Economic Modeling of Regional Integration in Electricity Markets of Member Countries in Selected Economic Cooperation Organization (ECO): Application of System Dynamics Approach

Meysam Haddad[1], Seyed Komail Tayebi[2*], Alimorad sharifi[3], Mehdi Niroomand[4]

1. PhD Candidate, Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, m.haddad@ase.ui.ac.ir

2. Professor, Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, sk.tayebi@ase.ui.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, alimorad@ase.ui.ac.ir

4. Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, mehdi_niroomand@eng.ui.ac.ir

Received: 2022-08-27 Accepted: 2022-11-27

Abstract

Due to the increasing growth rate of electricity demand as well as relevant supply challenges, the economic issues of power systems have been considered by governments and energy experts to achieve further efficient resources allocation. Based on an approach of a dynamic system, the aim of this study has been to modelling the regional integration of electricity markets among the selected ECO member countries (including Iran, Turkey, Azerbaijan, Pakistan and Afghanistan) in order to maximize the stability of electricity supply. Accordingly, the required data have been applied during the period of 1980-2019. In this respect, two scenarios, namely a scenario of self-sufficiency of electricity (implying national electricity market) and a scenario of free regional market (implying regional integration market) have been conducted respectively, by specifying and estimating a Structural time series model, to simulate the trade flows of electricity in the selected ECO country members by 2030. The simulated results have indicated that Iran has had the marginal storage of more than one and the lowest price among the countries, while it has the largest volumes of electricity exports. Afghanistan with the marginal storage of less than one among the regional countries has had the lowest volumes of electricity Imports. In addition, the empirical results have revealed the fact that the electricity price has been decreasing as a result of a decrease in the electricity production costs. Consequently, the paper findings imply that uncertainty in the electricity supply can be reduced through implementing an integrated regional electricity market among the ECO members.

JEL Classification: L94, F15, Q41, C33, C61

Keywords: Electricity Market, Regional Integration, ECO Country Members Countries, Dynamic System, Structural Time Series Model

*. Corresponding Author, Tel: +983117935242

تحقیقات اقتصادی (نشریه علمی) / دوره ۵۷، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۱/ ص ۵۸-۲۵

مدل‌سازی اقتصادی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق کشورهای منتخب عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی (اکو): رهیافت پویایی‌شناسی سیستم

DOI: 10.22059/JTE.2022.347749.1008711

میثم حداد[۱]، سید کمیل طیبی*[۲]، علیمراد شریفی[۳]، مهدی نیرومند[۴]

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، m.haddad@ase.ui.ac.ir

۲. استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، sk.tayebi@ase.ui.ac.ir

۳. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، alimorad@ase.ui.ac.ir

۴. دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، mehdi_niroomand@eng.ui.ac.ir

نوع مقاله: علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

چکیده

باتوجه به رشد روزافزون تقاضای برق و مسائل مربوط به عرضه آن از قبیل افزایش هزینه‌های اجتماعی سوخت‌های فسیلی و همچنین عدم توانایی دولت‌ها در تأمین منابع مالی لازم برای ایجاد و افزایش واحدهای تولیدی، مباحث مربوط به اقتصاد سیستم‌های قدرت بیش از پیش مورد توجه دولت‌ها و کارشناسان اقتصاد انرژی قرار گرفته است، تا تخصیص منابع کاراتری را اعمال کنند، بنابراین در مقاله حاضر هدف این است که ادغام منطقه‌ای بازارهای برق در بین کشورهای منتخب عضو اکو (ایران، ترکیه، آذربایجان، پاکستان و افغانستان) با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم و با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۸۰ به‌منظور بیشینه‌سازی پایایی عرضه برق، مدل‌سازی شود. برای این منظور دو سناریو شامل سناریوی بازار ملی برق (سناریو خودکفایی) و سناریوی بازار ادغام منطقه‌ای (سناریو آزاد) از طریق تصریح و برآورد یک الگوی سری‌های زمانی ساختاری تا سال ۲۰۳۰، شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو سناریو حاکی از آن است که کشور ایران با ذخیره نهایی بیشتر از یک و کم‌ترین قیمت در بین کشورهای منطقه بیشترین صادرات برق را دارد، و در مقابل افغانستان با ذخیره نهایی کمتر از یک، در بین کشورهای منطقه، بیشترین واردات برق را به خود اختصاص می‌دهد. از دیگر نتایج حاصل از این شبیه‌سازی می‌توان به کاهش قیمت برق به دلیل کاهش هزینه‌های تولید اشاره کرد. از مهم‌ترین یافته‌های این مقاله نیز می‌توان ایجاد بازار منطقه‌ای برق میان کشورهای عضو اکو نام برد که در آن نااطمینانی در تأمین و پایایی عرضه برق مورد نیاز در بین کشورهای عضو اکو کاهش می‌یابد.

طبقه‌بندی JEL: L94، F15، Q41، C33، C61

واژه‌های کلیدی: بازار برق، ادغام منطقه‌ای، کشورهای عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی (اکو)، پویایی سیستم، الگوی سری‌های زمانی ساختاری

---

*. نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۳۱۱۷۹۳۵۲۴۲

۱- مقدمه

از بین حامل‌های انرژی، برق برای اقتصاد دنیا یک عامل بسیار اساسی است؛ تا آنجا که برای تعیین وضعیت اقتصادی کشورها و سطح رفاه آن‌ها از شاخص‌های تولید و مصرف سرانه‌ی برق استفاده می‌شود. رشد تقاضای برق متأثر از عوامل گوناگونی همچون تولید ناخالص داخلی (GDP)، قیمت حامل‌های انرژی، رشد جمعیت، دما، تغییرات ساختاری در اقتصاد، توسعه‌ی صنایع انرژی‌بر و بهبود کارایی می‌باشد. پاسخگویی به این رشد در تقاضا می‌تواند به توسعه‌ی بخش عرضه به‌منظور تأمین این تقاضا بیانجامد. در این وضعیت، به همان نسبتی که تقاضا بالا می‌رود، ظرفیت نصب شده در بخش عرضه در داخل یا خارج از کشور باید افزایش یابد (باتچاریا[1]، ۲۰۱۹). اما ممکن است از یک‌سو دولت‌ها در سرمایه‌گذاری و توسعه بخش عرضه برق با محدودیت تأمین مالی روبرو بوده و از سوی دیگر، برخی از کشورها با توجه به تقاضای محدود داخلی در مواقعی از سال با مازاد تولید برق مواجه باشند، بدین منظور ایجاد بازار برق یکپارچه بین کشورهای یک منطقه برای پاسخگویی به تقاضا و همچنین فروش مازاد برق تولیدی، ضروری است.

در سال‌های اخیر با اجرای سیاست‌های تجدید ساختار در بازار برق، گامی برای خصوصی‌سازی و تجارت آزاد برق در جهان برداشته شده است، به‌گونه‌ای که با تفکیک محصول برق (به‌عنوان کالای نهایی) از خدمات برق، تجارت بین‌المللی آن با سرعت زیادی روبه افزایش گذاشته، تا حتی براساس ادغام بازارهای برق و هم براساس رقابت انجام شود. سازمان منطقه‌ای صنعت برق[2] در مبحث سیاست‌گذاری کنونی در بسیاری از نقاط جهان در مورد ادغام بازار برق نقش مهمی دارد (راماس[3]، ۱۹۹۹). از نیمه دوم دهه‌ی ۱۹۹۰، کشورهای اروپایی با هدف ایجاد بازار برق، فرآیند آزادسازی صنایع تأمین انرژی خود را آغاز کرده‌اند (پلینی[4]، ۲۰۱۲). بازار برق اروپا برای دستیابی به اهداف بلندمدت انرژی اتحادیه اروپا، به دنبال ابزارهای کلیدی از قبیل رقابت‌پذیری، پایداری و تأمین امنیت که در اسناد سیاست انرژی اتحادیه اروپا در دو دهه گذشته گنجانده شده، بوده است (به‌عنوان مثال EC، ۱۹۹۵، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰).

---

1. Bhattacharyya
2. Spatial Organization of the Electricity Industry
3. Ramos
4. Pellini

ادغام منطقه‌ای بازار برق به دلیل تخصیص بهتر تولید میان کشورها براساس اصل هزینه‌های نسبی،کارایی در تأمین برق را بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش کارایی می‌تواند به‌دلیل افزایش مقیاس تولید داخلی و خارجی، افزایش رقابت و قابلیت اطمینان (پایایی) تحقق یابد، بنابراین هزینه‌های تولید و در نتیجه قیمت برق کاهش یافته و به دلیل ایجاد رقابت، استانداردهای خدمات آن افزایش می‌یابد. همچنین در پی نگرانی جهانی برای افزایش تغییرات آب و هوایی، ادغام برق منطقه‌ای می‌تواند با توجه به بهبود کارایی، راهی مؤثر برای کاهش انتشار کربن باشد (ژای[1]، ۲۰۱۰).

لازم به ذکر است پیشرفت‌های واقعی ادغام منطقه‌ای بازار برق، در بین قاره‌ها و مناطق تجاری باتوجه به پتانسیل‌های تولید برق، قیمت برق و هزینه‌های تولید آن متفاوت است، بنابراین بررسی و مطالعه‌ی این مشاهدات پیامدهای مهمی برای توسعه ادغام منطقه‌ای بازار برق در کشورهای منتخب عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی (اکو) دارد.

تأمین برق در کشورهای عضو اکو از نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی، برق آبی و تجدید پذیر صورت می‌گیرد. بیشتر منابع تولید برق کشورهای مورد مطالعه سوخت‌های فسیلی است. تولید برق از نیروگاه‌های برق آبی متأثر از تغییرات آب و هوایی می‌باشد، به‌طوری‌که در خشک‌سالی‌های اخیر سبب خاموشی در ساعات پیک تابستان در بسیاری از کشورها شده است. همچنین انرژی‌های تجدیدپذیر دارای منحنی تولید متفاوت با نیروگاه‌های فسیلی و برق‌آبی می‌باشد، به‌طوری‌که استفاده از این انرژی‌ها می‌تواند بدون ذخیره‌سازی برق تولیدی، تقاضای بخشی از برق روزانه را تأمین کند و در مدیریت بار به کشورهای عضو اکو کمک کند. به‌عنوان مثال انرژی خورشیدی با توجه به پتانسیل تولید، جزء اصلی‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در بین اکثر اعضای اکو می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین مطالعه و بررسی انرژی‌های تجدیدپذیر یک نوآوری در این مقاله است که در مطالعات گذشته در مورد ادغام منطقه‌ای بازار برق یا نادیده گرفته شده و یا به آن‌ها توجه زیادی نشده است.

همچنین قیمت برق خورشیدی و یارانه‌هایی که برای این نوع برق تولیدی در کشورها در نظر گرفته می‌شود ممکن است سبب گمراهی در ادغام منطقه‌ای شود.

1. Zhai

بنابراین مطالعه و بررسی تأثیرات حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر و یارانه‌های اعطایی به این نوع برق تولیدی در کشورهای منتخب عضو اکو، دارای اهمیت می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد برق نظیر عدم دسترسی کشورهای مورد مطالعه به تکنولوژی‌های مقرون به صرفه برای ذخیره‌سازی در مقیاس بالا، نیاز به سیستم فیزیکی و استراتژیک بودن آن، مقاله حاضر به دنبال پاسخگویی به این سئوالات است: آیا می‌توان برق را به‌عنوان یک محصول تجاری متفاوت در بین کشورهای عضو اکو در نظر گرفت؟ آیا با ایجاد یک بازار منطقه‌ای یکپارچه و انعقاد قراردادهای مبادله‌ای، تجارت برق بین کشورهای عضو اکو به سهولت انجام می‌شود؟ بدین لحاظ، با توجه به عدم وجود بازار یکپارچه برق در بین کشورهای منتخب عضو اکو، برای مدل‌سازی اقتصادی ادغام بازار برق، روش شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات گذشته و به کمک رویکرد پویایی سیستم، می‌توان نحوه یکپارچگی بازار برق بین این کشورها را طراحی و سناریوهای مناسبی را برای ادغام منطقه‌ای بازار برق در این منطقه ارائه کرد.

هدف اصلی این مقاله تحلیل ساختاری بازارهای ملی برق کشورهای عضو اکو، تبیین روابط علّی و معلولی بین مجموعه متغیرهای اقتصادی در شکل‌گیری ادغام بازار برق بین کشورهای عضو اکو و ارزیابی سناریوهای ادغام منطقه‌ای بازار برق در بین کشورهای عضو اکو با تأکید بر قیمت برق است. در ادامه و در قسمت دوم، مبانی نظری، و در قسمت سوم مروری بر پیشینه تحقیق انجام می‌پذیرد. روش‌شناسی در قسمت چهارم، بحث و نتایج رویکرد پویایی سیستم، مدل‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق در بین کشورهای منتخب عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی و نتیجه‌گیری و پیشنهادها به ترتیب در قسمت‌های پنجم و ششم ارائه می‌شود.

