

## رویکردی ترکیبی از تحلیل پوششی داده‌ها با انواع خروجی‌ها و تحلیل پنجره در ارزیابی کارایی صنعت برق

محسن شفیعی نیک‌آبادی\*، کیخسرو یاکیده\*\*، اکرم اویسی عمران\*\*\*

### چکیده

در این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی نواحی تولید و انتقال نیرو در صنعت برق ایران در طی زمان و با توجه به ماهیت سیستمی مراحل تولید و انتقال برق، دو رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تحلیل پنجره با هم ترکیب شده است. این سیستم شبکه‌ای دارای خروجی نامطلوب و مطلوب نهایی و میانی بوده و دارای دو مرحله تولید و انتقال برق در بازه زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ است. متغیرهای ورودی و خروجی مرحله اول و دوم به ترتیب مصرف داخلی نیروگاه‌ها، سوخت مصرفی و بازده حرارتی، راندمان، قدرت نامی نیروگاه و قدرت عملی نیروگاه، حداکثر بار تولیدی، تولید ویژه و تولید ناویژه، ظرفیت پست‌های انتقال نیرو و طول خطوط انتقال نیرو و در نهایت انرژی تحویلی و تلفات انرژی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به مجموعه امکان ادغام شده طی سه دوره، در سال ۱۳۹۲ از نظر کارایی کل و کارایی مرحله تولید بالاترین تعداد واحدهای کارا وجود دارد؛ در حالی که در مقایسه با مرز کارایی سه دوره‌ای، مرحله تولید برق بیشترین واحدهای ناکارا را دارد و افزایش تعداد واحدهای کارا در مرحله کارایی کل ناشی از کارایی بالای شرکت‌های برق منطقه‌ای است.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل پنجره؛ تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای؛ خروجی نامطلوب؛ تولید برق؛ انتقال برق.

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۲/۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶.

\* استادیار، دانشگاه سمنان (نویسنده مسئول).

E-mail: shafiei@semnan.ac.ir

\*\* استادیار، دانشگاه گیلان.

\*\*\* دانشجوی دکتری، دانشگاه سمنان.

## ۱. مقدمه

تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۱</sup> (DEA) رویکردی ناپارامتریک برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده<sup>۲</sup> است. در مدل‌های DEA سنتی فرایند تولید همانند یک جعبه سیاه<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شود و تمرکز بر ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند است؛ اما از آنجاکه اغلب سیستم‌های تولیدی در دنیای واقعی دارای ساختار شبکه‌ای هستند؛ بنابراین مهیا کردن ابزاری پایدار برای تحلیل بهره‌وری و کارایی زیرسیستم‌ها و کل سیستم شبکه‌ای اهمیت زیادی می‌یابد [۱].

رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها در شرایط ثابت به کار برده می‌شود؛ به این معنا که اثر تغییرات زمان را نادیده می‌گیرند. این امر می‌تواند به نظر گمراه‌کننده باشد؛ زیرا تغییر شرایط در طی زمان می‌تواند به سمت استفاده بیشتر از منابع برای تولید نتایج مطلوب گرایش داشته باشد. در DEA، مدل‌های ناپارامتریک برای سنجش کارایی در طی زمان وجود دارد که از جمله این مدل‌ها می‌توان روش تحلیل پنجره<sup>۴</sup> و شاخص مالم کوئیست<sup>۵</sup> و رویکرد تحلیل پوششی داده‌های پویا<sup>۶</sup> را نام برد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به ارائه مدل‌های DEA برای ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دومرحله‌ای پرداخته‌اند؛ اما مدلی که بتواند کارایی کل و منشأ ناکارایی سیستم‌های شبکه‌ای را تشخیص دهد، ارائه نشده است.

در این پژوهش با هدف ارزیابی منشأ کارایی و ناکارایی سیستم‌ها و زیرسیستم‌های آن‌ها در طی دوره‌های زمانی مختلف، با توجه به اهمیت تشخیص منشأ ناکارایی در ساختار شبکه‌ای صنعت برق، ارائه روشی برای ارزیابی و پایش منشأ ناکارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده در شبکه تولید و انتقال برق در طی زمان نوآوری اصلی محسوب می‌شود. ویژگی برجسته این پژوهش ترکیب تحلیل پنجره و تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای برای ارزیابی و پایش ناکارایی در صنعت برق ایران است. در این ارزیابی به‌جای مرز کارایی مرحله اول، دوم و کل سیستم در یک دوره زمانی ثابت، از مرز کارایی حاصل از مجموعه امکان ادغام‌شده حاصل از دوره‌های زمانی چندگانه موجود در تحلیل استفاده شده است؛ از سوی دیگر تفکیک ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب نهایی و میانی سیستم تولید و انتقال برق نیز نوآوری کاربردی این پژوهش محسوب می‌شود؛ بنابراین طراحی مدلی ریاضی برای سنجش ناکارایی سیستم دومرحله‌ای تولید و انتقال برق در طی دوره‌های زمانی هدف اصلی پژوهش حاضر است.

