نشریه علمی پژوهشهای اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)
مقاله پژوهشی/ سال بیست و چهارم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳، ص: ۱۶۳-۱۹۲

مدل‌سازی اقتصادی شبکه تبادل برق ایران و همسایگان غربی با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی

مهسا مهرابی[۱]
علیمراد شریفی[۲]
بابک صفاری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۱

چکیده

در این پژوهش تلاش شده است با هدف حداقل کردن هزینه تبادلات برق ایران با کشورهای ترکیه و عراق، مقدار بهینه صادرات و واردات، مقدار خاموشی و میزان بهینهٔ تولید برق هریک از انواع نیروگاه‌ها بررسی شود. برای این منظور از روش بهینه‌یابی عدد صحیح نرم‌افزار گمز برای مدل کوتاه‌مدت مذکور در بازه زمانی یک‌ساله در سال ۲۰۱۹ استفاده شده است. نتایج حاکی از آن می‌باشد که حداقل هزینهٔ شبکه تبادل برق در کوتاه مدت با مجموع حداقل هزینه‌های شبکه برق هر سه کشور به‌تنهایی برابر است و اما این شبکهٔ تبادل در کوتاه‌مدت سبب می‌شود که تقاضای برق برآورده‌نشده‌ای در سه کشور ایران، ترکیه و عراق وجود نداشته باشد و همچنین سبب افزایش صادرات و واردات برق میان کشورها می‌شود که برای این سه کشور باعث ایجاد منفعت می گردد. شبکهٔ تبادل برق نیز باعث می‌شود کشورهای نامبرده، تولید نیروگاه‌های حرارتی خود را کاهش دهند و کشور ایران که با تغییرات اقلیمی با محدودیت آب مواجه است از تولید نیروگاه‌های برقابی ترکیه برخوردارشود که باعث کمتر شدن هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه‌های کشورهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر می‌شود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی اقتصادی، بازار برق، شبکه تبادل برق، یکپارچگی منطقه‌ای، ایران و همسایگان غربی
طبقه‌بندی JEL: F18، L94، L98، Q42، Q56

۱. دانشجوی دکتری، رشته علوم اقتصادی، دانشگاه اصفهان، ایران (نویسندهٔ مسئول) mahsa.mehrabi@ase.ui.ac.ir
۲. دانشیار اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران alimorad@ase.ui.ac.ir
۳. استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران babak.saffari@ase.ui.ac.ir

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]
[DOI: 10.22034/24.1.163]

۱. مقدمه

از میان حامل‌های انرژی، برق برای اقتصاد جهانی یک عامل بسیار اساسی است؛ تا جایی که برای تعیین وضعیت اقتصادی کشورها و سطح رفاه آنها، از شاخص‌های تولید و مصرف سرانهٔ برق استفاده می‌شود. رشد تقاضای برق، متأثر از عواملی همچون تولید ناخالص داخلی، قیمت حامل‌های انرژی، دما، رشد جمعیت، توسعه صنایع انرژی‌بر، تغییرات ساختاری در اقتصاد و بهبود کارآیی می‌باشد. پاسخگویی به رشد تقاضا، می‌تواند به توسعه بخش عرضه برق به منظور تأمین این تقاضا بیانجامد؛ اما ممکن است از یک‌سو، دولت‌ها در سرمایه‌گذاری و توسعه عرضه برق با محدودیت مالی روبرو بوده و از سوی دیگر، برخی از کشورها با توجه به تقاضای محدود داخلی در برخی روزهای سال، با مازاد تولید برق مواجه باشند. پس بدین منظور، ایجاد شبکه تبادل برق برای پاسخگویی به تقاضا و فروش مازاد برق تولیدی، ضروری می‌باشد (باتچاریا[1]، ۲۰۱۹).

شبکه تبادل برق با تخصیص بهتر برق میان کشورهای عضو شبکه بر اساس اصل هزینه نسبی، کارآیی در تأمین برق را بهبود می‌بخشد. افزایش کارآیی می‌تواند به دلیل افزایش مقیاس داخلی و خارجی، افزایش قابلیت اطمینان و رقابت باشد و بنابراین، هزینه‌های تولید و در نتیجه، قیمت برق کاهش پیدا کند و باتوجه به ایجاد رقابت، استانداردهای خدمات آن افزایش می‌یابد. همچنین در پی نگرانی جهانی برای افزایش تغییرات آب و هوایی، شبکه تبادل برق می‌تواند با بهبود کارآیی، سبب کاهش انتشار کربن باشد (ژای[2]، ۲۰۱۰).

لازم به ذکر است که پیشرفت‌های واقعی شبکه تبادل برق، در میان کشورها باتوجه به پتانسیل‌های تولید برق، هزینه تولید آن و قیمت برق متفاوت است و از این رو، بررسی این مشاهدات، پیامدهای مهمی برای توسعه شبکه تبادل برق میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق به همراه دارد.

تأمین برق در کشورهای ایران، ترکیه و عراق از نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی، برقابی و تجدیدپذیر صورت می‌گیرد که اکثر منابع تولید برق کشورهای مورد مطالعه، سوخت‌های فسیلی می‌باشد. تولید برق از نیروگاه‌های برقابی، متأثر از تغییرات آب و هوایی است، به طوری که در خشکسالی‌های اخیر، باعث خاموشی در ساعات پیک تابستان در این کشورها شده است. بنابراین، می‌توان با اتصال شبکه تبادل برق میان این سه کشور، میزان خاموشی را کاهش داد. همچنین مطالعه و بررسی حداقل هزینه شبکه تبادل برق میان سه کشور ایران، ترکیه و عراق با در نظر گرفتن هزینه سوخت یارانه‌ای در هر سه کشور در مقایسه با حداقل هزینه شبکه برق هرسه کشور، بدون تشکیل شبکه تبادل برق میان آنها، یک نوآوری در این مقاله است که در مطالعات گذشته در مورد شبکه تبادل برق، یا نادیده گرفته شده و یا به آن، توجه زیادی نشده است.

1. Bhattacharyya (2019).

2. Zhai (2010).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

از این‌رو، مطالعه و بررسی تأثیرات حمایت از تشکیل شبکه تبادل برق میان سه کشور ایران، ترکیه و عراق و یارانه‌های اعطایی به این نوع برق تولیدی در کشورهای منتخب، دارای اهمیت می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد برق نظیر عدم ذخیره سازی در مقیاس بالا، نیاز به سیستم فیزیکی و استراتژیک بودن، هدف از پژوهش حاضر، پاسخگویی به این سؤالات و بویژه سؤال زیر است:

آیا ایجاد یک بازار منطقه یکپارچه و انعقاد قراردادهای مبادله‌ای تجارت برق بین کشورهای ایران، ترکیه و عراق به سهولت انجام می‌شود؟

بدین لحاظ، با توجه به عدم وجود بازار یکپارچه برق در بین کشورهای ایران، ترکیه و عراق، برای مدل‌سازی اقتصادی ادغام بازار برق، روش بهینه‌یابی با استفاده از اطلاعات گذشته و به کمک نرم افزار گمز، می‌توان نحوه یکپارچگی بازار برق بین این کشورها را طراحی نمود و سناریوهای مناسبی را برای ادغام منطقه‌ای بازار برق در این کشورها ارائه کرد.

بدین منظور در قسمت بعد، به شرح شبکه تبادل برق و مزایای ایجاد آن میان سه کشور ایران، ترکیه و عراق و تأثیر ایجاد شبکه تبادل برق بر کاهش هزینه‌های تولید برق پرداخته می‌شود و پژوهش‌های انجام شده خارجی و داخلی با توجه به موضوع پژوهش حاضر و سپس با ارائه یک مدل مناسب اقتصادی با هدف حداقل سازی هزینه شبکه تبادل برق منطقه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در قسمت پایانی نیز نتایج حاصل از این پژوهش و ارائه پیشنهاداتی جهت افزایش مبادلات میان کشورهای منطقه ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری

شبکه تبادل برق[1] به گروهی متشکل از دو یا چند شبکه برق کشورهای مختلف گفته می‌شود که فعالیت های خود را در رابطه با تولید و انتقال برق هماهنگ می‌کنند. هماهنگی می‌تواند در ابعاد مختلفی از جمله اتصال تأسیسات تولیدی با خطوط انتقال، برنامه‌ریزی مشترک برای ساخت تأسیسات و خطوط جدید و تأمین نیازهای برق با ارسال در هر زمان مشخص صورت گیرد. کشورهایی که در شبکه تبادل برق شرکت می‌کنند، از مزایایی برخوردار و هزینه‌هایی را هم متحمل می‌شوند که معمولاً به میزان هماهنگی بین آنها در شبکه تبادل برق بستگی دارد.

قراردادهای شبکه تبادل برق، ابعاد مختلفی از عملیات تولید و انتقال را پوشش می‌دهند و توافق ممکن است در برخی ابعاد، محکم و دقیق و در برخی ابعاد، ضعیف اجرا شود. به طور بالقوه، راه‌های مختلفی وجود دارد که این شبکه‌ها می‌توانند عملیات‌ها را به صورت دقیق‌تری هماهنگ کنند و از صرفه جویی بیشتری در هزینه برخوردار شوند. اینکه بسیاری از کشورها از تشکیل شبکه تبادل برق کوتاهی می‌کنند، نشان می‌دهد که هماهنگی، هزینه‌هایی دارد که با منافع آن مقایسه می‌شود. از نظر مفهومی، کشورها تا زمانی به افزایش شبکه تبادل برق با قراردادهای محکم و دقیق با دیگر کشورها می‌پردازند که منافع نهایی و هزینه‌های نهایی برابر شود.

1. Power Pool

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

برای عملی و قابل اجرا بودن ایجاد شبکه تبادل برق، باید مزایای قابل توجهی برای کشورهای شرکت کننده به همراه داشته باشد. منافع اقتصادی در دو حوزه کلی بررسی می‌شود. حوزه اول، خرید و فروش ظرفیت تولید است. این معاملات به عنوان تصمیمات قابلیت اطمینان شبکه توصیف می‌شوند. حوزه دوم، تبادل انرژی می‌باشد. جریان‌های انرژی، ممکن است به شکل خدمات کوتاه‌مدت نیرو مانند تبادلات انرژی میان کشورهایی که هزینه‌های عملیاتی افزایشی متفاوتی در یک دوره زمانی خاص دارند، یا جریان‌های بلندمدت که در یک دوره معمولی ۱۲ تا ۳۶ ماهه اتفاق می‌افتد، باشد. که ابزار خرید ظرفیت کافی برای پاسخگویی به اوج تقاضای خود را ندارند.

