Applied Theories of Economics, Vol. 11, No. 2, Summer 2024

Presenting a Model to Determine the Equilibrium in an Electricity Oligopoly with Strategic Investment Decisions: a Case Study

Reza Basiri[1]
Mansour Abedian[2]
Saeed Aghasi[3]
Zahra Dashtaali[4]

Abstract

The purpose of this paper is to use optimization and equilibrium models to study the behavior of electricity producers in a multilateral oligopoly market with a competitive margin in which all producers have investment decisions. Modern wholesale electricity markets often have producers who exercise market power. The standard method for modeling market power in a monopoly with a competitive fringe is to use Mixed Complementarity Problems (MCPs) and conjecture variations. However, such models can lead to near-optimal behavior for monopolists. To solve this problem, we develop an equilibrium problem with equilibrium constraints to model an electricity market structure. It is modeled in the equilibrium of two types of players. Price-maker companies, which have market power, and price-taking companies, which do not have the power to impose prices on the market. The proposed model finds multiple equilibrium for firms' investment and profit decisions. The model was simulated for 2 price-setting electricity companies and 2 price-setting electricity companies in Iran. This research was done in 2022. In this article, the power companies of Isfahan and Boushehr provinces, which also have power plants, are considered as price takers, and the power companies of Khouzestan and Hormozgan provinces are considered as price takers. The presented model shows how it may be optimal for price-making companies to accept losses in some periods in order to prevent more investment of price-taking companies in the market.
Keywords: *price-taking: price-making; equilibrium; Oligopoly.*
JEL Classification: *D43, A11, C70, C02.*

[1] PhD Candidate, Department of Management, Dehaghan branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. basirira@yahoo.com
[2] PHD, Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. mansoorabedian@sin.iaun.ac.ir
[3] ,[4] PHD, Department of Management, Dehaghan branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. sa_aghasi@yahoo.com
[4] PHD, Department of Management, Dehaghan branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. zahra.dashtaali@gmail.com

Introduction

Iran is currently facing three major evolving issues that could significantly Modelling electricity markets has attracted much attention in the recent studies. Optimisation and equilibrium models, in particular, have been extensively used to provide insights from planning, operations, and regulatory perspectives. Regulators may use them to monitor market inefficiencies, profit-maximising generators may use them to devise trading strategies, while policymakers may use them to test the outcomes of different proposed policy mechanisms.

The present study aims to develop an Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints (EPEC) to model an electricity market structure. The EPEC models two types of players: price-making firms, who have market power, and price-taking firms, who do not. The proposed model considers an oligopoly with a competitive fringe where all firms have investment decisions. The results indicate that an EPEC can model investment decisions in an oligopoly with a competitive fringe more credibly and thus overcome the myopic behaviour observed in MCPs. The EPEC found multiple equilibria for investment decisions and firms' profits. Despite this, market prices and consumer costs were found to remain relatively constant across the equilibria. A further contribution of the modelling approach is that it shows how it may be optimal for price-making firms to accept losses in some time periods in order to disincentivize price-taking firms from investing further into the market.

Methodology

A novel mathematical model of an imperfect electricity market, one that is characterised by an oligopoly with a competitive fringe was developed. Two types of generating firms; price-making firms, who have market power, and price-taking firms who do not were modelled. All firms had both investment and forward generation decisions. The model took the form of an Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints (EPEC), which finds an equilibrium of multiple bilevel optimisation problems. The bilevel formulation allowed the optimisation problems of the price-taking firms to be embedded into the solve the EPEC problem, we utilised the Gauss-Seidel algorithm. An EPEC problem is a prudent model choice when modelling investment decisions in an oligopoly with a competitive fringe. This is because it overcomes modelling issues previously found in the literature and requires fewer limiting assumptions. However, we note that EPEC problems can be computationally challenging to solve in comparison to Mixed Complementarity Problems (MCPs).

The overall EPEC problem is to find an equilibrium among the MPEC problem of each price-making firm, which represents a Nash Equilibrium. Each MPEC problem can be represented as a Mixed Integer Nonlinear Problem (MINLP), making it computationally difficult to find Nash Equilibria. To do so, we employ the Gauss-Seidel algorithm (Hori & Fukushima, 2019). Furthermore, to obtain an initial starting solution for this algorithm we use the approach taken by Leyffer and Munson (2010) for solving EPEC problems (henceforth known as the Leyffer-Munson approach). Both the GuassSeidel algorithm and the Leyffer-Munson approach are described in detail in this section.

Results and Discussion

The results found multiple market equilibria. This led to varied investment decisions and profits for the price-making firms. These results will be of interest to generating firms, particularly those with market power. In fact, our results indicate that if firms do not expand their generation portfolios, then they may face profits lower than they would if the market was perfectly competitive. The results show that may it be optimal for generatingfirms with market power to occasionally operate some of their generating units at a loss in the short term in order to make profit in the long term. The driving factor behind this outcome is the ability of both price-making and price-taking firms to make investment decisions. The ability of price-taking firms to invest further into the market motivates the price-making firms to depress prices in earlier timepoints. This reduces the revenues price-taking firms could make from new investments and thus prevents them from making such investments. Such behaviour would not be captured by MCP or cost-minimisation unit commitment models. Consequently, this result again highlights the suitability of the EPEC modelling approach and the importance of including investment decisions in models of oligopolies with competitive fringes. Fourth, the multiple equilibria also indicate that generation from existing baseload may be higher in some equilibria compared with others. Such market outcomes will be of interest to energy policymakers who are concerned about carbon emission levels. Older baseload generators tend to be coal-based and thus emit higher levels of carbon. Consequently, while the market may be indifferent to where the electricity comes from, policymakers may seek to put measures in places to encourage the equilibrium outcomes where existing baseload generation is reduced.

فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد/ سال یازدهم/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۳/ صفحات ۲۸۰-۲۴۹

ارایه مدلی برای تعیین تعادل بازار انحصاری برق با تصمیمات سرمایه گذاری استراتژیک: مطالعه موردی شرکت های برق ایران[۱]

رضا بصیری
دانشجوی دکتری مهندسی مالی دانشگاه آزاد دهاقان، basirira@yahoo.com
منصور عابدیان*
گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه ازاد اسلامی، نجف آباد ، ایران، mansoorabedian@sin.iaun.ac.ir
سعید آقاسی
استادیار مدیریت دانشگاه آزاد دهاقان، sa_aghasi@yahoo.com
زهرا دشت لعلی
استادیار مدیریت دانشگاه آزاد دهاقان، Zahra.dashtlaali@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

چکیده

هدف از این پژوهش استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و تعادل برای نشان دادن رفتار تولید کنندگان برق در بازار انحصارطلبی چندجانبه با حاشیه رقابتی است که در آن همه تولیدکنندگان تصمیمات سرمایه‌گذاری دارند. بازارهای عمده فروشی برق مدرن اغلب تولیدکنندگانی دارند که قدرت بازار را اعمال می‌کنند روش استاندارد برای مدل‌سازی قدرت بازار در یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی، استفاده از مسائل تکمیلی مختلط و تغییرات حدسی است. با این حال، چنین مدل‌هایی می‌توانند منجر به رفتار تقریبا بهینه برای انحصارگرایان شوند. برای حل این مسئله، ما یک مساله تعادلی با محدودیت‌های تعادلی برای مدل‌سازی چنین ساختار بازار برق ایجاد می‌کنیم. در تعادل دو نوع بازیگر مدل‌سازی می‌شود. شرکت‌های قیمت‌گذار، که قدرت بازار دارند، و شرکت‌های قیمت‌پذیر که قدرتی برای اعمال قیمت بر بازار ندارند. مدل پیشنهادی تعادل‌های متعددی را برای تصمیمات سرمایه‌گذاری و سود شرکت‌ها پیدا می‌کند. مدل برای ۲ شرکت برق قیمت‌پذیر و ۲ شرکت برق قیمت گذار در ایران شبیه سازی شد. این تحقیق در سال ۱۴۰۲ انجام گرفت. در این مقاله شرکت‌های برق استان های اصفهان و بوشهر که دارای نیروگاه‌های برق نیز می باشند به عنوان قیمت‌گذار و شرکت‌های برق استان های خوزستان و هرمزگان به عنوان قیمت‌پذیران در نظر گرفته شده‌اند. مدل ارایه شده نشان می‌دهد چگونه ممکن است برای شرکت‌های قیمت‌گذار پذیرش زیان در برخی دوره‌های زمانی به منظور جلوگیری از انگیزه شرکت‌های قیمت‌پذیر از سرمایه‌گذاری بیشتر در بازار بهینه باشد.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری، قیمت‌پذیری، تعادل، بازار انحصاری چندجانبه.
طبقه‌بندی JEL: C02، D43، A11 ، C70.

---

[۱] این مقاله مستخرج از رساله دکترای نویسنده اول در دانشگاه آزاد اسلامی دهاقان است.

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

مطالعه استراتژی های قیمت‌گذاری رقابتی و رفتار اقتصادی شرکت‌ها سال‌های طولانی است که یک موضوع مورد توجه در ادبیات تجاری بوده است اما در سال‌های اخیر این موضوع توسط محققان و دانشمندان مورد مطالعه علمی قرار گرفته , تعداد مقالات منتشر شده در این زمینه بسیار افزایش یافته است (دوین و برتچ[1] ۲۰۱۹، هوانگ و همکاران[2] ۲۰۲۰). بررسی پویایی رقابت، موازنه‌هایی که شرکت‌ها در تعقیب استراتژی‌های بازاریابی رقابتی با آن مواجه می‌شوند، و نقش اطلاعات در شکل‌دهی به این استراتژی‌ها موضوعات جدید در استراتژی های رقابتی هستند. ورود نسبتاً دیرهنگام رقابت به صحنه مطالعات قیمت‌گذاری استراتژیک دانشگاهی مطمئناً با توسعه نظریه بازی‌ها به عنوان یک ابزار تحلیلی مرتبط است. اگرچه تئوری بازی‌ها سابقه‌ای طولانی دارد، برای مدت طولانی به مطالعه مسائل ریاضیاتی محدود می‌شد. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه نظریه بازی‌ها و در حوزه بازی‌های پویا این نظریه را غنی‌تر کرده و آن را برای مدل‌سازی استراتژی‌های رقابتی در دنیای واقعی کاربردی‌تر کرده است. این بدان معنا نیست که نظریه بازی‌ها تنها راه برای درک رقابت است. "مدل رقابت کامل" اقتصاد کلاسیک پیش از تئوری بازی در تحلیل برخی شرایط رقابتی کاربرد دارد. با این حال، عمدتاً رقابت در دنیای مدرن بین چند رقیب صورت می گیرد که قدرت بازار را در دست دارند و منافع آنها به یکدیگر وابسته است، به طوری که اقدامات هر رقیب بر تصمیمات و عملکرد سایر رقبا تأثیر می گذارد. چنین موقعیت‌هایی مشخصه رقابت استراتژیک هستند و نظریه بازی های غیرهمکارانه راه مناسبی برای مطالعه و بررسی آنها می باشد.