- 
1. Data Envelopment Analysis (DEA)
  2. Decision Making Units (DMUs)
  3. Black Box
  4. Window Analysis
  5. Malmquist Index
  6. Dynamic DEA

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به ارائه مدل‌های DEA برای ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دومرحله‌ای پرداخته‌اند [۱۸]. در بررسی مطالعات سیستم‌های دومرحله‌ای دو رویکرد کلی مدل‌های حاصل ضربی و پوششی دیده می‌شود. در بررسی مطالعات رویکرد اول و تحت فرض بازده به مقیاس ثابت، فیر و همکاران (۱۹۹۱، ۱۹۹۶)، مدلی را مبتنی بر رویکردی مرز کارا برای ارزیابی ۱۳۷ کارخانه لبنیات‌سازی در ایالت متحده آمریکا ارائه کردند. آن‌ها دریافتند که دقت این مدل دومرحله‌ای از مدل‌های سنتی DEA بیشتر است [۱۲، ۱۱]. لیانگ و همکاران (۲۰۰۸)، مدل متمرکز و رهبر-پیرو را با تمرکز بر مفاهیم نظریه بازی‌ها ارائه کردند. نتایج این مطالعه مدل‌هایی خطی هستند که برنامه‌ای نسبتاً منصفانه را برای تجزیه کارایی کل سیستم به کارایی زیرسیستم‌ها دربردارند [۲۰]. کائو و هوانگ (۲۰۰۸)، مدل‌های سنتی DEA را با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از روابط بین دو زیرفرایند یک فرایند کلی، اصلاح کردند. در این چارچوب کارایی کل می‌تواند به کارایی زی فرایندها تجزیه شود. این مدل رابطه‌ای<sup>۱</sup> دارای اعتبار فراوانی در اندازه‌گیری نمرات کارایی واحدها است و در نتیجه توانایی شناسایی علل ناکارایی‌ها را دارد. بر اساس ساختار این مدل، این ایده می‌تواند برای سیستم‌های چندمرحله‌ای که به‌طور متوالی به یکدیگر مرتبط هستند نیز به کار گرفته شود [۱۶]. چن و همکاران (۲۰۰۹)، مدل رابطه‌ای تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر ارائه کردند که کارایی کل از مجموع وزن‌های کارایی‌های دو مرحله به‌دست می‌آید [۵]. کوک و همکاران (۲۰۱۰)، نشان دادند که مدل‌های رابطه‌ای و مدل‌های متمرکز معادل مدل مرز کارا هستند [۹]. دو و همکاران (۲۰۱۱)، بر اساس مدل بازی چانه‌زنی<sup>۲</sup> هر مرحله را به‌عنوان یک بازیگر در نظر گرفتند و مدلی ارائه کردند که کارایی کل و کارایی هر یک از مراحل را محاسبه می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، زمانی که تنها یک متغیر میانی بین دو مرحله وجود داشته باشد، این مدل نتایجی معادل مدل‌های DEA استاندارد ارائه می‌دهد که به‌طور مجزا برای هر مرحله به‌کار گرفته می‌شود [۱۰]. ژو و همکاران (۲۰۱۳)، مدل بازی چانه‌زنی را با هدف دستیابی به تجزیه منصفانه کارایی بین مراحل با وجود ثابت ماندن کارایی کل سیستم ارائه کردند. حداقل نمرات کارایی برای دو مرحله به‌عنوان نقطه شکست استفاده می‌شود و تجزیه چانه‌زنی منحصر به فردی برای محاسبه کارایی کل نیز متعاقباً به‌دست آمده است [۲۷].

رویکرد حاصل ضربی در ساختارهای شبکه‌ای با خروجی نامطلوب میانی و به‌خصوص نهایی نیز به‌کار رفته است. سیفورد و ژو (۲۰۰۲)، نشان دادند که مدل‌های استاندارد DEA (با توجه به دو اصل خطی بودن و تحذب مدل‌های DEA) می‌توانند برای بهبود عملکرد واحدهای ناکارا با

1. Relational Model  
2. Bargaining Game Model

افزایش خروجی مطلوب و کاهش خروجی نامطلوب به‌کار روند؛ همچنین این روش در زمان نیاز به افزایش برخی از ورودی‌ها برای بهبود عملکرد نیز کاربرد دارد [۲۳]. کردرستمی و امیرتیموری (۲۰۰۵)، مدلی چندمرحله‌ای با خروجی نامطلوب نهایی را ارائه کردند که این خروجی‌های نامطلوب با علامت منفی در محاسبات وزن‌های مجازی به‌کار رفته است [۱۹]. ونگ و همکاران (۲۰۱۴)، برمبنای کار چن و همکاران (۲۰۰۹)، چارچوب DEA دومرحله‌ای جمعی با خروجی نامطلوب نهایی را ارائه کردند که برای تحلیل کارایی‌های بانک‌های تجاری چین به‌کار رفت. ارزیابی کارایی دومرحله اصلی (جمع‌آوری سپرده و کسب درآمد) با هدف شناسایی منبع ناکارایی کل سیستم بانکی صورت گرفته است. نتایج این بررسی نشان داد که مدل دومرحله‌ای در مقایسه با رویکرد سنتی DEA در دستیابی به هدف مطالعه، یعنی شناسایی منبع ناکارایی کل سیستم، موفق عمل کرده است و منبع ناکارایی سیستم بانکی چین در مرحله تولید سپرده شناسایی شد [۲۶].