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 صادر کننده از صادرات برق، کشور وارد کننده ممکن است با مشکلات جدی مواجه شود. در واقع این وضعیت، از ریسک ناشی از وابستگی تجاری منشأ می‌گیرد. لازم به ذکر می‌باشد که چنین ریسک امنیتی انرژی دو طرفه است، زیرا کشور صادر کننده ممکن است به همان اندازه وابسته به درآمد از صادرات برق باشد. بنابراین، انعقاد قراردادهای تجاری به عنوان یک عامل مؤثر در اجرایی سازی ادغام بازار برق بوده و طبق این قراردادها، هم کشور صادر کننده و هم کشور وارد کننده، باید به تعهدات خود عمل کنند تا خطر فروپاشی بازار را تهدید نکند (اوسینی و پالوت، ۲۰۱۶)[1].

تجارت بین‌الملل برق، یک مثال نسبتاً معمولی از تجاری شدن محصول غیرتجاری است. وضعیت اولیه در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به گونه‌ای است که تأمین‌کنندگان انحصاری برق برای تحریک فعالیت‌های اقتصادی، آن را در قیمت پایین عرضه می‌کنند. اگر تجارت، قیمت‌ها را تنها در یک کشور به دلیل توزیع مجدد عوامل تولید افزایش دهد، این امر می‌تواند توزیع برق بین دو کشور را تحت تأثیر قرار دهد. البته این امر از این واقعیت نشأت می‌گیرد که مصرف‌کنندگان برق تجاری و صنعتی، قابلیت اطمینان عرضه برق و قیمت آن را می‌سنجند و از این رو، اگر تجارت باعث بهبود قابلیت اطمینان و افزایش قیمت در یک زمان و در یک کشور خاص باشد، ممکن است صنایع وابسته برق در آن کشور، بیشتر به آن جذب شوند. بنابراین جنبه‌های اقتصادی، تنها تجارت برق بین کشورها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و عوامل دیگری مانند عوامل جغرافیایی، منابع تولید برق و کیفیت تولید، باعث ایجاد ادغام منطقه می‌شوند (اوسینی و پالوت، ۲۰۱۳).

تجارت بین‌الملل در زمینه عمده فروشی برق، زمانی ارزشمند است که به دلیل تغییرات آب و هوایی، قیمت برق به صورت فصلی یا روزانه در مکان‌های مختلف، متفاوت باشد (بهار و ساواج، ۲۰۱۳)[2]. این بدان معنی است که تجارت بین کشورهای مختلف، حتی در صورتی اتفاق خواهد افتاد که میانگین قیمت پیش از تجارت آنها، یکسان نباشند. افزایش تولید برق توسط انرژی‌های تجدید پذیر در برخی کشورهای مجاور یکدیگر، باعث می‌شود که این تجارت بیشتر ارزشمند شود. برق

1. Oseni & Pollitt (2016).

2. Bahar and Sauvage (2013).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

محصول معمولی آربیتراژی نیست، زیرا علاوه بر انرژی (یا توان)، دارای ابعاد کیفی نظیر ولتاژ و فرکانس بوده و نیازمند یک رژیم عملیاتی بازار است که به اندازه کافی بتواند کیفیت انرژی را در برابر نوسان‌های قیمت حفظ کند (ردوندو و همکاران، ۲۰۱۸)[1].

با در نظر گرفتن ترتیبات نهادی که ممکن است تجارت مرزی در برق را افزایش دهد، تدبیر در مورد طراحی و سرمایه‌گذاری‌های بازار ایده آل مفید است. هوگان (۱۹۹۵)[2]، پیشنهاد می‌کند که یک بازار عمده فروشی و یک اپراتور سیستم مستقل[3]، باید در کنار هم قرار گیرند. همچنین تجارت برق باید با مؤسسه‌ای مرتبط شود که مسئولیت عملیات سیستم انتقال را در زمان واقعی برعهده داشته باشد. از سویی، طرح استاندارد بازار ایالات متحده که این ایده‌ها را شامل می‌شود، اگرچه می‌تواند نقش بازار پیشرفته‌تری برای تجارت منطقه‌ای را ایفا کند، اما ممکن است برای تجارت بین‌الملل برق ضروری نباشد.

یک نکته کلیدی در مورد طراحی شبکه تبادل برق، نیاز به ظرفیت انتقال کافی است. فورش و همکاران (۲۰۱۳)[4]، در بررسی خود بیان می‌کنند که بدون ظرفیت انتقال کافی، تجارت بین مرزها و همچنین درجه پیشرفت بازارها هنگام حرکت به بازارهای برون‌مرزی، محدود می‌شود. بنابراین، از آنجا که ظرفیت انتقال مناسب برای تجارت برق ضروری بوده، وجود توافقنامه برای گسترش ظرفیت انتقال از اجزای توسعه یک توافقنامه برق بین‌المللی است.

تلفات در انتقال برق نیز یک عامل بازدارنده در ادغام بازارهای برق است. این عامل در موقعیتی که فاصله جغرافیایی بین دو طرف تجاری زیاد باشد، خود را نشان می‌دهد.

وقتی که مزایای بازارهای وسیع منطقه‌ای در میان است، نگرانی‌های زیادی در مورد استفاده از قدرت بازار وجود دارد، بویژه اگر اجرای سیاست‌های رقابتی در سطح بین‌المللی ضعیف‌تر از داخل کشور باشد. با این وجود ، اگر طراحی شبکه تبادل برق موجب شود که قدرت بازار به وجود آید، این یک موضوع مهم در اقتصاد انرژی و بویژه در قیمت‌گذاری و عرضه برق می‌باشد. نظارت بر بازار در بازارهای وسیع منطقه‌ای، فعالیت مهمی است تا اطمینان حاصل شود که بازار به عنوان هدف مورد نظر، رفتار می‌کند.

در ابتدای ادغام بازارها، ممکن است قیمت‌ها به دلیل وجود قدرت بازار افزایش یابد، تا اینکه با ایجاد رقابت کافی، قیمت‌ها به یک سطح تعادلی برسد. به‌رغم برخی شباهت‌های فرهنگی، عقیدتی و زبانی در بین سه کشور ایران، عراق و ترکیه، برخی از شاخص‌های اقتصادی و ویژگی‌های آنها متفاوت

1. Redondo *et al*. (2018).
2. Hogan (1995).
3. Independent System Operator
4. Fursch *et al*. (2013).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]
[DOI: 10.22034/24.1.163]

از یکدیگر هستند. به عنوان مثال، سطح درآمد سرانه و تولید ناخالص داخلی، در این سه کشور، تفاوت زیادی با یکدیگر دارند (نوهاف و نیوبری، ۲۰۰۵)[1].

برای توضیح بیشتر، اولین حوزه مزایای شبکه تبادل برق، با مثالی خاص از صرفه جویی در هزینه در استفاده از ظرفیت تولید، افزایش قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد که با برنامه‌ریزی سیستم هماهنگ میان اعضای شبکه امکان پذیر است. اگر هر یک از کشورها موافقت کنند که تعمیر و نگهداری تأسیسات تولیدی خود را با برنامه‌های تعمیر و نگهداری تمام تأسیسات دیگر در شبکه هماهنگ کنند، ممکن است که مزایای مشارکت شبکه تبادل برق قابل توجه باشد. هر عضو مسئولیت تأمین بار خود را دارد. با هماهنگی، زمان نگهداری و توانایی پاسخگویی به بار افزایش می‌یابد. در عین حال، زمانی که تأسیسات دیگر به دلیل تعمیر و نگهداری از کار افتاده باشند، شبکه تبادل برق مسئولیت مشترکی را در قبال مجموعه ارائه تسهیلات تولید بر عهده می‌گیرد.

افزایش قابلیت اطمینان شبکه نیز از طریق برنامه‌ریزی سیستم هماهنگ با توجه به ماهیت، مکان و زمان‌بندی تأسیسات انتقال اضافی تولید و اتصال امکان‌پذیر است. تصمیم برنامه‌ریزی نیاز به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اضافی را در نظر می‌گیرد. هر ابزار، پیش‌بینی‌های بار و قابلیت سیستم، فاکتورهای تنوع فصلی، روش‌شناسی پیش‌بینی و هر اطلاعات دیگری که برای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی لازم است را ارائه می‌کند. اگر اعضا تشخیص دهند که به تسهیلات تولید یا انتقال اضافی نیاز است، برنامه‌ریزی برای نوع تأسیسات می‌تواند ادامه یابد. میزان اهمیت کنترل شبکه تبادل برق، بستگی به دقیق بودن توافق در شبکه دارد.

یکی دیگر از مزایای مرتبط در زمینه افزایش قابلیت اطمینان شبکه، این است که بارهای متنوع و ذخایر مورد نیاز را می‌توان با ظرفیت تولید کمتری از مجموع نصب شده تأمین کرد. یک مثال، این است که در شرایط اضطراری در هر یک از کشورها، می‌تواند با احتمال کمتری برای کاهش خدمات به مردم برآورده شود. هر زمان که شبکه برق کشورها با شبکه برق مجاور هماهنگ می‌شود تا الزامات ضریب بار مورد نیاز را برآورده کند، این مزیت بیشتر تقویت می‌شود.

مزیت نهایی اعضای شبکه تبادل برق در مقوله تعیین ظرفیت، توانایی انتخاب بهترین مکان برای تجهیزات اضافی تولید کننده، امکانات انتقال و نقاط اتصال با سایر سیستم‌های الکتریکی است. هر عضو شبکه، ممکن است که عملکرد بسیار متفاوتی را با امکانات برق خود انجام دهد تا حداکثر صرفه جویی در عملیات و قابلیت اطمینان حاصل شود. یک شرکت، ممکن است نیرو را انتقال دهد، شرکت دیگری دسترسی به تنوع بار سیستم مجاور را فراهم می‌کند و شرکت سومی به دلیل پرداخت جریمه و داشتن حق مالکیت میزانی مشخص برای آلودگی، برق تولید می‌کند. این تطبیق در عملیات همچنین می‌تواند بین یک سیستم در درجه اول حرارتی و یک سیستم با مقادیر زیادی نیروی آبی رخ دهد که در آن، استفاده از آب توسط جریان آب و آبیاری محدود می‌شود.