۲- مبانی نظری ادغام منطقه‌ای بازارهای برق

۲-۱- نقش عرضه و تقاضا در ادغام منطقه‌ای بازار برق

عرضه‌ی برق شرایط ویژه‌ای دارد که خدمات مرتبط با آن را در مقایسه با سایر موارد در صنعت منحصربه‌فرد می‌سازد. محصول نهایی باید بلافاصله و به میزان تقاضای مصرف‌کننده تحویل گردد؛ مگر اینکه با سیستم‌های ذخیره‌سازی، بخشی از آن برای شرایط پیک شبکه و کمبود در عرضه ذخیره‌سازی شود. کمبود ظرفیت و ظرفیت مازاد

پیامد منفی[1] از جنبه‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به‌دنبال دارند (محقر و نجف‌زاده، ۱۳۹۶)، بنابراین، برنامه‌ریزی درست به‌منظور تأمین به‌موقع برق، جلوگیری از فروپاشی شبکه و در پی آن جلوگیری از مخاطره‌های اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. یکی از راه حل‌های دستیابی به شبکه پایدار برق که در نقطه مقابل افزایش ظرفیت تولید و خودکفایی است، انعقاد قرارداد تجاری برق و ایجاد بازار یکپارچه برق بین کشورهای منطقه به‌منظور استفاده از مزیت‌های تجاری در این زمینه می‌باشد.

به‌طورکلی در زمینه معاملات بین‌المللی برق (TIE)، چارچوب عرضه و تقاضا بر اساس پویایی تجارت بین دو کشور واردکننده و صادرکننده ارائه می‌شود. در بیشتر مطالعات مانند گوگلر و هاگزی‌موسی (۲۰۱۹)، ردوندو و همکاران (۲۰۱۸) و اوسینی و پالوت (۲۰۱۶)، از مبانی نظری ارائه شده در زیر که براساس محاسبه سود خالص است، استفاده می‌شود.

در نمودار (۱) موجود در پیوست (۱)، منحنی عرضه با تقاضای ثابت D در نظر گرفته می‌شود. در محل تقاطع منحنی عرضه و تقاضا، قیمت بدون در نظر گرفتن صادرات نشان داده شده است. در سمت چپ نمودار (۱)، تقاضای D+Exp با مجموع تقاضای کشور صادرکننده و تقاضای واردات کشور واردکننده مطابقت دارد. تقاطع بین منحنی عرضه و خط مستقیم D+Exp قیمت برق با صادرات را نشان می‌دهد، که بالاتر از قیمت برق بدون صادرات است، بنابراین، برای کشور صادرکننده برق، سود حاصل قسمت هاشور خورده در سمت چپ نمودار (۱) می‌باشد، که به معنی افزایش تولید و افزایش قیمت است، بنابراین تولیدکنندگان برای پوشش تقاضای خارجی برق مجبور به کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید هستند. در همین حال، در سمت واردکننده (سمت راست نمودار ۱)، یک تقاضای جدید D-Imp وجود دارد که تفاوت بین تقاضای ملی (برق تولیدی در کشور) و تقاضای واردات را نشان می‌دهد. تقاطع بین منحنی عرضه و خط مستقیم D-Imp قیمت برق وارداتی را نشان می‌دهد که کمتر از قیمت برق بدون واردات است. بنابراین، برای کشور واردکننده، سود حاصل قسمت هاشور خورده در سمت راست نمودار (۱) است، که به معنای کاهش قیمت در بازار برق می‌باشد.

1. Negative externality

نمودار (۲)، موجود در پیوست (۱)، زیان حاصل از معاملات بین‌المللی برق را نشان می‌دهد.کشور صادرکننده باید چگونگی افزایش قیمت داخلی بازار برق را جبران کند، در حالی که کشور واردکننده زیان‌هایی را در بخش تولیدکنندگان خود دارد، زیرا آن‌ها تولید و قیمت برق را در بازار داخلی که در آن سود دریافت می‌کردند کاهش داده‌اند، اگرچه هزینه‌های آن ثابت مانده است. در نمودار (۳) موجود در پیوست (۱)، سود خالص به‌صورت هاشور خورده نشان داده شده است. سود خالص به کمک تفاوت بین سود و زیان تعیین می‌شود. در این نمودار مشاهده می‌شود که برای هر دو کشور سود خالص مثبت است، بنابراین تمایل به انجام معاملات بین‌المللی برق را توجیه می‌کند.

تعامل بالای اجزای عرضه و تقاضا در ادغام منطقه‌ای بازار برق به‌صورت علت و معلول، پیچیدگی بالایی را بر این بخش تحمیل کرده است. به‌دلیل زمان‌بر بودن اجرای پروژه‌های مربوط به حوزه‌ی برق و انرژی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، اثرات زیست‌محیطی استفاده از این سوخت‌ها، نیاز به ابزارهایی برای شبیه‌سازی، سیاست‌گذاری و پاسخ‌دهی به مشکلات پیچیده وجود دارد. ماهیت بخش برق به‌گونه‌ای است که در به‌کارگیری رویکردی چون پویایی سیستم‌ها به‌دلیل لحاظ شدن دیدگاه‌های علت و معلولی و با به‌کارگیری متغیرهای حالت و جریان در بررسی سیستم‌های پیچیده‌ی پویا و بازخوردها بسیار مستعد است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۶). بدین منظور اهمیت این مقاله با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، این است که می‌تواند با طراحی بازار برق یکپارچه در بین کشورهای منتخب عضو اکو، یک راه حل مناسب برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در حوزه برق ارائه دهد و منجر به تأمین به‌موقع برق با قیمت مناسب در بین اعضا شود[۱].

۲-۲- روش‌های مدیریت ازدحام شبکه[۲]

طبق مقررات مربوط به معاملات بین‌المللی برق، در بازار واردات، انرژی خریداری شده از خارج از کشور با قیمت بازار داخلی پرداخت می‌شود، در حالی که در بازار صادرات این انرژی توسط ژنراتورها به قیمت بازار داخلی شناسایی می‌شود (سالازار و آرگوئلو[۳]، ۲۰۰۶). به این ترتیب اختلافی ایجاد می‌شود که به آن اجاره ازدحام[۱]

---

۱. در بخش روش‌شناسی پژوهش به معرفی رویکرد پویایی سیستم پرداخته خواهد شد.

2. Netwrok Congestion Management Methods

3. Salazar & Argüello

می‌گویند. لازم به ذکر است که قبل از محدودیت‌های فیزیکی یا امنیتی باید ازدحام را مدیریت کرد و کاهش داد، زیرا ظرفیت انتقال بین کشورهای مختلف محدود است و بنابراین، باید برای تصمیم‌گیری و داوری، مکانیزم‌هایی ایجاد شود. در اپراتورهای سیستم انتقال اروپا (۱۹۹۹)، روش‌های مدیریت ازدحام در بازارهای منطقه‌ای به‌صورت محدودیت براساس ظرفیت انتقال خالص منتشر شده[۲]، حراج صریح[۳]، تقسیم بازار[۴] و ارسال مجدد[۵] ارزیابی می‌شود.

افزون بر روش‌های مدیریت ازدحام در بازارهای منطقه‌ای ارائه شده توسط اپراتورهای سیستم انتقال اروپا (۱۹۹۹)، روش حراج ضمنی[۶] به‌عنوان کوپلینگ[۷] (پیونددهنده) بازار برق ارائه می‌شود. روش حراج ضمنی تضمین می‌کند برق از مناطق با قیمت پایین و با مازاد جریان به مناطق با قیمت بالاتر با کسری جریان مبادله شود و به دنبال همگرایی قیمت است. در حراج‌های ضمنی هدایت جریان داخلی بر اساس داده‌های بازار انجام می‌شود، اما در حراج صریح، معاملات به‌طور جداگانه و مستقل از داده‌های بازار در محل حراج برق انجام می‌شود. به این ترتیب می‌توان گفت که حراج‌های صریح در کوتاه‌مدت کارآیی بیشتری دارند، در حالی که حراج‌های ضمنی مکانیسم کارآمدی برای معاملات چندین ماه یا یک سال به بعد هستند، همان‌طورکه سالازار و آرگوئلو (۲۰۰۶) نشان داده‌اند.

تقسیم بازار و روش‌های کوپلینگ بازار، از انواع حراج ضمنی می‌باشد. کوپلینگ بازار روشی برای مدیریت ازدحام است که چندین بازار برق را باهم ادغام می‌کند و توسط نهادهای مختلف مدیریت شده و ماهیت مستقل هر بازار را حفظ می‌کند. کوپلینگ بازار با تقسیم بازار کمی متفاوت است. روش تقسیم بازار، تبادل انرژی در بازار، از طریق مناطقی با قیمت‌های مختلف انجام می‌شود، در حالی که کوپلینگ بازار به‌طور مشترک بازارهای جداگانه در یک منطقه را به هم پیوند می‌دهد. با این حال، دارای اثرات یکسان هستند. کوپلینگ بازار می‌تواند با از بین بردن ریسک غیرضروری مذاکرات انرژی و ظرفیت کوتاه‌مدت، نقدینگی را تقویت بخشد، بازارهای لحظه‌ای را

---

1. Congestion Rent
2. Restriction on the basis of published net transfer capacity
3. Explicit Auction
4. Market Splitting
5. Redispatch
6. Implicit Auction
7. Coupling

قوی کند و به همه فعالان بازار لحظه‌ای این امکان را دهد از معاملات مرزی بهره‌مند شوند. در صورت وجود ظرفیت کافی، کوپلینگ بازار می‌تواند اختلاف قیمت را به حداقل رسانده و به همگرایی بازار دست یابد (سالازار و آرگوئلو، ۲۰۰۶). باتوجه به نزدیک بودن کاربرد روش کوپلینگ بازار به اهداف مقاله حاضر، برای ادغام منطقه‌ای بازارهای برق کشورهای منتخب اکو از این روش استفاده می‌شود.

۲-۳- لزوم توافق‌نامه تجارت برق منطقه‌ای

اگر جنبه‌ی محصول بودن برق مورد توجه قرار گیرد، به دلیل ویژگی‌های خاص آن نظیر عدم ذخیره‌سازی در مقیاس زیاد، نمی‌توان بدون توافق قبلی برای ایجاد یک منطقه‌ی آزاد تجاری، آن را به‌راحتی مبادله کرد. وجود یک توافق‌نامه تجارت برق منطقه‌ای می‌تواند منجر به ایجاد یک رژیم تجاری منطقه‌ای، کاهش موانع تجاری ممکن و کاهش زمان برنامه‌ریزی در تأمین برق شود. مشکل زمانی به وجود می‌آید که قوانین سازمان تجارت جهانی به‌اندازه کافی تجارت برق را در نظر نگیرد، زیرا قوانین این سازمان تنها ترکیب کردن کالاها (تولید) و خدمات (انتقال) را درنظرگرفته و به سایر اهداف سیاستی مربوط به محیط‌زیست و امنیت انرژی توجهی نمی‌کند. توافقنامه تجارت آزاد بین کشورها منجر به ایجاد اطمینان مورد نیاز برای ترویج و توسعه یک معاهده برق منطقه‌ای می‌شود (اوسینی و پالوت[1]، ۲۰۱۶).

در صورت نادیده گرفتن شرایط، قوانین و مقررات ادغام منطقه‌ای، تجارت بین‌الملل برق ممکن است به دلیل متکی شدن به واردات برق، سبب ایجاد ریسک تغییرات قیمت‌های برق شده که این خود امنیت انرژی را با مشکل روبرو می‌کند. براساس تئوری تجارت هکشر-اوهلین اگر دو کشور تجارت برق را شروع کنند، به‌طور معمول هزینه بیمه در برابر شوک‌های بزرگ را به قیمت‌های برق اضافه می‌کنند. با این حال به دلیل قیمت بالای برق در کشور صادرکننده، احتمال وجود بی‌ثباتی‌های قیمت واردات و وقوع شوک‌های بزرگ عرضه و تقاضا در کشور واردکننده وجود خواهد داشت؛ که می‌تواند در شرایط بدون تجارت (خودکفایی) وجود نداشته باشد، بنابراین ادغام منطقه‌ای می‌تواند با وضع قوانین و مقررات و رفع محدودیت‌های تعرفه‌ای، این مشکلات را برطرف کند (اوسینی و پالوت، ۲۰۱۳).

