Competitiveness Optimization of Iran's Electricity Trade: A Strategic Balance Between Direct and Indirect Exports

Maryam Mohammadi — PhD Student in International Economics, Ferdowsi University of Mashhad

Mostafa Karimzadeh * — Associate Professor, Faculty of Administrative and Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Ahmad Seifi — Associate Professor, Faculty of Administrative and Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashahad, Iran

Kioumars Heydari — Assistant Professor, Department of Power and Energy Economics, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

Electricity trade has emerged as a crucial element within the global energy market, necessitating strategic optimization of Iran's role within this system. This study endeavors to design a mathematical model for optimizing Iran's electricity exchanges by analyzing the balance between direct electricity exports and indirect exports, particularly through product groups such as steel and cement. The research employs an applied quantitative design, utilizing supply and demand modeling, and integrating elements of trade network analysis and competitiveness theory. The statistical population encompassed Iran's electricity-intensive export sectors, with key products demonstrating high energy consumption and export relevance selected via a purposive sampling method. The study modeled decision-making scenarios related to electricity production, import, and export structures, employing a mathematical framework rooted in competitiveness indices and trade gravity models. Data analysis was performed using sensitivity analysis and network trade indicators. The results indicate that a moderate increase in electricity production capacity significantly supports enhanced profitability and regional competitiveness, while excessive expansion leads to diminishing returns. Steel was identified as a high-potential long-term export product, whereas

*Corresponding Author: mkarimzadeh@um.ac.ir

How to Cite: Mohammadi, M., Karimzadeh, M., Seifi, A., & Heydari, K. (2025). Competitiveness Optimization of Iran's Electricity Trade: A Strategic Balance Between Direct and Indirect Exports, ?(?), ?-?.

cement proved to be a more viable short-term option. The study concludes that reforms in the supply structure and the implementation of targeted export strategies are essential for improving Iran's electricity trade, noting that increased bargaining power alone will not guarantee higher profitability. The developed model serves as a strategic planning tool to strengthen Iran's position in both regional and international electricity trade.

Introduction

Electricity is vital to modern infrastructure and economic development, and Iran—endowed with ample energy resources and strong generation capacity—has the potential to lead regional electricity trade. However, rising domestic demand, resource limitations, and regional competition require a strategic reassessment of export and import policies. While earlier studies mostly emphasized direct electricity trade, this study introduces a dynamic multi-objective optimization model that also includes indirect exports through energy-intensive goods like aluminum and steel. The model positions Iran as the central node in a regional trade network, with its electricity flows treated as decision variables and external flows assumed stable. It aims to optimize electricity allocation among domestic use, direct exports, and indirect exports, using criteria such as trade competitiveness, profitability, gravity index, and infrastructure constraints. The study evaluates trade with key partners like Turkey, Iraq, and Pakistan, and supports policymakers in identifying optimal strategies and understanding the economic rationale behind Iran's electricity trade. The paper provides a structured analysis across five sections, offering practical insights and policy tools.

Methodology

This study develops a decision-making framework to optimize Iran's electricity trade, covering both direct electricity exchanges and indirect trade through electricity-intensive goods. The model uses a multi-objective optimization approach to enhance competitiveness and profitability while reducing costs. It assumes a fixed trade network with constant flows among other countries, treating Iran's electricity inflows and outflows as decision variables. The mathematical formulation defines key sets for countries (V), electricity-intensive commodities (K), and domestic allocation scenarios (S).

Key Constraints:

Electricity Supply Constraint: This constraint ensures that domestic consumption, direct exports, and indirect trade do not exceed the total electricity capacity

$$\sum_{s} S_s Q_s + \sum_{v} X_v + \sum_{k,v} \beta_k Z_{kv} \leq Power_{Cap} + \sum_{v} Y_v$$

Export Capacity Constraints: Exports cannot exceed the domestic production limits for energy-intensive goods. Demand Constraints: Trade must align with market demand limits. Minimum Electricity Allocation for Industry: To prevent the collapse of energy-intensive sectors, a minimum electricity allocation for substitute commodity exports is ensured and also Total Trade Volume Calculation: Iran's total trade accounts for both direct and indirect electricity flows.

Objective Functions:

Maximize Iran's Trade Competitiveness:

$$\mathrm{S_{vv'}} = \left[\sum_{\mathrm{i}} \frac{\mathrm{TET_{vi}} + \mathrm{TET_{v'i}}}{\mathrm{TET}}\right]\left[1 - \left|\frac{\mathrm{TET_{vi}} - \mathrm{TET_{v'i}}}{\mathrm{TET}}\right|\right][1 + \left|\frac{\mathrm{Dist_{vi}} - \mathrm{Dist_{v'i}}}{\mathrm{Dist_{vi}} + \mathrm{Dist_{v'i}}}\right|] \qquad \forall(\mathrm{v} \in \mathrm{V}, \mathrm{v}' \in \mathrm{V}, \mathrm{v} \neq \mathrm{v}')$$

Maximize Profitability:

$$\max Z_2 = \sum_{v} price_{electricity} X_v + \sum_{k,v} (price_c - price'_c) Z_{kv} - \sum_{v} f Y_v \qquad \forall(v \in V)$$

This methodological framework enables policymakers to optimize Iran's electricity trade position, balancing domestic electricity allocation, direct exports, and indirect exports.

Results and Discussion

This study introduces a mathematical model for optimizing Iran's electricity trade by incorporating both direct exports and indirect trade through electricity-intensive goods like steel and cement. Using real-world data, the model identifies effective trade strategies to enhance competitiveness and profitability. Key findings show that steel is a valuable long-term export, while cement offers short-term gains. A moderate (10–15%) increase in domestic electricity production boosts trade performance, but returns diminish beyond that. Political efforts to increase demand are not financially effective under current conditions.

Policy Recommendations

Based on the study's findings, the following policy recommendations are proposed:

- Prioritize Energy-Intensive Exports: Focus on industries like steel and cement over direct electricity exports to maximize economic gains.
- Control Generation Growth: Keep electricity production increases within 10–15% to avoid diminishing returns.
- Support Export-Oriented Plants: Promote private investment in power plants dedicated to exports to balance domestic supply and boost revenue.
- Improve Trade Infrastructure: Strengthen legal and technical frameworks to reduce dependence on political negotiations and enhance regional trade efficiency.

Keywords: Optimization, electricity trade, export balance, competitiveness analysis, export and import, indirect export.

JEL Classification :C61, Q41, F14, F12, F10, F13

مدل‌سازی رقابت‌پذیری تجارت برق ایران: تحلیل موازنه صادرات مستقیم و غیرمستقیم

مریم محمدی | دانشجوی دکتری اقتصاد بین الملل، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مصطفی کریم زاده* | دانشیار دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

احمد سیفی | دانشیار دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

کیومرث حیدری | استادیار گروه اقتصاد برق و انرژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده

در دهه‌های اخیر، تجارت برق به یکی از اجزای کلیدی بازار جهانی انرژی تبدیل شده است. ایران با ظرفیت بالای تولید برق و موقعیت ژئوپلیتیکی مهم در خاورمیانه، پتانسیل تبدیل شدن به بازیگری محوری در شبکه تبادلات برق منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای را دارد. این مقاله مدلی ریاضی برای بهینه‌سازی تبادلات برق ایران ارائه می‌دهد که موازنه میان صادرات مستقیم برق و صادرات غیرمستقیم از طریق کالاهای برق‌بر مانند فولاد و سیمان را تحلیل می‌کند. مدل ارائه‌شده با استفاده از داده‌های سال ۲۰۲۳ و در نرم افزار GAMS پیاده شده است. این مدل تقاضا و عرضه برق و تأثیر تبدیل برق به کالاهای جایگزین را در نظر گرفته و متغیرهای کلیدی مانند ظرفیت تولید، واردات و صادرات را به‌گونه‌ای مدلسازی کرده است که به سیاست‌گذاران در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک کمک کند. نتایج نشان می‌دهد، افزایش منطقی ظرفیت تولید برق (۱۰ تا ۱۵ درصد) سودآوری و رقابت‌پذیری تجارت برق ایران را بهبود می‌بخشد، اما افزایش بیش از این حد ممکن است بازده سرمایه را کاهش دهد .فولاد به‌عنوان کالایی با پتانسیل بالای صادرات و سیمان به‌عنوان گزینه‌ای سودآور در کوتاه‌مدت شناسایی شده‌اند. همچنین، تقویت چانه‌زنی سیاسی و تجاری به تنهایی نمی‌تواند سودآوری تجارت برق را افزایش دهد و نیاز به اصلاح ساختار عرضه و بهینه‌سازی ترکیب صادرات دارد.

کلیدواژه‌ها: بهینه سازی، تبادل برق، موازنه صادرات، تحلیل رقابت‌پذیری، صادرات و واردات، صادرات غیر مستقیم

طبقه بندی JEL : C61, Q41, F14, F12, F10, F13

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته اقتصاد بین الملل دانشگاه فردوسی مشهد است.

* نویسنده مسئول: m.karimzadeh@um.ac.ir

مقدمه

ایران با برخورداری از منابع غنی انرژی و زیرساخت‌های پیشرفته در حوزه تولید برق، از ظرفیت قابل‌توجهی برای ایفای نقشی مؤثر در تجارت منطقه‌ای برق برخوردار است. با این‌حال، افزایش پیوسته تقاضای داخلی، محدودیت‌های مالی و فنی، و فشار رقابتی ناشی از حضور سایر بازیگران در بازارهای منطقه‌ای، ضرورت انجام ارزیابی‌های جامع و راهبردی در حوزه صادرات و واردات برق را برجسته می‌سازد. از سوی دیگر، صادرات برق و همچنین صادرات غیرمستقیم از طریق کالاهای برق‌بَر، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در جهت تنوع‌بخشی به منابع درآمدی غیرنفتی کشور ایفای نقش کند. با توجه به محدودیت‌های موجود در تأمین تقاضای داخلی، تداوم یا توسعه صادرات مستقیم برق و یا صادرات غیرمستقیم از طریق کالاهای جایگزین، مستلزم تحلیلی ساختاریافته و مبتنی بر معیارهای اقتصادی است تا شرایط بهینه را به‌طور دقیق شناسایی و ارزیابی کند.