1. Neuhoff and Newbery (2005).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

علاوه بر این، توربین‌های احتراق می‌توانند در یک سیستم یکپارچه شبکه تبادل برق نقش داشته باشند، زیرا هزینه راه‌اندازی این نیروگاه‌ها که از نفت تقطیر شده یا گاز طبیعی استفاده می‌کنند، بسیار بالا بوده، اما نصب آنها ارزان و مزیت آنها راه اندازی سریع است و می‌توان از آنها برای ارائه کمک سریع در مواقع اضطراری یا تأمین حداکثر توان استفاده کرد.

دومین حوزه کلی منافع حاصل از شبه تبادل برق مربوط به تبادل انرژی است. دو شکل اساسی از مبادلات وجود دارد. یکی تبادل برق با وجود تنوع فصلی است. اساس این امر بین دو کشور با وجود الگوهای بار ثابت و مشخص در هر کشور است که دوره اوج بار فصلی یک کشور در زمان بار خارج از پیک فصلی در کشور دیگر، رخ می‌دهد.

شکل دوم تبادل انرژی، انرژی مقرون به صرفه است. مبادله انرژی اقتصادی زمانی اتفاق می‌افتد که طرف تأمین‌کننده می‌تواند با هزینه‌ای افزایشی که کمتر از هزینه‌ای که طرف دریافت‌کننده با تولید یا خرید انرژی معادل از تأسیسات یا قراردادهای موجود خود متحمل می‌شود، تولید و به طرف دریافت‌کننده تحویل دهد. انرژی اقتصادی، نشان دهنده یک مزیت عمده از مشارکت شبکه تبادل برق است. توانایی به دست آوردن انرژی از سایر شرکت‌های برق با هزینه کم، مبادلات بازار انرژی را تشویق می‌کند. این خدمت، "غیر ثابت" است و می‌تواند توسط طرف تأمین کننده طبق قوانین تعیین شده در قرارداد لغو شود.

در برخی از شبکه‌های تبادل برق، تبادل انرژی توسط یک مرکز پخش بار[1] مرکزی کنترل می‌شود. این مرکز، هر روز مقدار پایه‌ای از ظرفیت تولید را برای پاسخ‌گویی به بارهای مورد انتظار تعهد می‌کند. هنگامی که این کار انجام شد، مشکل فعلی تعیین ترکیبی از منابع تولید، از جمله خرید از طریق نیروگاه‌های داخلی، که هزینه‌های کل تولید انرژی الکتریکی را به حداقل می‌رساند، به طور مداوم تعیین می‌شود. وظیفه توزیع مرکزی، تعیین بارگیری مناسب در هر واحد تولیدی است؛ به طوری که هزینه‌های تولید مطابق با محدودیت‌هایی مانند تلفات انتقال، الزامات ذخیره گردان[2] و قوانین زیست محیطی به حداقل برسد که باعث به حداقل رساندن هزینه تبادل انرژی می‌شود.

باتوجه به اهمیت توسعه تجارت در اقتصاد و همچنین افزایش تعداد کشورهای ملحق شده به بازارهای برق منطقه‌ای، بررسی شبکه تبادل برق میان کشورهای منتخب ایران، ترکیه و عراق و تأثیر آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی از جمله صنعت برق، ضروری می‌باشد.

کشور ایران به دلیل داشتن ذخایر فراوان نفت و گاز، می‌تواند به تولید کالاهایی روی آورد که پایه آن فرآورده‌های نفتی و گاز است. از طرفی تولید برق را می‌توان به عنوان یک محصول در نظر گرفت، به طوری که با ایجاد شبکه تبادل برق، می‌تواند جزء کشورهای صادرکننده در منطقه باشد و از طرف دیگر، برق به عنوان انرژی ثانویه، یکی از عوامل تولید به حساب آید که به نوبه خود، می‌تواند تولید کالاهای نیازمند برق را افزایش دهد.

1. dispatch

2. Spinning reserve

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

۳. پیشینهٔ تحقیق

ادبیات اقتصادی رو به رشدی در مورد شبکه تبادل برق وجود دارد که آنها را می‌توان در سه جریان اصلی خلاصه کرد. جریان اول، شامل کارهای تجربی می‌باشد که ناکارآمدی سازوکار حراج صریح را برای تخصیص ظرفیت‌های اتصال بین مرزی بررسی می‌کند؛ جریان دوم، شامل کارهای نظری می‌باشد که تأثیر شبکه تبادل برق بر قیمت برق و قدرت بازار را تحلیل می‌کند و جریان سوم، تحلیل تجربی از تأثیر شبکه تبادل برق و ظرفیت انتقال اضافی مرزی بر رفاه اجتماعی کشورهای تازه وارد شبکه شده را بررسی می‌کند. در ادامه، مطالعات خارجی و مطالعات داخلی انجام شده در زمینه شبکه تبادل برق مرور می‌شود و سپس مورد نقد قرار می‌گیرد.

۳ – ۱. پژوهش‌های خارجی

چن و همکاران[1] (۲۰۲۲)، در بررسی شبکه تبادل برق در چین، به بررسی اثرات اقتصادی و زیست محیطی با طراحی سه سناریوی بازار استانی، بازار منطقه‌ای و برنامه‌ریزی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش بالقوه رفاه حاصل از ایجاد بازارهای استانی، ۱۴/۳ میلیارد یوان می‌باشد، که می‌تواند با ادغام بازارهای استانی در یک بازار منطقه‌ای، به ۲۱ میلیارد یوان افزایش یابد. میانگین قیمت عمده‌فروشی در بازار استانی و بازار منطقه‌ای به ترتیب ۲۲/۷ و ۲۳/۵ درصد قابل کاهش می‌باشد. انتشار کربن را می‌توان حدود ۱۶/۶ میلیون تن (۳/۲ درصد) در سناریوی بازار منطقه‌ای و ۱۲/۴ میلیون تن در سناریوی بازار استانی کاهش داد.

گوگلر و هاگزی موسی[2] (۲۰۱۹)، با استفاده از داده‌های ساعتی و با روش پویایی سیستم بازارهای برق آلمان و فرانسه، نشان دادند که ادغام بازارهای برق این دو کشور، به ترکیب تکنولوژی و ویژگی‌های بازارهای همسایه بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد، تنها زمانی‌که بازارهای برق آلمان و فرانسه از ترکیب تولید مشابه استفاده می‌کنند، اختلاف قیمتی صعودی می‌باشد و احتمال تراکم جریان برق به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

باتالا و همکاران[3] (۲۰۱۹)، تأثیر متغیرهای اقتصادی، ساختاری، فرهنگی و نهادی انرژی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که تعیین کننده‌های تجارت انرژی، مشابه تجارت محصول می‌باشد و همچنین مفاهیم استاندارد اقتصاد بین‌الملل مانند مزیت رقابتی در اقتصاد انرژی نیز به وجود خواهد آمد. جریان تجارت انرژی به دلیل افزایش فعالیت اقتصادی و توافق‌های نهادی در زمینه ادغام انرژی، عمدتاً توسط نیاز وارد کننده بررسی خواهد شد.

ردوندو و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از ادغام بازار برق براساس طرح جفت سازی بازار، پیشنهاد دادند که با مدل‌سازی بازارهای ملی با استفاده از روش پویایی سیستم شروع شود. نتایج نشان

1. Chen *et al*. (2022).
2. Gugler & Haxhimusa (2019).
3. Batalla *et al*. (2019).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]
[DOI: 10.22034/24.1.163]

می‌دهد، رفتار مورد انتظار سیستم بجز در مورد صادرات، با فرض ظرفیت انتقال نامتناهی بین کشورها، از ارزش های واقعی موجود در بازار فراتر می‌باشد. در این پژوهش، امکان آزمایش برای تدوین قوانین بازی در ادغام منطقه‌ای بازارها فراهم آمده است.

دیاس و جورج[1] (۲۰۱۷)، با استفاده از شبیه‌سازی برای ادغام بازار برق عمده‌فروشی (MIBEL) نشان دادند که چگونه اعمال قدرت بازار با ادغام کامل منطقه‌ای تکامل می‌یابد. نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که همان‌طور که انتظار می‌رود، قدرت بازار پس از ادغام کامل،کاهش یافته است. از آنجایی که قیمت عمده فروشی همچنان بیشتر از هزینه‌های نهایی است، مزایای کامل آزاد سازی و ادغام توسط مصرف‌کنندگان به دست نمی‌آید.

ساروها و ورما[2] (۲۰۱۳)، مناطق آسیای جنوبی را طی ۵۰ سال بررسی کردند. کشورهای این منطقه دارای ویژگی‌های خاصی از قبیل مصرف سرانه پایین، انرژی در دسترس گران، کیفیت پایین زیربنای اقتصادی و غیره می‌باشند. نتایج از ارائه مدل PMC برای شبکه تبادل انرژی این منطقه و ارزیابی ۱۰ مناقصه طرف عرضه و تقاضای برق می‌باشد، و حاکی از آن است که یکپارچگی بازار برق در این منطقه، به کشف قیمت شفاف و دستیابی به عرضه مطمئن و با کیفیت منجر خواهد شد.

در مطالعهٔ 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 گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که گسترش ظرفیت اضافی انتقال برون مرزی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ سبب کاهش هزینه‌های توزیع سالانه، بالا بردن سطح امنیت عرضه انرژی، کاهش نیاز به استفاده از منابع تجدیدپذیر و پاسخگویی مناسب به سطح تقاضای رشد یافته، خواهد شد.

سیدیوکی و همکاران[4] (۲۰۱۲)، روشی برای پیاده سازی هزینه تنظیم سرویس در بازار خرده فروشی برق هند، زمانی‌که بازار عمده فروشی آزاد شده است و از طریق یک بازار لحظه‌ای ساعتی عمل می‌کند را بررسی کردند. آنها شرایطی از ناتوانی سرویس‌دهی تقاضای اختصاص داده شده را به عنوان بی‌فایدگی برای تنظیم کننده مدل کردند که این بی‌فایدگی باید به حداقل برسد. نتایج حاکی از آن است که حتی یک قطع کوتاه در توانایی شرکت‌های توزیع برای تهیه برق از بازار لحظه‌ای، تأثیر عمیقی بر قیمت‌ها در بازار لحظه‌ای خواهد داشت.