1. Oseni and Pollitt

اکنون ممکن است این سئوال مطرح شود که چرا شبکه‌های تبادل انرژی و توان (Power Pools) در اروپا و آمریکای شمالی به‌صورت فعال عمل می‌کنند و محدودیتی در خصوص قوانین مبادله تجاری ندارند و مهم‌ترین محدودیت آن‌ها در بعضی اوقات محدودیت فیزیکی انتقال نیرو است؟ در پاسخ باید به این نکته توجه کرد که این کشورها عضو یک اتحادیه تجاری بزرگ مانند اتحادیه اروپا هستند و قوانین آن اتحادیه‌ها بر بازار انرژی نیز حاکم است.

با توجه به اهمیت رشد و توسعه تجارت در اقتصاد و همچنین افزایش تعداد کشورهای ملحق شده به بازارهای برق منطقه‌ای، بررسی ایجاد یک بازار منطقه‌ای برق مابین کشورهای منتخب عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی و تأثیر آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی از جمله صنعت برق، ضروری است. کشور ایران به دلیل داشتن ذخایر فراوان نفت و گاز می‌تواند به تولید کالاهایی روی آورد که به انرژی بیشتری نیاز دارد. از یک‌سو تولید برق را می‌توان به‌عنوان یک محصول در نظر گرفت، به‌گونه‌ای که با ایجاد بازار منطقه‌ای، می‌تواند جزء صادرکنندگان این بخش در منطقه باشد و از سوی دیگر برق به‌عنوان انرژی ثانویه، یکی از عوامل تولید به حساب آید که به نوبه خود می‌تواند تولید کالاهای نیازمند برق را افزایش دهد.

۳- پیشینه پژوهش

ادبیات اقتصادی در حال رشدی در مورد ادغام بازار برق وجود دارد که می‌توان در سه جریان اصلی خلاصه شود. جریان اول شامل کارهای نظری است که تأثیر ادغام بر قیمت برق و قدرت بازار را تحلیل می‌کند. جریان دوم شامل کارهای تجربی است که ناکارآمدی ساز و کار حراج صریح را برای تخصیص ظرفیت‌های اتصال بین مرزی بررسی می‌کند و جریان سوم، تحلیل تجربی از تأثیر ادغام بازار و ظرفیت انتقال اضافی مرزی بر رفاه اجتماعی بازارهای تازه ادغام شده را بیان می‌کند. در ادامه مطالعات خارجی و داخلی انجام گرفته در زمینه ادغام منطقه‌ای بازار برق مرور می‌شود و سپس مورد نقد قرار می‌گیرد.

چن و همکاران[1] (۲۰۲۲)، در ارزیابی اثرات اصلاح و ادغام بخش برق در چین به بررسی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی با طراحی سه سناریوی برنامه‌ریزی، بازار استانی

1. Chen et al.

و بازار منطقه‌ای می‌پردازد. نتایج حاکی از آن است که افزایش بالقوه رفاه حاصل از ایجاد بازارهای استانی، ۱۴/۳ میلیارد یوان است، که می‌تواند با ادغام بازارهای استانی در یک بازار منطقه‌ای به ۲۱ میلیارد یوان افزایش یابد. همچنین میانگین قیمت عمده فروشی در بازار منطقه‌ای و بازار استانی به ترتیب ۲۳/۵ و ۲۲/۷ درصد قابل کاهش است. انتشار کربن را می‌توان در حدود ۱۲/۴ میلیون تن (۲/۴ درصد) در سناریوی بازار استانی و ۱۶/۶ میلیون تن (۳/۲ درصد) در سناریوی بازار منطقه‌ای کاهش داد. گوگلر و هاگزی-موسی[1] (۲۰۱۹)، با استفاده از داده‌های ساعتی بازارهای برق آلمان و فرانسه نشان داده‌اند که ادغام بازارهای برق آلمان و فرانسه به ترکیب تکنولوژی و ویژگی‌های بازارهای همجوار بستگی دارد. تنها زمانی‌که که بازارهای برق آلمان و فرانسه از ترکیب تولید مشابه استفاده می‌کنند؛ اختلاف قیمتی افزایش می‌یابد و احتمال تراکم جریان برق به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. باتالا و همکاران[2] (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل جاذبه نشان داده‌اند که تعیین‌کننده‌های تجارت انرژی مشابه تجارت محصول است و همچنین مفاهیم استاندارد اقتصاد بین‌الملل مانند مزیت رقابتی در اقتصاد انرژی پدیدار می‌شود. جریان تجارت انرژی به دلیل افزایش فعالیت اقتصادی و توافق‌های نهادی در زمینه ادغام انرژی، به‌طور عمده توسط نیاز واردکننده هدایت می‌شود.

ردوندو و همکاران[3] (۲۰۱۸)، برای ادغام بازار برق دو کشور کلمبیا و اکوادور مدل کوپلینگ[4] بازار را پیشنهاد کرده‌اند که با مدل‌سازی بازارهای ملی با استفاده از روش پویایی سیستم شروع می‌شود. نتایج حاکی از آن است که، رفتار مورد انتظار سیستم به‌جز در مورد صادرات، به دلیل فرض ظرفیت انتقال نامتناهی بین کشورها، از واقعیت موجود در بازار فراتر است. کار ارائه شده در این مطالعه امکان آزمایش برای تدوین قوانین بازی در ادغام منطقه‌ای بازارها را فراهم می‌آورد. دیاس و جورج[5] (۲۰۱۷)، با شبیه‌سازی برای ادغام بازار برق عمده فروشی (MIBEL) نشان داده‌اند که چگونه اعمال قدرت بازار با ادغام کامل منطقه‌ای تکامل می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، همان‌طورکه انتظار می‌رود، قدرت بازار پس از ادغام کامل، کمتر شده است. با این حال، حتی پس از ادغام کامل، قدرت بازار هنوز هم به‌عنوان یک ویژگی بازار وجود دارد.

1. Gugler & Haxhimusa
2. Batalla et al.
3. Redondo et al.
4. Coupling
5. Dias and Jorge

ازآنجایی‌که قیمت عمده فروشی همچنان بالاتر از هزینه‌های نهایی است، مزایای کامل آزادسازی و ادغام توسط مصرف‌کنندگان به دست نمی‌آید. آپرگیس و همکاران[1] (۲۰۱۷)، در بررسی ادغام منطقه‌ای بازار برق در استرالیا از روش فیلیپس و سول[2] (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) برای آزمایش همگرایی قیمت عمده فروشی برق در ایالت‌های استرالیا استفاده کرده‌اند. یافته‌ها ضمن تعیین میزان همگرایی، انتظارات نظری را تأیید می‌کند. سرانجام، نقشی را که رژیم مالیات کربن در فرآیند همگرایی ایفا کرده است؛ را نشان می‌دهد. اوسینی و پالوت (۲۰۱۶)، به بحث در مورد تئوری همکاری‌های تجاری بین‌المللی در زمینه برق، با این هدف که چه پیش شرط‌هایی می‌تواند در تسهیل تجارت گسترده در سراسر مرزهای ملی مهم باشد، پرداخته‌اند. با توجه به تئوری و شواهدی که ارائه شده است، آموخته‌های کلیدی از قبیل زمینه‌هایی از پیش شرط‌های تجارت، ترتیبات سازمانی لازم و عملیات زمان‌بندی بیان کرده‌اند. آنها از مهم‌ترین موارد پیش شرط‌های تجارت به این موارد اشاره کرده‌اند که، هم تجارت برق دوجانبه و هم یکپارچگی بازارهای برق به تعهدات گسترده‌تری برای تجارت آزاد برای موفقیت‌آمیز بودن، نیاز دارند. همچنین ظرفیت انتقال کافی برای تجارت برق ضروری است. بنابراین، توافق‌نامه‌های گسترش ظرفیت انتقال یکپارچه در توسعه یک بازار برق بین‌المللی، مورد نیاز است. آنها به‌منظور بررسی ترتیبات سازمانی و عملیات زمان‌بندی به این نتیجه رسیده‌اند که بر نقش مؤسسات قوی، کارآمد و مستقل در حصول اطمینان از عملکرد مؤثر بازار قدرت یکپارچه نمی‌توان بیش از حد تأکید کرد. همچنین به‌دست آوردن ترکیب مناسبی از مقررات و طراحی بازار برای ادغام بازار برق دارای اهمیت است. استفاده از بازارهای آتی و بازارهای لحظه‌ای سبب تسهیل تجارت بیشتر و کارایی بیشتر بازار می‌شود. مارتینز و همکاران[3] (۲۰۱۳)، متغیرهای اثر ظرفیت انتقال برون مرزی بر هزینه‌های توزیع، کاهش نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش خروج گاز CO_2 و امنیت عرضه انرژی (در دوره‌هایی که انرژی ذخیره نمی‌شود) با استفاده از مدل حداقل هزینه توزیع مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از آن است که گسترش ظرفیت اضافی انتقال برون مرزی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ منجر به کاهش هزینه‌های توزیع سالانه، بالا بردن سطح امنیت عرضه انرژی، کاهش نیاز به استفاده از منابع

1. Apergis et al.
2. Phillips and Sul
3. Martínez et al.

تجدیدپذیر و پاسخ‌گویی مناسب به‌سطح تقاضای رشد یافته، خواهد شد. ساروها و ورما[1] (۲۰۱۳)، به شبیه‌سازی بازار انرژی مناطق آسیا جنوبی طی ۵۰ سال پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که یکپارچگی بازار برق در این منطقه منجر به کشف قیمت شفاف و دستیابی به عرضه مطمئن و با کیفیت خواهد شد. جانرت و دورمان[2] (۲۰۱۳)، در بررسی سیستم قدرت در اروپای شمالی در سال ۲۰۱۰ از یک مدل بازار قدرت تنظیم شده در حال گسترش استفاده کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که همگرایی بازار برق و ایجاد یک بازار برق یکپارچه در این مناطق منجر به فواید اقتصادی مطلوب می‌شود. شنگ و همکاران[3] (۲۰۱۲)، به این نتیجه رسیده‌اند که کشورهای درگیر یکپارچگی بازار انرژی رشد اقتصادی سریع‌تر، درآمد نسبتاً بالاتر و قیمت‌های انعطاف‌پذیر را در بلندمدت تجربه خواهند کرد. همچنین در کوتاه‌مدت انعطاف‌پذیری قیمت‌ها کاهش می‌یابد که در حقیقت با همگرایی بازار انرژی از فشار ناشی از افزایش تقاضا در بازارهای داخلی و خارجی کاسته خواهد شد. نپال و جاماسب[4] (۲۰۱۲) دریافته‌اند که ادغام بازار برق ایرلند و بریتانیای کبیر یک روش کارآمد برای رقابت‌پذیری بازار محسوب می‌شود. اگرچه این مطالعه نشان می‌دهد که یکپارچگی فقط ۱۷ درصد در بهبود ظرفیت اتصال مؤثر می‌باشد. همچنین نقدینگی یک عامل تعیین‌کننده در فرآیند یکپارچه‌سازی بازار است. بالاگوئر[5] (۲۰۱۱)، بازارهای عمده فروشی در سوئیس و دانمارک به نسبت بالایی همگرا هستند که این امر منجر به نشان دادن رفتار رقابتی در این بازارها شده است. همچنین همگرایی مرزی کشورها در سطوح اضافه بها و رفتار قیمتی صادرکنندگان سوئیسی ایجاد یک کارایی مطلوب در این بازار را نتیجه می‌دهد. مومدو و همکاران[6] (۲۰۰۵)، با ادغام بازار برق در کشور نیجریه، نرخ رشد سالانه مرکب شده و نرخ رشد اقتصادی که نقاط اهرم قدرت در این کشور در نظر گرفته شده است، بهبود می‌یابد. جنانسونو و دونگ[7] (۲۰۰۴)، در مقاله خود به ادغام منطقه‌ای بازار برق در شرق چین بر پایه استراتژی توسعه آینده سیستم تولید برق و ارزیابی فواید بالقوه بازار یکپارچه برق طی دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ پرداخته‌اند. گزاره‌های مدل شامل طراحی و بهره‌برداری از

1. Saroha and Verma
2. Jaehnert and Doorman
3. Sheng et al.
4. Nepal and Jamasb
5. Balaguer
6. Momodu et al.
7. Gnansounou and Dong

بازار، پیش‌بینی تقاضای برق، حداقل هزینه گسترش سیستم‌های تولید بوده است. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد یک بازار برق یکپارچه برای منطقه شاندونگ و شانگ‌های سودآور است.