ادبیات اقتصادی، تحلیل تجارت برق را در دو چارچوب نظری کلاسیک و مدرن مورد بررسی قرار داده است. از منظر کلاسیک، نظریه‌های «مزیت مطلق» اسمیت[1] (۱۷۷۶) و «مزیت نسبی» ریکاردو[2] (۱۸۱۷) بر تخصص‌یابی کشورها در تولید کالاها مبتنی بر بهره‌وری و هزینه‌فرصت تأکید دارند. در مقابل، نظریه «وفور نسبی عوامل تولید» هکشر–اوهلین[3] (۱۹۳۳) وفور نسبی عوامل تولید را منشأ تخصص می‌داند. با این حال، ماهیت ویژه برق به عنوان یک کالای همگن و غیرقابل ذخیره‌سازی، تطبیق آن را با چارچوب‌های سنتی تجارت بین‌الملل با چالش مواجه ساخته است. در نتیجه، نظریه‌پردازان مدرن با ارائه مدل‌هایی مانند «هموارسازی بار محلی» آنتویلر[4] (۲۰۱۶) به تبیین الگوهای تجارت برق پرداخته‌اند. مطالعات اخیر همچون ابرل[5] (۲۰۲۱)، بر نقش زیرساخت‌های اتصال منطقه‌ای[6]، انعطاف‌پذیری شبکه‌ها و یکپارچگی بازارهای برق منطقه‌ای تأکید داشته‌اند، ژائو و همکاران[7] (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل‌های جاذبه تعمیم‌یافته و تحلیل شبکه‌ای، نشان داده‌اند که عواملی همچون ریسک انتقال، سیاست‌های انرژی پاک، قابلیت انعطاف‌پذیری در تقاضا و هزینه‌های مبادله فرامرزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری جریان‌های تجارت برق دارند.

---

1 Smith
2 Ricardo
3 Heckscher-Ohlin
4 Antweiler
5 Abrell et al
6 interconnection
7 Zhao et al.

پژوهشهای پیشین عمدتاً به تجارت برق و صادرات مستقیم برق تمرکز داشته‌اند، در حالی‌که صادرات غیرمستقیم برق (یعنی تبدیل برق به کالاهای برق‌بر و صادرات آن‌ها) کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی شده که بتواند با در نظر گرفتن هر دو مسیر صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق، ضمن افزایش رقابت‌پذیری ایران در شبکه تجارت برق منطقه‌ای و جهانی، سودآوری صادرات را نیز بیشینه سازد. این مدل ریاضی پویا با تمرکز بر ساختار شبکه تجارت برق ایران و شرکای منطقه‌ای آن توسعه یافته و در آن، یال‌های ورودی و خروجی از گره ایران (به‌عنوان هسته مرکزی شبکه) به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف شده‌اند، در حالی‌که تبادلات میان سایر کشورهای عضو شبکه تحت فرض ثبات ساختاری تحلیل می‌شوند. این رویکرد امکان بررسی دقیق تأثیر سیاست‌های ملی بر تعادل منطقه‌ای را بدون پیچیده شدن مدل در اثر نوسانات خارجی فراهم می‌آورد. هدف نهایی مدل، تدوین سیاست‌های بهینه برای تخصیص برق میان مصارف داخلی، صادرات مستقیم و صادرات غیرمستقیم است؛ به‌طوری که شاخص‌هایی مانند رقابت‌پذیری تجاری، شاخص جاذبه، سودآوری اقتصادی و محدودیت‌های زیرساختی نیز در چارچوب مدل لحاظ شده‌اند.

این مدل، به تصمیم‌گیرندگان کمک خواهد کرد تا استراتژی‌های بهینه‌ای را برای ارتقای موقعیت ایران در شبکه تجارت جهانی و همچنین حداکثرسازی سود حاصل از صادرات اتخاذ کنند. در این راستا، تلاش می‌شود تا با تحلیل دقیق شرایط حاکم بر تجارت برق، پاسخ‌هایی برای سوالات کلیدی از جمله بهترین راهبرد برای صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق ایران در شبکه تبادلات و روش‌های افزایش رقابت‌پذیری و سودآوری در این حوزه و اینکه آیا ایران به واردات برق نیاز دارد و در چه شرایطی واردات برق توجیه اقتصادی دارد، ارائه شود. از جمله مؤلفه‌های کلیدی در این مدل پیشنهادی، ظرفیت محدود کشورها در صادرات و واردات مستقیم برق، محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت انتقال برق و امکان‌سنجی صادرات کالاهای جایگزین برق هستند.

این پژوهش، در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است: مبانی نظری مرتبط با تجارت برق، مرور پیشینه پژوهشهای داخلی و خارجی، روش پژوهش شامل مدل‌سازی ریاضی و پارامترهای کلیدی، نتایج عددی حاصل از مدل بهینه‌سازی، و تحلیل حساسیت و سیاست‌های

پیشنهادی برای تجارت برق ایران. نتایج این پژوهش می‌تواند ابزاری کاربردی برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان در حوزه تجارت برق باشد.

ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

تحلیل تجارت برق ایران مستلزم بهره‌گیری از نظریه‌های تجارت بین‌الملل و اقتصاد انرژی است. صنعت برق به دلیل وجود صرفه‌های مقیاس و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، دارای ویژگی انحصار طبیعی[1] بوده و نیازمند تنظیم‌گری دقیق دولتی است (عظیم‌زاده، ۱۴۰۲). نظریه‌های تجارت بین‌الملل مانند مدل «بخش‌های خاص» روگوفسکی[2] (۱۹۸۹) و مدل مدل تقاضای لیندر[3]، بر تأثیر ساختار اقتصادی و شباهت در الگوهای تقاضا بر تجارت بین‌المللی تأکید دارند و در تحلیل جایگاه ایران در تجارت برق منطقه‌ای کاربرد فراوانی دارند.

در تحلیل تجارت برق، نظریه‌های کلاسیک و مدل‌های تجارت درون‌صنعتی برای کالاهای همگن مانند برق کاربرد محدودی دارند. در پاسخ به این خلأ، مدل «هموارسازی بار محلی» آنتویلر (۲۰۱۶) نشان می‌دهد تبادل برق میان کشورها می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف و کاهش هزینه تولید در زمان‌های مختلف منجر شود. این مزیت نسبی، پویا و کوتاه‌مدت است و به نوسانات بار شبکه وابسته است. از سوی دیگر، مدل‌های جاذبه جدید با درنظر گرفتن عواملی مانند فاصله، اندازه اقتصادی، هزینه‌های پنهان، تفاوت قیمت، و توافق‌های تجاری، ابزار مناسبی برای تحلیل جریان تجارت برق هستند. نسخه‌های به‌روزشده این مدل‌ها (مانند مدل جاذبه هاف[4]) نیز قابلیت ترکیب با روش‌های بهینه‌سازی را دارند و برای تحلیل ظرفیت تولید و جریان بهینه تجارت برق مورد استفاده قرار می‌گیرند (هد و مایر[5]، 2021).

رویکرد دیگر تحلیل تجارت مدل‌های مبتنی بر شبکه است. نقش شبکه‌های تجاری در تسهیل روابط اقتصادی و مطالعات اقتصادی-اجتماعی با جهانی‌شدن اقتصاد افزایش یافته است. تجارت جهانی یک شبکه کاملا متصل بوده و تقریباً تمام کشورها (مستقیم یا غیرمستقیم) با هم تعامل دارند. این شبکه‌ها با ویژگی‌هایی مانند مقیاس‌پذیری، تمرکز و ماژولاریتی تحت تاثیر عوامل سیاسی، فرهنگی و جغرافیایی (مانند توافق‌های تجاری و روابط

1 Natural Monopoly
2 Rogowski.R
3 Linder's Theory of Overlapping Demand
4 Huff Gravity Model
5 Head & Mayer

دیپلماتیک) شکل می‌گیرند. تحلیل شبکه به صورت پویا بوده و شوک‌های اقتصادی و تغییر سیاست‌ها می‌توانند ساختار و روابط تجاری را بازتعریف کرده و توزیع قدرت و ارتباطات در شبکه را تغییر دهند (چن و همکاران[1]، ۲۰۲۳؛ شو و همکاران[2]، ۲۰۲۳).

به طور خاص، در تحلیل تجارت برق ایران، مدل‌های فوق می‌توانند چارچوب مناسبی برای تحلیل مزیت‌های صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق، ارزیابی نیاز احتمالی به واردات، و رتبه‌بندی کشورها در شبکه تبادلات بر اساس شاخص‌های رقابت‌پذیری و تمرکز ایجاد کنند. این چارچوب به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا ضمن استفاده از ظرفیت شبکه و بهینه‌سازی صادرات برق، به شکل واقع‌بینانه‌تری نسبت به طراحی سیاست‌های بلندمدت اقدام نمایند. به منظور سازمان‌دهی مناسب و ارائه تصویری جامع از سوابق پژوهشهای موجود، در جدول پیش‌رو، مجموعه‌ای از مهم‌ترین مطالعات داخلی و خارجی در دو بخش تجارت برق و شبکه‌های تجاری ارائه شده است.

جدول ۱: مطالعات خارجی (تبادلات برق و شبکه تجاری)

عنوان مطالعه	یافته ها	تجارت (صادرات -واردات)		ساختار شبکه		کالای جایگزین		مدل
		ص	و	داخلی	خارجی	دارد	ندارد	
تیمیلسینا و تومن[3] (۲۰۱۶)	صرفه‌جویی اقتصادی و بهبود امنیت انرژی با تجارت برق	×	×	×	✓	×	✓	مدل سیستم قدرت
آنتویلر[4] (۲۰۱۶)	ارائه یک نظریه اقتصادی جدید در تجارت در کالای همگن برق	✓	✓	×	✓	×	✓	جاذبه
آنوپ سینگ و همکاران[5] (۲۰۱۸)	موانع تجارت برق فرامرزی در جنوب آسیا	×	×	×	✓	×	✓	اقتصاد سنجی

1 Chen et al.
2 Xu et al.
3 Timilsina & Tomon
4 Antweiler
5 Anoop Singh

تورگیانی[1] و همکاران (۲۰۱۸)	تاثیر اندازه اقتصاد کشورها و عوامل ژئوپلیتیکی (نزدیکی جغرافیایی، توافقنامه‌ها) در تجارت	×	×	×	✓	×	✓	تصمیم گیری چندمعیار
مرتنس و همکاران[2] (۲۰۱۹)	تخمین‌های نادرست هزینه و انتخاب‌های فناوری نامناسب در تجارت برق مرزی یا استفاده از مدل‌های بیش از حد ساده‌شده	✓	✓	×	✓	×	✓	سیستم انرژی
بیستلاین و همکاران[3] (۲۰۲۳)	افزایش تقاضا برق وارداتی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در کانادا با سیاست‌های کاهش انتشار کربن	✓	✓	×	✓	×	✓	مدلسازی سیستم قدرت
ونیزلو[4] (۲۰۲۳)	همگرایی قیمت‌ها و افزایش امنیت انرژی با تجارت برق فرامرزی در اروپا	×	×	×	✓	×	✓	تجزیه و تحلیل روندها

مطالعات داخلی نیز هم‌راستا با ادبیات جهانی، تمرکز خاصی بر روابط برق ایران با کشورهای همسایه، تحلیل داده-ستانده، بررسی یارانه‌های ضمنی، ارزیابی هزینه‌های تجارت و جایگاه ایران در شبکه تجاری منطقه‌ای و جهانی داشته‌اند.