1. Dias and Jorge (2017).
2. Saroha and Verma (2013).
3. Martínez *et al*. (2013).
4. Siddiqui *et al*. (2012).

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

۳ – ۲. پژوهش‌های داخلی

صادقی و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی، با عنوان شبیه سازی یکپارچگی بازار برق (سیستم های قدرت) در کشورهای هم‌مرز ایران، با استفاده از مدل پویایی سیستم طی دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۰۰ پرداختند. بدین منظور، رفتار پویای سناریوهای خودکفایی و بازار آزاد با استفاده از نرم افزار شبیه سازی Vensim تا سال ۲۰۳۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که از مقایسه دو سناریوی خودکفایی و بازار آزاد، ایجاد بازار یکپارچه در منطقه مورد بررسی، به کاهش قیمت برق به دلیل کاهش هزینه‌های ظرفیت منجر می‌گردد.

محمودی و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی، با عنوان تعیین قیمت تمام شده برق براساس الگوریتم پیشنهادی LCOE منطبق با تکنولوژی‌های مختلف و مطالعه موردی آن در کشور ایران که با استفاده از الگوریتم هزینه همتراز شده برق با احتساب هزینه کربن و همچنین به تحلیل حساسیت پارامترها بر هزینه‌ها پرداخته‌اند. نتایج حاکی از آن است که کمترین هزینه تولید مربوط به تکنولوژی سیکل ترکیبی، زغال سنگ سوز، هسته‌ای و بادی می‌باشد. در بخش تحلیل حساسیت، بیشترین تأثیر مربوط به پارامترهای هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه سوخت و ضریب بهره برداری بوده است.

منظور و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی، با عنوان ارزیابی ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور با لحاظ هزینه‌های زیست محیطی با بهره‌گیری از مدل MESSAGE، سیستم عرضهٔ انرژی الکتریکی کشور برای افق زمانی ۳۰ ساله از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ پرداخته اند. نتایج حاکی از آن است که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین تقاضای برق در بلندمدت، بین ۱۰ تا ۳۵ درصد خواهد بود. سهم فناوری‌های موتورهای گازسوز، توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک در کل تولید از حدود ۴ درصد در ابتدای دوره به حدود ۱۰ درصد خواهد رسید. همچنین در بهترین شرایط، میزان مصرف انواع حامل‌های انرژی فسیلی تا ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. در این شرایط، متوسط میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای واحد تولید برق، ۳۰ تا ۷۰ درصد کاهش خواهد یافت.

لطفعلی پور و همکاران (۱۳۸۸)، در پژوهشی با عنوان «بررسی تأثیر الحاق به سازمان تجارت جهانی بر صادرات برق ایران» پرداختند. بدین منظور، از مدل خود توضیح با وقفه‌های توزیعی (ARDL) طی دوره زمانی ۱۳۸۷-۱۳۸۳ استفاده شده و نتایج، حاکی از آن است که در بلندمدت، تأثیر شاخص ادغام در تجارت جهانی بر صادرات برق منفی به‌دست آمده است و در کوتاه‌مدت، میان متغیرهای توضیحی مدل و صادرات برق، رابطه‌ای منفی را نشان می‌دهد.

باتوجه به مطالعات اشاره شده در این بخش، شبکه تبادل برق بین کشورهای منتخب ایران، ترکیه و عراق برای هر کشور متناسب با شرایط موجود در آن، متفاوت و تفاوت در متغیرهای ظرفیت نصب شده، تقاضای برق و قیمت برق در کشورها قابل بررسی بوده است. با این حال، وجه تمایز اصلی این مقاله، علاوه بر کشورهای مورد مطالعه (ایران، ترکیه و عراق)، متغیرهای وارد شده در مدل مانند هزینه تقاضای برق برآورده نشده (هزینه خاموشی)، هزینه سوخت یارانه‌ای و بین‌المللی، تلفات خطوط انتقال برق و ضریب خودکفایی تولید برق برای کشورهای منتخب می‌باشد.

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

به دلیل هزینه‌های بالای تشکیل شبکه تبادل برق، نمی‌توان بدون کسب اطمینان از امکان ایجاد شبکه برق، دست به ایجاد آن میان سه کشور منتخب زد. برای این منظور در پژوهش حاضر، از رویکرد بهینه یابی استفاده خواهد شد تا بتوان حداقل هزینه تشکیل شبکه تبادل برق میان سه کشور منتخب را برآورد کرد.

۴. روش تحقیق

بازارهای برق منطقه‌ای می‌توانند دارای تجارت دوجانبه محدود یا ساختار شبکه تبادل برق باشند. بازار برق منطقه‌ای براساس رویکردهای کوتاه‌مدت و بلندمدت مدل‌سازی می‌شوند و برای این منظور، معمولاً از تکنیک‌های حداقل‌سازی هزینه استفاده به‌عمل می‌آید. در رویکرد کوتاه‌مدت، افزایش ظرفیت در افق برنامه‌ریزی وجود نخواهد داشت. طول دوره کوتاه‌مدت را می‌توان از چند ساعت تا یک سال انتخاب کرد. با استفاده از مدل‌سازی کوتاه‌مدت، می‌توان سودآوری تجارت برق در حال توسعه بین کشورهای مورد مطالعه را در شرایط فعلی و بدون تغییر در ظرفیت تولید آنها، ارزیابی کرد.

در این مقاله، چهارچوب مدل‌سازی بهینه شبکه تبادل برق کوتاه‌مدت میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق با استفاده از نرم افزار گمز ارائه خواهد شد.

۴-۱.مدل‌سازی شبکه تبادل برق در کوتاه‌مدت

هدف، حداقل سازی کل هزینه‌های ناشی از هزینه عملیاتی (سوخت، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری متغیر) و هزینه تقاضای برآورد نشده می‌باشد.

۴-۱-۱. تابع هدف[1] مدل

$$Z = \min \sum_t \sum_i \sum_z \overline{C(I,z)} PG(I,z,t) + \overline{UD \cos t(z)}\, UD(z,t) \qquad (۱)$$

تابع هدف مدل، حداقل سازی هزینه نیروگاه‌های کشورهای ایران، ترکیه و عراق را مورد بحث قرار می‌دهد که بیانگر مجموع هزینه‌های عملیاتی نیروگاه‌ها در هر سه کشور، ضرب در مقدار تولید کل برق به علاوه تقاضای برآورد نشده توسط تولید توزیع شده در هر سه کشور ضرب در مقدار تقاضای برق برآورد نشده در هر کشور می‌باشد.

۴-۱-۱-۱. اندیس‌های مدل

اندیس i در مدل، بیانگر نیروگاه‌های حرارتی و برقابی می‌باشد؛ اندیس‌های z و zp بیانگر کشورهای صادرکننده و وارد کننده برق هستند که شامل کشورهای مورد مطالعه در این پژوهش (ایران، ترکیه و عراق) است. اندیس t بیانگر بازه زمانی مورد نظر در این پژوهش (سال ۲۰۱۹) می‌باشد.

پارامترهای تابع هدف مدل:

$C(i , z)$ هزینه عملیاتی در نیروگاه i و در کشور z برحسب ($/MWh)

1. Objective Function

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

هزینه هر مگاوات تقاضای برآورده نشده برحسب ($/MWh) UDcost(z)

متغیرهای اقتصادی تابع هدف مدل:

تولید کل برق در نیروگاه i در کشور z در زمان t برحسب (MWh) PG(i , z , t)

تقاضای برآورده نشده در کشور z برحسب (MWh) UD(z , t)

این حداقل‌سازی تابع هدف تحت محدودیت‌ها و قیود زیر انجام می‌شود:

۴-۱-۱-۲. محدودیت‌های تابع هدف

محدودیت ۱:

$$\sum_i PG(i,z,t) + \sum_{zp} PF(zp,z)\{\overline{1 - PFloss(zpz)}\} + UD(z,t) = \overline{D(z,t)} + \sum_{zp} PF(z,zp) \quad (۲)$$

متغیر محدودیت ۱:

تبادل برق از zp به z برحسب (MWh) PF (zp , z)

پارامترهای محدودیت ۱:

تلفات خطوط انتقال (بر حسب درصد) Pfloss (zp,z)

تقاضا در کشور z در زمان t (برحسب MWh) D (z , t)

کل تولیدات در کشور z به علاوه واردات از دیگر کشورها (با تعدیل تلفات خطوط انتقال) برابر با تقاضا در کشور z به علاوه صادرات به دیگر کشورها می‌باشد.

محدودیت ۲:

$$PG(i,z,t) \leq \overline{PGinit(i,z)} \quad (۳)$$

پارامتر محدودیت۲:

ظرفیت عملی بر حسب (MW) PGinit (i , z)

این محدودیت، بیانگر این می‌باشد که میزان تولید در نیروگاه i و در کشور z در هر زمان همیشه کمتر یا مساوی با ظرفیت تولید عملی آن نیروگاه i در کشور z می‌باشد.

محدودیت۳:

$$PF(z,zp) \leq PFinit(z,zp) \quad (۴)$$

پارامتر محدودیت ۳:

ظرفیت خطوط انتقال برحسب (MW) PFinit (z, zp)

این محدودیت، بیانگر این می‌باشد که تبادل برق از کشور z به کشور zp همیشه برابر یا کمتر از ظرفیت تبادل خطوط انتقال متصل کننده دو کشور با هم می‌باشد.

محدودیت۴:

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

$$\sum_i \frac{\overline{PGinit(i,z)}}{1+\overline{res(i,z)}} + UD(z) \geq \overline{Dpeak(z,peak)} \quad (۵)$$

پارامترهای محدودیت ۴:

res (i , z) نیاز ذخیره‌ای برای نیروگاه i در کشور z (برحسب درصد)

Dpeak(z , peak) تقاضای پیک درکشور z (برحسب MW)

این محدودیت، بیانگر این می‌باشد که مجموع کل ظرفیت همه نیروگاه‌ها در کشور z بخش بر حدود ذخایرشان به علاوه تقاضای برآورد نشده در کشور z، همیشه بیشتر یا مساوی با تقاضای پیك در کشور z می‌باشد.

محدودیت ۵:

$$\sum_i \overline{PGinit(I,z)} \geq \overline{A(z)}D\left(\overline{z,peak}\right) \quad (۶)$$

پارامتر محدودیت ۵:

A(z) ضریب خودکفایی برای کشور z (برحسب درصد)

مجموع کل ظرفیت تولید اولیه نیروگاه i در کشور z بزرگ‌تر یا برابر با تقاضای پیك در کشور z ضرب‌در ضریب خودکفایی کشور z می‌باشد. معمولاً کشورها به دلایل اقتصادی، سیاسی تمایل دارند همیشه بخشی از ظرفیت پیك خود را توسط نیروگاه‌های داخلی تأمین کنند. بنابراین، ضریب استقلال داخلی یا ضریب خودکفایی A(z) تعریف می‌شود که عددی بین صفر و یك می‌باشد که اگر این ضریب یك فرض شود، نشان دهنده این است که کشور z تمایل به تأمین کل ظرفیت پیك خود، توسط نیروگاه‌های داخلی را دارد.