در مطالعات داخلی نیز صادقی و همکاران (۱۳۹۶)، امکان ایجاد ادغام سیستم‌های قدرت در شش کشور ایران، پاکستان، ترکیه، قزاقستان، روسیه و عمان با استفاده از مدل پویایی سیستم طی دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۰۰ را مورد بررسی قرار داده‌اند. بدین منظور رفتار پویای سناریوهای خودکفایی و بازار آزاد با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی Vensim تا سال ۲۰۳۰ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه دو سناریوی خودکفایی و بازار آزاد حاکی از آن است که ایجاد بازار یکپارچه در منطقه مورد بررسی منجر به کاهش قیمت برق به دلیل کاهش هزینه‌های ظرفیت می‌شود.

لطفعلی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، تأثیر الحاق به سازمان جهانی تجارت بر صادرات برق ایران به کشورهای ترکمنستان، آذربایجان و ارمنستان را مورد بررسی قرار داده‌اند. بدین منظور از مدل خودتوضیح با وقفه‌های توزیعی (ARDL) طی دوره زمانی ۱۳۸۷-۱۳۸۳ استفاده شده است. نتایج برآورد جداگانه مدل پویای بلندمدت با توجه بـه هر یک از سه کشور مذکور وجود یک رابطه بلندمدت بین متغیرهای مدل را نشان می‌دهد. بر این اساس در بلندمدت تأثیر شاخص ادغام در تجارت جهانی بر صادرات برق منفی به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که این ضریب نسبت به سایر متغیرهای توضیحی مدل، بر صادرات برق اثر کمتری دارد. نتایج مدل کوتاه‌مدت نیز میان متغیرهای توضیحی مدل و صادرات برق رابطه‌ای منفی را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالعات اشاره شده در این بخش، ادغام منطقه‌ای بازار برق بین کشورهای عضو برای هر منطقه متناسب با شرایط کشورهای موجود در آن متفاوت است، و این‌که تفاوت در متغیرهای ظرفیت نصب شده، ظرفیت در حال ساخت، تقاضا و قیمت برق در کشورهای عضو آن منطقه قابل بررسی بوده است. با این حال، وجه تمایز اصلی این مقاله علاوه بر منطقه‌ی مورد مطالعه (کشورهای عضو اکو)، متغیرهای وارد شده در مدل مانند تلفات توزیع و در نظر گرفتن ویژگی‌های مربوط به بخش هزینه‌ی ظرفیت نصب شده برق است. به دلیل هزینه‌های بالای ادغام بازار برق منطقه‌ای نمی‌توان بدون شبیه‌سازی و کسب اطمینان از امکان ایجاد بازار یکپارچه، دست به ایجاد بازار یکپارچه منطقه‌ای زد. همچنین شبیه‌سازی با روش‌هایی انجام می‌شود که دنیای واقعی را با خطای کمتر نمایش دهد. برای این منظور در پژوهش حاضر از رویکرد

پویایی سیستم استفاده خواهد شد تا بتوان با استفاده از روابط علّی و معلولی، شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت داشت. از دیگر ویژگی‌های این مقاله نحوه‌ی به‌دست آوردن ضرایب توابع مربوط به معادلات روش پویایی سیستم است که با استفاده از سری‌های زمانی ساختاری برآورد می‌شود.

۴- روش‌شناسی پژوهش

۴-۱- رویکرد پویایی سیستم

همان‌طورکه در بخش قبلی بحث شد، اهمیت استفاده از رویکرد پویایی سیستم در آن است که می‌تواند با طراحی بازار برق یکپارچه در بین کشورهای منتخب عضو اکو، یک راه حل مناسب برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در حوزه برق ارائه دهد و منجر به تأمین به‌موقع برق با قیمت مناسب در بین اعضا شود. بدین منظور در اینجا به معرفی نظری این رویکرد پرداخته می‌شود.

رویکرد پویایی سیستم نخستین بار توسط فارستر[1] (۱۹۶۱) برای شناسایی و تبیین رفتار سیستم‌های پیچیده و چگونگی تعامل آن‌ها با یکدیگر مطرح شده است. وی معتقد بوده که این روش براساس روابط علّی و معلولی و فرآیند بازخورد قادر به شناخت و تبیین روابط بین سیستم‌های مختلف می‌باشد. در این روش فرض می‌شود که رفتار سیستم براساس شبکه به هم پیوسته‌ای از حلقه‌های بازخورد تعیین می‌شود و با شناسایی روابط علّی و معلولی بین متغیرهای مؤثر بر ادغام بازار برق، اثرگذاری این متغیرها را بر یکدیگر در قالب متغیرهای حالت و جریان جهت پیش‌بینی رفتار سیستم مدل‌سازی می‌کند. متغیرهای حالت وضعیت دائمی سیستم را نشان می‌دهد، اما متغیرهای جریان تغییرات متغیرهای حالت را در طول زمان نشان می‌دهند (استرمن[2]، ۲۰۰۰). در رویکرد پویایی سیستم، وضعیت فعلی سیستم با توجه به روندها و رفتارهای گذشته مدل می‌شود تا درک بهتری از رفتار سیستم واقعی حاصل شود. از این روش برای درک رفتار سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شود. بدین ترتیب در این مقاله به تبیین نظری و تجربی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق بین کشورهای عضو اکو، با استفاده از رویکرد پویایی سیستم پرداخته می‌شود.

1. Forester
2. Sterman

بر این اساس، گام اول مدل‌سازی در این مقاله برای پاسخ به این پرسش اساسی است که آیا ادغام منطقه‌ای بین کشورهای منتخب عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی امکان‌پذیر است؟ بدین منظور از داده‌های کشورهای منتخب منطقه اکو شامل ایران، پاکستان، ترکیه، افغانستان و آذربایجان- به دلیل داشتن مرز مشترک با ایران و داشتن روابط تجاری در سال‌های اخیر- طی دوره زمانی ۲۰۱۹-۱۹۸۰ استفاده خواهد شد. به‌منظور اتخاذ تصمیم در مورد ادغام یا عدم ادغام بازارهای ملی و نحوه تجارت برق بین کشورهای منطقه، دو سناریو در نظر گرفته‌شده است. در سناریو اول، که سیاست خودکفایی است، هر کشور تقاضای برق را از بازار داخلی تأمین می‌کند و سناریوی دوم، که سیاست آزاد نامیده می‌شود، ادغام بازارهای برق همه کشورها می‌باشد. در سناریو اول ظرفیت انتقال برق بین کشورها محدود در نظر گرفته شده است و به همین دلیل در خطوط انتقال همیشه ازدحام وجود دارد. در این سناریو واردات برق از کشورهای عضو، محدود و هیچ کشوری از طریق واردات بر تأمین رشد تقاضای خود تکیه نمی‌کند. در سناریوی دوم که امکان تکیه بر شبکه برای حفظ امنیت عرضه را در نظر می‌گیرد، فرض می‌شود که امنیت عرضه بر اتصال داخلی و ظرفیت تولید کشورهای منتخب عضو اکو متکی است و در این سناریو فرض بر نامحدود بودن ظرفیت انتقال برق بین کشورها می‌باشد. ارزیابی سناریوهای مطرح شده با استفاده از نتایج شبیه‌سازی صورت خواهد گرفت. گام دوم در مدل‌سازی، رفتار پویای مدل یا رفتار مرجع متغیرهای مورد نظر بررسی شده با استفاده از نمودارهای علّی و معلولی می‌باشد.

بر این اساس ابتدا به مدل‌سازی بازارهای برق ملی در هر کدام از کشورهای عضو اکو پرداخته می‌شود، به‌طوری‌که نتایج حاصل به‌عنوان سناریو خودکفایی شناخته می‌شود. سپس برای رسیدن به شرایط واقعی، مدل باید توسعه یابد، بدین معنا که با اجرای برخی کدها و شروط، برای ادغام بازار بین کشورهای مورد بررسی که هدف این مقاله است، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج دقیق‌تری نمایش داده می‌شود. برای این منظور از ساختار شرطی استفاده می‌شود. توسعه‌ی نمودارهای علّی و معلولی و حالت و جریان در سناریوی آزاد با استفاده از سیستم چهار بعدی ظرفیت تولید نصب شده، قیمت، ظرفیت تولید در حال ساخت و تقاضا برای برق، از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول به‌دست می‌آید.کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های سالیانه کشورهای منتخب عضو اکو طی دوره‌ی ۲۰۱۹-۲۰۱۰ انجام می‌شود.

حال با توجه به ظرفیت‌های نصب شده موجود در هر کشور، اگر در هر یک از کشورهای عضو، کمبود برق وجود داشته باشد برای سادگی مدل دو حالت وجود خواهد داشت. اول این‌که با توجه به کمبود، روال توسعه را ادامه خواهد داد (ظرفیت‌های جدید نصب کرده یا شبکه‌های موجود را گسترش می‌دهد) و دوم این‌که از کشورهای دیگر وارد می‌کند (وارد بازار برق ادغام شده در بین کشورهای عضو اکو می‌شود) که این مورد نیز دارای شرایطی است: اولاً قیمت انرژی ورودی مناسب باشد و ثانیاً کشورهای موجود در بازار دارای مازاد باشند. با این وجود با توجه به شرایط موجود نتایج مربوط به دو متغیر ذخیره نهایی و قیمت برق مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۴-۲- مدل‌سازی بازار ملی برق (سناریو خودکفایی)

۴-۲-۱- نمودار علی و معلولی

در تحقیقات داینر و همکاران (۲۰۱۱) و ردوندو (۲۰۱۳)، مدل‌های سه بعدی ریاضی با رویکرد پویایی سیستم برای طراحی بازار برق ملی ارائه شده است. در نمودار (۴) موجود در پیوست (۱)، فرضیه‌های پویا، برای طراحی مدل براساس ایده‌های ارائه شده توسط داینر و همکاران (۲۰۱۱)، قابل مشاهده است و در ادامه توضیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که قسمت‌هایی برای گسترش مدل و بر حسب نیاز پژوهش به مدل داینر و همکاران (۲۰۱۱) اضافه شده است. گسترش مدل شامل تفکیک هزینه‌ها به سه گروه نیروگاه‌های برق آبی، تجدیدپذیر و حرارتی و همچنین عوامل مؤثر بر تقاضا است.

همان‌طورکه در نمودار (۴)، مشاهده می‌شود، سیستم با دو حلقه‌ی بازخورد منفی طراحی شده است. حلقه‌ی بازخورد سمت چپ نشان‌دهنده تقاضا و حلقه‌ی سمت راست نشان‌دهنده عرضه برق در بازار برق ملی است. فرضیه‌های پویای مدل که حلقه‌های بازخورد را ایجاد می‌کنند، شامل موارد زیر می‌باشند:

H_1: ذخیره نهایی[1]، قیمت برق پرداختی مصرف‌کننده را تعیین می‌کند؛ به‌طوری‌که اگر ذخیره نهایی افزایش یابد، قیمت کاهش می‌یابد. ذخیره نهایی ارتباط دهنده‌ی بین عرضه برق توسط نیروگاه‌های تولیدی (به‌وسیله ظرفیت نصب‌شده در بازار) و تقاضای مصرف‌کننده است.

1. Reserve Margin

H_2: افزایش قیمت برق منجر به کاهش تقاضا با یک وقفه‌ی زمانی می‌شود. چون از یک‌سو صورتحساب مشتریان به‌صورت دو ماه یک‌بار است و از سوی دیگر تغییر الگوی مصرف زمان‌بر است، بنابراین مصرف‌کنندگان بلافاصله تغییرات قیمت بازار را درک نمی‌کنند.

H_3: افزایش تقاضای بازار موجب کاهش ذخیره نهایی می‌شود.

H_4: افزایش قیمت برق منجر به افزایش در بازده مورد انتظار سرمایه‌گذاری[1] در نیروگاه‌های تولیدی می‌شود.

H_5: افزایش در بازده مورد انتظار سرمایه‌گذاری منجر به افزایش سرمایه‌گذاری‌ها[2] در نیروگاه‌های تولیدی می‌شود.

H_6: افزایش سرمایه‌گذاری‌ها منجر به افزایش ظرفیت تولید برق در حال ساخت می‌شود.

H_7: افزایش ظرفیت تولید در حال ساخت، ظرفیت تولید نصب شده را پس از یک وقفه زمانی افزایش می‌دهد.

H_8: یک افزایش در ظرفیت تولید نصب شده سبب افزایش ذخیره نهایی می‌شود.