در دهه های اخیر مدلسازی در بازارهای برق مورد توجه محققان تحقیق در عملیات قرار گرفته است. به طور ویژه مدل‌های بهینه‌سازی و تعادل به طور گسترده برای نشان دادن رفتار تولیدکنندگان برق استفاده شده‌اند. چنین ابزارهایی چشم‌اندازی از دیدگاه‌های برنامه‌ریزی، عملیات و نظارتی را ارائه می‌دهند. تنظیم‌کننده‌ها ممکن است از آنها برای نظارت بر ناکارآمدی‌های بازار استفاده کنند. تولیدکنندگان به منظور به

[1] Devine & Bertsch
[2] Huang et al.

حداکثر رساندن سود ممکن است از آنها برای طراحی استراتژی‌های معاملاتی استفاده کنند، در حالی که سیاست‌گذاران ممکن است از آنها برای آزمایش نتایج مکانیسم‌های مختلف سیاست پیشنهادی استفاده کنند.

از دهه ۱۹۸۰، کشورها بازارهای برق خود را با هدف تقسیم مالکیت بر فعالیت های بازار، مقررات زدایی کرده‌اند. اهداف دولت ها تقویت رقابت، افزایش کارایی بازار و در نتیجه کاهش هزینه‌های مصرف کننده می‌باشد. در نتیجه مقررات‌زدایی شرکت‌کنندگان در بازار که به عنوان بازیگران بازار نیز شناخته می‌شوند، به دنبال حداکثر کردن مستقل سود خود بوده‌اند (بالتنسبرگر و همکاران[1]، ۲۰۱۶). مقررات‌زدایی و آزادسازی بازارهای برق به شواهدی مبنی بر اعمال قدرت بازار توسط بازیگران بازار منجر شده است (لی و همکاران[2]، ۲۰۱۸). قدرت بازار زمانی وجود دارد که یک (یا چند فروشنده) در بازار به طور استراتژیک سود خود را با تأثیرگذاری بر قیمت فروش از طریق مقداری که به بازار عرضه می‌کنند، به حداکثر می‌رسانند.

این برخلاف سناریوهایی است که فروشندگان نمی‌توانند بر قیمت‌ها تأثیر بگذارند، در این صورت به چنین بازاری بازار رقابت کامل گفته می‌شود. در حالی که مدلسازی دقیق قدرت بازار در مسایل نظریه بازی‌ها از چالش های بزرگ به حساب می‌آید مطالعاتی وجود دارد که قدرت بازار را در مدل های بازار برق به روش های مختلف به دست آورده است . برای پوزو و همکاران[3] (۲۰۱۷) ،بررسی جامعی از مدل‌های بازار برق که قدرت بازار را در خود جای داده‌اند، ارایه نمودند.

دیواین و برتش[4] (۲۰۱۸)، در مقاله‌ای جدیدتر از یک مسئله تکمیلی مختلط[5] (MCP) برای استراتژی های کاهش بار توسط مصرف کننده استفاده نمودند در نتیجه MCP ها محقق اجازه می دهد تا بازیگران دارای قدرت بازار را به عنوان بازیگران مدل تعادل کورنو در نظریه بازی‌ها مدل‌سازی کنند. نویسندگانی نیز در مقالات اخیر شان در

---

1 Baltensperger et al.
2 Li et al.
3 Pozo et al.
4 Devine & Bertsch
5 Mixed Complementarity Problem (MCP)

مدل‌سازی بازار انرژی MCP ها را به عنوان مسائل بهینه سازی محدب فرموله مجدد کرده‌اند (انصاری و هولز[1]، ۲۰۱۹، برات و همکاران[2]، ۲۰۲۰).

علیرغم ادبیات غنی در مورد مشکل تعادل با محدودیت‌های متعادل[3] (EPEC) و مدل‌های تعادلی برای بازارهای برق، در هیچ یک از مقالات، بازاری را که مشخصه آن یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی است و در آن همه تولیدکنندگان تصمیمات سرمایه‌گذاری دارند مدل‌سازی نمی‌کند. در نتیجه، این مقاله در یک نوآوری جدید مدل را ارایه و نقطه تعادل چنین بازاری را به دست می‌آورد.

سازماندهی این مقاله به این شرح است که: بعد از ارائه این مقدمه، ادبیات موضوع که دربرگیرنده مبانی نظری و مطالعات تجربی صورت گرفته در این زمینه است، ارائه می‌شود. سپس در بخش طراحی الگوی مدل، به معرفی پارامترهای مدل و مدلسازی قیمت‌گذاران و قیمت‌پذیران در بازار برق و چارچوب متدولوژی پرداخته می‌شود. سپس تحلیل‌های تجربی بیان شده است. در نهایت نیز به نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

۲-ادبیات موضوع

مطالعه اخیر متعلق به ادبیات اقتصادی در حال رشدی است که با انحصارات رفتاری سروکار دارد. به جای در نظر گرفتن یک نقطه تعادل در فضای استراتژی به عنوان یک نتیجه معین از تعامل شرکت‌ها، جنبه‌های پویای فرآیندهای یادگیری شرکت‌ها یعنی رفتار تطبیقی شرکت‌ها در موقعیت‌های واقعی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. در این ادبیات، شرکت‌ها به‌طور محدود منطقی هستند، به این دلیل که اطلاعات یا توانایی‌های محاسباتی کافی برای اجرای یک استراتژی تعادلی ندارند ویا به این دلیل که ممکن است در هماهنگی با رقبای خود در اجرای یک پروفایل تعادل شکست بخورند.

اولین جریان ادبیات مربوط یادگیری تطبیقی شرکت های استراتژیک است. شرکت‌های قیمت‌گذار انتظاراتی را در مورد تولید بقیه صنعت شکل می‌دهند و تحت انتظارات خود بهینه سازی می‌کنند. انتظارات بر اساس مشاهدات تاریخی شکل می‌گیرد. شرکت‌ها به طور محدود منطقی هستند یا به این دلیل که تعدیل همزمان رقبای خود را نادیده می‌گیرند، یا به این دلیل که اطلاعات ناقصی در مورد عملکرد تقاضای صنعت دارند یا

1 Ansari& Holz
2 Egging-Bratseth et al.
3 Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints (EPEC)

هر دو. در واقع، تعدیل به اصطلاح موضعی (ساده و غیر استراتژیک)، زمانی که هر شرکتی بهترین پاسخ را به کل تولید رقبای خود در دوره قبلی می دهد، به مدل کورنو (۱۸۳۸) برمی گردد که بر نقطه محدودی از چنین فرآیندی تمرکز دارد. به همین دلیل است که تعدیل موضعی اغلب پویایی بهترین پاسخ کورنو نامیده می‌شود.

بصیری و همکاران (۲۰۲۴)، از جمله افرادی بودند، چندین نتیجه را در مورد همگرایی پویایی‌های تعدیل موضعی به تعادل کورنو-نش به دست آوردند. الگوهای یادگیری پیچیده‌تری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، که در آن شرکت‌ها خروجی خود را به سمت بهترین پاسخ تنظیم می‌کنند و یا به میانگین تاریخی کل بازده پاسخ می‌دهند. این معمولاً همگرایی را به تعادل کورنو-نش افزایش می‌دهد.

بیسچی و همکاران[1] (۲۰۲۴)، رویکرد متفاوتی اتخاذ نمودند. آنها ویژگی‌های همگرایی فرآیندهای تعدیل را با این فرض که تابع تقاضا به درستی مشخص نشده است، مطالعه نمودند. در این روش همگرایی به حالت پایدار معمولاً سریع اتفاق می‌افتد، اگرچه، به دلیل تعیین نادرست تقاضا، حالت پایدار ممکن است با تعادل کورنو-نش متفاوت باشد.

شاخه دیگری از ادبیات، ایده‌های نظریه بازی های تکاملی را به کار می‌گیرد. در این مدل‌ها، انتخاب شرکت‌ها برای سطوح تولید، ملاحظات استراتژیک را شامل نمی‌شود، بلکه صرفاً توسط سودهای گذشته هدایت می‌شود. بنابراین شرکت ها مجبور نیستند بدانند چه تعداد رقیب در بازار وجود دارد، منحنی تقاضای آنها چقدر است و غیره. در واقع این چارچوبی است که در آن می توان جنبه‌های رفتاری مانند آزمایش یا تقلید را مدل‌سازی کرد. تمرکز روی نتیجه بلندمدت فرآیندها است و به ویژه اینکه کدام یک از دو تعادل، کورنو-نش یا تعادل والرازین، پویایی را جذب می‌کند. فرآیند پویایی را می‌توان شبیه سازی کرد یا می توان با استفاده از ابزارهای سیستم پویایی تصادفی مطالعه کرد. واضح است که نتیجه فرآیند پویا به فرضیات دقیق در مورد یادگیری بستگی دارد. اگر شرکت‌ها درگیر یادگیری اجتماعی باشند، در جایی که رفتار موفق‌ترین شرکت‌ها را در دوره قبل تقلید می‌کنند، سپس فرآیند به تعادل والراسی همگرا می‌شود. از سوی دیگر، اگر شرکت‌ها یادگیری فردی را تجربه کنند، فقط

[1] Bischi et al.

می‌توانند در آزمایش فرضی یا واقعی با استراتژی‌های خود شرکت کنند و آنگاه نتیجه ممکن است متفاوت باشد.