در بررسی مطالعات رویکرد دوم که رویکرد پوششی است، فیر و گروسکوف (۲۰۰۰)، مجموعه امکان تولید و در نتیجه مدل‌های پوششی را برای ساختار سیستم‌های شبکه‌ای ارائه نمودند. در واقع ساختارهای عمومی مدل‌های شبکه‌ای در بسیاری از مؤسسات و شرایط مختلف قابل کاربرد هستند [۱۳]. چن و ژو (۲۰۰۴)، مدل کارایی پوششی را جهت مرز کارایی فرایندهای تولیدی دومرحله‌ای مرتبط با یکدیگر که خروجی مرحله اول به‌عنوان ورودی مرحله دوم است را ارائه کردند. مجموعه‌ای از شرکت‌های فعال در صنعت بانکداری به‌عنوان مبنای مطالعه در نظر گرفته شدند. توصیف اثر غیرمستقیم فناوری اطلاعات بر عملکرد شرکت‌ها، شناسایی مرز کارایی حاصل از ارزش افزوده مراحل سرمایه‌گذاری فناوری اطلاعات، تولید سود و در نهایت مشخص کردن برترین شرکت‌هایی که دارای عملکرد الگو در این زمینه هستند، از نتایج این مطالعه به‌شمار می‌آید [۶]. چن و یان (۲۰۱۱)، مدل DEA شبکه‌ای را برای ارزیابی کارایی عملکرد زنجیره تأمین ارائه کردند. در این مطالعه سه مدل DEA شبکه‌ای متفاوت برای سیستم‌های سازمانی دارای تمرکز، عدم‌تمرکز و ترکیبی، بررسی و ارائه شد. تحلیل کارایی به‌ترتیب، شامل بررسی ارتباط بین زنجیره تأمین و عرضه و ارتباط بین سه مکانیسم سازمانی مختلف بود؛ همچنین ائتلاف منابع درونی زنجیره تأمین نیز بررسی شد [۷]. تونه و تیسوتسویی (۲۰۰۹)، مدل DEA شبکه‌ای بر مبنای متغیرهای کمکی<sup>۱</sup> برای ارزیابی کارایی کلی و مراحل دوگانه فرایندهای دومرحله‌ای مختلف ارائه کردند. این مدل توانایی ارزیابی کارایی سیستم را به‌صورت منطقی‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد؛ زیرا در محاسبات مربوط به ارزیابی کارایی، اهمیت زیرسیستم‌ها را وارد محاسبات می‌کند [۲۴]. کوک و همکاران (۲۰۱۰)، نشان دادند که

مدل‌های رابطه‌ای و مدل‌های متمرکز معادل مدل «مرز کارا» هستند؛ همچنین مدل‌های پوششی را به‌عنوان دوگان مدل‌های حاصل‌ضربی نشان دادند؛ البته ارتباط این دو مدل چندان واضح به نظر نمی‌رسد [۱۲].

رویکرد پوششی در ساختارهای شبکه‌ای با خروجی نامطلوب میانی و به‌خصوص نهایی نیز به‌کار رفته است. فوکویاما و وبر (۲۰۱۰)، کارایی بانک‌های ژاپنی را با ساختار شبکه‌ای بر مبنای متغیرهای کمکی با خروجی نامطلوب نهایی ارزیابی و مدل حاصل‌ضربی را به‌عنوان دوگان مدل پوششی ارائه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ساختار دومرحله‌ای در مقایسه با ساختار تک‌مرحله‌ای در شناسایی منابع ناکارایی سیستم بانکی کارایی بیشتری دارد [۱۴]. لوزانو و همکاران (۲۰۱۳)، مدل DEA شبکه‌ای بر مبنای تابع فاصله‌ای با خروجی‌های مطلوب و نامطلوب نهایی ارائه کرد. این مدل برای مدل‌سازی و الگوبرداری عملکرد فرودگاه‌های اسپانیا در سال ۲۰۰۸ به‌کار رفت و نتایج آن با فرایند یک‌مرحله‌ای تابع فاصله‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد که تابع فاصله‌ای شبکه‌ای نسبت به همتای تک‌مرحله‌ای خود ناکارایی‌ها را بیشتر آشکار کرده و نتایج معتبرتری ارائه می‌کند [۲۱]. چن و همکاران (۲۰۱۲)، مدل چندفعالیتی مبتنی بر ساختار شبکه‌ای برای ارزیابی تأسیسات کوره‌ای در تایوان ارائه کردند. کارایی‌های مربوط به مراحل تصفیه ضایعات و تولید برق به‌عنوان یک ساختار یکپارچه ارزیابی شدند [۸]. مقبولی و همکاران (۲۰۱۴)، مدلی متمرکز را در دو حالت و با خروجی نامطلوب میانی و نهایی بررسی کردند [۲۲].

همان‌طور که ملاحظه شد رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای در شرایط ثابت به‌کار برده می‌شود؛ به این معنا که اثر تغییرات زمان را نادیده می‌گیرند. این امر می‌تواند به نظر گمراه‌کننده باشد؛ زیرا تغییر شرایط در طی زمان می‌تواند به سمت استفاده بیشتر از منابع برای تولید نتایج مطلوب گرایش داشته باشد. در DEA سنتی مدل‌های ناپارامتریک برای سنجش کارایی در طی زمان وجود دارد که از جمله این مدل‌ها می‌توان روش تحلیل پنجره<sup>۱</sup>، شاخص مالم کوئیست<sup>۲</sup> و رویکرد تحلیل پوششی داده‌های پویا<sup>۳</sup> را نام برد؛ اما در زمینه ارزیابی کارایی سیستم‌های فرایندی در طی زمان مطالعات اندکی صورت گرفته و مدل‌های شبکه‌ای پویا در قالب فرمولاسیون مختلف ارائه شده است که برای نمونه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

تونه و تیسوتسویی (۲۰۱۴)، مدل DEA پویا مبتنی بر ساختار شبکه‌ای در هر دوره زمانی و بر اساس رویکرد مبتنی بر سنجش‌های کمکی (SBM) ارائه کردند. در این بررسی مدل شبکه‌ای مبتنی بر سنجش‌های کمکی و مدل‌های مبتنی بر سنجش‌های کمکی پویا با یکدیگر ترکیب شدند.