جدول ۲: مطالعات داخلی (مطالعات مرتبط با تبادل برق و شبکه های تجاری)

عنوان مطالعه	یافته ها	تجارت **(صادرات -واردات)**		ساختار شبکه		کالای جایگزین		مدل
		ص	**و**	**داخلی**	**خارجی**	**دارد**	**ندارد**	
جلایی و افشارپور (۱۳۹۶)	تحلیل صادرات مستقیم و غیرمستقیم بنزین و نفت گاز	✓	×	×	×	✓	×	داده-ستانده

1 Torreggiani
2 Tim Mertens et al.
3 Bistline, J et al.
4 Venizelos Venizelou

فریدزاد (۱۳۹۷)	سنجش خالص صادرات بین بخشی، یارانه ضمنی حامل‌های انرژی	✓	×	×	×	×	✓	داده-ستانده
تقوی و همکاران (۱۳۹۰)	محتوای عاملی تجارت کالاهای صادراتی ایران در ۱۳ بخش اقتصادی	✓	×	×	×	×	✓	هکشر-اوهلین
رفعت (۱٤۰۰)	بررسی حجم تجارت کشورهای غرب آسیا	×	×	×	✓	×	✓	شبکه تجاری
میرتاج‌الدینی (۱٤۰۱)	تحلیل شبکه تجاری برق ایران در منطقه غرب آسیا و بررسی جایگاه و شدت رقابت ایران در منطقه	×	×	×	✓	×	✓	خوشه‌بندی و شاخص تمرکز
طاهری (۱٤۰۲)	تحلیل شبکه تجاری کشورهای پسا شوروی	×	×	×	✓	×	✓	مدل گراف
مهرابی (۱٤۰۳)	بررسی هزینه تبادل برق ایران با ترکیه و عراق	✓	✓	×	×	×	✓	بهینه‌ی ابی

مطالعات یادشده پایه نظری مناسبی برای توسعه مدل پیشنهادی مقاله حاضر فراهم می‌آورند. نوآوری پژوهش حاضر در بهره‌گیری از مدل بهینه‌سازی جاذبه است و تمرکز بر موازنه صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق ایران، در چارچوب رقابت‌پذیری منطقه‌ای و تحلیل شبکه تجاری برق، آن را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد.

روش

در این پژوهش، با رویکردی کاربردی و تحلیلی، مدلی ریاضی با هدف بهینه‌سازی ترکیب تبادلات برق ایران توسعه یافته است. مدل پیشنهادی بر موازنه بین صادرات مستقیم برق و صادرات غیرمستقیم آن از طریق کالاهای برق‌بر نظیر فولاد و سیمان تمرکز دارد. برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های آماری سال ۲۰۲۳ بهره‌برداری شده است. جامعه مورد مطالعه شامل کشورهای همسایه ایران در تجارت برق، نظیر ترکیه، عراق، افغانستان، پاکستان، ارمنستان، ترکمنستان و آذربایجان به‌عنوان شرکای مستقیم، و سایر کشورهای منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای به‌عنوان شرکای غیرمستقیم در نظر گرفته شده است.

مدل ریاضی طراحی‌شده با استفاده از نرم‌افزار GAMS و بهره‌گیری از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی، جریان‌های تجاری را به نحوی تحلیل می‌کند که ترکیب بهینه‌ای از صادرات برق و کالاهای جایگزین برق‌بر حاصل شود.

در این بخش، ابتدا تعریف دقیق مسئله پژوهش و اهداف آن، سپس فرآیند مدلسازی و در نهایت، داده‌های مورد استفاده در مدلسازی و منابع آن‌ها معرفی می‌گردد.

تعریف مساله

مدلسازی انجام شده در این پژوهش، چارچوبی بهینه برای تصمیم‌گیری در زمینه واردات و صادرات برق ارائه می‌دهد که علاوه بر تبادلات مستقیم برق، تبادلات غیرمستقیم از طریق صادرات کالاهای برق‌بَر نظیر گروه کالاهای سیمان و فولاد را نیز دربرمی‌گیرد. در این مدل، کشورهای حاضر در شبکه تجارت برق به‌عنوان گره‌های شبکه در نظر گرفته می‌شوند و یال‌های جهت‌دار میان این گره‌ها نمایانگر جریان واردات و صادرات برق هستند. با فرض چنین ساختاری، روابط مدل به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند تصمیمات بهینه در زمینه صادرات و واردات برق (اعم از مستقیم یا غیرمستقیم) را مشخص کنند. هدف آن است که ضمن بیشینه‌سازی رقابت‌پذیری و جاذبه ایران در شبکه تجارت برق، سود حاصل از این تبادلات نیز حداکثر شود. نکته مهم در این چارچوب آن است که از میان تمام یال‌های موجود در شبکه، تنها یال‌هایی که به ایران وارد یا از آن خارج می‌شوند، به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند؛ چرا که سایر تبادلات میان کشورهای دیگر توسط رقبا کنترل شده و از دید این مدل، دارای مقادیر مشخص و غیرقابل تغییر هستند. در نتیجه، با تمرکز بر جریان‌های واردشونده و خارج‌شونده از گره ایران، می‌توان سیاست‌های بهینه برای صادرات و واردات برق را به‌صورت دقیق استخراج کرد. این سیاست‌ها نه‌تنها مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم تبادلات برق را تعیین می‌کنند، بلکه نقش کالاهای جایگزین را نیز برجسته ساخته و اولویت نسبی هرکدام را در فرآیند تصمیم‌گیری نمایان می‌سازند. این مدل بهینه‌سازی با هدف تعیین جریان‌های شبکه به گونه‌ای طراحی شده است که شاخص جاذبه ایران به حداکثر مقدار ممکن برسد. بر این اساس، مجموعه‌ای از تصمیمات و سیاست‌های بهینه شکل می‌گیرد که انتخاب سیاست نهایی و وزن‌بندی اهمیت شاخص‌های جاذبه و سود، بر عهده تصمیم‌گیرندگان و مراجع مسئول خواهد بود.

یک نمونه از بررسی شدت رقابت‌پذیری، مطالعه ژانگ[1] و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی رقابت‌پذیری بین واردکنندگان نفت است. آنها با بهره‌گیری از نظریه شبکه پیچیده و معیارهای جایگزین شدت رقابت، به بررسی تکامل و انتقال رقابت در تجارت نفت بین واردکنندگان پرداخته‌اند. ابتدا شبکه‌ای از شدت رقابت نفت ایجاد کردند تا مناطق کلیدی رقابت، موقعیت کشورهای بزرگ مصرف‌کننده و تغییرات رقابت را تحلیل کنند. شدت رقابت به‌عنوان وزن لینک‌ها اندازه‌گیری شده است. برای کمی‌سازی شدت رقابت بین واردکنندگان نفت، تنها از شاخص مستقیم استفاده شده که در رابطه (۱) معرفی گردیده است.

$$S_{direct}(ij) = \sum_c \left\{ \left(\frac{M_{ic}+M_{jc}}{M_w} \right) \times \left[1 - \frac{|(M_{ic}/M_i)-(M_{jc}/M_j)|}{(M_{ic}/M_i)+(M_{jc}/M_j)} \right] \right\} \times 100 \qquad (1)$$

در اینجا $S_{direct}(ij)$ ، شدت رقابت مستقیم بین واردکنندگان نفت vi و vj است، c نشان‌دهنده منبع مشترک واردات نفت است، M_{ic} نشان دهنده حجم واردات نفت است که واردکننده نفت vi وارد می‌کند، M_{jc} نمایانگر حجم واردات نفت است که وارد کننده نفت vj وارد می‌کند، M_wکل حجم واردات نفت جهان است، M_i کل حجم واردات واردکننده نفت و M_j کل حجم واردات نفت وارد کننده است. قسمت اول نشان‌دهنده سهم حجم تجارت رقابتی از کل حجم تجارت جهان است. بخش دوم شباهت ساختارهای واردات واردکنندگان نفت را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص زمانی بسیار کاربردی است که محقق بر روی یک گره یا یک جامعه تمرکز کند. مطالعه ژانگ در مطالعات بسیاری به عنوان روش پایه برای بررسی رقابت پذیری مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از چارچوب نظری این مطالعه و با تعدیل روابط موجود متناسب با ویژگی‌های خاص تجارت برق، شدت رقابت صادراتی در این پژوهش به‌صورت رابطه (۲) مدل‌سازی و تصریح شده است.

$$S_{vv'} = \left[\sum_i \frac{TET_{vi} + TET_{v'i}}{TET} \right] \left[1 - \left| \frac{TET_{vi} - TET_{v'i}}{TET} \right| \right] \left[1 + \left| \frac{Dist_{vi} - Dist_{v'i}}{Dist_{vi} + Dist_{v'i}} \right| \right] \qquad \forall (v \in V, v' \in V, v \neq v') \qquad (2)$$

1 Zhang

در این رابطه $S_{vv'}$، شاخص شدت رقابت مستقیم میان دو صادرکننده برق v' و v را نشان می‌دهد. متغیر TET_{vi}، بیانگر حجم تجارت کشور v با کشور وارد کننده i است و TET، نمایانگر ارزش کل صادراتی برق در سطح جهانی است. بخش اول معادله، سهم کشور v نسبت به کل ارزش تجارت جهانی را محاسبه می‌کند؛ در حالی‌که بخش دوم، میزان شباهت ساختار بازارهای صادراتی دو کشور v' و v را ارزیابی می‌نماید. این شاخص در چارچوب مطالعه حاضر برای تحلیل وضعیت رقابتی ایران در مقایسه با سایر کشورهای صادر کننده برق و شرکای تجاری منطقه ای به کار گرفته شده است. تفاوت‌های کلیدی این روش نسبت به فرمول قبلی را می‌توان در دو بخش مطرح نمود. نخست اضافه شدن متغیر فاصله (Dist) در بخش سوم فرمول جدید که با هدف اعمال تاثیر تاثیر فاصله جغرافیایی یا هزینه حمل ونقل بر رقابت تجاری انجام شده است. این بخش عدم تقارن در دسترسی جغرافیایی را مدلسازی می‌کند و کشورهای نزدیک به هم احتمالا سهم بازار بیشتری کسب می‌کنند؛ با این اصلاح آثار مکانی فضایی در رقابت وارد شده و مدل به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. دومین تفاوت اصلاح مخرج در بخش شباهت ساختاری است به این صورت که در فرمول اصلاح شده، تفاوت مطلق حجم تجارت دو کشور نسبت به کل تجارت جهانی سنجیده می شود، بنابراین اختلاف حجم مطلق تجارت وزن بیشتری نسبت به نسبت‌های نسبی دارد که منجر به ارزیابی واقع‌بینانه‌تر رقابت می‌گردد.