در جریان اول ادبیات، رفتار شرکت‌ها استراتژیک است، در حالی که در جریان دوم، شرکت‌های غیراستراتژیک اقدامی را انتخاب می‌کنند که در گذشته بهترین عملکرد را داشته است. جریان سوم این دو ایده را با هم ترکیب می‌کند. مشابه جریان اول، شرکت‌ها می‌توانند از قوانین رفتاری کم و بیش پیچیده استفاده کنند و مانند مورد دوم، رفتار آنها وابسته به سود نسبی گذشته هدایت می‌شود، اما اکنون آنها قوانین رفتاری را انتخاب می کنند. موضوع اصلی در اینجا در پویایی ترکیب بازار (یعنی توزیع بر اساس قوانین) و در پویایی قیمت و کمیت حاصل نهفته است. این مدل در مورد انحصارطلبی‌ها در هومز و همکاران[1] (۲۰۱۸)، توسعه یافته است. در این مطالعه مشخص شد که تعادل کورنو-نش با افزایش تعداد شرکت‌ها در یک صنعت بی‌ثبات می‌شود. در این جریان مطالعه دو قانون رقیب با یک حالت پایدار معمول است. در عوض، در مدل آندونی و همکاران[2] (۲۰۲۱)، دو حالت رفتار دارای تعادل‌های متفاوتی هستند، تعادل‌های کورنو-نش و تعادل والراسی. این مطالعه با یک مطالعه قبلی مهم توسط هوانگ وهمکاران[3] (۲۰۲۱)، مرتبط است. در مقالات هوانگ بازار با شرکت های قیمت‌پذیر و شرکت‌های حرفه ای (مثلاً قیمت‌گذار) تجزیه و تحلیل می‌کنند و نشان می‌دهند که قیمت‌پذیران همیشه سود بیشتری نسبت به شرکت‌های حرفه‌ای دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که رفتار قیمت‌پذیری ممکن است برای شرکت‌ها سودمند باشد و به مطالعه انگیزه‌های شرکت‌ها برای تغییر انواع رفتاری خود و بررسی ویژگی‌های فرآیند انتخاب نوع پویایی آنها دعوت می‌کند. این مقاله به بررسی ادبیات اقتصادی در حال رشدی می‌پردازد که با انحصارات رفتاری (حاشیه رقابتی) شرکت‌های قیمت پذیر و قیمت گذار در صنعت برق سروکار دارد. فانزرس و همکاران[4] (۲۰۱۹)، یک مدل ریاضی با محدودیت های تعادلی[5] (MPEC) برای مناقصه استراتژیک در بازار برق پیشنهاد کردند، یک MPEC می‌تواند یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی را مدل کند، که یک

[1] Hommes et al.
[2] Andoni et al.
[3] Huang et al.
[4] Fanzeres et al.
[5] Mathematical Program with Equilibrium Constraints

برنامه ریاضی است که در آن مسائل بهینه سازی بیشتر توسط سایر مسائل بهینه سازی محدود می‌شوند.

در چالش‌ها و مسائل در یک محیط بازار برق، MPEC ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. مدل بازارهایی که در آن یک رهبر واحد قدرت بازار را در دست دارد. سطح بالایی نشان‌دهنده مشکل بهینه‌سازی بازیکنی است که قدرت بازار را در دست دارد در حالی که مشکلات سطح پایین نشان دهنده مشکلات بازیکنانی است که از قدرت بازاری نیبت به رهبرشان برخوردار نیستند. بازیگران سطح پایین با سایر رقبا هنوز هم می‌توانند قدرت بازار را اعمال کنند (فانزرس و همکاران، ۲۰۱۹، رویز و کونجو[1] ، ۲۰۰۹).

استیگر و ربناک[2] (۲۰۱۷)، روشی مدلی ترکیبی از لاگرانژ و بندر برای فرایندهای آبی با قدرت بازار ارایه دادند. در مقاله ای مشابه حبیبیان و همکاران[3] (۲۰۱۹)، از روش هیورستیک، مدل مشتریان بزرگ برق را با قدرت بازار استفاده کردند در هر دو مقاله تنها یک بازار شرکت‌کننده برتری استراتژیک داشت.

در مطالعاتی تعداد زیاد بازارهای برق مدرن با انحصارطلبی یک حاشیه رقابتی مشخص شده است (بوشنل و همکاران[4] ، ۲۰۰۸؛ والری و کاسمو[5]، ۲۰۱۶).

هاپمن[6] (۲۰۱۳) و انصاری[7] (۲۰۱۷) از یک MCP برای مدل سازی یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی در بازار بین‌المللی نفت یک استفاده کردند. هاپمن (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که مدل سازی یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی با استفاده از MCP می‌تواند به طور خاص سناریوها منجر به تصمیمات بهینه نزدیک، ضد شهودی و در نتیجه غیرواقعی از طرف انحصارگرایان شود.

مشابها دوین و برتچ[8] (۲۰۱۹) مدل MCP از انحصارطلبی با حاشیه رقابتی و بررسی تاتیر پاسخ تقاضا بر روی قدرت بازار در بازارهای برق را توسعه دادند.

---

[1] Ruiz & Conejo
[2] Steeger & Rebennack
[3] Habibian et al
[4] Bushnell et al.
[5] Valeri & Cosmo
[6] Huppmann
[7] Ansari
[8] Devine & Bertsch

در یک فرمول استاندارد MCP، مدل می‌تواند برای هر انحصاری که خودش را بهینه می‌کند، موقعیت در تعادل با اقدامات دیگر انحصارگرایان توضیح دهد اما نمی‌تواند از نظر ریاضی واکنش بهینه حاشیه رقابت را به تصمیم خود در برگیرد.

با این حال، مقاله کیمبرو و همکاران[1] (۲۰۱۴) و نتایج نشان می‌دهد، تغییرات حدسی گنجانده شده در مدل‌های MCP ممکن است منجر به ایجاد ثصمیمات زیربهینه انحصارطلبی شود. این موضوع به این دلیل است که تغییرات حدسی یک ساختار مدل سازی که لزوماً مبتنی بر تئوری اقتصاد نیستند اغلب می‌تواند برای استفاده از استدلال دایره‌ای در مدل‌ها تفسیر شود، و در ارتباط با منحنی‌های تقاضای خطی می‌تواند منجر به ساده‌سازی بیش از حد واقعیت‌های اقتصادی در مدل‌ها شود. به عنوان نمونه، در هیچ یک از مطالعات انصاری (۲۰۱۹) و دیواین و برتش (۲۰۱۹) تصمیمات سرمایه‌گذاری را برای مدل جدید در نظر نمی‌گیرند.

در نتیجه، در این مقاله، با توجه به ادبیات موجود و تایید آن با نشان دادن اینکه زمانی که تصمیمات سرمایه‌گذاری در یک مدل MCP از یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی گنجانده می‌شود، تغییرات حدسی همچنان منجر به خروجی مدل نزدیک بین برای افراد انحصاری می‌شود. در این مقاله این ویژگی مدل‌سازی متضاد را با ایجاد یک مسئله تعادل با مدل محدودیت های تعادلی (EPEC) (یک انحصار چندگانه با یک حاشیه رقابتی که در آن هم انحصارطلب‌ها و هم رقابتی‌ها حاشیه تصمیمات سرمایه‌گذاری دارند) حل شد.

یک EPEC شامل یافتن یک تعادل بین MPEC های متعدد به هم پیوسته است (گابریل و همکاران[2]، ۲۰۱۲). در این کار، هر MPEC مشکل بهینه سازی یک انحصارطلب شخصی را نشان می‌دهد:

یک شرکت تولیدکننده برق که دارای قدرت بازار و به عنوان یک شرکت قیمت‌گذاری شناخته شده است، همچنین شرکت‌های قیمت‌ساز به دنبال حداکثر کردن سود با انتخاب موضوع تولید و سرمایه‌گذاری به محدودیت‌های ظرفیت هستند علاوه بر این،

[1] Kimbrough et al.
[2] Gabriel

شرایط تعادل نشان دهنده مشکلات بهینه‌سازی حاشیه رقابتی به عنوان محدودیت در مشکل هر شرکت قیمت‌گذار تعبیه شده است.

در نتیجه، یک رویکرد EPEC می‌تواند با اجازه دادن به مفروضات محدودکننده مرتبط با تغییرات حدسی غلبه کند. انحصارگرایان به صراحت برای سرمایه‌گذاری بهینه و تصمیمات تولید حاشیه رقابتی برنامه‌ریزی کنند.

آندونی[1] (۲۰۲۱) و ژو و کورکوبتیس[2] (۲۰۲۰) در مقالات جدید پیشنهاد کرده‌اند که در بازارهایی با تولیدات تجدیدپذیر و پراکنده بالا، سرمایه‌گذاری و تصمیمات می‌تواند توسط قیمت‌سازان پیش‌بینی شود.

تعداد مثال‌های زیادی در ادبیات گذشته در مورد EPES ها در مورد استفاده از مدل‌های بازارهای برق وجود دارد. تعدادی از مدل‌های اولیه EPES برای بازارهای برق، مولدهای برق در سطوح بالا و سیستم‌های عملیاتی مستقل را بررسی می‌کند (هو و رالف[3]،۲۰۰۷،پوزو و کونتراز[4]،۲۰۱۱ کانجو و اسمیر[5]، ۲۰۱۱).

بنابراین ویژگی مقاله اخیر نسبت به مطالعات قبلی عبارت است از : ۱- رفتارهای متناقص توسط شرکت‌های قیمت‌گذار هنگام مدلسازی قدرت بازار در یک بازار الیگوپلی به همراه رقابت حاشیه با استفاده از متغیرهای MCP در نظر گرفته می‌شود. ۲- چارچوبی برای گنجاندن تصمیمات سرمایه‌گذاری هنگام مدل‌سازی در بازار انحصارطلبی با حاشیه رقابتی در نظر گرفته می‌شود، این نتایج برای شرکت‌های مولد، با توجه به قدرت بازار، بوداز آنجایی که سود آنها می‌تواند بسته به تعادلی که در بازار وجود دارد متفاوت باشد جالب خواهد ۳- در مدل فوق نشان داده می‌شود که توانایی شرکت‌های قیمت‌پذیر برای سرمایه‌گذاری بیشتر در بازار، شرکت‌های قیمت‌گذار را تحریک به کاهش قیمت در دوره‌های زمانی خاص می‌کند.