آرانگو و همکاران[3] (۲۰۰۲)، رفتار پویا در بازارهای برق را با تمرکز بر توسعه ظرفیت‌های تولید برق نصب‌شده توصیف می‌کنند. این دیدگاه جمعی نشان می‌دهد که تقاضای برق به جمعیت و تولید ناخالص داخلی و همچنین به کشش تقاضای برق بستگی دارد. قیمت بالای برق سبب تحریک سرمایه‌گذاری در تأسیسات تولید برق می‌شود که به ظرفیت بالاتر و در نتیجه به سود نهایی بیشتر منتهی می‌شود. مهم‌ترین متغیر از بین متغیرها، انگیزه برای سرمایه‌گذاری است. این متغیر نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی، تصویب و فرآیندهای ساخت و ساز، افزایش واقعی ظرفیت را به تأخیر می‌اندازد.

۴-۲-۲- *نمودار جریان- حالت*

در مطالعه‌ی رودندو (۲۰۱۳)، نمودار جریان-حالت برای سیستم سه بعدی رسم شده است، به‌گونه‌ای که سعی می‌شود یک سیستم چهار بعدی همانند نمودار (۵)

1. Expected Return
2. Investments
3. Arango et al.

موجود در پیوست (۱) و براساس نمودار علّی- معلولی ارائه شده در نمودار (۴)، طراحی شود. لازم به ذکر است قسمت‌های زیادی از جمله تلفات توزیع، مدل‌سازی هزینه‌های تولید برق، دما، جمعیت و درآمد اضافه شده است.

با توجه به نمودار (۵)، متغیرهای حالت در مدل پیشنهادی شامل؛ ظرفیت تولید نصب‌شده (IC)، ظرفیت تولید در حال ساخت (BC)، تقاضای برق (D) برحسب مگاوات و تأخیر در قیمت (DP) بر حسب دلار آمریکا بر کیلووات ساعت است. باتوجه به نمودار جریان- حالت، روند توسعه معادلات از متغیرهای حالت ایجاد می‌شود. اما متغیر جریان از طریق نمایش تغییرات حاصل در متغیر حالت بیانگر فعالیت سیستم است و از طریق مشتق‌گیری از متغیر حالت در طول زمان به‌دست می‌آید.

از نمودار جریان- حالت، معادلات مربوط به متغیرهای حالت بهتر درک می‌شوند. برای این منظور از معادلات مورد استفاده در مطالعه رودندو و همکاران (۲۰۱۸) و بازنگری در برخی از این معادلات براساس رفتار تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کشورهای مورد مطالعه بهره گرفته شده است. در این مقاله نرخ تغییرات در ظرفیت تولید نصب شده از معادله (۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{IC} = \mathrm{PT} - \mathrm{Dep} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که PT نسبت بین ظرفیت تولید در حال ساخت BC و متوسط زمان مورد نیاز (برحسب سال) برای ساخت نیروگاه‌های جدید تولید برق است که از معادله (۲) به‌دست می‌آید:

$$\mathrm{PT} = \frac{\mathrm{BC}}{\mathrm{TEC}} \qquad (۲)$$

Dep ظرفیت تولیدی که از سیستم خارج می‌شود، یعنی استهلاک ظرفیت تولید نصب شده را نشان می‌دهد. استهلاک به‌عنوان نسبت بین ظرفیت تولید نصب شده IC و متوسط عمر مفید از ظرفیت اندازه‌گیری شده برحسب سال VU از معادله (۳) به‌دست می‌آید،

$$\mathrm{Dep} = \frac{\mathrm{IC}}{\mathrm{VU}} \qquad (۳)$$

PT و Dep بر حسب مگاوات در سال اندازه‌گیری می‌شود.

نرخ تغییرات ظرفیت تولید در حال ساخت از معادله (۴) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{BC} = \mathrm{Inv} - \mathrm{PT} \qquad (۴)$$

Inv جریان سرمایه‌گذاری در ظرفیت تولید است. در اینجا سرمایه‌گذاری توسط تابع حداکثر، بین صفر و حاصل‌ضرب بازده مورد انتظار برای سرمایه‌گذاری RE در استهلاک Dep و ω محاسبه می‌شود، همان‌طورکه معادله (۵) نشان می‌دهد:

$$Inv = \max\left\{0, RE.\,Dep.\,e^{\omega}\right\} \quad (۵)$$

پارامتر ω پارامتر بدون بعدی است که انگیزه سرمایه‌گذاران را بر اساس یک طرح تشویقی نشان می‌دهد و سعی دارد افت انرژی ناشی از خروجی سیستم تولید (استهلاک) را جبران کند. پارامتر ω یک سیگنال جدی در جریان Inv است، که نشان‌دهنده تمایل سرمایه‌گذار برای استفاده از همه فرصت‌های تجاری می‌باشد. سیگنال e^{ω} را می‌توان با n^{ω} که $n \in R^{+}$، و حتی با ضرب در ω جایگزین کرد، با برآورد همان اثر در پویایی سیستم، تنها تفاوت در مقادیر کالیبراسیون ω است.

متغیر کمکی بدون بعد بازده مورد انتظار (RE) به‌عنوان تفاوت قیمت برق P و هزینه برق C تقسیم بر قیمت برق توسط معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$RE = \frac{P-C}{P} \quad (۶)$$

به‌طور کلی، بازده مورد انتظار یک درصد از سود است. هزینه، مقدار پولی است که باید توسط تولیدکننده برق پرداخت شود و شامل هزینه‌های ثابت و متغیر می‌باشد.

قیمت برق P دلار آمریکا برکیلووات ساعت و تابعی از ذخیره نهایی MR می‌باشد. به‌طور معمول ذخیره نهایی به‌عنوان تفاوت بین ظرفیت تولید نصب شده و تقاضای برق تعریف می‌شود، بنابراین واحد آن مگاوات است. با این حال، در مدل به مقادیر بدون بعد نیاز است تا از ثبات مدل جلوگیری شود، بنابراین ذخیره نهایی توسط معادله (۷) به‌دست می‌آید:

$$MR = {}^{IC}/_{D} \quad (۷)$$

تعیین ذخیره نهایی به این شکل، تغییرات مقدار تعادلی را به‌طوری‌که مازاد و کسری صفر دارد، نسبت به مورد مدنظر تعریف می‌کند. قیمت P به‌عنوان یک تابع سیگموئید از ذخیره نهایی MR مدل‌سازی شده است. قیمت یک تابع نزولی از ذخیره نهایی است، یعنی برای مقادیر بالای ذخیره نهایی، قیمت برق به یک مقدار کف (پایین) متمایل می‌شود، که به آن حداقل قیمت برق P_{min} گفته می‌شود و بر حسب دلار آمریکا برکیلووات ساعت است. برای مقادیر پایین ذخیره نهایی، قیمت برق به یک مقدار

محدود،که توسط تنظیم‌کننده[1] برای حمایت از مصرف‌کننده تعریف شده است، متمایل می‌شود. این حداکثر قیمت به‌عنوان مجموع حداقل قیمت برق P_{min} و بالاترین افزایش قیمت برق ΔP_{max} تعریف می‌شود که به دلار آمریکا برکیلووات ساعت است. بیان ریاضی به معادله شکل (۸) است:

$$P = \frac{\Delta P_{max}}{1+e^{MR}} + P_{min} \qquad (۸)$$

مدل‌سازی قیمت با این روش نشان‌دهنده توسعه سیستم می‌باشد. سپس، هنگامی‌که ذخیره نهایی افزایش پیدا می‌کند، قیمت کاهش می‌یابد و هنگامی‌که کاهش پیدا می‌کند، قیمت به همان اندازه که برای اطمینان از تزریق سرمایه برای ایجاد ظرفیت بیشتر لازم است، رشد می‌کند.

نرخ رشد تقاضا به‌صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$\frac{d}{dt}D = CD \qquad (۹)$$

CD، تقاضا ایجاد شده است. تقاضا ایجاد شده نشان‌دهنده نرخ تغییرات تقاضای انرژی ناشی از تأثیر جمعیت، تأثیر دما، تأثیر درآمد و تأثیر قیمت بر تقاضا (EPSD) می‌باشد. بیان ریاضی تقاضا به‌صورت معادله (۱۰) است:

$$CD = k\,.\,(D - D_{ref})\,.\,EPSD \qquad (۱۰)$$

که در آن k ضریب مربوط به میانگین رشد سالیانه تقاضا در سال‌های گذشته است، D_{ref} نشان‌دهنده میزان تقاضای مبنا است و چون در حالت مبنا مصرف‌کننده به هر قیمتی حاضر به خرید برق برای رفع نیازهای اساسی است سبب می‌شود تقاضا به رفتار قیمت وابسته نباشد، بنابراین، میزان تقاضای برق مبنا بسیار کمتر از تقاضای برق سیستم است.

تأثیر قیمت بر تقاضا (EPSD)، یک تابع بدون بعد است که به قیمت مصرف‌کننده بستگی دارد و مشاهده رابطه بین قیمت مصرف‌کننده و تقاضای برق را امکان‌پذیر می‌کند: وقتی قیمت پایین است، مصرف برق افزایش می‌یابد، اما وقتی قیمت افزایش می‌یابد، تقاضای برق کمتر می‌شود. عبارت ریاضی ارائه شده برای تأثیر قیمت بر تقاضا به‌صورت معادله (۱۱) است:

$$EPSD = \left(\frac{PC}{PC_{ref}}\right)^{-\varepsilon} \qquad (۱۱)$$

1. Regulator

که در آن PC متغیر حالت قیمت مصرف‌کننده است PC_{ref} یک پارامتر مثبت می‌باشد که نشان‌دهنده قیمت مبنای مصرف‌کننده برحسب دلار آمریکا برکیلووات ساعت است و $\varepsilon < 0$ یک مقدار بدون بعد است که کشش تقاضا را با توجه به قیمت پرداخت شده توسط مصرف‌کنندگان نشان می‌دهد. نرخ تغییرات در قیمت مصرف‌کننده توسط معادله (۱۲) به‌دست می‌آید:

$$\frac{d}{dt}PC = CP \qquad (۱۲)$$

CP تغییر میانگین قیمت برحسب (دلار آمریکا برکیلووات ساعت) در سال است که به‌عنوان تفاوت بین قیمت تولیدکننده برق و قیمت مصرف‌کننده تقسیم بر زمان تعدیل قیمت TAP به‌صورت معادله (۱۳) تعریف می‌شود:

$$CP = \frac{P-PC}{TAP} \qquad (۱۳)$$

زمان تعدیل قیمت، پارامتری است که بیانگر میانگین سال‌هایی است که مصرف‌کننده بین قیمت برق و تصمیم مشروط برای کاهش مصرف برق سپری می‌کند.

مدل کامل ریاضی عرضه و تقاضا در بازار ملی برق با استفاده از معادلات (۱۳) به‌دست آمده است. همان‌طورکه در مجموعه معادله (۱۴) نشان داده شده است:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}IC = \frac{BC}{TEC} - \frac{IC}{VU} \\ \frac{d}{dt}BC = -\frac{BC}{TEC} + \max\left\{0, e^{\omega}.\ \frac{IC}{VU}.\left(1 - \frac{C(1+e^{IC/D})}{\Delta P_{max}+(1+e^{IC/D})*P_{min}}\right)\right\} \\ \frac{d}{dt}D = k.\left(D - D_{ref}\right).\left(\frac{PC}{PC_{ref}}\right)^{-\varepsilon} \\ \frac{d}{dt}PC = \frac{1}{TAP}\left(\frac{\Delta P_{max}}{1+e^{IC/D}} + P_{min} - PC\right) \end{cases} \qquad (۱۴)$$

۴-۲-۳- مدل‌سازی ادغام منطقه‌ای بازار برق (سناریو آزاد)

مدلی که در این بخش ارائه خواهد شد، برای ادغام n کشور براساس طرح بازار کوپلینگ و با اقتباس از مطالعه رودندو و همکاران (۲۰۱۸)، تهیه شده است و مدل عرضه و تقاضای برق در بازار ملی برق ارائه شده در بخش قبل را به‌عنوان نمونه ارائه می‌دهد. مهم‌ترین فرضی که از این منظر باید به آن توجه شود، این است که خطوط انتقالی که بازارهای برق کشورهای مختلف را به هم متصل می‌کند بایستی دارای ظرفیت بی‌نهایت باشد و در نتیجه مدلی توسعه داده می‌شود که امکان استفاده از نتایج بخش قبلی را داشته باشد.