برای اعتبار تصمیمات خروجی و نهایی مدل، توجه به محدودیت‌ها ضروری است. یکی از این محدودیت‌ها، ظرفیت تولید داخلی برق است که با در نظر گرفتن میزان واردات، سقف صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق را مشخص می‌کند. در این زمینه، توجه به پتانسیل کشورها در مبادلات تجاری برق نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، حد پایین صادرات کالاهای جایگزین نیز باید مدنظر قرار گیرد؛ به‌طوری‌که برخی صنایع صادرات‌محور برای ادامه فعالیت خود، به حداقلی از برق نیاز حیاتی دارند.

در این پژوهش با در نظر گرفتن توابع هدفی نظیر تابع بیشنه‌سازی میزان رقابت پذیری گره ایران و هم‌چنین بیشینه‌سازی سود (و کمینه‌سازی همزمان هزینه) چارچوبی برای تصمیم گیری در خصوص بهینه‌سازی واردات و صادرات برق یا کالاهای جایگزین ارائه می‌گردد. در این خصوص سه فرض اصلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

- ✓ تعداد گره‌های شبکه و میزان جریان در یال[1]های شبکه تجاری معلوم فرض می‌شوند.
- ✓ برای گره‌های غیر از ایران، جریان در یال‌ها ثابت است.
- ✓ یال‌های ورودی و خروجی از نود ایران به عنوان متغیرهای کنترلی، دارای جریانی با حجم مجهول هستند.

نمادهای استفاده شده برای ورودی‌های مدل به شرح زیر است:

مجموعه‌ها

V	مجموعه تمام نودهای شبکه (کشورها) $v \in \{1,2,\dots,V\}$
K	مجموعه کالاهای صادراتی جایگزین برق $c \in \{1,2,\dots,C\}$
S	سناریوهای تخصیص برق به مصارف خانگی

پارامترها

β_c	میزان برق مصرف شده برای تولید یک واحد از کالای جایگزین c
$Power_{Cap}$	ظرفیت برق حاصل از تولید داخلی
$\overline{Cap_k}$	ظرفیت داخلی تولید کالای جایگزین c
D_v^k	پتانسیل بالقوه تقاضای کشور v از کالای جایگزین k
$\bar{D}_v$	تقاضای بالقوه کشور v از برق
Sup_v	پتانسیل بالقوه کشور v برای تامین برق
$\bar{X}_{vv'}$	میزان صادرات برق از مبدا کشور v به مقصد کشور v'
$\bar{Z}_{vv'}^k$	میزان صادرات کالای جایگزین برق k از مبدا کشور v به مقصد کشور v'
S_s	میزان ذخیره برق برای تخصیص به مصارف داخلی تحت سناریو s
$Dist_{vv'}$	فاصله دو کشور v و v'
$price_{electricity}$	قیمت فروش برق
$price_c$	قیمت فروش کالای جایگزین c
$price'_c$	هزینه عملیاتی برای تولید یک واحد کالای جایگزین c
f	قیمت خرید یک واحد برق

1 Arc

TET میزان تجارت جهانی برق در جهان

M عدد بزرگ

همچنین خروجی‌های مدل و مجهولات لازم با نمادهای زیر نشان داده شده‌اند:

X_v صادرات برق ایران به کشور v

Y_v واردات برق ایران از کشور v

Z_{kv} صادرات کالای جایگزین k از ایران به کشور V

Q_s متغیری دودویی، مقدار ۱، اگر سناریو s برای تخصیص برق به مصرف داخلی انتخاب شود، مقدار ۰، در غیر این‌صورت.

$TET_{vv'}$ کل حجم تجارت بین دو کشور v و v'

S_v شاخص جاذبه تجارت کشور v در مقابل کشور v'

همان‌طور که قبل‌تر اشاره شد، مهم‌ترین محدودیتی که باید در نظر گرفته شود مربوط به ظرفیت محدود داخلی در تولید و استفاده برق است که به‌صورت زیر در مدل آورده شده است:

$$\sum_s S_s Q_s + \sum_v X_v + \sum_{k,v} \beta_k Z_{kv} \leq Power_{Cap} + \sum_v Y_v \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، میزان برق تخصیص داده شده به مصرف داخلی و صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق کوچکتر از ظرفیت تولید داخلی برق به اضافه واردات قرار داده شده است. طبیعی است که از بین سناریوهای مختلف ممکن حتما باید یکی، نه کمتر و نه بیشتر، انتخاب شود. لذا محدودیت بعدی بدین منظور در نظر گرفته شده است:

$$\sum_s Q_s = 1 \qquad (۴)$$

همچنین مشابه با رابطه (۴)، ظرفیت داخلی در تولید کالاهای جایگزین و صادرات آن‌ها نیز باید در نظرگرفته شود. لذا محدودیت بعدی با مشخص کردن حد بالایی برای صادرات کالاهای جایگزین، مانع از تولید جواب‌های غیرواقعی می‌گردد:

$$\sum_v Z_{kv} \leq \overline{Cap}_k \qquad \forall(\boldsymbol{k} \in \boldsymbol{K}) \qquad (۵)$$

رابطه (۵)، مشخص کننده حد بالای ظرفیت تولید کالاهای داخلی است. علی‌رغم محدودیت موجود در ظرفیت صادرات کالاهای جایگزین، پتانسیل خرید سایر کشورها نیز

باید در نظر گرفته شود. هر کشوری با هر مقداری متقاضی کالاهای جایگزین تولید شده نیست و طبیعتا برای کشورهای مختلف، مقادیر تقاضا متناسب با بازار داخلی آن کشور از هر کالا متفاوت است. لذا محدودیت زیر برای مشخص کردن حد بالایی برای حجم صادرات کالاهای جایگزین باید در مدل لحاظ گردد:

$$Z_{kv} \leq D_{kv} \qquad \forall(v \in V, k \in K) \qquad (۶)$$

مشابه با منطق رابطه (۶)، برای صادرات مستقیم برق نیز حجم صادرات به پتانسیل تقاضای بازار کشور هدف محدود است:

$$X_v \leq \overline{D}_v \qquad \forall(v \in V) \qquad (۷)$$

واردات برق نیز از هر کشوری ممکن نیست و میزان واردات بالقوه کشورها با هم متفاوت است در واقع:

$$\boldsymbol{Y_v \leq Sup_v} \qquad \forall(\boldsymbol{v \in V}) \qquad (۸)$$

حداقل نیاز صنایع به برق برای جلوگیری از ورشکستگی احتمالی آنان نیز با رابطه زیر لحاظ شده است:

$$\boldsymbol{\sum_{v} Z_{kv} \geq LB_k} \qquad \forall(\boldsymbol{v \in V, k \in K}) \qquad (۹)$$

پس از در نظر گرفتن محدودیت‌های بالا، لازم است که حجم تبادل مستقیم و غیرمسقیم برق بین دو کشور اندازه‌گیری شود که در محاسبات مربوط به جاذبه کاربرد خواهد داشت. با توجه به اینکه میزان تجارت ایران در شبکه تجارت از مجهولات مدل و میزان تجارت سایر کشورها مقداری مشخص است دو محدودیت زیر در محاسبات مدل درنظر گرفته شده‌اند:

$$\boldsymbol{TET_{Iran,v} = X_v - Y_v + \sum_{k} \beta_k Z_{kv}} \qquad \forall(\boldsymbol{v \in V, v \neq Iran}) \qquad (۱۰)$$

$$TET_{vv'} = \bar{X}_{vv'} - \bar{X}_{v'v} + \sum_k \beta_k \bar{Z}^k_{vv'} - \sum_k \beta_k \bar{Z}^k_{v'v} \qquad \forall(v \in V, v' \in V, v \neq v') \qquad (11)$$

رابطه (۱۰)، حجم مبادلات تجاری ایران با یک کشور دیگر و رابطه (۱۱) حجم تجارت بین دو کشور (غیر ایران) را مشخص می‌کند، نهایتا شاخص جاذبه به‌صورت زیر به مدل اضافه می‌گردد:

$$\mathbf{S_{vv'} = \left[\sum_i \frac{TET_{vi} + TET_{v'i}}{TET}\right]\left[1 - \left|\frac{TET_{vi} - TET_{v'i}}{TET}\right|\right]\left[1 + \left|\frac{Dist_{vi} - Dist_{v'i}}{Dist_{vi} + Dist_{v'i}}\right|\right]} \qquad \forall(v \in V, v' \in V, v \neq v') \qquad (12)$$

همچنین باید در نظر داشت که:

$$\mathbf{S_{vv'} = 0} \qquad \forall(v \in V) \qquad (13)$$

روابط (۳) تا (۱۳) در کنار یکدیگر سازنده چهارچوب و فضای حل مساله حاضر خواهند بود. برای تکمیل این مدل کافی است، توابع هدف لازم را نیز به آن اضافه کرد. تابع هدف اول، بیشینه‌سازی شاخص جاذبه ایران در مقابل سایر کشورهاست:

$$\max Z_1 = \sum_v S_{Iran,v} \qquad (14)$$

هدف دوم، بیشینه‌سازی سود حاصل از تجارت برق است:

$$\max Z_2 = \sum_v price_{electricity} X_v + \sum_{k,v} (price_c - price'_c) Z_{kv} - \sum_v f Y_v \qquad \forall(v \in V) \qquad (15)$$

روابط (۱) تا (۱۵) در برگیرنده تمام روابط لازم برای مدلسازی شبکه تجارت مستقیم و غیرمستقیم برق است.

