natural gas markets. *Frontiers of Engineering Management*, <https://doi.org/10.1007/s42524-025-4077-3>
- Du, Q., Yang, M., Wang, Y., Wang, X., & Dong, Y. (2024). Dynamic simulation for carbon emission reduction effects of the prefabricated building supply chain under environmental policies. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105027. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105027>
- Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37–66.
- Guo, B. W., & Giorgio, C. G. (2021). Cost pass-through in the British wholesale electricity market. *Energy Economics*, 102, 105497. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105497>
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Johanna, C., Sander, D. B., Katja, S., & Robert, V. (2020). Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS - An analysis for six industry sectors. *Energy Economics*, 91, 104883. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104883>
- Li, Y., Feng, T. T., Liu, L. L., & Zhang, M. X. (2023). How do the electricity market and carbon market interact and achieve integrated development? A bibliometric-based review. *Energy*, 265, 126308. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126308>
- Liu, X., & Jin, Z. (2020). An analysis of the interactions between electricity, fossil fuel and carbon market prices in Guangdong, China. *Energy for Sustainable Development*, 55, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.01.004>

- Lu, Y., Xiang, J., Geng, P., Zhang, H., Liu, L., Wang, H., & Feng, T. (2023). Coupling mechanism and synergic development of carbon market and electricity market in the region of Beijing–Tianjin–Hebei. *Energies*, 16(4), 1726. <https://doi.org/10.3390/en16041726>
- Ma, J., & Kuo, J. (2021). Environmental self-regulation for sustainable development: Can internal carbon pricing enhance financial performance? *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 3517–3527. <https://doi.org/10.1002/bse.2806>
- Qi, S., & Cheng, S. (2018). China's national emissions trading scheme: Integrating cap, coverage and allocation. *Climate Policy*, 18(sup1), 45–59. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1454587>
- Shi, M., Zou, T., Xu, J., & Wang, J. (2022). Can Carbon Emissions Trading Scheme Make Power Plants Greener? Firm-Level Evidence from China. *Frontiers in Energy Research*, 10, 700. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.912283>
- Tvinnereim, E., & Mehling, M. (2018). Carbon pricing and deep decarbonization. *Energy Policy*, 121, 185–189.
- Wang, L., Yang, C., Xu, Z., Yuan, G., Tang, L., Bai, Y., & Wang, X. (2024). Analysis of carbon electricity coupled market modeling method based on carbon credit trading mechanism. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 156, 109707.
- World Bank. (2023). *State and trends of carbon pricing 2023*. <https://hdl.handle.net/10986/39796>
- Xu, S., & Xu, Q. (2024). Impacts of carbon emissions allowance limitations on carbon price with power generation rights trading in China. *Journal of Cleaner Production*, 470, 143312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143312>
- Yu, S., Chen, Y., Pu, L., & Chen, Z. (2022). The CO₂ cost pass-through and environmental effectiveness in emission trading schemes. *Energy*, 239, 122257. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122257>
- Zhang, R., Lu, Z., Shahidehpour, M., Li, Z., & Yan, L. (2024). Deciphering the electricity–carbon market nexus: Challenges and prospects of electricity–carbon coupling. *Energy Internet*, 1, 34–51. <https://doi.org/10.1049/ein2.12003>
- Zou, H., & Zhong, M.R. (2022). Factor reallocation and cost pass-through under the carbon emission trading policy: Evidence from Chinese metal industrial chain. *Journal of Environmental Management*, 313, 114924. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114924>