تعداد n کشور در طرح ادغام منطقه‌ای بازار برق مفروض است، باید ذخیره نهایی i امین کشور تعیین شود $i = 1, \dots, n$، با توجه به موارد زیر:

۱- مازاد عرضه برق و قیمت پایین i امین کشور در مقابل کسری در عرضه برق و قیمت بالاتر کشور k ام. در این حالت، کشور i به کشور k برق صادر می‌کند. ذخیره نهایی باید با توجه به مجموع تقاضاهای کشورهای i و k تعریف شود. به‌عبارت‌دیگر،

$$MR_i = \frac{IC_i}{D_i + D_k} \qquad (۱۵)$$

۲- کسری برق و قیمت بالاتر کشور i ام، در مقابل مازاد عرضه برق و قیمت پایین‌تر کشور j ام. در این حالت، کشور i ام از کشور j ام برق وارد می‌کند. به این ترتیب، با در نظر گرفتن عرضه به‌عنوان مجموع ظرفیت‌های نصب شده کشورهای i ام و j ام، ذخیره نهایی تعریف می‌شود. به‌عبارت‌دیگر:

$$MR_i = \frac{IC_i + IC_j}{D_i} \qquad (۱۶)$$

۳- سایر موارد، یعنی مواردی که برای ادغام نیاز به صادرات یا بهترین قیمت همراه با مازاد ندارد. در این حالت، ذخیره نهایی فصل قبل برای یک بازار ملی تعریف شده است:

$$MR_i = \frac{IC_i}{D_i} \qquad (۱۷)$$

برای دستیابی به ادغام بین کشورهای دیگر غیر از منطقه، متغیرهای تصمیم‌گیری زیر نیز باید تعریف شوند:

- ذخیره نهایی مبنا در i امین کشور MRri، که ذخیره نهایی در نظرگرفته شده برای یک کشور واحد است.

$$MRr_i = \frac{IC_i}{D_i} \qquad (۱۸)$$

- (Exj)، مازاد کشور j ام، اگر کشور j ام مازاد داشته باشد، یعنی $MRr_i > 1$، این به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$Ex_i = \begin{cases} 0, & \text{if } MRr_j \leq 1 \\ IC_j, & \text{if } MRr_j > 1 \end{cases} \qquad (۱۹)$$

- j بهترین قیمت و مازاد در دسترس PED_j را دارد و نشان‌دهنده این واقعیت است که j ام کشور دارای مازاد است، بهترین قیمت را به PC ارائه می‌دهد. تابع به‌صورت معادله (۲۰) نمایش داده می‌شود:

$$\mathrm{PED_j} = \begin{cases} 0, & \text{if } \min\{\mathrm{PC_i}\} \neq \mathrm{PC_j}\,, \ \text{con i} = 1, \dots, \mathrm{j}, \dots \\ \mathrm{Ex_j}, & \text{if } \min\{\mathrm{PC_i}\} = \mathrm{PC_j}\,, \ \text{con i} = 1, \dots, \mathrm{j}, \dots \end{cases} \quad (۲۰)$$

$\mathrm{exporta_j}$، یک متغیر تصمیم‌گیری است که مجوز صادرات از کشور j امین را صادر می‌کند، به‌طوری‌که کشور i ام دچار کسری در عرضه برق باشد. به‌صورت معادله (۲۱) است:

$$\mathrm{exporta_j} = \begin{cases} 0, & \text{if } \mathrm{MRr_i} \geq 1 \\ \mathrm{PED_j}, & \text{if } \mathrm{MRr_i} < 1 \end{cases} \quad (۲۱)$$

به این ترتیب می‌توان تعریف ذخیره نهایی کشور i ام را به‌صورت معادله (۲۲) بازنویسی کرد:

$$\mathrm{MR_i} = \begin{cases} \frac{\mathrm{IC_i}}{\mathrm{D_i}+\mathrm{D_k}}, & \text{if } \mathrm{MRr_i} > 1,\ \mathrm{MRr_k} < 1,\ \mathrm{PC_i} < \mathrm{PC_k} \\ \frac{\mathrm{IC_i}+\mathrm{exporta_j}}{\mathrm{D_i}}, & \text{if } \mathrm{MRr_i} < 1,\ \mathrm{MRr_j} > 1,\ \mathrm{PC_i} > \mathrm{PC_k} \\ \frac{\mathrm{IC_i}}{\mathrm{D_i}}, & \text{All other cases} \end{cases} \quad (۲۲)$$

بنابراین، بر اساس طرح کوپلینگ بازار، برق از مناطق کم قیمت با مازاد، به مناطق با قیمت بالاتر و دارای کسری برق جریان می‌یابد.

اکنون می‌توان سیستمی از معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول نوشت که با استفاده از آن ادغام منطقه‌ای n کشور تحت مدل کوپلینگ بازار با فرض یک ظرفیت انتقال بی‌نهایت بین کشورها پیشنهاد کند، همان‌طورکه در مدل زیر نشان داده شده است:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{IC_i} = \frac{\mathrm{BC_i}}{\mathrm{TEC_i}} - \frac{\mathrm{IC_i}}{\mathrm{VU_i}} \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{BC_i} = -\frac{\mathrm{BC_i}}{\mathrm{TEC_i}} + \max\left\{0, \left(1 - \frac{\mathrm{C_i}\left(1+\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{MR_i}}{\mathrm{D_i}}}\right)}{\Delta\mathrm{P_i^{max}} + \left(1+\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{MR_i}}{\mathrm{D_i}}}\right) * \mathrm{P_i^{min}}}\right) . \left(\frac{\mathrm{IC_i}}{\mathrm{VU_i}}\right)_{\mathrm{i}}^{\omega}\right\} \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{D_i} = \mathrm{k_i} . \left(\mathrm{D_i} - \mathrm{D_i^{ref}}\right) . \left(\frac{\mathrm{PC_i}}{\mathrm{PC_i^{ref}}}\right)^{-\varepsilon_i} \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathrm{PC_i} = \frac{1}{\mathrm{TAP_i}}\left(\frac{\Delta\mathrm{P_i^{max}}}{1+\mathrm{e}^{\mathrm{MR_i/D_i}}} + \mathrm{P_i^{min}} - \mathrm{PC_i}\right) \end{cases} \quad (۲۳)$$

به‌طوری‌که $\mathrm{MR_i}$ در معادله (۲۲) تعریف شده است. معادله (۲۳) یک سیستم ۴ بعدی است، و در آن n تعداد کشور است. در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی‌های ظرفیت

نصب شده، ظرفیت تولید در حال ساخت، تقاضا و قیمت براساس دو سناریو خودکفایی و آزاد ارائه می‌شود. سیستم معادلات برای هر کشور نقطه تعادل ناپایدار $(0.0.\mathrm{D_i^{ref}}.\frac{\Delta \mathrm{P_i^{max}}}{2}+\mathrm{P_i^{min}})$ دارد.

نمودار (۶)، موجود در پیوست (۱)، مدل‌سازی ادغام منطقه‌ای بازار برق را به‌صورت فرضی بین دو کشور الف و ب نشان می‌دهد. این نمودار براساس رویکرد کوپلینگ و با استفاده از معادلات (۱۸)، (۱۹)، (۲۰)، (۴) و (۲۲) به ادغام بازارهای برق منطقه‌ای می‌پردازد. در قسمت بحث و نتایج، به بحث و بررسی ادغام کشورهای منتخب عضو اکو با این رویکرد پرداخته می‌شود. خطوط یکپارچه سیاه نشان‌دهنده انتقال انرژی، خطوط نقطه چین نشان‌دهنده انتقال اطلاعات و خطوط ادامه‌دار با رنگ قرمز نشان‌دهنده انتقال انرژی در داخل هر کشور است.

۵- بحث و نتایج

در این مقاله از داده‌های سری‌های زمانی سالانه کشورهای منتخب اکو طی دوره زمانی ۲۰۱۹-۱۹۸۰ استفاده می‌شود. ماهیت روش پویایی سیستم، به‌کارگیری داده‌های گذشته برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی است. هرچقدر تعداد داده‌های مربوط به گذشته‌ی متغیرها بیشتر باشد، درجه‌ی آزادی مدل، افزایش و همچنین مدل‌سازی با تورش کمتر صورت می‌گیرد (گجراتی و پارتر[1]، ۲۰۰۹). داده‌های متغیرها از منابع انتشار یافته آماری مانند بانک جهانی[2]، آژانس بین‌المللی انرژی[3]، گزارش‌های منتشر شده در زمینه‌ی آمار برق و انرژی[4] مربوط به کشورهای مورد مطالعه استفاده شده است. همچنین نرم‌افزار Vensim PLE برای شبیه‌سازی و نرم‌افزار OxMetrics برای برآورد ضرایب توابع و معادلات به‌کار رفته است.

در ادامه برای برآورد ضرایب، از روش سری‌های زمانی ساختاری[5] (STSM) استفاده شده است که سلیقه در تابع تقاضا را به‌عنوان یک جزء غیرقابل مشاهده و به‌صورت ضمنی در تابع تقاضا وارد می‌کند تا ضرایب مدل بدون تورش برآورد شود. در

1. Gujarati & Porter
2. World Bank
3. International Energy Agency
۴. وزارت نیرو، شبکه آمار و اطلاعات
5. Structural Time Series Models

این روش برای هر سری زمانی یک جزء روند[1]، سیکلی[2] و نامنظم[3] وجود دارد، بنابراین در کنار عوامل اقتصادی نظیر درآمد و قیمت، عوامل دیگری مانند تغییر سلیقه مصرف‌کنندگان، ساختار اقتصادی، کارائی تکنیکی و یا عوامل غیراقتصادی که قابل مشاهده نیستند، می‌توانند اثر قوی و زیادی بر تقاضای برق داشته باشد. ممکن است آثار مزبور در طول زمان دارای روند معینی نباشند و عدم مدل‌سازی صحیح آن‌ها می‌تواند منجر به وجود تورش در تخمین شود. این روش در برآورد جزء روند بین این عوامل با عوامل اقتصادی تفاوت قائل می‌شود. جزء روند دارای دو جزء سطح و شیب است که واریانس این دو جزء ابر پارامترهای[4] مدل را نشان می‌دهند که نقش بسیاری در ماهیت روند دارند و بسته به ثابت، صفر و تصادفی بودن این ابر پارامترها، مدل‌ها حالت‌های مختلف به خود می‌گیرند.

از متغیرهای مهم مورد استفاده در مدل‌سازی اقتصادی بازارهای برق می‌توان به زمان، کشش‌های قیمتی، درآمدی تقاضای برق و ضرایب متغیرهای دما و جمعیت اشاره کرد. در این قسمت ابتدا با استفاده از روش سری‌های زمانی ساختاری تابع تقاضای برق هریک از کشورهای منتخب عضو اکو برآورد می‌شود. جدول (۱)، موجود در پیوست (۲)، نتایج حاصل از برآورد تقاضای برق را به روش سری‌های زمانی ساختاری گزارش می‌کند. متغیرهای LP، LY، LT، LPOP و LC(-1)، به ترتیب لگاریتم قیمت برق، لگاریتم تولید ناخالص ملی (به‌عنوان متغیر درآمد)، لگاریتم دما، لگاریتم جمعیت و لگاریتم متغیر وابسته (مصرف برق) با یک وقفه زمانی است. برای برآورد سری‌های زمانی ساختاری از نرم‌افزار STAMP 8.3 که در بسته نرم‌افزار OxMetrics 6.3 تعبیه شده، استفاده می‌شود.

همان‌طورکه از جدول (۱) مشخص است، باتوجه به آزمون t همه ضرایب معنادار هستند. همچنین علامت ضرایب در همه کشورها با مبانی نظری تابع تقاضا همخوانی دارند. در این مدل از لگاریتم متغیرها استفاده شده و بنابراین ضرایب نشان‌دهنده کشش تقاضا است. به‌عنوان مثال با افزایش یک درصد قیمت برق در ایران، تقاضای برق ۰/۴۳ درصد کاهش می‌یابد.

1. Trend
2. Cyclical
3. Irregular
4. Hyper Parameters

در ادامه جدول (۱)، نتایج حاصل از آزمون‌های خوبی برازش مدل‌های سری‌های زمانی ساختاری در کشورهای منتخب آورده شده است. باتوجه به آماره ضریب تعیین تعدیل شده، متغیرهای مستقل سطح بالایی از متغیر وابسته را توضیح می‌دهند. مطابق با آماره دوربین واتسون، مشکل خودهمبستگی باقیمانده‌ها در الگوی کشورها مشاهده نمی‌شود. جزء سطح، جزء شیب و جزء نامنظم، معرفی و سپس مدل مناسب براساس این اجزاء برای هر کشور انتخاب شده است.

براساس مدل‌سازی بازار ملی برق ارائه شده در بخش قبل، بازار برق ملی برای پنج کشور منتخب عضو اکو (ایران، ترکیه، آذربایجان، پاکستان و ترکیه) تا افق سال ۲۰۳۰ مطابق با سیاست‌های پیشنهادی شبیه‌سازی می‌شود. از دلایل عمده انتخاب بازه ده ساله برای پیش‌بینی، بررسی بلندمدت روند متغیر قیمت و تصمیم‌گیری براساس اطلاعات بیشتر است. جدول‌های (۲) تا (۶) موجود در پیوست (۲)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بازار برق ملی (سناریو خودکفایی) و داده‌های مورد استفاده در کالیبراسیون و اعتبارسنجی از منابع مختلف همچون بانک جهانی و سازمان جهانی انرژی درکشورهای مورد مطالعه را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد.