برای تک‌هدفه‌سازی مدل دوهدفه فوق، از روش جمع وزنی[1] استفاده شده است (میتینن[2]، ۲۰۲۰). در این روش، توابع هدف با ضرایب وزنی مشخص ترکیب می‌شوند تا یک تابع هدف واحد حاصل شود. برای این منظور، ابتدا هر تابع هدف نرمال‌سازی می‌گردد و سپس تابع هدف نهایی به‌صورت ترکیب خطیِ وزنی از توابع نرمال‌شده تعریف می‌شود. فرآیند نرمال‌سازی با بهره‌گیری از مقادیر بهینه (f^*) و مقادیر ضدبهینه (f^N) به ازای هر تابع هدف انجام می‌گیرد. در نهایت، تابع هدف ترکیبی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\boldsymbol{max\ Z = w_1\left(\frac{f_1^{\ *} - Z_1}{f_1^{\ *} - f_1^{\ N}}\right) + w_2\left(\frac{f_2^{\ *} - Z_2}{f_2^{\ *} - f_2^{\ N}}\right)} \qquad \forall(\boldsymbol{v} \in \boldsymbol{V}) \qquad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶)، Z_1 و Z_2 به ترتیب توابع هدف اول و دوم بوده و همچنین w_1 و w_2 وزن مربوط به هر تابع هدف هستند.

مطالعه موردی و داده

جامعه مورد مطالعه این پژوهش، شبکه کشورهای شریک تجاری ایران در حوزه برق است، کشورهای ترکیه، ارمنستان، آذربایجان، افغانستان، پاکستان، عراق و ترکمنستان به‌عنوان شرکای مستقیم و کشورهای منطقه‌ای و سایر کشورها و به‌عنوان شرکای غیرمستقیم در نظر گرفته شده‌اند. در این بخش، پارامترهای کلیدی مدل به همراه منابع داده‌های مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این پارامترها شامل حجم تجارت جهانی کالاهای جایگزین، میزان صادرات و واردات برق، ظرفیت تولید داخلی و پتانسیل واردات کشورهای هدف بوده که از منابع رسمی آماری و بین‌المللی استخراج شده‌اند.

جدول ۳: پارامترهای کلیدی مدل به همراه منابع داده‌های مورد استفاده در مدلسازی

پارامترها	توضیح	منبع
صادرات و واردات جهانی فولاد ($\bar{Z}_{vvı}^{k}$)		پایگاه دادهٔ UN Comtrade

1 The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights

2 Miettinen

تقاضای فولاد (Z_ij) و ظرفیت داخلی تولید	فولاد[1] شامل ۲۹ کالای زیر مجموعه با کد سیستم هماهنگ‌شده (HS) ۷۲۰۰	سایت اتحادیه جهانی فولاد[2]
صادرات و واردات جهانی و سیمان ($\bar{Z}^{k}_{vvt}$)	سیمان[3] شامل ۵ کالای زیر مجموعه با کد سیستم هماهنگ‌شده (HS) ۲۵۲۳۰۰	پایگاه دادهٔ UN Comtrade
تقاضای سیمان (Z_ij) و ظرفیت داخلی تولید		پورتال صنعت سیمان جهانی[4]
صادرات و واردات جهانی برق برق $\bar{X}_{vvt}$	برق با کد سیستم هماهنگ‌شده (HS) ۲۷۱۶۰۰	پایگاه دادهٔ UN Comtrade
صادرات و واردات برق ایران		گزارش‌های دفتر مبادلات برون‌مرزی شرکت مادرخصصی توانیر[5]
فاصله دو نود انتقال برق $Dist_{vvt}$	شامل مشخصات فنی خطوط، ظرفیت انتقال و نقشه‌های جغرافیایی	آمار تفصیلی صنعت برق ایران
ظرفیت تولید برق داخل $Power_{Cap}$	معادل ۷۵ هزار مگاوات (سال۱۴۰۳)	آمار تفصیلی برق ایران
میزان برق مصرف شده برای تولید یک واحد از کالای جایگزین (β_c)		استانداردهای مصرف انرژی در تولید فولاد و سیمان[6]
میزان برق مصرفی خانگی		آمار تفصیلی صنعت برق

1 Product: 72 Iron and steel
2 World Steel Association
3 Product: ۲۵۲۳ Cement, incl. cement clinkers
4 https://www.globalcement.com/

[5] شامل جزئیات دقیق صادرات و واردات برق، توافقنامه‌های بین‌کشوری و حجم مبادلات سالانه

[6] بر اساس استاندارد مصرف انرژی در تولید فولاد، انرژی الکتریکی بیش از ۳۰٪ هزینه تولید فولاد در کوره‌های قوس الکتریکی را تشکیل می‌دهد، مصرف ویژه انرژی الکتریکی این فرآیند تا ۱۵۵ کیلووات‌ساعت بر تن می‌رسد، همچنین عملیات نورد گرم نیز نیازمند برق قابل توجهی است (جدول ۱ و ۴ استاندارد فولاد). فرآیندهای احیای مستقیم (جدول ۸) و پخت کلینکر در کوره بلند (جدول ۷) نیازمند کنترل دقیق دما و انرژی است که بدون دسترسی پایدار به برق امکان‌پذیر نیست. آسیاب سیمان و سنگن‌شکن مواد خام از پرمصرف‌ترین بخش‌ها هستند،کوره پخت کلینکر (با مصرف حرارتی تا ۱۱۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم در جدول ۱ استاندارد سیمان) و سیستم‌های خنک‌کننده به برق پایدار نیاز دارند تا از انحراف از استانداردهای زیست‌محیطی جلوگیری شود.

ترکیب این داده‌ها از منابع متنوع، امکان تحلیل جامعی از رقابت در تجارت برق را با در نظر گرفتن ابعاد مستقیم و غیرمستقیم فراهم می‌کند. داده‌ها با رویکرد اعتبارسنجی چندمنبعی (Cross-Validation) مورد بررسی قرار گرفتند تا از دقت و انسجام آنها اطمینان حاصل شود.

یافته‌ها

مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار GAMS ۲۵.۰.۰ با استفاده از حل‌کننده CPLEX حل شده است، که در آن تمامی نمونه‌های مدل‌ها بر روی یک پردازنده Core i۷ با سرعت ۴.۲ گیگاهرتز و ۱۶ گیگابایت RAM اجرا شده‌اند. ابتدا، نتایج عددی برای مدل برای مقادیر مختلف از وزن توابع هدف در رابطه (۱۴) با هدف تولید یک مجموعه پارتو محدود از نتایج با در نظر گرفتن $f_1^* = 10$ ، $f_1^N = 1$، $f_2^* = 7.3E8$ و $f_2^N = 2E8$ به‌دست آمده‌اند. نتایج پارتو حاصل در جدول شماره ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ٤: نتایج پارتو حاصل

واردات برق (میلیون)	مجموع صادرات			کل سود (میلیون)	شاخص جاذبه ایران	مقدار تابع هدف	wei_r
	برق (هزار)	فولاد (هزار)	سیمان (هزار)				
۹.۸	۸۷.۱	٤٥٧.٩٨٨	١٢٩٧.٠٦٢	247	1.27	0.11	(۰.۹ ،۰.۱)
۲۱۲	١٦.٨	١٤٠٣.٠٦٤	٦٠.٧٠٧	690	1.13	0.06	(۰.۷ ،۰.۳)
۲۱۱	٨١.٣٨٧	١٤١٦.١٧٥	٣٠	698	1.12	0.03	(۰.۵ ،۰.۵)
۲۱۳	٤٠.٦٦٤	١٤١٦.٦٦٧	٣٠.١٨٠	700	1.12	0.02	(۰.۳ ،۰.۷)
۲۱۳	0	١٤١٧	٣٠	703	1.11	0.06	(۰.۱ ،۰.۹)

منبع: محاسبات پژوهش

نتایج ارائه‌شده در جدول۴ بیانگر نوعی ناهمسویی میان دو تابع هدف «بیشینه‌سازی سود» و «افزایش شاخص جاذبه تجاری ایران در شبکه برق منطقه‌ای» است. در حالت‌های اولیه، که وزن تابع هدف مربوط به جاذبه بیشتر از تابع سود در نظر گرفته شده است، تمایل مدل به سمت افزایش صادرات مستقیم برق و نیز صادرات سیمان به‌عنوان کالای جایگزین مشهود

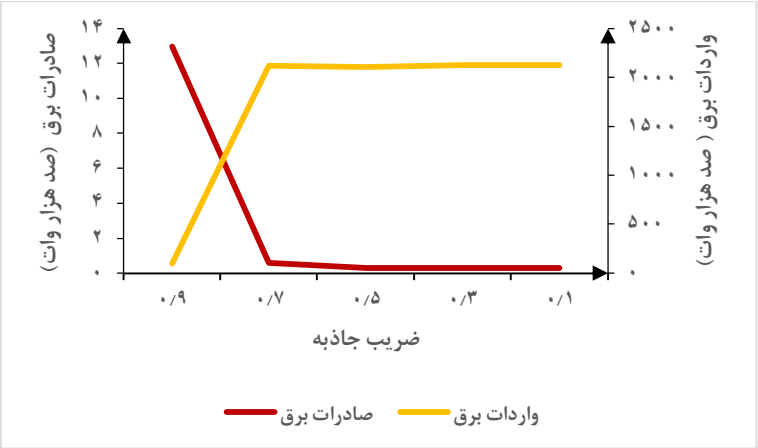
است. این گرایش را می‌توان با توجه به کمبود منابع انرژی و مصالح ساختمانی از جمله سیمان در برخی کشورهای منطقه تبیین کرد؛ شرایطی که موجب می‌شود ایران از طریق صادرات مستقیم برق و صادرات غیرمستقیم سیمان، موقعیت رقابتی و سهم بازار مناسبی در منطقه کسب کند.