۴ – ۱ – ۲. اصول اولیهٔ همسان کردن زمانی

متغیر بودن ارزش حقیقی پول یا به عبارتی، تغییر قدرت خرید پول در گذر زمان مسأله‌ای است پذیرفته شده که توجیحات مختلفی از جمله: تورم، تغییر میزان عرضه و تقاضای محصولات، پیشرفت فناوری و ... بیان می‌شود. از این رو با توجه به تغییرات زمانی، لازم می‌باشد که در انجام محاسبات اقتصادی قبل از اعمال ارقام به صورت خام، تأثیر ناشی از گذر زمان را در آن اعمال کرد که به کمک روشی که در ادامه شرح داده خواهد شد، انجام می‌شود.

۴ – ۱ – ۳. ارزش فعلی (PV)[1]

ارزش فعلی، ارزش کنونی میزان پولی است که در آینده دریافت می‌کنید یا در گذشته دریافت کرده‌اید، می‌باشد و می‌توان از آن برای پیش بینی اینکه درآمدهای آینده از یک سرمایه‌گذاری بالقوه، به پول امروز چقدر ارزش دارند، استفاده کرد.

1. Present Value

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

در محاسبه ارزش فعلی، ابتدا تمامی هزینه‌ها بسته به اینکه در چه زمانی به وقوع خواهند پیوست، با نرخ بهره مناسبی طبق رابطه زیر به دست می‌آیند و باتوجه به اینکه می‌خواهیم ارزش فعلی هزینه‌های گذشته را به دست آوریم، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$PV=R_t \cdot (1+i)^t \quad (۷)$$

در این رابطه، t زمان انجام هزینه، i نرخ بهره و R_t مقدار کمی هزینه براساس جریان نقدینگی می‌باشد. برای ارزیابی ارزش حال کل هزینه‌های سیستم عرضه انرژی در این پژوهش، از نرخ تنزیل ۱۵ درصد برای ایران و نرخ تنزیل ۳ درصد برای عراق و نرخ تنزیل ۱۲ درصد برای ترکیه استفاده شده است.

۵. توصیف داده‌ها

۵ - ۱. مشخصات اقتصادی نیروگاه‌ها در کشور ایران، ترکیه و عراق

مشخصات اقتصادی تکنولوژی‌های مورد نظر شامل هزینه سوخت، هزینه عملیاتی و هزینه تعمیر و نگهداری، در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات اقتصادی سیستم عرضه برق ایران

نیروگاه	هزینه سوخت یارانه‌ای (R/KWh)	هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری متغیر (R/KWh)
گازی	۱۷/۷	۶۳/۸
بخاری	۱۱/۲	۳۲/۸۵
سیکل ترکیبی	۱۱/۸	۲۷/۵۵
برقابی	۰	۲/۱۳

(منبع: آمار تفضیلی صنعت برق و برنامه‌ریزی و توسعه شرکت توانیر، ۱۳۸۶)

(جدول ۲: مشخصات اقتصادی سیستم عرضه برق ترکیه)

نیروگاه	هزینه سوخت یارانه‌ای ($/MWh)	هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری متغیر ($/MWh)
ذغالی	۸/۹۲	۴/۳۳
گازی	۲۱/۶	۴/۴۹
برقابی	۰	۱/۱۱

(منبع: Ministry of Energy and Natural Resources Turkey (MENR, 2017))

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

جدول ۳: مشخصات اقتصادی سیستم عرضه برق عراق

نیروگاه	هزینه سوخت ($/MWh)	هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری متغیر ($/MWh)
سیکل ترکیبی	۰/۰۴	۲/۷۰
گازی	۰/۰۴	۱۱/۰۷
بخاری	۰/۱۴	۳/۱۳
برقابی	۰	۰/۱۴

(منبع: Ministry Of Electricity-Iraq (MOELC, 2015))

۵ - ۲. هزینهٔ هر مگاوات تقاضای برآورده نشده در هر کشور عضو شبکهٔ تبادل برق

در ادبیات انرژی الکتریکی، واژه outage به معنای خاموشی و قطع برق می‌باشد. هرگونه افت فرکانس، نوسان در ولتاژ و به طور کلی هرگونه نوسان ایجاد شده در سیستم برق که آن را از حالت استاندارد خارج کند را خاموشی می‌نامیم. هزینه‌های خاموشی برق، بسته به نوع استفاده از برق، شرایط آب و هوایی، زمان وقوع خاموشی در طول سال، هفته و حتی وقوع آن در ساعات مختلف روز، طول مدت خاموشی، تعداد وقوع خاموشی، اعلام یا عدم اعلام قبلی آن و عوامل متعدد دیگری بین بخش‌های مختلف، بسیار متغیر می‌باشد. در این میان، این هزینه‌ها ارتباط بسیار تنگاتنگی با نوع استفاده از برق دارد. استفاده از برق در حالت کلی، به دو صورت می‌باشد: ۱. استفاده از برق به عنوان کالای واسطه‌ای و نهاده تولید و ۲. استفاده از برق به عنوان کالای نهایی. لذا از این نقطه نظر، خسارات ناشی از خاموشی در دو بخش زیر قابل بررسی است:

الف) خسارات خاموشی در واحدهای تولیدی که شامل تولید از دست رفته، از بین رفتن تجهیزات و ماشین آلات، ضایعات مواد اولیه و مواردی از این دست است.

ب) خسارات خاموشی در بخش مصرف‌کنندگان خانگی که مواردی همچون فاسد شدن مواد غذایی، خرابی وسایل الکتریکی، عدم استفاده مطلوب از اوقات فراغت، نداشتن روشنایی برای مطالعه، نابسامانی در برگزاری مهمانی‌ها، ایجاد اخلال در انجام کارهای خانه‌داری، عدم تماشای برنامه دلخواه از تلویزیون و به طور کلی، کاهش رفاه مصرف کنندگان را شامل می‌شود.

جدول ۴: هزینهٔ تقاضای برق برآورده نشدهٔ ترکیه و عراق (بر حسب $/KWh)

کشورها	ترکیه	عراق
هزینه تقاضای برق برآورده نشده	۴/۰۶	۱۰

(منبع: ریداتور، ۲۰۲۰)

جدول ۵: هزینه تقاضای برق برآورده نشده ایران (بر حسب R/KWh)

کشور	ایران
هزینه تقاضای برق برآورده نشده	۳۸۳۷۸

(منبع: احمدیان و عباس‌زاده، ۱۳۹۲)

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

۵ – ۳. تقاضای برق و تقاضای پیک برق در هر کشور عضو شبکه تبادل برق

اطلاعات مربوط به مقدار تقاضای برق و تقاضای پیک هر کشور توسط اطلاعات آمار تفضیلی صنعت برق ایران و برای کشورهای ترکیه و عراق، توسط آژانس بین‌المللی انرژی تعیین شده است.

جدول ۶: تقاضای برق و تقاضای پیک برق در هر سه کشور

کشورها	تقاضای برق (MWh)	تقاضای پیک برق (MW)
ایران	۲۷۳۲۹۴۴۸۰	۵۷۰۱۷
ترکیه	۲۷۱۹۹۸۰۰۰	۴۳۳۸۷
عراق	۴۸۷۹۳۲۰۰	۳۲۰۰۰

(منبع: آمار تفضیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۸؛ آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۱۹)

۵ – ۴. ظرفیت خطوط انتقال برق بین کشورهای عضو در شبکه تبادل برق

اطلاعات مربوط به مقدار ظرفیت خطوط انتقال برق بین کشورهای ایران، ترکیه و عراق توسط اطلاعات آمار تفضیلی صنعت برق ایران و شبکه آمار و اطلاعات برق وزارت نیروی این دو کشور تعیین شده است.

جدول ۷: ظرفیت خطوط انتقال برق بین کشورهای عضو در شبکه تبادل برق

کشورها	ظرفیت خطوط انتقال برق (MW)
ایران - ترکیه	۴۵۰
ایران - عراق	۱۲۰۰
ترکیه - عراق	۴۰۰

(منبع: آمار تفضیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۸)

Ministry of Electricity-Iraq (MOELC, 2019); Turkish Electricity Transmission Company (TEİAŞ, 2019)

۵ – ۵. تلفات خطوط انتقال میان کشورهای عضو شبکه تبادل برق

ضریب تلفات خطوط انتقال می‌تواند از صفر تا ۱۰۰ درصد باشد که به عبارتی، ضریب تلفات صفر درصد به این معنا است که هیچ تقاضای برق برآورد نشده‌ای میان کشورها وجود ندارد و جریان برق به طور کامل منتقل می‌شود اما ضریب تلفات ۱۰۰ درصد به این معنا است که هیچ مبادله برقی صورت نمی‌گیرد و تمام برق انتقالی از بین می‌رود.

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

جدول ۸: مقدار تلفات خطوط انتقال برق کشورها در سال ۲۰۱۹

کشورها	تلفات خطوط انتقال برق (درصد)
ایران	۱۸
ترکیه	۲۰
عراق	۵۷

(منبع: بانک جهانی، ۲۰۱۶)

۵ – ۶. حاشیه ذخیره برای کشورهای عضو شبکهٔ تبادل برق

به دلیل نبود اطلاعات برای میزان حاشیه ذخیره برق این سه کشور، با توجه به مطالعات پژوهش اسپارو و همکاران (۲۰۰۳)، مقدار حاشیه ذخیره ۱۰ درصد در تولید برق آبی و مقدار ۱۹ درصد در تولید حرارتی تعیین شده است.

۵ – ۷. ظرفیت عملی تولید برق در کشورهای عضو شبکهٔ تبادل برق

بیشترین توان قابل‌تولید مولد در محل نصب با در نظر گرفتن شرایط محیطی (دمای محیط، ارتفاع از سطح دریا و رطوبت نسبی) است که اطلاعات مربوط به مقدار ظرفیت عملی تولید برق کشورهای ایران، ترکیه و عراق توسط اطلاعات آمار تفضیلی صنعت برق ایران و شبکه آمار و اطلاعات برق وزارت نیروی کشورهای ترکیه و عراق برای پژوهش حاضر تعیین شده است.