براساس جداول (۲) تا (۶)، داده‌های ظرفیت خالص مؤثر به‌عنوان ظرفیت تولید نصب شده، تقاضای ملی برق، رشد تقاضای سالانه برق، میانگین قیمت برق و ظرفیت تولید در حال ساخت، در اعتبارسنجی مدل ملی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین شبیه‌سازی بازار برق ملی با داده‌های مذکور در این جداول آورده شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل از مقایسه شبیه‌سازی انجام گرفته با داده‌ها و اطلاعات هر قسمت که از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ به وقوع پیوسته، استفاده شده است. نمودارهای (۷) تا (۱۱) موجود در پیوست (۱)، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی شده‌ی ظرفیت نصب شده، تقاضا، میانگین قیمت و ظرفیت تولید در حال ساخت برای کشورهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همان‌طورکه در نمودارهای (۷) تا (۱۱) نشان داده می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی به داده‌های موجود بسیار نزدیک است و می‌توان بدون نگرانی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مدل‌سازی اقتصادی بازارهای برق ملی و همچنین ادغام منطقه‌ای بازارهای برق استفاده کرد. کالیبراسیون به‌طور عمده شامل یافتن مقادیر تقاضای مبنا و انگیزه سرمایه‌گذار، بر اساس اطلاع از میانگین سایر پارامترها است، بنابراین، مشخص است که تقاضای مبنا مقدار تقریبی تقاضای ارائه شده می‌باشد و انگیزه سرمایه‌گذار باید حداقل

با سه مقدار تقاضای برق، قیمت برق و ظرفیت تولید نصب شده برآورد شود. در مورد اعتبار سنجی با داده‌های کشورهای مورد مطالعه، مقادیر پارامترها در جدول (۷) موجود در پیوست (۲)، نشان داده شده است. مقادیر در نظر گرفته شده به‌عنوان پارامتر در این جدول با ارزش‌های موجود در بازار (IEA، بانک جهانی و آمار و اطلاعات برق در هر کشور) و مقادیر تعدیل منحنی‌ها مطابقت دارد.

در این بخش تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ادغام بازار برق پنج کشور مورد مطالعه به روش کوپلینگ[۱] در این مقاله ارائه می‌شود. جزئیات نحوه اجرای معادلات (۱۸)، (۱۹)، (۲۰)، (۴) و (۲۲) در شکل (۶) در بخش مدل‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق نشان داده شده است. در وهله اول، شبیه‌سازی با مقادیر استفاده شده در کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بازار ملی، در جداول (۲) تا (۷) انجام شده است، در وهله دوم، پنج کشور ادغام می‌شود. فاصله زمانی شبیه‌سازی از ۰ تا ۲۰ سال، به‌عبارت‌دیگر از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ سال است، به‌طوری‌که نتایج شبیه‌سازی از سال ۲۰۱۰ برای اعتبار سنجی و کالیبراسیون مدل استفاده می‌شود و از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ برای پیش‌بینی است. برای شبیه‌سازی از یکپارچه کننده مرتبه چهارم رانگ-کوتای[۲] با مقیاس ۰/۰۶۲۵ استفاده شده است. نتایج با توجه به قیمت در بازار ملی برق، ذخیره نهایی، صادرات و قیمت در ادغام منطقه‌ای بازار برق هر کشور در نمودارهای (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) موجود در پیوست (۱)، ارائه شده است.

همان‌طورکه در بخش قبل بیان شد، قیمت برق عامل مهم در ادغام منطقه‌ای بازارهای برق است. باتوجه به نمودار (۱۲)، قیمت برق در بازار ملی برق کشورهای مورد مطالعه به‌جز کشور ترکیه در حال افزایش است. لازم به ذکر است این قیمت نشان‌دهنده قیمت تولیدکننده است و ممکن است به‌جز کشور ترکیه قیمت مصرف‌کننده به دلیل پرداخت یارانه یا دریافت مالیات متفاوت باشد.

روند قیمت برق ایران از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، کاهش و سپس افزایش می‌یابد که مطابق با آنچه در نمودار (۱۳) مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش ذخیره نهایی می‌باشد. بنابر نتایج حاصل از شبیه‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق با رویکرد پویایی سیستم،

---

۱. همان‌طور که در قسمت مبانی نظری بیان شد این روش یکی از روش‌های مدیریت ازدحام است و باتوجه به ویژگی‌های این روش برای ادغام منطقه‌ای بازارهای برق در این مطالعه از آن استفاده شد.

۲. پرکاربردترین روش‌های حل معادلات دیفرانسیل معمولی، روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم است. Runge-Kutta

از سال ۲۰۲۱ به بعد قیمت برق در ایران پایین‌ترین قیمت در بین کشورهای مورد مطالعه است. براساس روش کوپلینگ با مقایسه قیمت و ذخیره نهایی، صادرات برق ایران در سال ۲۰۲۱ از حدود ۴/۵۰۰ گیگاوات، شروع شده و به‌صورت افزایشی تا حدود ۶/۵۰۰ گیگاوات در سال می‌باشد.

روند قیمت برق ترکیه از سال ۲۰۲۰ تا پایان دوره شبیه‌سازی کاهشی است، و همان‌طورکه در نمودار (۱۳) مشاهده می‌شود به دلیل افزایش ذخیره نهایی می‌باشد. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق با رویکرد پویایی سیستم، از سال ۲۰۲۰ تا پایان دوره مورد مطالعه پایین‌ترین قیمت برق را در بین کشورهای منطقه ندارد. براساس روش کوپلینگ با مقایسه قیمت و ذخیره نهایی، صادرات برق ترکیه طی دوره شبیه‌سازی شده صفر خواهد بود و دلیل آن بالا بودن قیمت برق شبیه‌سازی شده طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ در این کشور نسبت به کشورهای دیگر با وجود ذخیره نهایی بزرگ‌تر از یک است.

روند قیمت برق آذربایجان در طول دوره شبیه‌سازی افزایشی است و همان‌طورکه در نمودار (۱۳) مشاهده می‌شود، به‌دلیل کاهش ذخیره نهایی می‌باشد. بنابر نتایج حاصل از شبیه‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق با رویکرد پویایی سیستم، سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ قیمت برق در آذربایجان پایین‌ترین قیمت برق در بین کشورهای مورد مطالعه است. براساس روش کوپلینگ و مقایسه قیمت و ذخیره نهایی، صادرات برق آذربایجان در ابتدای سال ۲۰۲۰ حدود ۱/۷۳۳ گیگاوات و در انتهای سال ۲۰۲۰ حدود ۱/۷۹۹ گیگاوات خواهد بود.

روند قیمت برق پاکستان و افغانستان در طول دوره شبیه‌سازی افزایشی است و همان‌طورکه در نمودار (۱۳) مشاهده می‌شود به دلیل کاهش ذخیره نهایی می‌باشد. بنابر نتایج حاصل از شبیه‌سازی ادغام منطقه‌ای بازارهای برق با رویکرد پویایی سیستم، از سال ۲۰۲۰ تا پایان دوره مورد مطالعه کشور پاکستان و افغانستان پایین‌ترین قیمت برق را در بین کشورهای منطقه ندارند. براساس روش کوپلینگ و مقایسه قیمت و ذخیره نهایی، صادرات برق پاکستان و افغانستان طی دوره شبیه‌سازی شده صفر خواهد بود.

طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل ادغام منطقه‌ای بازار برق، ادغام منطقه‌ای بین کشورهای مورد مطالعه براساس معیار قیمت برق و ذخیره نهایی دارای توجیه است. دو کشور ایران و آذربایجان به‌عنوان صادرکننده برق در این بازار شناخته شده و کشور

ترکیه با توجه به ذخیره نهایی مطلوب، اما قیمت برق بالا به‌عنوان صادرکننده با روش کوپلینگ نیست و می‌تواند به‌عنوان صادرکننده در ساعات اوج مصرف و با به‌کارگیری روش‌های دیگر مانند روش حراج صریح یا بازارهای قرارداد روز قبل به صادرات برق بپردازد. همچنین کشور پاکستان اگر با تمام ظرفیت تولید نصب شده برق تولید کند تا سال ۲۰۲۶ قادر به تأمین برق خود و حتی مازاد برق است، اما به دلیل بالا بودن قیمت برق، قادر به صادرات بین کشورهای مورد مطالعه نیست. این کشور از سال ۲۰۲۶ به بعد با کمبود عرضه مواجه است و بایستی از ایران برق وارد کند. کشور افغانستان به دلیل ذخیره نهایی کمتر از یک در طی دوره شبیه‌سازی، برای تأمین برق مورد نیاز مجبور به واردات برق کشور آذربایجان در سال ۲۰۲۰ و از کشور ایران از سال ۲۰۲۱ تا سال ۲۰۳۰ است، بنابراین کشور ایران در بین کشورهای مورد مطالعه به‌عنوان کشور اصلی در زمینه صادرات برق به دلیل مازاد تولید برق از طریق به‌کارگیری تمام ظرفیت تولید نصب شده و همچنین پایین بودن قیمت برق تولیدی می‌باشد. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی صورت گرفته استفاده از تمامی ظرفیت نصب شده مدنظر است و عدم استفاده از کل ظرفیت نصب شده به دلایل پیش بینی نشده، در مدل‌سازی لحاظ نشده است.

با گذشت زمان احتمال وابستگی به واردات برق وجود دارد و ممکن است توسعه و امکانات تولید داخلی محدود شود و در صورت خودداری کشور صادرکننده از صادرات برق، کشور واردکننده می‌تواند با مشکلات جدی مواجه شود. در حقیقت این وضعیت از ریسک ناشی از وابستگی تجاری منشأ می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که چنین ریسک امنیتی انرژی دو طرفه است، زیرا کشور صادرکننده هم ممکن است به همان اندازه وابسته به درآمد از صادرات برق باشد (اوسینی و پالوت، ۲۰۱۶)، بنابراین انعقاد قراردادهای تجاری به‌عنوان یک عامل مؤثر در اجرایی سازی ادغام بازار برق بوده و طبق این قراردادها هم کشور صادرکننده و هم کشور واردکننده باید به تعهدات خود عمل کنند تا خطر فروپاشی، بازار را تهدید نکند، بنابراین در این قسمت قیمت برق در ادغام منطقه‌ای بازار برق (سناریو آزاد) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار (۱۵) موجود در پیوست (۱)، نتایج شبیه‌سازی قیمت برق در ادغام منطقه‌ای را نشان می‌دهد.

باتوجه به نمودار (۱۵)، قیمت برق در ایران از سال ۲۰۲۱ به دلیل استفاده از تمام ظرفیت تولید به‌منظور صادرات برق و بالا بودن قیمت برق در کشور واردکننده، افزایش می‌یابد. قیمت برق در ترکیه به دلیل عدم صادرات نسبت به قبل از ادغام، ثابت می‌ماند.

قیمت برق آذربایجان در سال ۲۰۲۰ به دلیل صادرات به افغانستان، افزایش و سپس برابر با قیمت قبل از ادغام و معادل قیمت برق در بازار ملی می‌شود. قیمت برق پاکستان از سال ۲۰۲۶ به دلیل واردات از ایران، کاهش و معادل قیمت برق ایران در قبل از ادغام می‌شود. همچنین قیمت برق افغانستان در سال ۲۰۲۰ برابر قیمت برق آذربایجان و از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ معادل قیمت برق ایران قبل از ادغام خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

در این پژوهش با استفاده از رویکرد پویایی سیستم به شبیه‌سازی بازارهای برق کشورهای منتخب عضو اکو (کشورهای ایران، ترکیه، آذربایجان، پاکستان و افغانستان) پرداخته شده است. وجه تمایز اصلی این مقاله با سایر مطالعات علاوه بر منطقه‌ی مورد مطالعه (کشورهای عضو اکو)، متغیرهای وارد شده در مدل مانند تلفات توزیع و در نظر گرفتن ویژگی‌های مربوط به بخش هزینه‌ی ظرفیت نصب شده برق است. همچنین به دلیل هزینه‌های بالای ادغام بازار برق منطقه‌ای نمی‌توان بدون شبیه‌سازی و کسب اطمینان از امکان ایجاد بازار یکپارچه، دست به ایجاد بازار یکپارچه منطقه‌ای زد. افزون بر این شبیه‌سازی با روش‌هایی انجام می‌شود که دنیای واقعی را با خطای کمتر نمایش دهد. برای این منظور در مقاله حاضر از رویکرد پویایی سیستم استفاده شده است و با کاربرد روابط علّی و معلولی، شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت ارائه شده است. از دیگر ویژگی‌های این مقاله نحوه‌ی به‌دست آوردن ضرایب توابع مربوط به معادلات روش پویایی سیستم می‌باشد که با استفاده از سری‌های زمانی ساختاری برآورد شده است.