شایان ذکر است که در این نتایج، شاخص جاذبه تجاری ایران نسبت به سایر کشورهای مورد مقایسه در بالاترین سطح قرار دارد. با این حال، پاسخ‌های حاصل از مدل، توجه چندانی به واردات برق نشان نمی‌دهند؛ این موضوع نشان‌دهنده آن است که از منظر بهینه‌سازی ترکیبیِ سودآوری و جاذبه تجاری، واردات برق برای ایران فاقد اولویت راهبردی محسوب می‌شود. در ادامه و با افزایش وزن تابع هدف سود در مدل، همان‌طور که انتظار می‌رود، مقدار سود در جدول به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، هرچند که شاخص جاذبه ایران با شیب ملایمی روند کاهشی پیدا می‌کند. در این حالت، میزان صادرات مستقیم برق به‌تدریج کاهش یافته و در آخرین حالت به صفر می‌رسد. این یافته نشان می‌دهد که هرچند صادرات مستقیم برق می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای ارتقاء جایگاه تجاری ایران در بازار منطقه‌ای تلقی شود، اما از نظر سودآوری اقتصادی چندان مقرون‌به‌صرفه نیست. روند مشابهی نیز در مورد صادرات سیمان مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از سطوح بالاتر کاهش یافته و در نهایت به حداقل مقدار مجاز تعیین‌شده در رابطه (۷) می‌رسد.

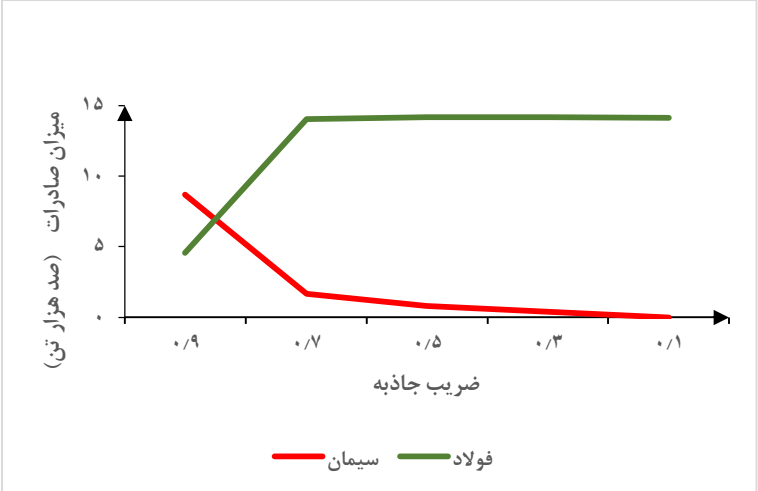
اما این روند در مورد صادرات غیرمستقیم فولاد صدق نمی‌کند؛ به‌طوری‌که برخلاف سیمان و برق، فولاد نقش کالایی استراتژیک برای کسب سهم بازار و جاذبه تجاری بلندمدت را ایفا نمی‌کند. در عوض، نتایج نشان می‌دهد فولاد گزینه‌ای مناسب برای دستیابی به سود در افق‌های زمانی کوتاه‌مدت و میان‌مدت است.

شکل ۱ تغییرات صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق را در ضرایب مختلف جاذبه براساس نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد.

شکل ۱) میزان صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق در ضرایب مختلف جاذبه



الف) صادرات مستقیم برق



ب) صادرات غیرمستقیم برق

منبع: محاسبات پژوهش

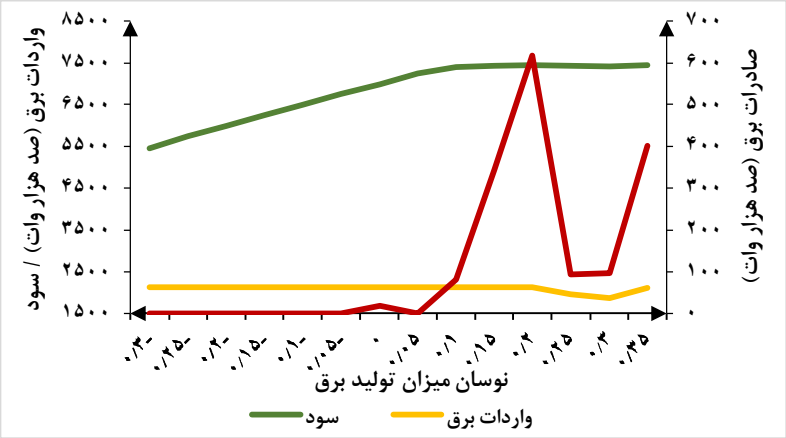
این بخش با تمرکز بر تحلیل حساسیت، تأثیر تغییرات در تولید داخلی برق را بر تصمیمات بهینه صادرات (مستقیم و غیرمستقیم) و واردات برق بررسی می‌کند. یکی از

چالش‌های کلیدی صنعت برق ایران، تعیین میزان بهینه افزایش تولید از طریق احداث نیروگاه‌های جدید یا تجدیدپذیر است. هدف تحلیل، مشخص کردن حد بهینه سرمایه‌گذاری در تولید برق با توجه به تابع سود و جاذبه‌های اقتصادی-فنی است تا از هدررفت سرمایه جلوگیری و برنامه‌ریزی موثری برای مدیریت تولید، صادرات و واردات برق انجام شود. در این راستا، با تغییر سطح تولید داخلی، تصمیمات بهینه صادرات و واردات مورد بررسی قرار می‌گیرند تا حد مطلوب تولید برق در کشور تعیین شود.

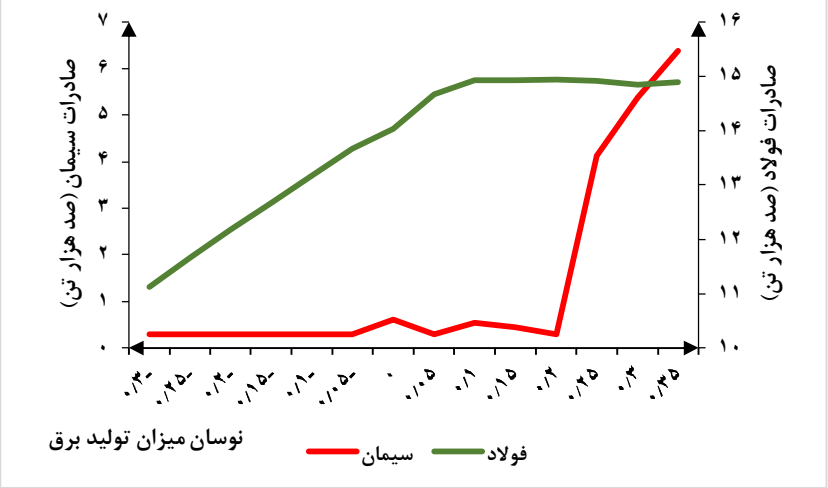
برای انجام چنین تحلیلی لازم است تا با ایجاد نوسان در میزان تولید برق در کشور ایران ($Power_{Cap}$) و تست مدل تحت حالات مختلف، رفتار مدل و تصمیمات اتخاذ شده مورد تحلیل قرار گیرند. لازم به ذکر است که برای تست مدل از ضرایب (۰.۳ و ۰.۷) استفاده شده است. شکل ۲ در زیر نشان‌دهنده میزان تغییرات سود و صادرات و واردات مستقیم برق (در شکل ۲.الف) و میزان تغییرات صادرات غیر مستقیم برق از سیمان و فولاد (در شکل ۲.ب)، است.

شکل ۲) میزان تغییرات در سود و صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق در اثر تغییر حجم تولید برق

الف) تغییرات سود و صادرات/واردات مستقیم برق



ب) تغییرات در صادرات غیر مستقیم برق



منبع: محاسبات پژوهش

همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، کاهش تولید داخلی برق تأثیر قابل‌توجهی بر سودآوری صنعت برق دارد؛ به‌ویژه با توجه به یارانه‌های دولتی تخصیص‌یافته به این بخش، ضروری است اقدامات لازم جهت حفظ ظرفیت فعلی و نگهداری از نیروگاه‌های قدیمی در دستور کار قرار گیرد. از سوی دیگر، روند افزایش سودآوری با رشد تولید داخلی برق در ابتدا دارای شیب مثبت و قابل‌توجهی است، اما پس از رسیدن به یک سطح مشخص، این روند به حالت تقریباً پایدار می‌رسد. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه برای سرمایه‌گذاری در صنعت برق کشور است. با در نظر گرفتن افزایش حدود ۱۰ تا ۱۵ درصدی در تولید برق، می‌توان نتیجه گرفت که سرمایه‌گذاری فراتر از این سطح، از منظر اقتصادی فاقد توجیه کافی خواهد بود؛ مگر آن‌که اهدافی نظیر انعقاد قراردادهای صادراتی با کشورهای همسایه یا توسعه ظرفیت تولید کالاهای جایگزین مدنظر قرار گیرد.

علاوه بر این شکل ۲ بیانگر نمای دیگری از وضعیت تصمیمات بهینه‌ی متناسب افزایش یا کاهش تولید برق در این صنعت است. پرواضح است که میزان واردات برق از کشورهای دیگر در تمام این نوسانات مربوط به میزان تولید برق تقریبا ثابت است. درواقع واردات برق به‌گونه‌ای، منبع تامین برق مازاد از ظرفیت تولید است که حتی با افزایش تولید هم جایگزین

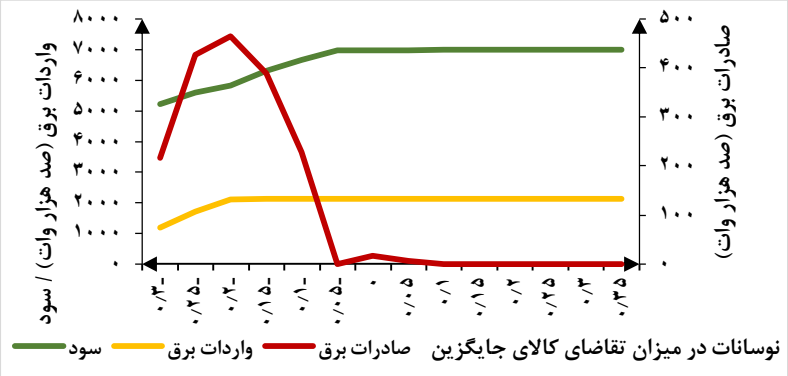
نمی‌شود. این رفتار در عمل و واقعیت به دلیل رفتارهای سیاسی یا مشکلات واردات و صادرات در این حد آسان نیست، اما این بینش را به‌وجود می‌آورد که واردات برق و استفاده از امکانات کشورهای همسایه خصوصا برای تبدیل برق به کالاهای جایگزین همانند سیمان و فولاد می‌تواندگزینه مناسبی باشد. همچنین صادرات مستقیم برق نیز تا زمانی‌که برق لازم برای تولید کالاهای جایگزین فولاد و سیمان تامین نشده باشد، از مقدار جزئی افزایش نمی‌یابد اما پس از افزایش ظرفیت تولید داخلی برق به میزان ۱۰ درصد، صادرات مستقیم برق نیز همزمان با افزایش صادرات کالای جایگزین به منظور بیشینه‌سازی جاذبه و سود توجیه می‌یابد.