---

[1] Andoni
[2] Xu & Courcoubetis
[3] Hu & Ralph
[4] Pozo & Contreras
[5] Conejo & Smeers

۳-مدل سازی

۳-۱- معرفی متغیرها و فرضیات مدل

در این پژوهش، با توجه به تغییر محیط و بازار کسب و کار با گذر زمان، از نظریه بازی‌های پویا برای تحلیل بازار و تعیین تصمیم‌های شرکت‌ها در بازار استفاده شده است. ساختار رقابت در این مطالعه شامل ویژگی‌های پویایی است که نمی‌توان آنها را به روش مطلوبی در الگوی ایستا نمایش داد. در میان ساختارهای مختلف بازار، بررسی بازار انحصار چندجانبه یا الیگوپُلی که شامل تعداد محدودی عرضه کننده (تولیدکننده) و تعداد زیادی متقاضی یا مشتری است به دلیل نزدیک بودن آن به شرایط بسیاری از شرکت‌ها در دنیای واقعی رقابت، انتخاب شده است. با ورود عرضه‌کنندگان مختلف به بازارهای محصولات و خدمات تخصصی در دهه های اخیر، بازارهای انحصار کامل جای خود را به بازارهای انحصار چندجانبه (الیگوپلی) داده است. بازار الیگوپلی نسبت به سایر انواع بازارها دارای ساختاری واقعی‌تری است؛ زیرا بیشتر کالاها در سراسر دنیا به وسیله چند فروشنده یا تولیدکننده اصلی در بازارهای مربوطه شناسانده می‌شوند. در ساختار الیگوپلی شرکت‌ها معمولاً با نوعی تردید و دوراهی روبه رو هستند. شرکت‌ها می‌توانند راهبردهای سوددهی صنعت را بدون درنظرگرفتن راهبردهای رقبا دنبال کنند و خطر واکنش تلافی‌جویانه رقبا و افزایش رقابت و مبارزه در درون صنعت را بپذیرد و یا اینکه راهبردهای خود را بر اساس تحرکات رقبا برای کسب موفقیت در بازار طرح‌ریزی کنند. هدف این پژوهش به دست آوردن مقادیر بهینه سطوح تولید در محیط رقابتی پویا در بازارهای الیگوپلی است. در چنین محیط رقابتی، از مدل نظریه بازی برای تحلیل و بررسی استراتژی های قیمت پذیری و قیمت‌گذاری شرکت ها به طور همزمان استفاده شده است. کاربرد نظریه بازی‌ها و استفاده ترکیبی از ابزارهای تحلیلی با مفاهیم تعادل آینده‌نگر و ابزارهای شبیه‌سازی‌ها با یادگیری رو به عقب برای تحلیل و بهینه کردن استراتژی‌های قیمت‌پذیری و قیمت‌گذاری به طورهمزمان و در قالب یک مدل از جنبه‌های مهم جدید بودن و نوآوری تحقیق می باشد. در ادامه به بررسی و تحلیل مدل‌های به دست آمده در قالب یک مثال در بازار رقابتی صنعت برق پرداخته می‌شود و نتایج مدل بررسی می‌شود. در این پژوهش صنعت انحصاری چند جانبه برقدر نظر گرفته شده است که در آن شرکت‌ها در نوع یا شیوه رفتارشان ناهمگن هستند و این

بسیار نزدیک به شرایط بازار واقعی می‌باشد. در این بازار برخی از شرکت‌ها از استراتژی قیمت‌پذیری پیروی می‌کنند. آنها قدرت بازار را در دست دارند و تولید را به روشی رقابتی بر طبق تجارب قبلی با قیمتی که داده شده تعیین می کنند. سایر شرکت‌ها با مطالعه ترکیب بازارو تعداد شرکت‌های قیمت‌پذیر و قیمت‌گذار، از استراتژی قیمت‌گذاری به عنوان پاسخی برای حفظ تعادل در بازار رقابتی استفاده می‌کنند. همچنین در این پژوهش از مفهوم بازارهای باثبات برای توصیف ترکیبات بازار استفاده می‌شود که در آن هیچ یک از شرکت‌ها انگیزه‌ای برای تغییر نوع رفتار خود به‌صورت یک‌طرفه ندارند و تعادل حاصل به‌طور مقطعی تحت انتظارات قیمت خام پایدار است.

در این قسمت بازارهای تحت بررسی و ورودیهای داده برای مدل‌ها را بررسی قراردادیم. بازارهای برق مورد بررسی در مقاله شامل دونوع بازیکن می‌باشد: شرکت‌های قیمت‌گذار و شرکت‌های قیمت‌پذیر. شرکت‌های قیمت‌گذار ممکن است قدرت بازار را بوسیله تصمیمات تولیدی با تاثیرات قیمت بازار اعمال کنند. شرکت‌های قیمت‌پذیر توانایی چنین کاری را ندارند. هر شرکت تصمیمات تولید بازار پیشرو را برای ماکزیمم کردن سود خود در نظر می گیرد. شرکت‌ها با توانایی قیمت‌گذاری و پرتفولیوهای تولید ابتدایی از هم متمایز شده‌اند. در این مقاله یک بازار برق شامل چهار شرکت تولیدی بررسی شد: $l=1,l=2$ شرکت‌های قیمت‌گذار (اصفهان و بوشهر) و $f=4$, $f=3$ شرکت‌های قیمت‌پذیر (خوزستان و هرمزگان) همچنین شش تکنولوژی بازار برق در نظر گرفته شده است: بار پایه موجود، میانی موجود، اوج موجودی (پیک)، پایه جدید، میانی جدید، پیک جدید. شرکت $l=1$ (اصفهان) یک شرکت یکپارچه از ۳ مراحل ابتدایی، میانی و اوج می‌باشد و شرکت‌های دو و سه و چهاربه ترتیب ابتدایی و میانی و اوج بار می‌باشد.

جدول (۱): اندیس‌ها و مجموعه‌های مربوط به مدل

شرکت های تولید کننده	$f \in F$
تکنولوژی های تولید	$t \in T$
دوره های زمانی	$p \in P$
شرکت های قیمت پذیر	PT
شرکت های قیمت گذار	PM
متغیرها	

متغیرهای اولیه شرکت های قیمت پذیر	
$gen_{f,t,p}^{PT}$	فرم تولید رو به جلو شرکت قیمت پذیر f با تکنولوژی t در دوره p (MWh)
$inv_{f,t}^{PT}$	سرمایه گذاری در ظرفیت تولید جدید با تکنولوژی t برای شرکت قیمت پذیر f (MW)
متغیرهای اولیه شرکت های قیمت گذار	
$gen_{l,t,p}^{PM}$	فرم تولید رو به جلو شرکت قیمت پذیر l با تکنولوژی t در دوره p (MWh)
$inv_{l,t}^{PM}$	سرمایه گذاری در ظرفیت تولید جدید با تکنولوژی t برای شرکت قیمت پذیر l (MW)
متغیرهای دوگان	
γ_p	سیستم قیمت برای دوره زمانی p
$\lambda_{f,t,p}^{PT}$	لاگرانژ چندگانه مرتبط با محدودیت ظرفیت شرکت های قیمت پذیر f با تکنولوژی t در زمان p
$\lambda_{l,t,p}^{PM}$	لاگرانژ چندگانه مرتبط با محدودیت ظرفیت شرکت های قیمت گذار l با تکنولوژی t در زمان p

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۲): پارامترهای مدل

$CAP_{f,t}^{PT}$	ظرفیت تولیدی ساعتی ابتدایی برای شرکت قیمت پذیر f با تکنولوژی t (MW)
$CAP_{l,t}^{PM}$	ظرفیت تولیدی ساعتی ابتدایی برای شرکت قیمت گذار l با تکنولوژی t (MW)
A_p	پایان خمیدگی تقاضا برای مرحله زمان p
B	شیب خمیدگی تقاضا
C_t^{GEN}	هزینه تولید حاشیه برای تکنولوژی t
IC_t^{GEN}	سرمایه گذاری در هزینه تولید تکنولوژی t
W_p	وزن (تعداد از ساعت) مرتبط با دوره رو به جلوی p
CV_l	نوع حدسی مرتبط با شرکت l
E_t	سطح فاکتور انتشار برای برای تکنولوژی

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۳): ظرفیت تولیدی اولیه در ساعت بوسیله شرکت‌ها $CAP_{f,t}$

شرکت قیمت‌پذیر ۴	شرکت قیمت‌پذیر ۳	شرکت قیمت‌گذار ۲	شرکت قیمت‌گذار ۱	تکنولوژی
-	-	۱۹۴۰	۱۹۴۷	بارگذاری موجود
-	۴۰۴	-	۵۱۲	میانی موجود
۲۳۴	-	-	۲۷۰	اوج موجودی

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۴): خلاصه داده‌های ورودی فنی-اقتصادی بررسی شده تکنولوژی‌ها

تکنولوژی	هزینه سرمایه گذاری	هزینه تولید حاشیه	سطح فاکتور انتشار co_2برای برای تکنولوژی
بارگذاری موجود	-	۴۸/۸۷	۱.۱۷
میانی موجود	-	۴۱/۱	۰.۳۶
اوج موجودی	-	۶۳/۳۸	۰.۵۶
بارگذاری جدید	۱۱۰/۷۶۹	۳۱/۵۸	۰.۷۸
میانی جدید	۶۷/۲۶۸	۳۴	۰.۳۰
اوج جدید	۴۰/۳۶۳	۵۰/۵۰	۰.۴۵

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۵): مقدار انتهایی خمیدگی تقاضا برای مرحله زمان p

دوره زمانی p	۱	۲	۳	۴	۵
	۲۵۱۷۵/۱	۲۶۷۶۸/۳۰۷	۳۰۴۲۹/۷۰	۳۴۳۰۲/۱۹۵	۳۷۴۶۵/۷۸۳

منبع: یافته‌های تحقیق

۲-۳-مدلسازی‌های مرتبط

در این بخش چارچوب مسئله تکمیلی مختلط (MCP) توضیح داده خواهد شد که نشان‌دهنده یک بازار برق با دو بازیکن است. انواع بازیگران، شرکت‌های قیمت‌گذاری و شرکت‌های قیمت‌پذیر. تفاوت بین شرکت‌های قیمت‌گذار و قیمت‌پذیر در این است که شرکت‌های قیمت‌گذار قدرت بازار را دارند و بنابراین برای به حداکثر رساندن سود خود رفتاری استراتژیک دارند. این شرکت ها از طریق سرمایه‌گذاری و تصمیمات تولید رو به جلو این کار را انجام می‌دهند. در مقابل شرکت‌های قیمت‌پذیر رفتار استراتژیک ندارند و تصمیمات آنها بر قیمت بازار تأثیر نمی‌گذارد.

ابتدا شرکت قیمت‌گذار l را در نظر می‌گیریم. شرکت قیمت‌گذار l به دنبال حداکثر کردن سود (درآمد کمترهزینه‌ها) خود با انتخاب سرمایه‌گذاری در ظرفیت جدید $inv_{l,t}^{PM}$ و انتخاب میزان برق برای تولید هر تکنولوژی در هر دوره زمانی $gen_{l,t,p}^{PM}$ است. هر دوره زمانی را یک دوره زمانی رو به جلو فرض کرده‌ایم بنابراین $gen_{l,t,p}^{PM}$ تصمیمات تولید روبه جلو است. هزینه شرکت l شامل هزینه سرمایه‌گذاری در هر واحد IC_t^{GEN} و هزینه حاشیه از تولید C_t^{GEN} می‌باشد این در حالی است که در حالی که درآمد آن از قیمت آتی بازار γ_p حاصل می شود. وقتی مسئله به عنوان یک شرکت قیمت‌گذار MCP ارائه می‌شود مسئله بهینه سازی l به شکل زیر است:

$$\max \sum_{t,p} W_p \times gen_{l,t,p}^{PM} \times \left(\gamma_p - C_t^{GEN}\right) - \sum_t IC_t^{GEN} \times inv_{l,t}^{PM} \qquad (۱)$$

s.t

$$gen_{l,t,p}^{PM} \le inv_{l,t}^{PM} + CAP_{l,t}^{PM} \ \ \forall t,p$$

$$gen_{l,t,p}^{PM} > 0, inv_{l,t}^{PM} > 0$$

محدودیت مدل ۱ برای هر فناوری تولید کننده در هر مرحله زمانی در داخل تضمین می کند شرکت l نمی‌تواند بیش از ظرفیت اولیه خود $\mathrm{CAP}_{\mathrm{l,t}}^{\mathrm{PM}}$به اضافه هر گونه سرمایه‌گذاری جدید تولید کند.