جدول ۹: ظرفیت عملی نیروگاه‌های حرارتی و آبی کشورها در پژوهش حاضر

نیروگاه	ایران (MW)	ترکیه (MW)	عراق (MW)
حرارتی	۵۱۵۴۶	۶۹۵۲۰	۱۷۰۰۰
برقابی	۱۱۶۷۷	۴۲۹۵۰	۱۵۰۰

(منبع: آمار تفضیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۸)

Ministry of Electricity-Iraq (MOELC, 2019); Ministry of Energy and Natural Resources Turkey (MENR, 2019)

۵ – ۸. ضریب خودکفایی تولید برق کشورهای عضو شبکهٔ تبادل برق

ضریب خودکفایی نسبتی از سطح اعتماد هر کشور در تأمین تقاضای پیک خود، و به عبارتی دیگر، به معنی حداقل درصد تأمین تقاضای پیک هر کشور توسط نیروگاه‌های داخلی می‌باشد. ضریب خودکفایی ۱۰۰ درصد به این معنی است که هیچ مبادله برقی صورت نگیرد و ضریب خودکفایی صفر درصد به این معنی است که امکان مبادله به طور کامل وجود داشته باشد.

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

۶. تحلیل نتایج

حالت اول: هزینهٔ شبکه تبادل برق کوتاه‌مدت با استفاده از هزینهٔ سوخت یارانه‌ای

با توجه به هزینه سوخت یارانه‌ای و هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری متغیر کشورهای ایران، ترکیه و عراق در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ که مقدار این هزینه‌ها برحسب دلار بر مگاوات ساعت می‌باشد و برای تبدیل آنها برای یک سال باید اعداد مربوط به هر هزینه را در تعداد روزهای کل سال و تعداد ساعات کل شبانه روز ضرب کرد (۳۶۵×۲۴) و با قرار دادن آنها در مدل کوتاه‌مدت شبکه تبادل برق، مقدار حداقل هزینه کوتاه‌مدت شبکه تبادل برق کشورهای ایران، ترکیه و عراق و مقدار متغیرهای مدل شامل تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در کشورهای ایران، ترکیه و عراق، تقاضای برق برآورد نشده در کشورهای ایران، ترکیه و عراق و میزان صادرات و واردات برق میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق در ادامه، به شرح زیر می‌باشند.

جدول ۱۰: مقدار حداقل هزینه شبکه تبادل برق با هزینه سوخت یارانه‌ای در کشورها

حداقل هزینه شبکه تبادل (B$/MWyr)	کشورها
۳/۲۹۶۵	ایران
	ترکیه
	عراق

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

حالت دوم: مقایسه حداقل هزینه شبکه تبادل برق با مجموع حداقل هزینه شبکه برق هر کشور

با مقایسهٔ مجموع حداقل هزینه شبکه تبادل برق هر سه کشور ایران، ترکیه و عراق با حداقل هزینه شبکه تبادل برق، نتایج حاکی از آن می‌باشد که دو عدد، اختلاف اندکی باهم دارند و می‌توان گفت حداقل هزینه شبکه تبادل برق سه کشور با مجموع حداقل هزینه‌های شبکه هر سه کشور مورد مطالعه، به تنهایی برابر می‌باشد.

جدول ۱۱: حداقل هزینه شبکه برق سه کشور

حداقل هزینه شبکه برق هر کشور (B$/MWyr)	کشورها
۲/۴۰۲۵	ایران
۰/۳۴۰۹۴	ترکیه
۰/۳۶۶۶	عراق
۳/۱۱	مجموع

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

حالت سوم: هزینه شبکه تبادل برق کوتاه‌مدت با استفاده از هزینه سوخت بین‌المللی در کشورها

باتوجه به هزینه سوخت بین‌المللی کشورهای ایران، ترکیه و عراق در جدول ۴-۱۲ و هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری کشورها، به شرح جدول زیر می‌باشد.

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

جدول ۱۲: مقدار حداقل هزینه شبکه تبادل برق با هزینه سوخت بین‌المللی

کشورها	هزینه سوخت بین‌المللی ($/MWh)	حداقل هزینه شبکه تبادل برق (B$/MWyr)
ایران	۶۹/۳۱	۱۴۷/۹
ترکیه	۵۰/۱	
عراق	۶۹/۳۱	

(مأخذ: یافته‌های تحقیق؛
Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, 2019)

حالت چهارم: تأثیر مقادیر مختلف ضریب تلفات خطوط انتقال بر مقدار تولید برق حرارتی و برقابی

نتایج این سناریو در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۳: تولید برق نیروگاه‌های حرارتی کشورها براساس مقادیر ضریب تلفات خطوط انتقال

ضریب تلفات خطوط انتقال (درصد)	۰	۰/۵	۰/۷۵	۱
نیروگاه‌های حرارتی ایران	۱۶۲۲۱	۱۷۰۴۶	۱۷۴۵۸	۱۷۸۷۱
نیروگاه‌های حرارتی ترکیه	۰	۰	۰	۰
نیروگاه‌های حرارتی عراق	۸۷۰	۱۶۷۰	۲۰۷۰	۲۴۷۰

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

جدول ۱۴: تولید برق نیروگاه برقابی کشورها براساس مقادیر ضریب تلفات خطوط انتقال

ضریب تلفات خطوط انتقال (درصد)	۰	۰/۵	۰/۷۵	۱
نیروگاه برقابی ایران	۱۱۶۷۷	۱۱۶۷۷	۱۱۶۷۷	۱۱۶۷۷
نیروگاه برقابی ترکیه	۲۹۳۵۰	۲۹۷۷۵	۲۹۹۸۷	۳۰۲۰۰
نیروگاه برقابی عراق	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

مقادیر بهینه سه متغیر تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در سه کشور ایران، ترکیه و عراق، مقدار صادرات و واردات برق میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق و تقاضای برق برآورده نشده در هر سه کشور در جداول زیر ارائه شده‌اند.

جدول ۱۵: مقدار تولید کل بهینه نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در کشورها در سال ۲۰۱۹

نیروگاه‌های کشورها	نیروگاه‌های حرارتی (MWyr)	نیروگاه‌های برقابی (MWyr)
ایران	۱۶۸۸۴	۱۱۶۷۷
ترکیه	۰	۲۹۶۰۴
عراق	۱۰۷۰	۱۵۰۰

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

جدول ۱۶: مقدار بهینه توان انتقال برق میان کشورها در سال ۲۰۱۹

کشور	مقدار انتقال برق میان کشورها (MW)
از ایران به ترکیه	۴۵۰
از ایران به عراق	۱۲۰۰
از ترکیه به عراق	۴۰۰

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

جدول ۱۷: مقدار بهینه تقاضای برق برآورده نشده کشورها در سال ۲۰۱۹

کشورها	مقدار تقاضای برق برآورده نشده کشورها (MWyr)
از ایران به ترکیه	۰
از ایران به عراق	۰
از ترکیه به عراق	۰

(مأخذ: یافته‌های تحقیق)

۶ – ۱. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل

در قسمت‌های قبلی، ذکر شد که در مدل حاضر، شبکه تبادل برق کوتاه مدت هزینه سوخت و ضریب تلفات خطوط انتقال، نقشی اساسی در تعیین نتایج مدل ارائه می‌کنند و بنابراین، لازم است روی هزینه سوخت و ضریب تلفات خطوط، تحلیل حساسیت صورت گیرد تا میزان نااطمینانی از وقوع نتایج مشخص شود. نتایج مربوط به هر بخش، بیانگر این است که با تغییر هزینه سوخت (یارانه‌ای و بین‌المللی)، مقدار حداقل هزینه کوتاه مدت شبکه تبادل برق تغییر می‌کند و افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش ضریب تلفات خطوط انتقال میان صفر تا یک، مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی ایران و عراق، افزایش می‌یابد اما مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی ترکیه تغییری نمی‌کند. همچنین با افزایش ضریب تلفات خطوط انتقال بین صفر و یک، مقدار تولید نیروگاه برقابی ترکیه افزایش می‌یابد اما مقدار تولید نیروگاه‌های برقابی ایران و عراق تغییری نمی‌کنند. بنابراین، نتایج مدل به انتخاب هزینه سوخت و ضریب تلفات خطوط انتقال برق حساس است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقالهٔ حاضر به ارائه یک مدل انرژی اقتصاد برای کشورهای ایران، ترکیه و عراق اقدام شد. در این مطالعه، مدل شبکه تبادل برق کوتاه‌مدت میان کشورهای ایران و همسایگان غربی آن (ترکیه و عراق) ملاحظه می‌گردد. این مدل برای حداقل کردن هزینه شبکه تبادل برق میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق انجام شده است.

هدف از تدوین این مقاله، حداقل کردن هزینه شبکه تبادل برق میان کشورها در کوتاه‌مدت و همچنین تعیین مقدار تولید برق نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در هر سه کشور (ایران، ترکیه و عراق)،

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

تعیین مقدار صادرات و واردات برق میان کشورها و تعیین مقدار تقاضای برق برآورد نشده در هر کشور می‌باشد.

نتایج حاصل از اجرای مدل در جداول ۱۰ تا ۱۷ ارائه گردیده است و در آن، میزان تأثیر هزینه سوخت و ضریب تلفات خطوط انتقال بر حداقل هزینه کوتاه‌مدت شبکه تبادل برق و تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و برقابی تحلیل شده است که:

۱. هزینه سوخت بر حداقل هزینه کوتاه‌مدت شبکه تبادل برق تأثیر دارد و استفاده از هزینه سوخت بین‌المللی برای نیروگاه‌های سه کشور ایران، ترکیه و عراق، سبب افزایش حداقل هزینه شبکه تبادل برق می‌شود؛

۲. میزان تأثیر ضریب تلفات خطوط انتقال بر تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و برقابی کشورهای ایران، ترکیه و عراق، باعث می‌شود که مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی ایران و عراق افزایش یابد اما مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی ترکیه تغییری نمی‌کند. همچنین با افزایش ضریب تلفات خطوط انتقال بین صفر و یک، مقدار تولید نیروگاه برقابی ترکیه افزایش می‌یابد اما مقدار تولید نیروگاه‌های برقابی ایران و عراق تغییری نمی‌کنند. مقدار بهینهٔ تولیدکل نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در کشورهای ایران، ترکیه و عراق و مقدار بهینهٔ صادرات و واردات برق و مقدار تقاضای برق برآورد نشده این سه کشور تحلیل شده است؛