در مورد کالاهای جایگزین و صادرات غیرمستقیم برق نیز باید گفت که فولاد به نسبت سیمان در اولویت بالاتری از تخصیص برق قرار دارد و در مقادیر پایین‌تری از ظرفیت تولید برق و حتی در شرایط فعلی به میزان سقف ظرفیت تولید فولاد برق اختصاص داده می‌شود که در سیمان اینگونه نیست. علیرغم روند ثابت و تولید حداکثری فولاد در همه نوسانات، سیمان با افزایش ظرفیت تولید برق به مراتب افزایش تولید داشته و در مقادیر بالاتر از ۲۰ درصد با روندی شدیدا صعودی افزایش تولید و افزایش تخصیص برق را نشان می‌دهد. البته این روندها همان‌طور که در شکل ۱ و بخش نتایج توضیح داده شد، کاملا به ضرایب توابع هدف (جاذبه و سود) بستگی دارند.

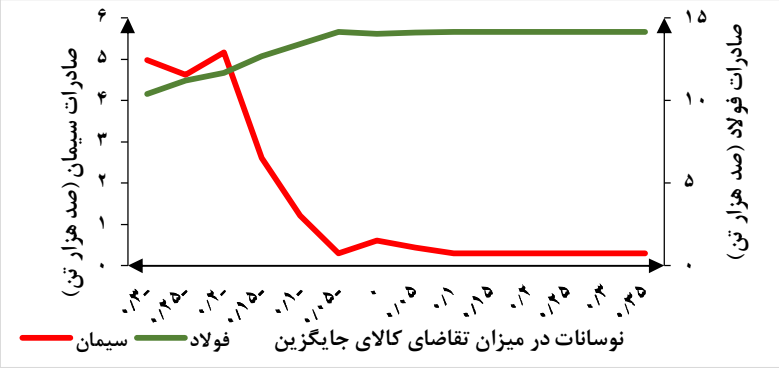
علاوه بر تحلیل‌های فوق، در ایران متناسب با شرایط سیاسی و بالاخص تحریم‌ها میزان تقاضا برای صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق و یا حتی واردات برق همواره با عدم قطعیت همراه است. لذا با توجه به چالش های موجود، بررسی و تحلیل نوسانات در عرضه و تقاضای برق موضوعیت پیدا می‌کند. این مساله می‌تواند بیانگر قدرت چانه‌زنی سیاسی و تجاری ایران نیز باشد. این مساله از سه منظر نوسان در واردات برق به ایران یا عرضه برق، نوسان در تقاضای مستقیم برق و همچنین نوسان در صادرات غیرمستقیم برق می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۳ نشان‌دهنده رفتار مدل تحت سناریوهای مختلفی از این نوسانات در تقاضای کالاهای جایگزین و صادرات غیرمستقیم است.

شکل ۳) تغییرات در تصمیمات بهینه با نوسان در تقاضای کالای جایگزین

الف) تغییرات در تابع سود و صادرات/واردات مستقیم برق



ب)تغییرات در صادرات غیرمستقیم برق



منبع: محاسبات پژوهش

تحلیل رفتار مدل در اثر نوسانات در تقاضای کالای جایگزین و تحت تاثیر قرار گرفتن صادرات غیرمستقیم بیانگر آن است که با افزایش تقاضا برای کالاهای جایگزین، صادرات مستقیم برق کاملا روند نزولی به خود گرفته است. این بدین معنی است که صادرات غیرمستقیم و چانه‌زنی برای فروش فولاد و سیمان اولویت کاملا بالاتری به صادرات مستقیم دارد و درصورت وجود بازار هدف مناسب، صادرات مستقیم برق معنی پیدا نمی‌کند. نکته

مهم دیگر که در شکل ۳.الف پیداست، کاهش واردات برق است که در مثال‌ها و تحلیل‌های قبلی همواره مقدار ثابتی داشت. حتی واردات برق با کاهش تقاضای کالاهای جایگزین کاهش پیدا کرده و روند نزولی دارد. این بدین معناست که مدل از واردات برق برای تولید فولاد و سیمان استفاده می‌کرده است که با کاهش تقاضای کالای جایگزین، روند واردات برق نیز نزولی می‌شود.

در مورد صادرات غیرمسقیم نیز با افزایش تقاضا برای کالاهای جایگزین، صادرات غیرمستقیم برق نیز افزایش می‌یابد. روند صعودی صادرات فولاد در شکل ۳.ب کاملا مشخص است، اما به دلیل وجود ظرفیت تولید برق و واردات، منابع تولید برق به تولید فولاد اختصاص داده می‌شود که به‌ناچار منجر به کاهش صادرات سیمان می‌شود، همان‌طور که منجر به کاهش صادرات مستقیم برق نیز می‌شود (شکل ۳.الف).

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر شبکه تبادل تجاری برق را با در نظر گرفتن کالاهای جایگزین برق در شبکه اعم از فولاد و سیمان به‌صورت یک مدل تصمیم‌گیری ریاضی ارائه کرد که با در نظرگرفتن میزان تقاضا و عرضه برق در شبکه تجارت برق و در نظر گرفتن امکان تبدیل برق به کالاهای جایگزین، قادر به تولید جواب‌هایی به منظور مشخص کردن تصمیمات بهینه از دیدگاه ایران از دو بعد بیشینه‌سازی جاذبه و رقابت‌پذیری در سایر کشورها و هم‌چنین از بعد بیشینه‌سازی سود حاصل از صادرات مستقیم برق یا غیر مستقیم آن (توسط کالاهای جایگزین) است. شرایط خاص تولیدی و عرضه و تقاضا در شبکه تجارت برق نیز مدل شدند که در ابعاد چندین کشور با استفاده از داده‌های واقعی و به روز مورد بررسی و آزمون قرار گرفتند.

نتایج حاصل از مدل با تولید جواب‌هایی دربرگیرنده سیاست بهینه برای صادرات و واردات برق به کشورهای دیگر برای ایران است. همچنین حد تبدیل برق به کالای جایگزین وصادرات آن، امکان استفاده عملی آن در سیاست‌گذاری و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های مربوط به صنعت برق در این مدل مشخص می‌شود. پژوهشها این مقاله نشان داد که مابین دو کالاهای جایگزین برق در نظر گرفته شده، فولاد می‌تواند به عنوان کالایی کم‌نظیر برای ایجاد جاذبه در کشورهای مقصد در نظر گرفته شود که جنبه استراتژیک و بلند مدت انتظار

از صنعت برق می‌تواند باشد، اما برای ایجاد سودآوری در کوتاه مدت کالای سیمان گزینه بهتری نسبت به فولاد است. (مقایسه یافته ها با یافته های پیشین) تحلیل‌های صورت گرفته نشان دادند در شرایط فعلی، با میزان تقاضای داخلی و میزان عرضه و تقاضای برق و نیز کالاهای جایگزین آن در شبکه، افزایش ۱۰ الی ۱۵ درصدی میزان تولید برق در ایران، پتانسیل افزایش شدید (با شیب زیاد) سودآوری و جاذبه را برای ایران دارد، هرچندکه افزایش ظرفیت تولید داخلی برق بیش از ۱۵ درصد نیز منجر به افزایش سود خواهد شد اما بنابه نتایج به‌دست آمده، نرخ بازگشت سرمایه برای این پله از سرمایه‌گذاری در تولید داخلی برق کمتر خواهد بود. تحلیل نتایج به‌دست آمده حاکی بر این است که چانه‌زنی و رایزنی سیاسی/تجاری در کشورهای دیگر به منظور افزایش تقاضای برق یا حتی کالاهای جایگزین، در شرایط فعلی منجر به ایجاد سودآوری برای شبکه برق ایران نخواهد شد.

بر اساس مطالعات و تحلیلهای صورت گرفته در ادامه توصیه‌های سیاستی ارائه می گردد:

۱. بهینه‌سازی ترکیب صادرات برق و کالاهای جایگزین:

سیاست‌گذاران باید به جای افزایش مستقیم صادرات برق، به توسعه صنایع وابسته مانند فولاد و سیمان توجه کنند. این صنایع در بلندمدت رقابت‌پذیری ایران را در بازارهای هدف افزایش می‌دهند. در پیشبرد این تصمیم ایجاد مکانیزم‌های تشویقی بسیار موثر است، تعیین مشوق‌هایی برای صنایعی که از برق داخلی بهره می‌برند و محصولات صادراتی تولید می‌کنند، می‌تواند مزایای اقتصادی بیشتری نسبت به صادرات مستقیم برق داشته باشد.

۲. مدیریت ظرفیت تولید برق برای افزایش سودآوری

افزایش کنترل‌شده و سرمایه‌گذاری برای افزایش ظرفیت تولید برق باید در حد ۱۰ تا ۱۵ درصد انجام شود تا بیشترین میزان سودآوری و جذب بازار حاصل شود، بدون آنکه نرخ بازگشت سرمایه کاهش یابد. تخصیص هوشمندانه برق بین صنایع داخلی می‌تواند تقاضای پایدار برای برق ایجاد کند و هم‌زمان صادرات غیرمستقیم را تقویت نماید.

۳. توسعه نیروگاه‌های صادرات‌محور با مشارکت بخش غیردولتی

به منظور حفظ بازارهای صادراتی در بخش برق و جلوگیری از ناترازی برق داخلی، احداث نیروگاه‌های جدید صادرات‌محور با جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و غیر دولتی توصیه می‌شود. بخشی از برق تولیدی این نیروگاه‌ها در ایام اوج مصرف به شبکه

داخلی تزریق و در سایر ایام به صادرات اختصاص یابد. این رویکرد باعث افزایش امنیت عرضه داخلی و درآمد ارزی کشور خواهد شد.