مشابها برای شرکت‌های قیمت‌پذیر برای مسئله MCP داریم:

شرکت قیمت‌پذیر f به دنبال حداکثر کردن سود (درآمد کمترهزینه‌ها) خود با انتخاب سرمایه‌گذاری در ظرفیت جدید $inv_{f,t}^{PT}$ و انتخاب میزان برق برای تولید هر تکنولوژی در هر دوره زمانی $gen_{f,t,p}^{PT}$ است. هر دوره زمانی را یک دوره زمانی رو به جلو فرض کرده‌ایم بنابراین $gen_{l,t,p}^{PM}$ تصمیمات تولید روبه جلو است.هزینه شرکت f شامل هزینه سرمایه‌گذاری در هر واحد IC_t^{GEN} و هزینه حاشیه از تولید C_t^{GEN} می‌باشد این در حالی است که در حالی که درآمد آن از قیمت آتی بازار γ_p حاصل می‌شود. وقتی مسئله به عنوان یک شرکت قیمت‌گذار MCP ارائه می‌شود مسئله بهینه سازی f به شکل زیر است:

$$\max \sum_{t,p} W_p \times gen_{f,t,p}^{PT} \times \left(\gamma_p - C_t^{GEN}\right) - \sum_t IC_t^{GEN} \times inv_{f,t}^{PT} \qquad (۲)$$

s.t

$$gen_{l,t,p}^{PM} \le inv_{f,t}^{PT} + CAP_{f,t}^{PT} \ \ \forall t,p$$

$$gen_{f,t,p}^{PT} > 0, inv_{f,t}^{PT} > 0$$

به این نکته باید توجه داشت که قیمت رو به جلوی بازار برای هر دوره زمانی از شرایط واضح بازار زیر تعیین می‌شود:

$$\gamma_p = A_p - B \times \left(\sum_{ff,tt} gen^{PT}_{ff,tt,p} + \sum_{ll,tt} gen^{PM}_{ll,tt,p}\right) \quad (۳)$$

تساوی ۳ منحنی تقاضای خطی را نشان می‌دهد و به بازار اجازه می‌دهد با کاهش تولید کل بازار، قیمت افزایش می‌یابد و بالعکس.

در این قسمت، چارچوب مسئله تعادل با محدودیت‌های متعادل (EPEC) را شرح می‌دهیم. همانطور که قبلاً اشاره شد یک بازار برق با دو نوع بازیگر وجود دارد: شرکت‌های قیمت‌گذاری و شرکت‌های قیمت‌پذیر. شرکت‌های قیمت‌گذار ممکن است قدرت بازار را با استفاده از تصمیمات تولید برای تأثیرگذاری بر قیمت بازار اعمال کنند شرکت‌های قیمت‌پذیر چنین توانایی ندارند.

مسئله EPEC یافتن یک تعادل نش میان MPEC از هر شرکت قیمت‌گذار می باشد. هر مسئله MPEC به صورت یک مسئله غیرخطی صحیح است که محاسبات را برای بدست آوردن نقطه تعادل نش دشوار می‌کند که برای این موضوع از الگوریتم گاوس سایدل استفاده می‌شود.

$$\max \sum_{t,p} W_p \times gen^{PM}_{l,t,p} \times \left(A_p - B \times \left(\sum_{ff,tt} gen^{PT}_{ff,tt,p} + \sum_{ll,tt} gen^{PM}_{ll,tt,p}\right) - C^{GEN}_t\right) - \sum_t IC^{GEN}_t \times inv^{PT}_{f,t} \quad (۴)$$

s.t

$$gen^{PM}_{l,t,p} \le inv^{PM}_{l,t} + CAP^{PM}_{l,t} \quad \forall t, p$$

$$gen^{PT}_{f,t,p} \ge 0, inv^{PT}_{f,t} \ge 0$$

$$gen^{PM}_{l,t,p} \ge 0, inv^{PM}_{l,t} \ge 0$$

که در آن هر یک از تصمیمات تولید و سرمایه‌گذاری شرکت l مقید به غیر منفی بودن است .

محدودیت اخیر در مدل ۴ برای هرتکنولوژی در هر دوره زمانی تضمین می‌کند، شرکت نمی‌تواند بیش از ظرفیت اولیه خود تحت هر گونه سرمایه‌گذاری جدید برق تولید کند.

EPEC کلی را می توان به عنوان مشکل یافتن تعادل نش در بین قیمت‌گذاران l بیان کرد. برای یافتن چنین تعادلی، الگوریتم گاوس سیدل (گابریل و همکاران، ۲۰۱۲) زیر را را پیاده‌سازی کردیم.

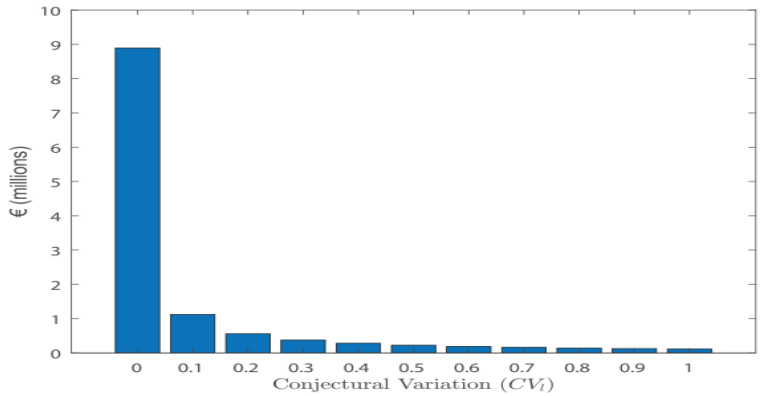
۴-نتایج و تحلیل‌های تجربی

در این قسمت نتایج حاصل از این مقاله را ارائه می‌دهیم. این تحلیل نشان می‌دهد که یک MCP برای مدلسازی یک انحصارطلبی با یک حاشیه رقابتی و تصمیمات سرمایه‌گذاری که منجر به نزدیکی و رفتار ضد شهودی توسط شرکت‌های قیمت‌ساز می‌شود نامناسب است. ضمنا این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که چگونه یک EPEC می‌تواند رفتار استراتژیک را در بازارهایی که با یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی و تصمیم‌های سرمایه‌گذاری مشخص می‌شوند مدل‌سازی کند.

MCP در یازده زمان هر بار با تغییرات حدسی[1] (CV) متفاوت برای دو شرکت قیمت‌گذارحل می شود. دو شرکت متغیرهای حدسی مشابهی در هر موقعیت دارند. هنگامی که CV1=CV2=0 هر دو شرکت قیمت‌گذاری توانایی قیمت‌گذاری خود را از دست می‌دهند و بنابراین نتیجه بازار با رقابت کامل مطابقت دارد.

شکل ۱ سود شرکت قیمت گذار اصفهان $l = 1$ برای موقعیت های مختلف MCP را نشان می‌دهد. در این شکل شرکت $l = 1$ سود کمتری در موقعیت با انحصار و حاشیه رقابتی در مقایسه با رقابت کامل دارد.

واضح است اگر شرکت‌ها توانایی قیمت‌گذاری داشته باشندپس آنها باید بتوانند از آن توانایی در همان لحظه بسیار کمتر برای بدست آوردن همان سودی که در یک تنظیم رقابت کامل خواهند داشت استفاده کنند.



شکل (۱): سود شرکت قیمت گذار (اصفهان) با استفاده از مدلسازی MCP

منبع: یافته‌های تحقیق

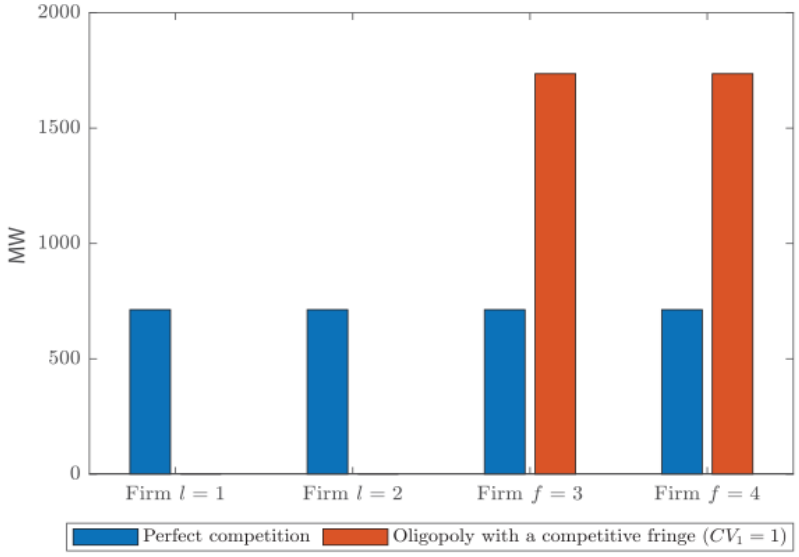
[1] Conjectural Variation

نتیجه را می‌توان با شکل ۲ توضیح داد که سرمایه‌گذاری در موقعیت میانی جدید تولید با ارزش متوسط برای حالت رقابت کامل در موقعیت CV1=CV2=1 را نشان می‌دهد.

در شرایط رقابت کامل، همه شرکت‌ها ۷۱۳ مگاوات در تولید نسل جدید میانی سرمایه‌گذاری می‌کنند. با این حال، در انحصارطلبی با حاشیه رقابتی، دو شرکت قیمت‌گذار روی هیچ استراتژی جدیدی سرمایه‌گذاری نمی‌کنند این در حالی که دو شرکت قیمت‌گذاری هر کدام سرمایه‌گذاری خود را در تولید متوسط جدید به ۱۷۳۶ مگاوات افزایش می‌دهند.

توجه: در هر دو حالت، هیچ سرمایه‌گذاری چه توسط شرکت‌های قیمت‌گذار چه قیمت‌پذیر در بار پایه جدید یا تولید پیک جدید صورت نمی‌گیرد.