۳. براساس نمودارهایی که میزان تولید برق نیروگاه‌های حرارتی و برقابی در سال ۲۰۱۹ در کشورهای ایران، ترکیه و عراق را ارائه می‌دهد، در مقایسه با مقادیر بهینه نیروگاه‌های حرارتی و برقابی به‌دست آمده از مدل، نشان می‌دهد که با استفاده از شبکه تبادل برق، میزان تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی کشورهای ایران و عراق کاهش می‌یابد و کشور ترکیه نیز با پیوستن به این شبکه تبادل برق، مقدار تولید نیروگاه حرارتی اش صفر می‌شود و میزان تولید برق نیروگاه برقابی هر سه کشور در این شبکه تبادل باید افزایش یابد که به نوعی سبب کاهش هزینه در کشورها می‌شود؛ زیرا باعث کاهش هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌های حرارتی کشورها می‌شود و کشورها می‌توانند برق ارزان‌تر را ازکشورهای دیگر تأمین کنند. همچنین با مقدار بهینه انتقال برق میان کشورها که به‌دست آمده است، نشان می‌دهد صادرات و واردات برق میان کشورها باید افزایش پیدا کند؛

۴. پیوستن کشورهای ایران، ترکیه و عراق به شبکه تبادل برق کوتاه‌مدت، سبب می‌شود که تقاضای برق برآورده نشده در هیچیک از سه کشور وجود نداشته باشد؛

۵. باتوجه به مقادیر ظرفیت خطوط انتقال موجود میان سه کشور ایران، ترکیه و عراق که در جدول ۷ ارائه شده است و میزان صادرات و واردات برق میان کشورهای ایران و ترکیه در سال ۲۰۱۹ در جدول۶، در مقایسه با مقادیر بهینه مدل در جدول ۱۷، بیانگر این است که طبق ظرفیت خطوط انتقال موجود، باید مبادله برق مطابق با این ظرفیت یعنی به میزان ۴۵۰ مگاوات میان

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

کشورهای ایران و ترکیه صورت گیرد. همچنین میزان صادرات برق از ایران به عراق، باید افزایش یابد و همچنین میزان واردات برق از عراق به ایران، می‌باید به میزان ظرفیت خطوط انتقال برق موجود میان عراق و ایران یعنی به میزان ۱۲۰۰ مگاوات صورت گیرد.

باتوجه به فرضیه‌های این پژوهش که بیان داشته است شبکهٔ تبادل برق میان کشورهای ایران، ترکیه و عراق سبب ایجاد منفعت در کوتاه‌مدت شده و شبکه تبادل برق در کوتاه‌مدت باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاهی در کشورهای مورد مطالعه می‌شود، مشاهده می‌گردد که این فرضیه‌ها تأیید می‌شود؛ زیرا نتایج مدل نشان می‌دهد که این شبکه تبادل در کوتاه‌مدت سبب می‌شود که تقاضای برق برآورد نشده‌ای در هر سه کشور ایران، ترکیه و عراق وجود نداشته باشد و همچنین باعث افزایش صادرات و واردات برق میان کشورها می‌شود و نیز از طریق شبکه تبادل برق، سبب می‌گردد که کشورهای ایران، ترکیه و عراق، تولید نیروگاه‌های حرارتی خود را کاهش، و تولید نیروگاه‌های برقابی خود را افزایش دهند که باعث کمتر شدن هزینه سوخت و هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه‌ها شده و همچنین سبب کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی مورد استفاده نیروگاه‌ها می‌شود که سبب ایجاد منفعت برای کشورهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر می‌گردد.

۸. پیشنهادات

۱. برای توسعه بازار بین‌المللی در کشور، با تدوین قوانین جدید در بخش برق و قوانین مربوط به صادرات و واردات برق و تعیین ضوابط اعطای مجوز به بخش خصوصی داخلی و یا شرکت‌های خارجی برای تأسیس شرکت‌های تجاری و صادراتی برق در کشور، می‌توان باعث سرعت بخشیدن به این روند شد؛

۲. سرمایه‌گذاری مشترک با کشورهای همسایه برای احداث خطوط انتقال جدید و نیروگاه‌های مرزی و بهره‌برداری مشترک کشورها از این نیروگاه‌ها، باتوجه به اختلاف زمان پیک مصرف برق در کشور ایران با کشورهای همسایه، امکان تبادل برق در بلندمدت امکان پذیر می‌باشد. درحال حاضر، برنامه صادرات و واردات برق کشور ایران با کشورهای همسایه به صورت توافقنامه‌های سالیانه انجام می‌شود اما طرح‌های سرمایه‌گذاری مشترک بلندمدت، در تثبیت برنامه‌های تجارت بین‌المللی برق بسیار مؤثر است؛

۳. باید سیستم مزایده در بازار برق برقرار شود؛ به‌طوری‌که با ایجاد پایگاه‌های اطلاعاتی، بتوان از آخرین اطلاعات قیمت فروش و صادرات برق بین کشورهای صادرکننده و واردکننده و شرکت‌های برق اطلاع کسب کرد. سپس با استفاده از سیستم مزایده، حداقل قیمت فروش را برای صادرات برق و حداکثر قیمت پیشنهادی خریداران را تعیین و اقدام به فروش برق نمود؛

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

۴. برقراری شبکه تبادل برق میان کشورهای منطقه که می‌تواند سبب شکل‌گیری بازار بین‌المللی برق خاورمیانه و تبادل برق آن با اروپا و شمال آفریقا شود. در سیستم شبکه تبادل برق، امکان خرید و فروش برق به صورت روزانه و زمان‌های کوتاه‌تر طی روز برقرار است و قیمت برق در هر زمان متفاوت می‌باشد. در شبکه تبادل برق، هر کشور می‌تواند به صورت یک بازار عمده فروشی عمل کند و پس از رفع نیازهای محلی و منطقه‌ای، به تبادل برق با سایر بازارهای عمده فروشی برق بپردازد؛

۵. از محاسبهٔ سیستم قیمت‌گذاری بهینه با روش LRMC به عنوان قیمت پایه در بازاریابی برق استفاده شود و قیمت قطعی براساس چانه زنی[1] در بازار تعیین گردد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

1. Bargaining

References

Abbaspour, M. (2012). *Power Generating Plants*. first edition. Tehran: Scientific Publishing Institute of Sharif University of Technology [In Persian].

Abedin Moqanaki, M. R., & Kamali Ardakani, M. (2004). Consequences of establishing preferential trade arrangements in West Asia on Iran's foreign sector. *Business Research Quarterly*. No. 37: 109-131 [In Persian].

Batalla, J., Paniagua, J., & Trujillo, E. (2019). Energy market integration and electricity trade: A gravity model. *Working Papers* in Applied Economics.

Bahar, H., & Sauvage, J. (2013). Cross-border trade in electricity and the development of renewables-based electric power: Lessons from Europe. OECD Trade and Environment. *Working Papers*. 2013/02. OECD Publishing.

Bhattacharyya, S. C. (2011). Energy Economics. Concepts, Issues, Markets and Governance.

Bowen, B. H., Sparrow, F. T., & Yu, Z. (1999). Modeling electricity trade policy for the twelve nations of the Southern African Power Pool (SAPP). *Utilities Policy*. *8*(3): 183-197.

Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, 2019.

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.

Dasht Bozorg, M. & Ali Abadi, H. (2014). Restructuring and creating competition in the electricity industry: A case study, Iran's electricity market. *The 7th. Power Plant Conference* [In Persian].

Dias, F., & Jorge, S. (2017). Market power and integrated regional marketsof electricity: A simulation of the MIBEL. *International Journal of Economic Sciences*. *5*(2): 45-67.

Fakhrrahimi, A.,Vaziri-Mehr, M. & Fakhrrahimi, E. (2012). *Getting to Know the Working Principles of Power Plants*. First edition, Tehran: Gostar Publishing House [In Persian].

Firozifar, S. & Firozifar, M. S. (2012). *Principles of Power Plant Production*. first edition, Tehran: Nasir Basir Publications [In Persian].

Mohgar, A. & Najafzadeh, K. (2016). A model based on system dynamics for the development of electricity production capacity in the country. *Development Management Process Quarterly*. 30th. year, No. 2: 145-172. [In Persian].

Fürsch, M., Hagspiel, S., Jägemann, C., Nagl, S., Lindenberger, D., & Tröster, E. (2013). The role of grid extensions in a cost-efficient transformation of the European electricity system until 205. *Appl. Energy*. 104: 642-652.

Forty-four years of Iran's electricity industry in the future. Tavanir Company Statistics [In Persian].

Gibbons, R. S. (1992). *Game Theory for Applied Economists*. Princeton University Press.

Gohari Moghadam, A., & Bashiri Lahaghi, M. (2016). The application of convergence theories in the design of the regional convergence model in the neighborhood of the Islamic Republic of Iran. *Political Science Journal*. 13th. year, No. 1: 71-98 [In Persian].

Gugler, K., & Haxhimusa, A. (2019). Market integration and technology mix: Evidence from the German and French electricity markets. *Energy Policy*. 126: 30-46.

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

Gullberg, A.T. (2013). The political feasibility of Norway as the "green battery" of Europe. *Energy Policy*. 57: 615- 623.

Hosseini, M. A. & Homan, T. (2016). Comparative studies of international macroeconomic indicators of ECO member countries in the process of regionalism. *Knowledge and Development Journal*. No. 20: 11-42 [In Persian].

Iglimi, M. (1387). *Development Potentials of Iran's Electricity Exchanges with Neighboring Countries*. Electricity and Energy Macro Planning Office - Iran [In Persian].

Iran Electricity Industry Syndicate (2016) [In Persian].

Iran Electric Network Management Company (2006) [In Persian].

Jäger, T., Schmidt, S., & Karl, U. (2009). A system dynamics Model for the German electricity market model development and application. *Inproceeding of 27th. International Conference of the System Dynamics Society*. Albuquerque, NM: 26-30.

Kirschen, D. S., & Strbac, G. (2004). *Fundamentals of Power System Economics*. John Wiley & Sons.

Lotf Alipour, M. R., Nowrozi, R., Ashna, M. & Zabihi, M. (2008) Investigating the effect of joining the World Trade Organization on Iran's electricity exports. *Economic Modeling Quarterly*. Third year, No. 3: 177-202 [In Persian].

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.

Mahmoudi, S., Berhamandpour, H. & Heydari, K. (2014). Determining the cost price of electricity based on the proposed LCOE algorithm in accordance with different technologies and its case study in Iran. *International Electricity Conference* [In Persian].

Neary, J. P. (2007). Cross-border mergers as instruments of comparative advantage. *Rev. Econ. Stud.* 74: 1229-1257.