---

1. Window Analysis  
2. Malmquist Index  
3. Dynamic DEA

بخش‌های مختلف از طریق ارتباط ساختار شبکه‌ای در هر دوره و از نظر افق زمانی، مفهوم انتقال فعالیت‌ها بین دو دوره متوالی را با ساختار شبکه‌ای ترکیب کرده است. این مدل توانایی ارزیابی کارایی کل در تمام دوره‌های تحت‌مشاهده، تغییر پویای کارایی هر دوره و تغییر پویای کارایی هر بخش را دارد؛ همچنین تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر و ورودی-خروجی گرا و بدون گرایش قابلیت کاربرد دارد [۲۵]. اوکران (۲۰۱۵)، مدل DEA شبکه‌ای پویا با تأکید بر تحلیل استواری<sup>۱</sup> را برای ارزیابی کارایی بانک‌های تجاری به کار گرفت. زمانی که ابعاد شبکه‌ای و پویایی با هم به کار می‌روند، تحلیل کامل‌تری از کارایی روابط بین دوره‌ها و بخش‌ها در دوره زمانی ۲۰۰۸-۲۰۱۰ به دست می‌دهد. مدل DEA شبکه‌ای پویای مبتنی بر سنج‌های کمکی بدون گرایش، بازده به مقیاس متغیر و موزون در چارچوبی از رویکرد میانجی‌گرانه به ارزیابی رفتار بانک به کار رفته است. این مدل دارای خروجی نامطلوب میانی و نهایی است که از یک دوره به دوره دیگر منتقل می‌شود. با استفاده از تحلیل استواری، برنامه واضحی برای بحث درباره تفاوت بین نمرات کارایی، ابعاد مدل عملکرد، ثبات تخمین‌های روش، حساسیت نتایج به وزن‌های بخش‌ها دارد و با مفروضات بازده به مقیاس ثابت ارائه شده است [۳].

رستروپو و همکاران (۲۰۱۶)، عملیاتی دارای چند چشم‌انداز، سیستم و فرایند را در نظر گرفتند و نشان دادند که چگونه رویکرد اندازه‌گیری عملکرد شبکه‌ای پویا برای اندازه‌گیری عملکرد سیستمی از سیستم‌ها کاربرد مفیدی دارد. در این مطالعه دو چشم‌انداز مختلف از طریق خروجی‌های میانی و انتقال بین وره‌ای به‌وسیله فرایندهای هر یک از چشم‌اندازها به یکدیگر متصل شدند. درواقع رویکرد DEA شبکه‌ای پویای مبتنی بر سنج‌های کمکی را با مهندسی ترافیک و نظریه اجتماعی و رفتاری عمل حفاظتی ترکیب می‌کند [۱۵].

در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سیستم‌های شبکه‌ای در طی زمان، ترکیب تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با تحلیل پنجره مدنظر قرار گرفت؛ از طرفی صنعت برق ایران، دربردارنده سه مرحله تولید، انتقال و توزیع نیروی برق است و ماهیتی چندمرحله‌ای دارد؛ بنابراین در این پژوهش از مدل‌های شبکه‌ای تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای برای سنجش کارایی کلی و کارایی فرایندهای نواحی تولید و انتقال نیرو در صنعت برق ایران استفاده شده است.

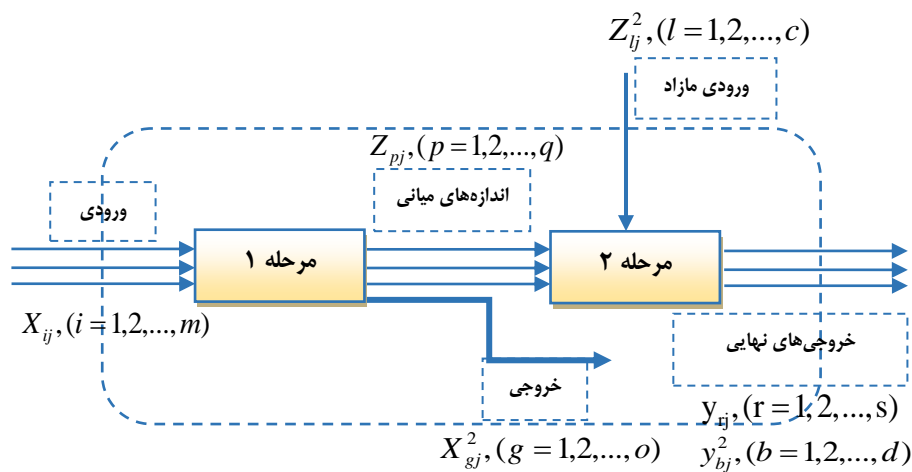
با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، طراحی مدلی دومرحله‌ای با هدف ارزیابی کارایی دو مرحله تولید و انتقال برق یکی از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر است. مدل پیشنهادی بر اساس مطالعات صورت‌گرفته و با توجه به تفاوت‌های اساسی مورد مطالعه در صنعت برق ایران ارائه شده است.

### ۳. روش شناسی پژوهش

تعیین شاخص‌های ارزیابی. در این پژوهش بر اساس مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای خلیلی و شه‌میر (۲۰۱۵)، مدلی ارائه می‌شود که در آن متغیرهای مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته خواهد شد. در این مدل متغیر خروجی نامطلوب نهایی به‌عنوان متغیر ورودی در مدل در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

هر واحد تصمیم‌گیرنده  $DMU_j, (j=1,2,\dots,n)$  دارای  $m$  متغیر ورودی  $X_{ij}, (i=1,2,\dots,m)$  در مرحله ۱ هستند که  $q$  خروجی را تولید می‌کنند. بخشی از این خروجی‌ها به‌عنوان ورودی مرحله دوم  $Z_{pj}, (p=1,2,\dots,q)$  برخی وارد مرحله دوم فرایند واحدها نمی‌شوند که با نماد  $X_{gj}^2, (g=1,2,\dots,o)$  نشان داده می‌شود. مرحله دوم علاوه بر متغیرهای دریافتی از مرحله اول دارای متغیرهای ورودی دیگری نیز است که از مرحله قبل تولید نشده و به‌صورت  $Z_{lj}^2, (l=1,2,\dots,c)$  نمایش داده می‌شود. خروجی نهایی سیستم شامل دو نوع متغیر خروجی مطلوب و نامطلوب  $y_{bj}^2, (b=1,2,\dots,d)$  و  $y_{rj}^2, (r=1,2,\dots,s)$  است.