علاوه بر این، شکل ۲ و جدول ۳ نشان می‌دهد که مجموع ظرفیت‌های شرکت‌های قیمت‌پذیر مشابه شرکت‌های قیمت‌گذار در انحصارطلبی با حاشیه رقابتی هستند این بیشتر نشان می‌دهد که MCP چارچوبی نامناسب برای مدل‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذاری در یک انحصارطلبی با رقابت حاشیه است زیرا منجر به خروجی بازاری می شود که توسط یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی مناسب توصیف نشده است.



شکل (۲): سرمایه گذاری شرکت های قیمت گذاردر تولیدات میانی جدید با استفاده از مدلسازی MCP

منبع: یافته‌های تحقیق

برای تعیین کمیت اثرات انحصارطلبی که تصمیمات سرمایه‌گذاری حاشیه رقابتی پیش‌بینی نمی‌شود دو تحلیل در نظر گرفته می‌شود:

اول، سناریویی در نظر گرفته می‌شود که در آن انحصارطلب ها تصمیمات سرمایه‌گذاری و تولید حاشیه رقابتی را پیش‌بینی نمی‌کنند. که این موضوع با حل مدل MCP با CV1=CV2=1 انجام می‌شود.

دوم، سناریویی در نظر گرفته می‌شود که در آن انحصارطلب‌ها پیش‌بینی تصمیمات سرمایه‌گذاری در حاشیه رقابتی را نمی‌کنند اما تصمیمات تولید حاشیه را پیش‌بینی می‌کنند.

این کار را با حل مدل EPEC با تصمیمات سرمایه‌گذاری شرکت‌های قیمت‌پذیر که در مقادیر مشاهده شده از مدل MCP ثابت شده‌اند انجام پذیرفت.

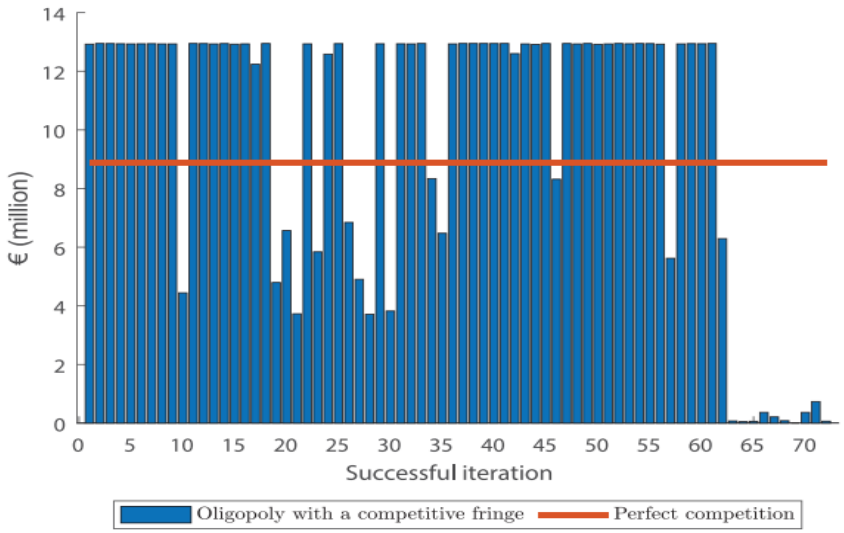
یعنی هر دو شرکت $f = 1$ و $f = 2$ در مراکز هرمزگان و خوزستان در تولید متوسط جدید بر روی ۱۷۳۶ مگاوات ثابت سرمایه‌گذاری می‌کنند.

جدول ۶ تفاوت در سود را برای هر دو شرکت قیمت سازی شرکت $l = 1$ و $l = 2$ در مناطق اصفهان و بوشهر، بین بالاترین سطوح مشاهده شده آنها از مدل کامل EPEC (شکل ۳ و ۴) و تجزیه و تحلیل. نشان می‌دهد پیش بینی هر دو تصمیمات سرمایه‌گذاری و تولید هزینه‌های حاشیه رقابتی برای شرکت های قیمت‌گذار اصفهان و بوشهر $l=1$ و $l=2$ به ترتیب ۱۲.۸۳۸ میلیون یورو و ۱۲.۸۹۶ میلیون یورو است. زمانی که فقط تصمیمات سرمایه‌گذاری پیش‌بینی نشده باشد، به ترتیب ۱۲.۷۹۸ میلیون یورو و ۱۲.۸۹۴ میلیون یورو تفاوت ها کمتر است.

جدول (۶): مقایسه تفاوت سود بین زمانی که انحصارطلبان سزمایه گذاری حاشیه رقابتی و تصمیات تولید را پیش بینی نمی کنند (سناریو ۱) و زمانی که فقط تصمیمات تولیدی را پیش بینی می کنند (سناریو۲)

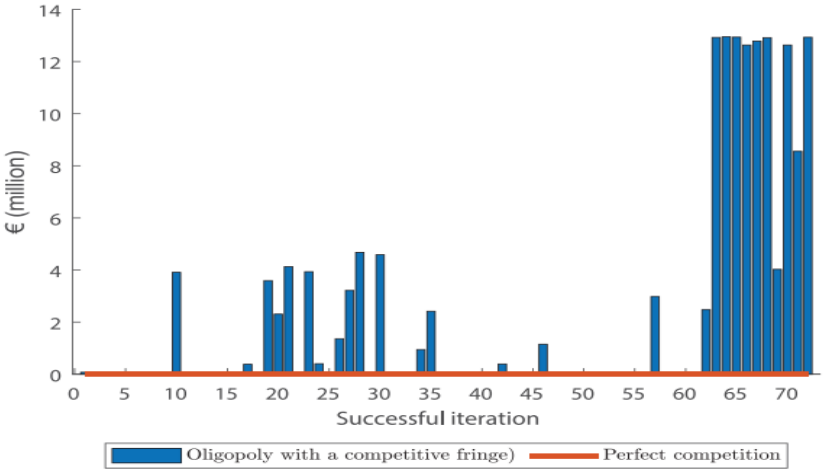
سناریوی ۲	سناریوی ۱	میلیون یورو
۱۲.۷۹۸	۱۲.۸۳۸	شرکت $l=1$
۱۲.۸۹۴	۱۲.۸۹۶	شرکت$l=2$

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل ۳ : سود شرکت قیمت گذار اصفهان برای هر درخواست موفق

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۴): شود شرکت قیمت گذار بوشهر برای هر درخواست موفق

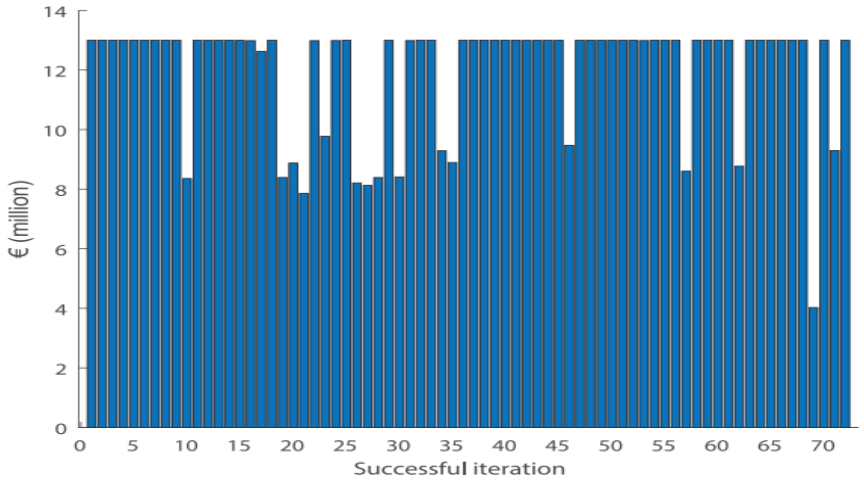
منبع: یافته‌های تحقیق

شکل‌های ۳ و ۴ سود شرکت‌های قیمت‌گذار $l = 1$ و $l = 2$ را به ترتیب برای هر یک از تکرارهای موفق نمایش می‌دهند. خطوط افقی در هر شکل نشان‌دهنده سودی است که هر شرکت از مورد رقابت کامل به دست خواهد آورد.

شکل‌های ۳ و ۴ هر دو نشان می‌دهند که الگوریتم چندین راه حل تعادل نش را پیدا کرده است. سود شرکت $l = 1$ از ۰ تا ۱۲.۹۸ میلیون یورو متغیر است در حالی که سود شرکت $l = 2$ از ۵۰۰۰۰ یورو تا ۶.۸ میلیون یورو متغیر است. برای اکثر تعادل‌ها، هر دو شرکت سود بیشتری نسبت به آن در یک چارچوب عالی کسب کردند. این در ۶۶.۷٪ و ۱۰۰٪ از تکرارهای موفق برای سود شرکت‌های $l = 1$ و $l = 2$ رخ داده است. هنگامی که سود هر دو شرکت کمتر از معادل رقابت کامل بود هیچ نقطه تعادل نشی در آن یافت نشد.

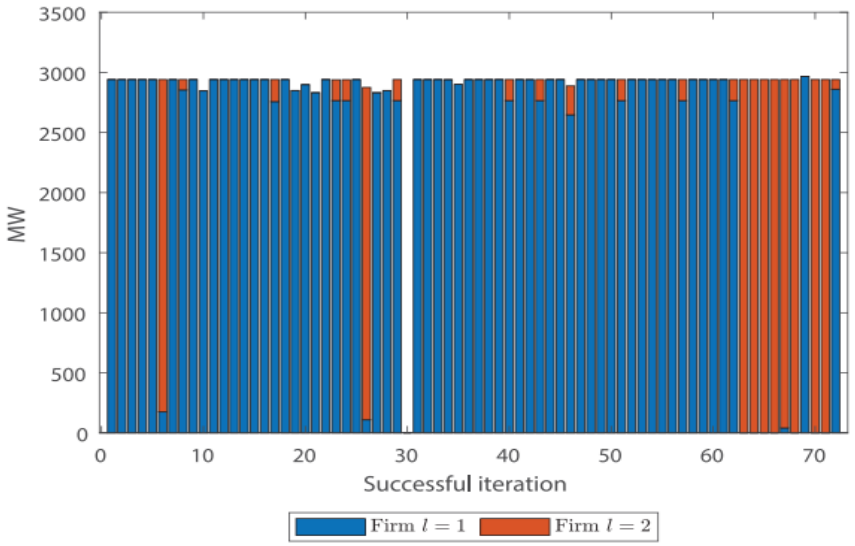
شکل ۵ سود ترکیبی این دو شرکت قیمت‌گذار را نشان می‌دهد این نشان می‌دهد که سود ترکیبی در تعادل‌ها متفاوت بوده که یک بازی مجموع- صفر بین شرکت‌های قیمت‌گذار در مورد نحوه تقسیم سود بین آنها برقرار است.