Manzoor, D., Farmad, M., Arianpour, V. & Shafiei, E. (2013). Evaluation of the optimal combination of power plants in the country in terms of environmental costs. *Environment*. Fourth year, No. 2: 415-430 [In Persian].

Oseni, M., & Pollitt, M. (2016). The promotion of regional integration of electricity markets: Lessonsfor developing countries. *Energy Policy*. 88: 628-638.

Oseni, M., & Pollitt, M. (2013). The economic costs of unsupplied electricity: Evidence from backup generation among African firms. *EPRG Working Paper*. 351.

Rahimi Boroujerdi, A. (2015). *Economic Convergence, Regional Preferential Trade Arrangements and Common Markets*. Organization and study and compilation of university humanities books [In Persian].

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.

Reisi, Z. (2009). The feasibility of establishing regional trade arrangements among the countries of the MENA region. Master's thesis, Faculty of Economics. University of Tehran [In Persian].

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

Ruiz Estrada, M. (2011). Policy modeling: Definition, classification and evaluation. *Journal of Policy Modeling*. *33*(4): 1015-1029.

Ruusunen, J., Ehtamo, H., & Hamalainen, R. P. (1991). Dynamic cooperative electricity exchange in a power pool. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. *21*(4): 758-766.

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.

Sadeghi, Z., Bahadurmayvan, S. & Nejati, M. (2016). Simulating the integration of the electricity market (power systems) in countries bordering Iran. *Iranian Energy Economy Quarterly*. Sixth year, No. 24: 123-149 [In Persian].

Siddiqui, M. Z., de Maere d'Aertrycke, G., & Smeers, Y. (2012). Demand response in Indian electricity market. *Energy policy*. 50 : 207-216.

Simbar, R. (2012). Regionalism and peace building in the world with emphasis on the Persian Gulf. *Human Settlement Planning Studies*. First year, No. 12: 19-34 [In Persian].

Shahmoradi, A., Haghighi, I., Zahedi, R. & Aghababai, M. E. (2008). Analysis of the impact of price policies in economic sectors (With a focus on water and energy): Computable general equilibrium approach. *The final report of the research project of the Ministry of Energy - Iran* [In Persian].

Sparrow, F. T., Engi, D., Al Salamah, M., Bowen, B. H., AL-Turki, U., & Selim, S. Z. (2001). The Economic Benefits of A Regionally Integrated Electricity Market in the Middle East (Draft). Joint Research of partners from Purdue University in Indiana.

Special statistics of Iran's electricity industry (2018) [In Persian].

Special statistics of Iran's electricity industry (2006) [In Persian].

Energy balance sheet of Iran (2016) [In Persian].)

Stoft, S. (2002). *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. IEEE Press & Wiley Interscience.

Zhai, Y. (2010**)**. Energy sector integration for low carbon development in greator Mekong sub-region: Towards a model of south-south cooperation. *World Energy Congress* 9.

http://www.centralclubs.com/230-400-t114188.html/,Accessed August 2016.

http://www.lib.utexas.edu/maps/middle_east_and_asia/kurdish_86.jpg.

https://www.iea.org

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

Quarterly Journal of The Economic Research (Sustainable Growth and Development)
Original Research Article/ Vol.24, No.1, Spring 2024, pp.163-192

Economic modeling of power pool of Iran and western neighbors using optimization approach

Mahsa Mehrabi[1]
Alimorad Sharifi[2]
Babak Saffari[3]

Received: 2023/03/01 Accepted: 2023/03/31

Introduction

Among energy carriers, electricity is a very basic factor for the global economy; To the extent that per capita electricity production and consumption indicators are used to determine the economic status of countries and their welfare level. The growth of electricity demand is affected by factors such as gross domestic product, the price of energy carriers, temperature, population growth, the development of energy-intensive industries, structural changes in the economy, and improving efficiency. Responding to the growth of demand can lead to the development of the electricity supply sector in order to meet this demand. On the one hand, governments are facing financial limitations in investing and developing electricity supply, and on the other hand, some countries are facing surplus electricity generation due to limited domestic demand in some days of the year. So, creating a power pool is necessary to meet the demand and sell the excess electricity produced (Bhattacharyya, 2019).

It should be noted that the actual progress of power pool is different among countries according to the potential of electricity production, its production cost and the price of electricity, so the examination of these observations has important consequences for the development of power pool between the countries of Iran, Türkiye and Iraq.

Electricity supply in the countries of Iran, Türkiye and Iraq is made from fossil fuel, electric and renewable power plants, and most of the sources of electricity production in the studied countries are fossil fuels. The production of electricity from electric power plants is affected by climate changes, so that in recent droughts it has caused blackouts during peak summer hours in these countries. Therefore, by connecting the power pool between these three countries, the blackout rate can be reduced. Also, examining the minimum cost of the power pool between the three countries of Iran, Türkiye and Iraq, taking into account the cost of subsidized fuel in all three countries, and comparing to the minimum cost of the electricity network of all three countries without forming power pool between them is the innovation of this paper.

Due to the lack of integrated electricity market between the countries of Iran, Türkiye and Iraq, for the economic modeling of electricity market integration,

1. Ph.D. student of Economics, University of Isfahan, Iran (Corresponding Author), Email: mahsa.mehrabi@ase.ui.ac.ir
2. Associate Professor of Economics, University of Isfahan, Iran Email: alimorad@ase.ui.ac.ir
3. Assistant Professor of Economics, University of Isfahan, Iran Email: babak.saffari@ase.ui.ac.ir

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

optimization method using past information and with the help of GAMS software, it is possible to determine how the electricity market is integrated.

Methodology

The regional electricity market is modeled based on short-term and long-term approaches. Cost minimization techniques are usually used. In the short-term approach, there will be no capacity increase in the planning horizon. The length of the short term can be chosen from a few hours to a year. By using short-term modeling, it is possible to evaluate the profitability of the developing electricity trade between the countries under study in current conditions without changes in their production capacity.

Results and Discussion

1- For the development of the international market in the country, new laws in the electricity sector and laws related to the export and import of electricity should be developed, and the criteria for granting licenses to the domestic private sector or foreign companies to establish commercial and export electricity companies in the country should be determined. This process was accelerated. 2- through joint investment with neighboring countries for constructing new transmission lines and border power plants and the joint exploitation of these power plants, due to the difference in peak times of electricity consumption in Iran and neighboring countries, electricity exchange is possible in the long term. Currently, Iran's electricity export and import program with neighboring countries is carried out in the form of annual agreements, but long-term joint investment projects are very effective in stabilizing international electricity trade programs. 3- An auction system should be established in the electricity market so that by creating databases, it is possible to get information on the latest information on the sale and export price of electricity between exporting and importing countries and electricity companies. Then, using the auction system, determined the minimum selling price for electricity export and the maximum price offered by the buyers and proceeded to sell electricity. 4- Establishing power pool between the countries of the region can lead to the formation of the international electricity market in the Middle East and its electricity exchange with Europe and North Africa. In the power pool, it is possible to buy and sell electricity on a daily basis and for shorter times during the day, and the price of electricity is different at any time. In power pool, each country can act as a wholesaler, and after meeting local and regional needs, it exchanges electricity with other wholesale electricity markets. 5- An optimal price based on LRMC method should be used as the base price in electricity marketing and bargaining in the market to determine the final price.

Conclusion

In this article, an economic energy model was presented for the countries of Iran, Türkiye and Iraq. In this study, the short-term electricity exchange network model between the countries of Iran and its western neighbors (Türkiye and Iraq) is

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

presented. This model is designed to minimize the power pool between Iran, Türkiye and Iraq.

1- The cost of fuel has an effect on the minimum short-term cost of the power pool. Using the international fuel cost for the power plants of the three countries of Iran, Türkiye, and Iraq causes an increase in the minimum cost of the power pool. 2- The effect of transmission line losses on the total production of thermal and electric hydroelectric power plants in Iran, Türkiye and Iraq causes the increase in production of thermal power plants in Iran and Iraq, but changes the production of thermal power plants in Türkiye. With the increase in the loss factor of the transmission lines between zero and one, the output of Türkiye's electric power plant increases, but the output of Iran's and Iraq's electric power plants does not change. The optimal production of thermal and electric power plants in the countries of Iran, Türkiye and Iraq and the optimal electricity export and import and the amount of unmet electricity demand of these countries have been analyzed. 3- The graphs that present the electricity production of thermal and hydroelectric power plants in 2019 in the countries of Iran, Türkiye and Iraq, compared to the optimal values of thermal and hydroelectric power plants obtained from the model show that using the power pool, the production of electricity in the thermal power plants of Iran and Iraq will decrease, and by joining this power pool, the production of Türkiye will become zero, and the amount of electricity produced by the hydroelectric power plants of all three countries in this power pool should increase. It causes cost reduction in mentioned countries because it reduces the cost of operating thermal power plants in countries, so they can supply cheaper electricity. Also, the optimal amount of electricity transmission between countries shows the export and import of electricity between countries should increase. 4- With the joining of the countries of Iran, Türkiye and Iraq to the short-term power pool, there will be no unmet electricity demand in them. 5- the capacity values of the existing transmission lines between the three countries of Iran, Türkiye and Iraq, which are presented in Table 7, and the electricity export and import between Iran and Türkiye in 2019 in Table 6, compared to the optimal values of the model in Table 17 shows that exchange of electricity should be done according to this capacity, i.e. 450 megawatts between Iran and Türkiye. Also, the electricity export from Iran to Iraq should be increased and electricity import from Iraq to Iran should be done according to the capacity of the existing electricity transmission lines between Iraq and Iran, i.e. 1200 megawatts.

According to the hypotheses of this research, which state that the power pool between the countries of Iran, Türkiye and Iraq will create benefits in the short term, and the power pool will reduce the operating costs of power plants in the studied countries in the short term, it can be seen that these hypotheses are confirmed because the results of the model show that this power pool in the short term causes no unmet electricity demand in sample countries, and also increases the export and import of electricity between the countries. As a result, within the power pool, Iran, Türkiye, and Iraq will reduce the production of thermal power

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]

plants and increase the production of hydroelectric power plants, which will reduce the cost of fuel and operating costs of power plants, and also reduce environmental pollutants. This power pool also reduces the consumption of fossil fuels used by power plants, which creates benefits for the countries studied in this research.

Keywords: Economic Modeling, Electricity Market, Power Pool, Regional Integration, Iran and Western Neighbors

JEL Classification: F18, L94, L98, Q42, Q56

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[Downloaded from ecor.modares.ac.ir on 2024-08-05]

[DOI: 10.22034/24.1.163]