۴. برنامه‌ریزی برای توسعه زیرساخت‌های صادرات برق و کالاهای جایگزین

با توجه به ظرفیت‌های فنی ایجادشده برای اتصال شبکه برق ایران به کشورهای منطقه، لازم است الزامات قانونی، قراردادی و فنی برای صادرات برق و کالاهای جایگزین به بازارهای جدید با جدیت پیگیری شود تا تنوع بازارها و پایداری درآمد ارزی تضمین گردد. افزایش ظرفیت تولید برق باید با دقت مدیریت شود تا از کاهش نرخ بازگشت سرمایه جلوگیری گردد. سیاست‌های تجاری باید به جای وابستگی به چانه‌زنی سیاسی، بر توسعه مزیت‌های داخلی و هدایت صادرات کالاهای جایگزین تمرکز کنند.

با وجود این که مدل ریاضی ارائه شده بسیاری از شرایط واقعی و سیاسی شبکه تجارت برق را منعکس می‌کند، اما طبیعتا محدودیت‌ها و الزامات دیگری نیز وجود دارند که می‌توان با افزودن به تعریف مساله و مدل فعلی منجر به بهبود تصمیات و سیاست‌گذاری‌ها شود. از جمله این الزامات، مدل‌سازی تأثیر سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی، به‌ویژه برق، بر مدیریت تقاضا و عرضه داخلی است. این موضوع می‌تواند با توسعه مدل فعلی و افزودن مفروضات مرتبط با جذب سرمایه و احداث نیروگاه‌های جدید مورد مطالعه قرار گیرد.

از طرف دیگر، یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذاری در چنین شبکه‌هایی عدم قطعیت‌های حاضر در دنیای واقعی است که دقت و صحت تصمیمات خروجی از مدل را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین شناسایی و مدلسازی چنین عدم‌قطعیت‌هایی در داده‌ها مثمربه‌ثمر خواهد بود.

منابع

مهرابی، م.، شریفی، ع.، و صفاری، ب. (۱۴۰۳). مدل‌سازی اقتصادی شبکه تبادل برق ایران و همسایگان غربی با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی .پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)، ۲۴۱، ۱۹۲–۱۶۳.

عظیم‌زاده آرانی، م.، و کجوری نفت‌چالی، م. (۱۴۰۲). تحلیل فرایند اصلاحات بخش برق در چین و توصیه‌های سیاستی برای ایران .پژوهشنامه اقتصادی،۲۳۹۱،۲۱۷–۱۶۶ .

رفعت، م. (۱۴۰۰). تحلیل جایگاه تجاری ایران و شرکای آن در غرب آسیا بر اساس شاخص‌های وزن‌دار شبکه تجاری .نظریه‌های کاربردی اقتصاد، ۸۱، ۱۶۴–۱۴۵ .

طاهری، ص.، کریم‌زاده، م.، سیفی، ا.، و ملک‌السادات، س. (۱۴۰۲). بررسی اثرات عضویت در سازمان همکاری‌های شانگهای بر امکان‌پذیری ایجاد پیوند تجاری در شبکه تجاری کشورهای پساشوروی؛ رهیافت مدل گراف تصادفی .(ERGM) اقتصاد و تجارت نوین، ۱۸(تابستان)، ۲۷–۴۷۲.

میرتاج‌الدینی، ل.، شیرین‌بخش ماسوله، ش.، موسوی، م.، و حیدری، ک. (۱۴۰۱). بررسی جایگاه و شدت رقابت تجارت برق ایران در منطقه غرب آسیا با استفاده از رویکرد تئوری شبکه . توسعه و سرمایه، ۲۵۰–۲۲۷.

تقوی، م.، جهانگرد، ا.، و صفوی، ر. (۱۳۹۰). بررسی و تحلیل مدل هکشر–اهلین–وانک (HOV) در اقتصاد ایران .پژوهش‌ها و مدل‌سازی اقتصادی، ۱۳، ۶۹–۴۵.

جلایی، س. ع.، و افشارپور، م. (۱۳۹۹). صادرات ضمنی یارانه حامل‌های انرژی در ایران۱۳۸۷–۱۳۹۵ .پژوهش‌های رشد و توسعه پایدار، ۲۰۴، ۹۱–۶۷.

رفعت، م. (۱۳۹۷). کاربرد تکنیک تحلیل شبکه در بررسی روابط چندجانبه تجاری ایران با مهم‌ترین شرکای تجاری در آسیا .پژوهش‌ها و مدل‌سازی اقتصادی، ۹۳۴، ۱۳۷–۱۰۷.

فریدزاد، ع. (۱۳۹۸). سنجش خالص صادرات بین‌بخشی یارانه ضمنی حامل‌های انرژی در سطح بخش‌های اقتصادی ایران .پژوهش‌های اقتصادی ایران، ۲۴۷۸، ۱۲۵–۹۳ .

طاهری‌فرد، ع.، و اخوان، م. (۱۳۸۸). محاسبه صادرات مستقیم و غیرمستقیم برق و یارانه ضمنی پرداختی بخش برق به بخش صادرات با استفاده از جدول داده–ستانده .بررسی‌های بازرگانی، ۳۷، ۸–۲.

لطفعلی‌پور، م.ر.، نوروزی، ر.ا.، آشنا، م.، و ذبیحی، م. (۱۳۸۸). بررسی تأثیر الحاق به سازمان جهانی تجارت بر صادرات برق ایران .فصلنامه مدل‌سازی اقتصادی، ۳۹، ۲۰۲–۱۷۷.

References

Aller, C., Ductor, L., & Herrerias, M. J. (2015). The world trade network and the environment. Energy Economics, 52, 55–68.

Anderson, J. E. (1979). A theoretical foundation for the gravity equation. American Economic Review, 69(1), 106–116.

Antweiler, W. (2016). Cross-border trade in electricity. Journal of International Economics, 101, 42–51.

Bergstrand, J. H. (1985). The gravity equation in international trade: Some microeconomic foundations and empirical evidence. Review of Economics and Statistics, 67(3), 474–481.

Braeutigam, R. R. (1989). Optimal policies for natural monopolies. In R. Schmalensee & R. D. Willig (Eds.), Handbook of Industrial Organization (Vol. 2, pp. 1289–1346). Elsevier.

Brell, J., Rausch, S., & Schwenen, S. (2021). Cross-border electricity trading and climate policy interactions in Europe. Energy Economics, 96, 105149.

Bistline, J., Onda, C., & Browning, M. (2023). Equity implications of net-zero emissions: A multi-model analysis of energy expenditures across income classes under economy-wide deep decarbonization policies. Energy and Climate Change, 5, 100118. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100118

Brander, J., & Krugman, P. (1983). A 'reciprocal dumping' model of international trade. Journal of International Economics.

Chen, W., Niu, X., Ke, W., & Yu, Z. (2023). Investigating the energy trade networks in the Belt and Road regions: Structures and evolution. Energy, 283, 129157.

Fagiolo, G., Reyes, J., & Schiavo, S. (2010). International trade and financial integration: A weighted network analysis. Quantitative Finance, 10(4), 1–19.

Feenstra, R. C. (2015). Advanced international trade: Theory and evidence. Princeton University Press.

Grubel, H. G., & Lloyd, P. J. (1975). Intra-industry trade: The theory and measurement of international trade in differentiated products. Wiley.

Head, K., & Mayer, T. (2021). Gravity equations: Workhorse, toolkit, and cookbook. In G. Gopinath, E. Helpman, & K. Rogoff (Eds.), Handbook of International Economics (Vol. 5, pp. 131–195). Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.hesint.2021.03.004

Heckscher, E. F., & Ohlin, B. (1933). Heckscher-Ohlin trade theory. Oxford University Press.

Huff, D. L. (1963). A probabilistic analysis of shopping center trade areas. Land Economics, 39(1), 81–90.

Jackson, M. O. (2008). Social and economic networks. Princeton University Press.

Li, X., Jin, Y. Y., & Chen, G. (2003). Complexity and synchronization of the world trade web. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 328, 287–296.

Linder, S. B. (1961). An essay on trade and transformation. Almqvist & Wicksell.
Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. Structural and Multidisciplinary Optimization, 41(6), 853–862. https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7
Mertens, T., Gonzalez-Salazar, M. A., & Howells, M. (2021). Representing cross-border trade of electricity in long-term energy-system optimization models with a limited geographical scope. Applied Energy, 282, 116060. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116060
Ricardo, D. (1817). On the principles of political economy and taxation. John Murray.
Rogowski, R. (1990). Commerce and coalitions: How trade affects domestic political alignments. Princeton University Press.
Sadorsky, P. (2011). Trade and energy consumption in the Middle East. Energy Economics, 33(5), 739–749. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.12.012
Singh, A., Jamasb, T., Nepal, R., & Toman, M. (2018). Electricity cooperation in South Asia: Barriers to cross-border trade. Energy Policy, 120, 741–748.
Smith, A. (1776). An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations. Strahan and Cadell.
Timilsina, G. R., & Toman, M. (2016). Potential gains from expanding regional electricity trade in South Asia. Energy Economics, 60, 6–14.
Torreggiani, S., Mangioni, G., Puma, M. J., & Fagiolo, G. (2018). Identifying the community structure of the international food-trade multi-network. Environmental Research Letters, 13(5), 054026.
Venizelou, V., & Poullikkas, A. (2024). Trend analysis of cross-border electricity trading in Pan-European network. Energies, 17(21), 5318. https://doi.org/10.3390/en17215318
Xu, H.-C., Wang, Z.-Y., Jawadi, F., & Zhou, W.-X. (2023). Reconstruction of international energy trade networks with given marginal data: A comparative analysis. Chaos, Solitons & Fractals, 167, 113031.
Zhang, H., Ji, Q., & Fan, Y. (2014). Competition, transmission and pattern evolution: A network analysis of global oil trade. Energy Policy, 73, 312–322.
Zhao, X., Lin, B., & Li, X. (2021). Modeling electricity trade among China's provinces: A gravity model approach. Applied Energy, 289, 116648.

استناد به این مقاله:
Journal of Economic Research is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License..