شکل ۶ سرمایه‌گذاری‌های ترکیبی را در میان تولیدات میانی جدید برای دو شرکت قیمت‌گذار برای هر تکرار موفق نشان می‌دهد در مقایسه با قسمت قبل هر دوی این شرکت‌ها این کار را روی هر بار پایه یا تولید پیک در هر نقطه تعادلی سرمایه‌گذاری نکردند.



شکل (۵): سود ترکیبی برای شرکت های قیمت گذار برای هر درخواست موفق

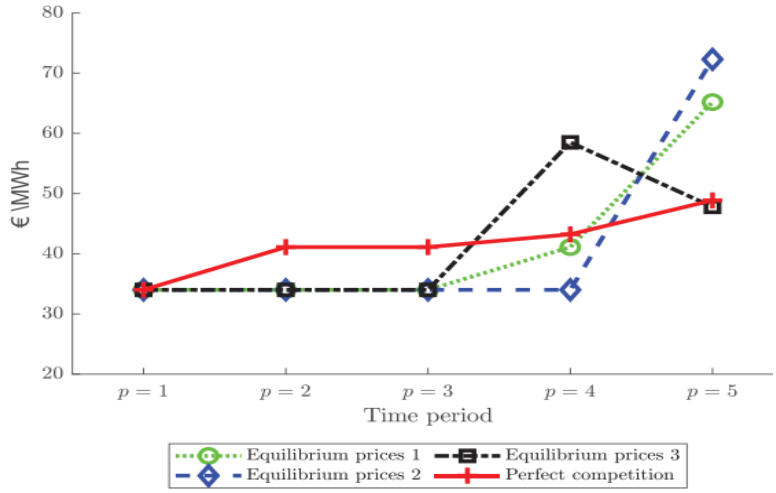
منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۶): سرمایه گذاری ترکیبی در تولیدات میانی جدید برای شرکت قیمت گذار برای هر درخواست موفق

منبع: یافته‌های تحقیق

با وجود اینکه شکل‌های ۳-۶ ارائه دهنده تعادل چندگانه است، قیمت‌های رو به جلو در یکی از سه سری زمانی قیمت ثابت بودند. سری زمانی یک و دو در ۸۱.۹٪ و ۱۶.۷٪ از تعادل‌های به دست آمده، مشاهده شدند در حالیکه سری سوم فقط در یکی از نقاط تعادل به دست آمده، مشاهده شد. شکل ۷ این سه سری زمانی را به همراه قیمت‌های به دست آمده از رقابت کامل قسمت قبل نشان می‌دهد. برای دوره‌های زمانی $p = 2,3,$ قیمت‌های رو به جلو بازار انحصارطلبی با یک مورد حاشیه رقابتی کمتر از موارد مربوط به رقابت کامل هستند. این در حالی است که نیمی از شرکت‌ها توانایی قیمت‌گذاری دارند. با این حال، قیمت‌های بازار در حالت انحصارطلبی با یک مورد حاشیه رقابتی در مراحل بعدی بالاتر است. توجه: هر دو سری زمانی قیمت تعادل اول و دوم زمانی پیدا شد که MPEC هر دو شرکت $l = 1$ و شرکت $l=2$ ابتدا همگرا شدند در حالی که تنها نمونه از سری زمانی قیمت تعادلی سوم زمانی رخ می‌دهد که MPEC $l=2$ ابتدا همگرا می‌شود.



شکل (۷): تعادل قیمت بازار رو به جلو برای مدل EPEC با رقابت کامل

منبع: یافته‌های تحقیق

از این رو، عملیات هزینه حاشیه‌ای پایین واحدها در دوره های زمانی p = 3 و p = 4 وجود ندارد که منجر به قیمت‌های رو به جلوی بالاتر در مقایسه با انحصارطلبی با حاشیه رقابتی شود.

مشابها در دوره زمانی p = 5، قیمت رو به جلو در حالت رقابت کامل توسط گرانترین واحدی که بار پایه موجود تولید می‌کند تعیین می‌شود. در مقابل، در انحصارطلبی با موقعیت حاشیه رقابتی، موقعیت بهینه برای شرکت‌های قیمت‌ساز که تولید خود را تنظیم کنند زمانی است که اطمینان حاصل کنند که قیمت رو به جلو بالاتر از مورد رقابت کامل است.

۵-یافته‌های تحقیق

دراین تحقیق چهار یافته بررسی و تحلیل قرار داده شد. اول اینکه ، یک مسئله تعادل با محدودیت‌های تعادلی (EPEC) یک انتخاب مدل محتاطانه هنگام انحصارطلبی با حاشیه رقابتی و سرمایه‌گذاری مدل‌سازی شد. در قسمت مدلسازی زمانی که تصمیمات سرمایه‌گذاری در مدل گنجانده می‌شود، استفاده از یک مشکل مکمل ترکیبی (MCP) می‌تواند به رفتار مدل نزدیک و در نتیجه نتایج غیر شهودی منجر شود. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که یک مدل EPEC می‌تواند بر این مسئله غلبه کند و نیازی به فرض محدود کننده تغییرات حدسی نیست.

دوم، در بخش تجزیه و تحلیل تعادل‌های بازار چندگانه به دست آمد. این منجر به تصمیمات سرمایه‌گذاری و سودهای مختلف برای این شرکت‌های قیمت‌گذار شد این نتایج برای سرمایه‌گذاری مولد، به ویژه آنهایی که قدرت بازار را دارند، جالب خواهد بود. شکل‌های ۳-۶ مزیت تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری قبل از سایر شرکت‌ها قیمت‌گذاری رقیب را انجام می‌دهند. در واقع، نتایج نشان می‌دهد که اگر شرکت‌ها سبد تولیدی خود را گسترش ندهند، در این صورت ممکن است با سود کمتری نسبت به زمانی که بازار کاملاً رقابتی بود مواجه شوند.

سوم، نتایج نشان می‌دهد که ممکن است برای تولید بهینه شرکت‌ها با قدرت بازار که گهگاه برخی از واحدهای تولیدی آنها را به کار می گیرند با زیان در کوتاه مدت به منظور کسب سود در بلند مدت اقدام کنند. عامل محرک پشت این نتیجه، توانایی هر دو شرکت قیمت‌گذار و قیمت‌پذیر برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری است.

توانایی شرکت‌های قیمت‌پذیر برای سرمایه‌گذاری بیشتر در بازار، انگیزه شرکت‌های قیمت گذار را برای رکود تقویت می‌کند. این امر باعث کاهش قیمت گذاری درآمد می شود شرکت ها می‌توانند از سرمایه‌گذاری‌های جدید بهره ببرند و در نتیجه از انجام چنین سرمایه گذاری هایی از آنها جلوگیری می‌شود چنین رفتاری یا مدل‌های MCP یا تعهد واحد برای به حداقل رساندن هزینه قابل درک نیست. در نتیجه، این نتیجه دوباره مناسب بودن EPEC و رویکرد مدل‌سازی و اهمیت گنجاندن سرمایه‌گذاری تصمیم گیری در مدل‌های انحصارطلبی با حاشیه‌های رقابتی را برجسته می‌کند.

چهارم، تعادل‌های چندگانه نیز فرم تولیدات پایه موجود را نشان می‌دهد که ممکن است در برخی از تعادل‌ها در مقایسه با دیگران بیشتر باشد. چنین نتایج بازار برای سیاست‌گذاران انرژی که نگران سطوح انتشار کربن هستند، مورد توجه قرار خواهد گرفت. ژنراتورهای بار پایه قدیمی تر معمولاً مبتنی بر زغال سنگ هستند و در نتیجه سطوح بالاتر کربن منتشر می‌کنند در حالی که سیاست‌گذاران بازار ممکن است بدون توجه به اینکه برق از کجا می‌آید به دنبال اتخاذ تدابیری برای تشویق نتایج تعادلی هستند که در آن تولید بار پایه موجود کاهش می‌یابد.

۶-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله، یک مدل ریاضی جدید با استفاده با اطلاعات ناکامل از بازار رقابت برق ارائه می دهد، بازاری که با ویژگی های انحصارطلبی با حاشیه رقابتی مشخص می‌شود. دو نوع شرکت مولد برق مدل سازی شده است. شرکت‌های قیمت‌گذار که قدرت بازار را در دست دارند و شرکت‌های قیمت‌گیر که قدرت بازار را ندارند. همه شرکت‌ها تصمیمات سرمایه‌گذاری و هم تصمیماتی برای تولید آینده داشتند. این مدل به شکل یک مسئله تعادل با محدودیت‌های تعادلی (EPEC) بود که تعادلی از مسائل بهینه‌سازی دوسطحی چندگانه را پیدا می‌کند. فرمول دوسطحی اجازه داد که مشکلات بهینه‌سازی شرکت‌های قیمت‌گیر در مشکلات بهینه‌سازی شرکت‌های قیمت‌گذار گنجانده شود. این امر شرکت های قیمت گذار را قادر می سازد تا به درستی واکنش های بهینه شرکت های قیمت گیرنده را در تصمیمات خود پیش بینی کنند. مدل برای ۲ شرکت برق قیمت پذیر و ۲ شرکت برق قیمت گذار در ایران شبیه سازی شد.

به طور کلی، مطالعه اخیر نشان می‌دهد که یک مشکل EPEC انتخاب مدل محتاطانه هنگام مدل‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذاری در یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی است. این به این دلیل است که بر مسائل مدل‌سازی که قبلاً در ادبیات یافت شده بود برتری دارد و به مفروضات محدودکننده کمتری نیاز دارد. با این حال، باید متذکر شد که حل مسائل EPEC در مقایسه با مسائل تکمیلی مختلط (MCP) می تواند از نظر محاسباتی چالش برانگیز باشد.

مدل پیشنهادی به دلیل بی‌تفاوتی بازار نسبت به این که کدام شرکت قیمت‌گذار برق تولید می‌کند، تعادل‌های چندگانه پیدا کرد. اگرچه مشخص شد که هزینه‌های مصرف کننده در سراسر تعادل ها نسبتاً ثابت است، اما این نتیجه برای سیاست‌گذارانی که مایلند از نتایج تعادلی که منجر به سطوح انتشار کربن بالاتر می‌شود اجتناب کنند، مهم است.