مفروضات اصلی مدل نیز به این صورت است که  $e_j^1, e_j^2, e_j^3$  به‌ترتیب از چپ به راست، به‌عنوان نمرات کارایی کل، نمرات کارایی مرحله اول و نمرات کارایی مرحله دوم در نظر گرفته می‌شود. فرایند دومرحله‌ای با متغیر ورودی اضافی در مرحله دوم، خروجی نامطلوب نهایی و متغیر خروجی مطلوب مازاد بر ورودی‌های مرحله دوم در پایان مرحله اول در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل دومرحله‌ای با خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میانی و نهایی

**تحلیل پنجره DEA.** روش تحلیل پنجره با امکان پذیر ساختن ترکیب مشاهدات در سری‌های زمانی و مقطعی تا حدودی مشکل ناکافی بودن مشاهدات را در ارزیابی‌های زمانی برطرف می‌کند. در این روش با هر واحد در یک دوره متفاوت، همانند یک واحد مستقل رفتار می‌شود. در این صورت، عملکرد یک واحد در یک دوره خاص در مقابل عملکرد خود آن واحد در سایر دوره‌ها، علاوه بر عملکرد سایر واحدها ارزیابی می‌شود. این وضعیت تعداد دوره‌های مورد بررسی در تحلیل را افزایش می‌دهد که در هنگام مطالعه نمونه‌هایی در اندازه کوچک مفید است. از آنجاکه تمامی واحدها در یک پنجره نسبت به همدیگر اندازه‌گیری می‌شوند، این روش به‌طور ضمنی فرض می‌کند که هیچ تغییر تکنیکی در هر هیچ یک از پنجره‌ها وجود ندارد. با کاهش عرض پنجره این مشکل کاهش می‌یابد و جهت اعتباربخشیدن به تحلیل پنجره، عرض پنجره باید طوری انتخاب شود که چشم‌پوشی از تغییرات تکنیکی منطقی باشد [۲].

**تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای بر اساس تحلیل پنجره DEA.** در رابطه با ارزیابی عملکرد سیستم‌های دنیای واقعی که از زیرسیستم‌های متوالی، موازی یا ترکیبی تشکیل شده‌اند، مطالعات بسیاری صورت گرفته است؛ اما در رابطه با ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها در طی زمان مطالعات اندکی صورت گرفته است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد این‌گونه سیستم‌ها در طی زمان و با توجه به ویژگی‌های تحلیل پنجره DEA، به دنبال استفاده از ویژگی مجموعه امکان ادغام شده این مدل بوده و تحلیل پنجره DEA را با تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای ادغام نموده است؛ بنابراین بر اساس مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای خلیلی و شه‌میر (۲۰۱۵) و ویژگی مجموعه امکان ادغام شده تحلیل پنجره، مدلی ارائه می‌شود که در آن متغیرهای مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته خواهد شد. در این مدل متغیر خروجی نامطلوب نهایی به‌عنوان متغیر ورودی در مدل در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

با تعریف کارایی به‌صورت نسبت مجموع موزون خروجی‌ها بر مجموع موزون ورودی‌ها، تحت فرض بازده به مقیاس ثابت می‌توان مدل کسری سنجش کارایی کل سیستم را به‌صورت مدل ۱، نوشت.

در این مدل، تابع هدف نشان‌دهنده کارایی کل سیستم است. محدودیت‌ها نیز به‌ترتیب نمایانگر کارایی مراحل اول و دوم هستند.



$$e_0 = \text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{r0} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{g0}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{i0} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{l0}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2}$$

$$s.t : \frac{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{gj}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{ij}} \leq 1 \quad \text{مدل (۱)}$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{rj}}{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{lj}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2} \leq 1$$

$$v'_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p \geq 0, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g \geq 0, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l \geq 0, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b \geq 0, b = 1, 2, \dots, d$$

در مدل ۱، ارزش  $e_0$  نشان دهنده کارایی کل واحدهای تصمیم گیرنده تحت ارزیابی با خروجی نامطلوب نهایی است. مدل ۱، نمایانگر مدلی غیرخطی است که می توان آن را به مدل خطی تبدیل کرد. بر اساس مطالعه بیسچاپ (۲۰۱۲) و با روش تغییر متغیر می توان به صورت زیر مدل ۱ را به مدل خطی ۲ تبدیل کرد [۴]:

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{i0} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{l0}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2}$$

$$v'_i t = v_i, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p t = h_p, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g t = n_g, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r t = u_r, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l t = k_l, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b t = w_b, b = 1, 2, \dots, d$$

رابطه (۱)

با استفاده از رابطه ۱، مدل ارزیابی کارایی کل سیستم خطی می‌شود و مدل ۲، به دست می‌آید. در این مدل اندیس  $t$  به تمام ضرایب و متغیرهای سنجش کارایی اضافه شده است. این اندیس نشان‌دهنده تعداد دوره‌های زمانی موجود در تحلیل است. تحلیل پنجره با فرض عدم وجود انتقال بین مرزهای کارایی در دوره‌های تحت‌ارزیابی، کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده در دوره‌های موردنظر را در یک مجموعه واحد محاسبه می‌کند. در این حالت تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده به تعداد  $(n \times t)$  افزایش می‌یابد؛ بنابراین با فرض عدم وجود انتقال مرز، با افزودن اندیس زمان، تابع هدف نشان‌دهنده مجموع موزون خروجی‌های مطلوب سیستم در دوره‌های زمانی موجود در تحلیل خواهد بود.