در ادامه دو سناریو خودکفایی و آزاد (ادغام) برای این کشورها طراحی شده است. در سناریو اول، بازارهای ملی برق در هر کشور با استفاده از نمودارهای علی و معلولی و جریان-حالت براساس بیان مسئله (مبانی نظری) به شبیه‌سازی پرداخته شده است. سپس با استفاده از داده‌های هر کشور به کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل پرداخته شده است. سپس شبیه‌سازی طی دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ به‌صورت سالانه انجام گرفته و متغیرهای حالت که شامل قیمت، تقاضا، ظرفیت تولید نصب شده و ظرفیت در حال ساخت است مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی اول حاکی از این است که قیمت برق در بازار ملی برق کشورهای مورد مطالعه به‌جز کشور ترکیه در حال افزایش است. همچنین از سال ۲۰۲۱ به بعد قیمت برق در ایران پایین‌ترین قیمت در بین کشورهای مورد مطالعه است (حدود ۰/۱۰۴ تا ۰/۱۰۶ دلار

آمریکا بر هر کیلووات ساعت)، به‌طوری‌که از سال ۲۰۲۰ تا پایان دوره مورد مطالعه، ترکیه پایین‌ترین قیمت برق را در بین کشورهای منطقه ندارد. در سال ۲۰۲۰ قیمت برق در آذربایجان پایین‌ترین قیمت برق در بین کشورهای مورد مطالعه است (حدود ۰/۱۰۴ دلار آمریکا بر هر کیلووات ساعت). روند قیمت برق پاکستان و افغانستان در طول دوره شبیه‌سازی افزایشی است و براین اساس از سال ۲۰۲۰ تا پایان دوره مورد مطالعه کشور پاکستان و افغانستان پایین‌ترین قیمت برق را در بین کشورهای منطقه ندارند (در پایان دوره شبیه‌سازی قیمت برق در پاکستان به ۰/۱۳ و در افغانستان به ۰/۱۷ دلار آمریکا بر هر کیلووات ساعت می‌رسد).

در سناریوی دوم با توجه به روش کوپلینگ و با اولویت قرار دادن قیمت برق به‌عنوان مهم‌ترین عامل اقتصادی و ذخیره نهایی به کمک توسعه مدل به‌کار گرفته شده در مطالعه رودندو و همکاران (۲۰۱۸)، به ادغام بازارهای برق کشورهای مورد مطالعه پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ادغام منطقه‌ای بازار برق (سناریو آزاد) کشورهای مورد مطالعه حاکی از آن است که کشورهای ایران و آذربایجان با توجه به عامل قیمت و ذخیره نهایی قابلیت صادرات برق در این بازار را دارند. کشور ترکیه در طول دوره شبیه‌سازی دارای ذخیره نهایی بیشتر از یک و حتی دارای مازاد برق بیشتر از ایران و آذربایجان است، اما به‌دلیل بالا بودن قیمت برق تولیدی نمی‌تواند با روش کوپلینگ برق را در بازار منطقه‌ای صادر کند، اما با روش‌های حراج صریح و قرارداد روز قبل در ساعات اوج (پیک) کشورهای منطقه می‌تواند برق را به فروش برساند و صادرات برق داشته باشد. کشور افغانستان به دلیل ذخیره نهایی کمتر از یک در طول دوره شبیه‌سازی و قیمت بالای برق در این کشور، واردکننده برق از دو کشور ایران و آذربایجان است. مطلوب است در سال ۲۰۲۰ برق صادراتی از آذربایجان را از طریق ایران و از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ از ایران برق وارد کند (صادرات برق آذربایجان در ابتدای سال ۲۰۲۰ حدود ۱/۷۳۳ گیگاوات و در انتهای سال ۲۰۲۰ حدود ۱/۷۹۹ گیگاوات خواهد بود). کشور پاکستان نیز تا سال ۲۰۲۶ قادر به تأمین برق مورد نیاز خود می‌باشد، اما بعد از این سال تا پایان دوره شبیه‌سازی باتوجه به استفاده کامل از ظرفیت نصب شده باید برای تأمین برق مورد نیاز، از ایران برق وارد کند (صادرات برق ایران به پاکستان از ۴/۵۴۰ گیگاوات در سال ۲۰۲۱ به حدود ۶/۵۱۸ گیگاوات در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید)، بنابراین یکی از اهداف این پژوهش که بیشینه‌سازی پایایی عرضه برق در

بین کشورهای مورد مطالعه است، از طریق صادرات و واردات با تمرکز بر قیمت و ذخیره نهایی حاصل شده است. در حقیقت واردات و صادرات با توجه به قیمت برق و ذخیره نهایی در بین کشورهای مورد مطالعه، شاخصی برای پایایی عرضه برق است.

باتوجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی آزاد، کشور ایران از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ به افغانستان و از سال ۲۰۲۶ تا ۲۰۳۰ به پاکستان برق صادر می‌کند. همچنین در سال ۲۰۲۰ آذربایجان برق را از طریق ایران به افغانستان صادر می‌کند. از مهم‌ترین استفاده‌های نتایج این پژوهش کمک به ایجاد بازار منطقه‌ای برق میان کشورهای عضو اکو، برنامه‌ریزی و مدیریت عرضه برق به‌منظور کاهش ریسک و عدم اطمینان در تأمین و امنیت برق مورد نیاز در بین کشورهای عضو اکو و ایجاد محیط رقابتی در بازار برق با ادغام بازارهای منطقه‌ای و به دنبال آن کاهش تعرفه برق است. همچنین توصیه می‌شود برای برنامه‌ریزی صنعت برق در کشورهای مورد مطالعه ابتدا به ویژگی‌های کشورهای منطقه توجه شود و باتوجه به پتانسیل‌های موجود تصمیم‌ها اتخاذ شود. به‌عنوان مثال در کشور ایران به دلیل پایین بودن قیمت انرژی و پایین بودن هزینه نهایی برق تولیدی، سرمایه‌گذاری در احداث ظرفیت‌های تولید برق پیشنهاد می‌شود تا از طریق صادرات، ارزآوری بیشتری داشته باشد، اما در کشوری مانند افغانستان به دلیل بالا بودن هزینه‌های تولید برق، واردات آن از کشورهای منطقه به جای افزایش ظرفیت تولید توصیه می‌شود.

منابع

۱. احمدی، معین، ودادی کانتر، سعید و کیقبادی، مهدی (۱۳۹۸). ارائه مدل مطلوب شکل‌گیری بازار برق منطقه‌ای کشورهای عضو اکو با الگوبرداری از مدل بازار برق یکپارچه اتحادیه اروپا. اندیشکده حکمرانی انرژی و منابع ایران، تهران، ۲(۱۲)، ۱۳-۳۴

۲. صادقی، زین العابدین، بهادرمایوان، سحر و نجاتی، مهدی (۱۳۹۶). شبیه‌سازی یکپارچگی بازار برق (سیستم‌های قدرت) در کشورهای هم‌مرز ایران. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۶(۲۴)، ۱۴۹-۱۲۳.

۳. لطفعلی‌پور، محمدرضا، نوروزی، روح الله، آشنا، ملیحه و ذبیحی، مریم (۱۳۸۸). بررسی تأثیر الحاق به سازمان جهانی تجارت بر صادرات برق ایران. *مدل‌سازی اقتصادی*، ۳(۳)، ۲۰۲- ۱۷۷.

۴. محقر، علی و نجف‌زاده، کیان (۱۳۹۶). مدل مبتنی بر پویایی سیستم برای توسعه‌ی ظرفیت تولیدی برق در کشور. *فرآیند مدیریت توسعه*، ۳۰(۲)، ۱۷۲-۱۴۵.

5. Apergis, N., Fontini, F., & Inchauspe, J. (2017). Integration of regional electricity markets in Australia: A price convergence assessment. *Energy Economics, 62*, 411-418.
6. Arango, S., Smith, R.A., Dyner, I., & Osorio, S. (2002). *A System Dynamics Model to Analyze Investments in Power Generation in Colombia.*
7. Balaguer, J. (2011). Cross-Border Integration in the European Electricity Market: Evidence from the Pricing Behavior of Norwegian and Swiss Exporters. *Energy Policy, 39 (9),* 4703-4712.
8. Batalla, J., Paniagua, J., & Trujillo, E. (2019). Energy Market Integration and Electricity Trade: A gravity model. *Working Papers in Applied Economics*.
9. Bhattacharyya, Subhes C. (2019). Energy Economics, Concepts, Issues, Markets and Governance, *Springer, Second Edition.*
10. Chen, H., Cui, J., Song. F., & Jiang, Z. (2022). Evaluating the impacts of reforming and integrating China's electricity sector. *Energy Economics, 108*, 1-14.
11. Dias, F., & Jorge, S. (2017). Market Power and Integrated Regional Markets of Electricity: A Simulation of The MIBEL. *International Journal of Economic Sciences, 5(2)*, 45-67.
12. Dyner, I., Olivar, G., & Redondo, JM. (2011). A non smooth model of national energy market for the regional energy integration, *Conference Proceedings International Conference of the System Dynamics Society in Washington*, (29), 1-18.
13. Forester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Boston, Massachusetts: MIT Press.
14. Gnansounou, E., & Dong, J. (2004). Opportunity for Inter-Regional Integration of Electricity Markets: The Case of Shandong and Shanghai in East China. *Energy Policy, 32 (15),* 1737-1751.
15. Gugler, K., & Haxhimusa, A. (2019). Market integration and technology mix: Evidence from the German and French electricity markets. *Energy Policy, 126*, 30-46.
16. Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). Basic Econometrics, *Douglas Reiner, Fifth Edition*.
17. Jaehnert, S., & Doorman, G. L. (2012). Assessing the Benefits of Regulating Power Market Integration in Northern Europe, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 43(1)*, 70-79.
18. Martínez-Anido, C. B., Vandenbergh, M., De Vries, L., Alecu, C., Purvins, A., Fulli, G., & Huld, T. (2013). Medium-Term Demand for European Cross-Border Electricity Transmission Capacity. *Energy Policy, 61*, 207-222.

19. Momodu, A. S., Oyebisi, T. O., & Obilade, T. O. (2012). Modelling the Nigeria's Electric Power System to Evaluate its Long-Term Performance. *In Proceedings International Conference of the System Dynamics Society*, (30), 1-31.
20. Nepal, R., & Jamasb, T. (2012). Interconnections and Market Integration in the Irish Single Electricity Market. *Energy Policy, 51*, 425-434.
21. Oseni, M., & Pollitt, M. (2016). The promotion of regional integration of electricity markets: Lessons for developing countries. *Energy Policy, 88*, 628–638.
22. Oseni, M., & Pollitt, M. (2013). The Economic Costs of Unsupplied Electricity: Evidence from Backup Generation among African Firms. *EPRG Working Paper, 1351*.
23. Pellini, E. (2012). Measuring the impact of market coupling on the Italian electricity market. *Energy Policy, 48*, 322-333.
24. Ramos, A. (1999). Modeling competition in electric energy markets by equilibrium constraints. *Util Policy, 7(4)*, 233–242.
25. Redondo, J., Olivar, G., Ibarra-Vega, D., & Dyner, I. (2018). Modeling for the regional integration of electricity markets. *Energy for Sustainable Development, 43*, 100-113.
26. Redondo, JM. (2013). *Modelado de Mercados de Electricidad*. Doctoral thesis. Colombia: Univers idad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería Manizales.
27. Salazar, G., & Argüello, G. (2006). Rentas de congestion en las transacciones internacionales de electricidad; analisis para las transacciones ecuador-colombia.
28. http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/200/1/rte07-01.pdf.
29. Saroha, S., & Verma, R. (2013). Cross-Border Power Trading Model for South Asian Regional Power Pool. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 44 (1)*, 146 152.
30. Sheng, Y., Shi, X., & Zhang, D. (2013). Economic Development, Energy Market Integration and Energy Demand: Implications for East Asia. *Energy Strategy Reviews, 2 (2),* 146-152.
31. Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and a Modeling for a Complex World*, McGraw Hill.
32. Zhai, Y. (2010). Energy sector integration for low carbon development in greater Mekong sub-region: towards a model of south-south cooperation. *World Energy Congress 9*.
33. https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators
34. https://www.iea.org/
35. https://isn.moe.gov.ir/