همچنین مشاهده شد که ممکن است از نظر استراتژیک برای شرکت‌های قیمت‌گذار بهینه باشد که گهگاه با قیمتی کمتر از هزینه نهایی خود در کوتاه‌مدت تولید کنند تا به سودهای بلندمدت دست یابند. این به این دلیل است که تصمیمات سرمایه‌گذاری را در مسائل بهینه سازی هر دو نوع شرکت مولد گنجانده شده است. در نتیجه، شرکت‌های

قیمت‌گذار به دنبال کاهش قیمت‌ها هستند تا سایر شرکت ها از سرمایه‌گذاری بیشتر در بازار منصرف شوند. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان می‌دهد که وقتی قدرت بازار از بازار حذف شد، هزینه‌های مصرف‌کننده تنها بین ۱ تا ۲ درصد کاهش می‌یابد.

در نزدیک‌ترین کار به این مقاله زراهن و هاپمن[1] (۲۰۱۷) یک مدل بازی‌های سه مرحله‌ای برای توسعه شبکه‌های انتقال در یک بازار رقابتی ارائه دادند. در حالی که برخی مولدان دارای قدرت بازار و برخی فاقد قدرت بازار بودند. آنها مدل فوق را با روش یادگیری رو به عقب و الگوی سوددهی قبلی در نظریه بازی‌ها حل کردند. در کارهای قبلی که از داده‌های مشابه استفاده می‌کردند، وجود رفتار قیمت‌گذاری منجر به افزایش بیشتر هزینه‌های مصرف‌کننده شد (دیوین و برتش، ۲۰۱۸). با این حال، توانایی قیمت‌پذیری حاشیه‌ای برای سرمایه‌گذاری در مولدهای جدید، بنگاه‌های قیمت‌ساز را به کاهش قیمت‌های آتی بازار در برخی دوره‌های زمانی برمی‌انگیزد. در حالی که قیمت‌های بازار دوباره در دوره‌های زمانی بعدی افزایش می‌یابد، این نتایج مربوط به هزینه مصرف‌کننده نشان می‌دهد که چگونه وجود یک حاشیه رقابتی و حضور قیمت پذیران به کاهش اثرات منفی قدرت بازار کمک می‌کند.

علیرغم ادبیات غنی در مورد مساله تعادل با محدودیت‌های تعادلی و مدل‌های تعادلی برای بازارهای برق، در هیچ یک از مقالات قبلی، بازاری را که مشخصه آن یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی که در آن همه تولیدکنندگان تصمیمات سرمایه‌گذاری دارند مدل‌سازی نشده است. در حالی که نتایج این کار برای یک محیط بازار برق اعمال می‌شود، چارچوب مدل‌سازی و نتایج مربوط به هر بازاری است که با یک انحصارطلبی با حاشیه رقابتی مشخص می‌شود. در تحقیقات آتی اثرات افزایش تعداد گام‌های زمانی در مدل قابل بررسی است. علاوه بر این، بررسی تاثیر تصادفی، به ویژه در استفاده از انرژی باد در تولید برق و چگونگی تأثیر معرفی بازار ظرفیت بر نتایج تعادل قابل بررسی وتحلیل خواهد بود.

لازم به ذکر است این مقاله دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. از آنجا که مشکلات حل EPEC چالش‌برانگیز هستند، تعداد نسبتاً کمی از محدودیت‌ها در پنج مرحله زمانی انتخاب شد. این ساعات در تابستان با تقاضا کم، تابستان با تقاضا بالا، زمستان با تقاضا

[1] Zerrahn & Huppmann

کم، زمستان با تقاضای زیاد و اوج زمستان را نشان می‌دهد. بنابراین، مقادیر رهگیری تقاضای خالص نشان‌دهنده میانگین مقدار برای این مراحل زمانی است، به ویژه در سیستم‌های با مقدار زیادی از انرژی‌های تجدیدپذیر، رهگیری این مقادیر ساعت به ساعت در نوسان خواهند بود. چندین ویژگی فیزیکی سیستم‌های برق به عنوان مثال هزینه‌های نوسانات و راه اندازی علاوه بر آن محدودیت‌های انتقال را مدل‌سازی نشد که انجام این کار نیاز به برنامه‌ریزی عدد صحیح با متغیرهای (اولیه) و توابع غیرخطی دارد. بنابراین در مشتق‌گیری برای شرایط KKT دچار مشکل می‌شود و از این رو نمی‌توان از رویکرد EPEC استفاده کرد. با توجه به ماهیت متناوب و نامشخص بودن انرژی باد، هیچ گونه تاثیرتصادفی در مدل در نظر گرفته نشده است. تصادفی بودن یکی از ویژگی‌های بسیاری از مدل‌های بازار برق است. در مطالعات آتی، تاثیرات افزایش گام های زمانی در مدل، تاثیرات تصادفی بودن عوامل محیطی در ژنراتورهای بادی، و تاثیر معرفی ظرفیت بازار در نتایج تعادل قابل مطالعه و بررسی می‌باشد.

تقدیر و تشکر

در پایان نویسندگان برخود لازم می‌دانند که از راهنمایی‌های مدیران شرکت های برق استان اصفهان، خوزستان، هرمزگان و بوشهر برای بهبود و رونق بخشیدن به متن مقاله قدردانی نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

فهرست منابع

1. Andoni, M., Robu, V., Couraud, B., Früh, W. G., Norbu, S., & Flynn, D. (2021). Analysis of strategic renewable energy, grid and storage capacity investments via Stackelberg-cournot modelling. *IEEE Access*, *9*, 37752-37771.

2. Ansari, D., & Holz, F. (2019). Anticipating global energy, climate and policy in 2055: Constructing qualitative and quantitative narratives. *Energy Research & Social Science*, *58*, 101250.

3. Basiri, R., Abedian, M., Aghasi, S., & Dashtaali, Z. (2024). A dynamic analysis of the firms in oligopoly market structure: a case study. *Journal of Modelling in Management*.

4. Baltensperger, T., Füchslin, R. M., Krütli, P., & Lygeros, J. (2016). Multiplicity of equilibria in conjectural variations models of natural gas markets. *European Journal of Operational Research*, *252*(2), 646-656.

5. Bischi, G. I., Baiardi, L. C., Lamantia, F., & Radi, D. (2024). Nonlinear dynamics and game-theoretic modeling in economics and finance. *Annals of Operations Research*, *337*(3), 731-737.

6. Bushnell, J. B., Mansur, E. T., & Saravia, C. (2008). Vertical arrangements, market structure, and competition: An analysis of restructured US electricity markets. *American Economic Review*, *98*(1), 237-266.

7. Conejo, A. J., Contreras, J., Arroyo, J. M., & De la Torre, S. (2002). Optimal response of an oligopolistic generating company to a competitive pool-based electric power market. *IEEE transactions on power systems*, *17*(2), 424-430.

8. Devine, M. T., & Bertsch, V. (2018). Examining the benefits of load shedding strategies using a rolling-horizon stochastic mixed complementarity equilibrium model. *European Journal of Operational Research*, *267*(2), 643-658.

9. Devine, M. T., & Bertsch, V. (2023). The role of demand response in mitigating market power: a quantitative analysis using a stochastic market equilibrium model. *OR Spectrum*, *45*(2), 555-597.

10.Devine, M. T., Nolan, S., Lynch, M. Á., & O'Malley, M. (2019). The effect of demand response and wind generation on electricity investment and operation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, *17*, 100190.

11.Egging-Bratseth, R., Baltensperger, T., & Tomasgard, A. (2020). Solving oligopolistic equilibrium problems with convex optimization. *European Journal of Operational Research*, *284*(1), 44-52.

12.Facchinei, F. (2003). Finite-dimensional variational inequalities and complementarity problems.

13.Fanzeres, B., Street, A., & Pozo, D. (2020). A column-and-constraint generation algorithm to find Nash equilibrium in pool-based electricity markets. *Electric power systems research*, *189*, 106806.
14.Gabriel, S. A., Zhuang, J., & Egging, R. (2009). Solving stochastic complementarity problems in energy market modeling using scenario reduction. *European Journal of Operational Research*, *197*(3), 1028-1040.
15.Li, L., Chen, J., & Raghunathan, S. (2018). Recommender system rethink: Implications for an electronic marketplace with competing manufacturers. *Information Systems Research*, *29*(4), 1003-1023.
16.Habibian, M., Downward, A., & Zakeri, G. (2020). Multistage stochastic demand-side management for price-making major consumers of electricity in a co-optimized energy and reserve market. *European Journal of Operational Research*, *280*(2), 671-688.
17.Hu, X., & Ralph, D. (2007). Using EPECs to model bilevel games in restructured electricity markets with locational prices. *Operations research*, *55*(5), 809-827.
18.Hommes, C. H., Ochea, M. I., & Tuinstra, J. (2018). Evolutionary competition between adjustment processes in cournot oligopoly: instability and complex dynamics. *Dynamic Games and Applications*, *8*, 822-843.
19.Huang, Q., Xu, Y., & Courcoubetis, C. (2020). Stackelberg competition between merchant and regulated storage investment in wholesale electricity markets. *Applied Energy*, *264*, 114669.
20.Huang, S., Wu, Y., Zhao, Z., Wu, B., Sun, K., Wang, H., ... & Tang, W. (2021). A new mechanism of obeticholic acid on NASH treatment by inhibiting NLRP3 inflammasome activation in macrophage. *Metabolism*, *120*, 154797.
21.Huang, Q., Xu, Y., & Courcoubetis, C. (2020). Stackelberg competition between merchant and regulated storage investment in wholesale electricity markets. *Applied Energy*, *264*, 114669.
22.Huppmann, D. (2013). Endogenous shifts in OPEC market power: A Stackelberg oligopoly with fringe.
23.Kimbrough, S. O., Murphy, F., & Smeers, Y. (2014). Extending Cournot: When does insight dissipate?. *Fox School of Business Research Paper*, (14-036).
24.Pozo, D., & Contreras, J. (2011). Finding multiple nash equilibria in pool-based markets: A stochastic EPEC approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, *26*(3), 1744-1752.
25.Pozo, D., Sauma, E., & Contreras, J. (2017). Basic theoretical foundations and insights on bilevel models and their applications to power systems. *Annals of Operations Research*, *254*, 303-334.

26.Ruiz, C., & Conejo, A. J. (2009). Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, *24*(4), 1855-1866.

27.Steeger, G., & Rebennack, S. (2017). Dynamic convexification within nested Benders decomposition using Lagrangian relaxation: An application to the strategic bidding problem. *European Journal of Operational Research*, *257*(2), 669-686.

28.Tangerås, T. P., & Mauritzen, J. (2018). Real-time versus day-ahead market power in a hydro-based electricity market. *The Journal of industrial economics*, *66*(4), 904-941.

29.Zerrahn, A., & Huppmann, D. (2017). Network expansion to mitigate market power. *Networks and Spatial Economics*, *17*, 611-644.