$$e_0 = \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r y_{rt0} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gt0}^2$$

$$\text{s.t.} : \sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gtj}^2 - \sum_{i=1}^m v_{it} x_{itj} \leq 0$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rtj} - \sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} - \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{ltj}^2 - \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{btj}^2 \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^m v_{it} x_{it0} + \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{lt0}^2 + \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{bt0}^2 = 1$$

$$v_{it} \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$h_{pt} \geq 0, (p = 1, 2, \dots, q), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$u_r \geq 0, (r = 1, 2, \dots, s), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$n_{gt} \geq 0, (g = 1, 2, \dots, o), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$k_{lt} \geq 0, (l = 1, 2, \dots, c), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$w_{bt} \geq 0, (b = 1, 2, \dots, d), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

مدل (۲)

همانند مدل ۱، کارایی مرحله اول سیستم را به صورت مدل کسری و در قالب مدل ۳، می‌توان نوشت.

$$e^{1+} = \text{Max} \frac{\sum_{p=1}^q h'_p z_{p0} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{g0}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{i0}}$$

$$s.t : \quad \sum_{r=1}^s u'_r y_{r0} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{g0}^2 = e_0^*$$

$$\frac{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{g0}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{ij}} \leq 1$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{rj}}{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{lj}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{bj}^2} \leq 1$$

$$v'_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p \geq 0, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g \geq 0, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l \geq 0, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b \geq 0, b = 1, 2, \dots, d$$

مدل (۳)

حداکثر ارزش قابل دسترسی برای  $e_j^1$  همان  $e_0^{1+}$  است که همان ارزش بهینه تابع هدف مدل ۳ است. این مدل یک مدل برنامه ریزی کسری است و حل آن از طریق یک راه حل بهینه سراسری دشوار است؛ بنابراین همانند مدل دستیابی به کارایی کلی، مدل خطی نظیر آن با روش تغییر متغیر و در قالب مدل ۴، نوشته می شود:

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{i0}}$$

$$v'_i = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p = 0, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g = 0, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r = 0, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l = 0, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b = 0, b = 1, 2, \dots, d$$

$$t > 0$$

رابطه (۲)

مدل ۴، کارایی مرحله اول سیستم را در مجموعه امکان ادغام شده تحلیل پنجره محاسبه می‌کند. تابع هدف نشان‌دهنده مجموع موزون خروجی‌های مرحله اول سیستم است. محدودیت اول نیز به ترتیب مجموع موزون خروجی‌های سیستم را برابر کارایی کل سیستم قرار می‌دهد. محدودیت دوم و سوم نیز کارایی مراحل اول و دوم را کمتر یا مساوی یک قرار می‌دهند.

$$e_0^{1+} = \text{Max} \sum_{p=1}^q h_{pt} z_{pt0} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gt0}^2$$

$$\text{s.t.} : \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \sum_{g=1}^o n_g x_{g0}^2 = e_0^*$$

$$\sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gtj}^2 - \sum_{i=1}^m v_{it} x_{itj} \leq 0$$

$$\sum_{r=1}^s u_{rt} y_{rtj} - \sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} - \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{ltj}^2 - \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{btj}^2 \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^m v_{it} x_{it0} = 1$$

$$v_{it} \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$h_{pt} \geq 0, (p = 1, 2, \dots, q), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$u_{rt} \geq 0, (r = 1, 2, \dots, s), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$n_{gt} \geq 0, (g = 1, 2, \dots, o), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$k_{lt} \geq 0, (l = 1, 2, \dots, c), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$w_{bt} \geq 0, (b = 1, 2, \dots, d), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

مدل (۴)

با توجه به تعریف کارایی، مدل ۵، نیز نشان‌دهنده کارایی کسری مرحله دوم است. در این مدل علاوه بر محدودیت‌های کارایی مراحل اول و دوم، محدودیتی در مدل وجود دارد که کارایی کل سیستم را کوچک‌تر یا مساوی کارایی کل قرار می‌دهد.

$$e^{2+} = \text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{r0}}{\sum_{p=1}^q h'_p z_{p0} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{l0}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2}$$

$$\text{s.t.} : \frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{r0} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{g0}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{i0} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{l0}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2} \leq e_0^*$$

$$\frac{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{g=1}^o n'_g x_{gj}^2}{\sum_{i=1}^m v'_i x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{مدل (۵)}$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s u'_r y_{rj}}{\sum_{p=1}^q h'_p z_{pj} + \sum_{l=1}^c k'_l z_{lj}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{bj}^2} \leq 1$$

$$v'_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p \geq 0, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g \geq 0, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l \geq 0, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b \geq 0, b = 1, 2, \dots, d$$

$$t \succ 0$$

حداکثر ارزش قابل‌دسترسی برای  $e_j^2$  همان  $e_0^{2+}$  است که همان ارزش بهینه تابع هدف مدل ۵، است. مدل ۵، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی کسری است و حل آن از طریق یک راه‌حل بهینه سراسری دشوار است؛ بنابراین همانند مدل دستیابی به کارایی کلی، مدل خطی نظیر آن با روش تغییر متغیر و در قالب مدل ۶، نوشته می‌شود:

$$t = \frac{1}{\sum_{p=1}^q h'_p z_{p0} + \sum_{l=1}^c k_l z_{l0}^2 + \sum_{b=1}^d w'_b y_{b0}^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$v'_i = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h'_p = 0, p = 1, 2, \dots, q$$

$$n'_g = 0, g = 1, 2, \dots, o$$

$$u'_r = 0, r = 1, 2, \dots, s$$

$$k'_l = 0, l = 1, 2, \dots, c$$

$$w'_b = 0, b = 1, 2, \dots, d$$

$$t > 0$$

بنابراین همانند مدل‌های ۲ و ۴، مدل ۶ با اندیس  $t$  نوشته می‌شود.

$$e^{2+} = \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$$

$$\text{s.t:} \quad \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gt0}^2 - e_0^* \left( \sum_{i=1}^m v_{it} x_{it0} + \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{lt0}^2 + \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{bt0}^2 \right) \leq 0 \quad \text{مدل (۶)}$$

$$\sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} + \sum_{g=1}^o n_{gt} x_{gtj}^2 - \sum_{i=1}^m v_{it} x_{itj} \leq 0$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rtj} - \sum_{p=1}^q h_{pt} z_{ptj} - \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{ltj}^2 - \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{btj}^2 \leq 0$$

$$\sum_{p=1}^q h_{pt} z_{pt0} + \sum_{l=1}^c k_{lt} z_{lt0}^2 + \sum_{b=1}^d w_{bt} y_{bt0}^2 = 1$$

$$v_{it} \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$h_{pt} \geq 0, (p = 1, 2, \dots, q), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$u_{rt} \geq 0, (r = 1, 2, \dots, s), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$n_{gt} \geq 0, (g = 1, 2, \dots, o), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$k_{lt} \geq 0, (l = 1, 2, \dots, c), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$w_{bt} \geq 0, (b = 1, 2, \dots, d), (t = 1, 2, \dots, T)$$

$$J = 1, 2, \dots, n$$

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است؛ زیرا نتایج این مطالعه می‌تواند در نیروگاه‌ها و شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران، شرکت مادر تخصصی توانیر و وزارت نیرو مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

در این پژوهش نواحی تولید و انتقال برق در صنعت برق ایران به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته شد. نواحی انتقال برق در سطح کشور شامل ۱۶ منطقه تولید و انتقال برق است. جامعه آماری دربردارنده ۱۶ ناحیه تولید و انتقال، شامل نیروگاه‌ها و شرکت‌های برق منطقه‌ای (DMU) است که عبارت‌اند از: نواحی آذربایجان، اصفهان، باختر، تهران، خراسان، خوزستان، زنجان، سمنان، سیستان و بلوچستان، غرب، فارس، کرمان، گیلان، مازندران، هرمزگان و یزد.

تولید برق در نیروگاه‌ها صورت می‌گیرد. نیروگاه، مجموعه‌ای از تأسیسات صنعتی است که برای تولید انرژی الکتریکی از آن استفاده می‌شود. نیروگاه‌ها بسته به نوع فناوری به‌کاررفته در آن‌ها و منابع انرژی در دسترس متفاوت هستند [۲۱]. وظیفه اصلی یک نیروگاه، تبدیل انرژی از دیگر شکل‌های آن مانند انرژی شیمیایی، هسته‌ای، پتانسیل گرانشی و غیره به انرژی الکتریکی است. وظیفه اصلی تقریباً در همه نیروگاه‌ها بر عهده مولد یا ژنراتور است. ژنراتور ماشین دوار است که انرژی جسم سیال را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. انرژی مورد نیاز برای چرخاندن یک ژنراتور از راه‌های مختلفی تأمین می‌شود و غالباً به‌منظور ایجاد بیشترین بازدهی و حداقل کردن هزینه‌ها و همچنین میزان دسترسی به منابع مختلف انرژی در آن منطقه و دانش فنی گروه سازنده بستگی دارد [۱].

فرایند جابه‌جایی توان الکتریکی را انتقال انرژی الکتریکی می‌گویند. این فرایند معمولاً شامل انتقال انرژی الکتریکی از مولد یا تولیدکننده به پست‌های توزیع نزدیک شهرها یا مراکز تجمع صنایع است و پس از آن، یعنی تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌ها، در محدوده توزیع انرژی الکتریکی است [۴]. انتقال انرژی الکتریکی این امکان را فراهم می‌سازد تا به‌سادگی و بدون پذیرفتن هزینه حمل سوخت‌ها و همچنین جدای از آلودگی تولیدشده از سوختن سوخت‌ها در نیروگاه، از انرژی الکتریکی بهره‌گیری شود؛ حال آنکه در بسیاری موارد انتقال منابع انرژی مانند باد یا آب سدها غیرممکن است و تنها راه ممکن انتقال انرژی الکتریکی است [۲].

انرژی الکتریکی تولیدشده در نیروگاه‌ها توسط تأسیسات انتقال شامل پست‌ها و خطوط انتقال و فوق‌توزیع، به ورودی‌های شبکه توزیع تحویل می‌گردد تا از طریق شبکه توزیع به مصرف‌کنندگان نهایی برسد. ولتاژ خطوط انتقال نیرو در کشور در سطوح ۴۰۰، ۲۳۰ و خطوط فوق‌توزیع در سطوح ۱۳۲، ۶۶ و ۶۳ کیلوولت است. خطوط و پست‌های انتقال و فوق‌توزیع

پاسخگوی نیاز مصرف مشترکین برق، افزایش پایداری و قابلیت اطمینان سیستم و اتصال و مبادله انرژی با کشورهای همسایه است.

**متغیرهای ورودی و خروجی پژوهش.** برای ارزیابی کارایی به متغیرهایی نیاز است که بتوانند نتیجه درستی از عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده را ارائه دهند. انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در ارزیابی کارایی نیروگاه‌ها و شرکت‌های برق منطقه‌ای به روش تحلیل پوششی داده‌ها است؛ به عبارت دیگر عدم‌انتخاب صحیح متغیرهای موردنیاز، نتایج ارزیابی شرکت‌های برق منطقه‌ای را بی‌اعتبار می‌سازد.

در این پژوهش با استفاده از مطالعات پیشین، امکان دسترسی به داده‌ها و نظرهای متخصصان و کارشناسان ارشد صنعت برق، متغیرهای ورودی و خروجی انتخاب شده که به‌طور خلاصه در قالب جدول ۱، بیان شده است.

جدول ۱. متغیرهای ورودی و خروجی مراحل تولید و انتقال برق

متغیرها	تعریف
مصارف داخلی نیروگاه‌ها	مقدار انرژی الکتریکی که توسط تجهیزات کمکی و جنبی یک واحد برای راهبری آن، چه در حالت کار و چه در حالت توقف، لازم است و برحسب کیلووات ساعت و در طول یک دوره مشخص محاسبه می‌شود.
سوخت مصرفی	میزان سوخت مصرفی نیروگاه
طول خطوط انتقال ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولتی	مجموع فاصله دکل‌های خط بین دو نقطه مبدأ خط و مقصد آن یا اولین پست بعد از پست مبدأ به کیلومتر است؛ به عبارت دیگر طول مسیر یک مدار یا خط الکتریکی (متر یا کیلومتر)، اعم از هوایی یا زیرزمینی عبارت است از: طول تصویر واقعی آن.
ظرفیت پست‌های انتقال ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولتی	ظرفیت نامی یک ایستگاه برق بر اساس مجموع قدرت ظاهری ترانسفورماتورهای نصب‌شده در آن بر حسب مگاوات آمپر و یا بر اساس ظرفیت حرارتی ترانسفورماتورها برحسب کیلوآمپر است.
ظرفیت نامی نیروگاه‌ها	قدرت نامی یک دستگاه توربین یا دستگاه تولیدی نیروی محرکه از طرف سازنده بر روی پلاک مشخصات آن برای شرایط معینی برحسب اسب بخار یا مگاوات نوشته شده است. در ماشین‌های کوچک قدرت نامی بر حسب کیلووات مشخص می‌شود.
ظرفیت عملی نیروگاه‌ها	بیشترین توان قابل تولید مولد در محل نصب با در نظر گرفتن شرایط محیطی (ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط و رطوبت نسبی) است.
حداکثر بار تولیدی در پیک همزمان	حداکثر بار همزمان از مجموع بار حداکثر شبکه به هم پیوسته و بار مناطق مجزا به مگاوات، به‌طور همزمان به دست می‌آید. با توجه به اختلاف ساعت پیک در مناطق مختلف وابسته به یک سیستم سراسری به هم پیوسته، حداکثر بار

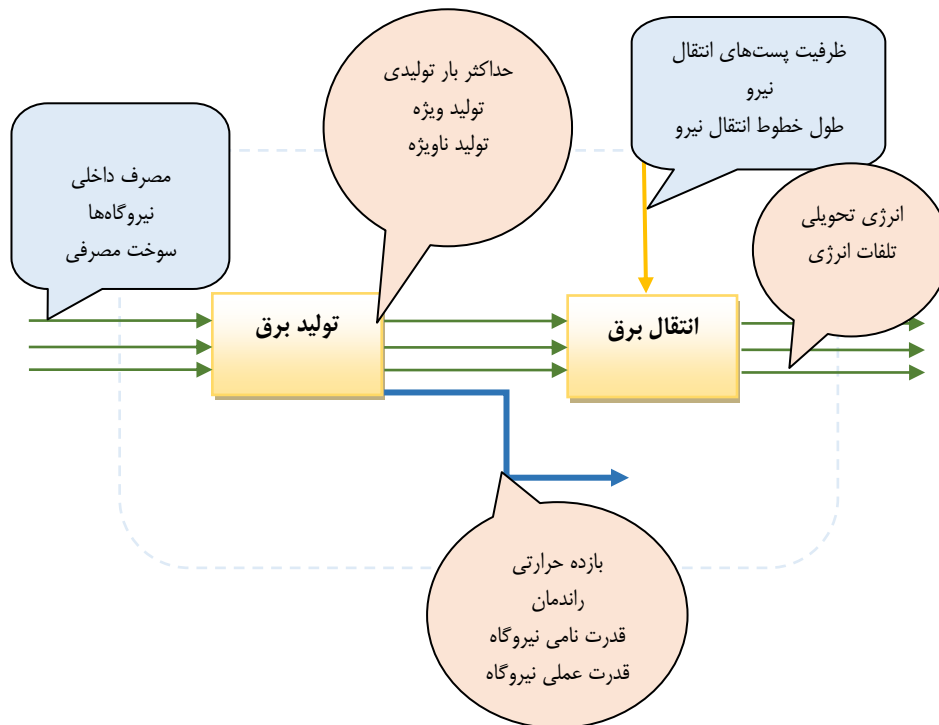
متغیرهای ورودی

متغیرهای خروجی



همزمان کمتر از جمع بار حداکثر مناطق است.	
تولید ناویژه نیروگاهها	جمع انرژی تولیدی مولدهای برق یک نیروگاه که در طی یک دوره زمانی معین (برای مثال، یک سال) روی پایانه خروجی مولدها برحسب کیلووات ساعت یا مگاوات ساعت اندازه گیری می شود.
تولید ویژه	تولید انرژی ویژه، عبارت است از: تولید انرژی برق ناویژه منهای مصرف داخلی نیروگاهها در یک دوره معین و برحسب کیلووات ساعت یا مگاوات ساعت محاسبه می شود.
راندمان	از طریق فرمول به دست می آید که همان نسبت خروجی به ورودیها است.
بازده حرارتی	مقدار انرژی که از سوختن یک واحد سوخت به دست می آید و برحسب کیلوکالری سنجیده می شود.

با استفاده از مدل پیشنهادی پژوهش (شکل ۱) و متغیرهای انتخاب شده، مدل مفهومی پژوهش در قالب شکل ۲، ارائه شده است.



شکل ۲. متغیرهای ورودی و خروجی شبکه‌ای تولید و انتقال نیروی برق ایران

بررسی وضعیت مرزهای کارا بین دوره‌های تحت‌ارزیابی. تحلیل پنجره به‌طور ضمنی فرض می‌کند که تغییر جدی در مرزهای کارای دوره‌های موجود در عرض پنجره وجود ندارد؛ به عبارتی هنگام انتخاب عرض پنجره این فرض اساسی باید رعایت شود. با رعایت این فرض اساسی نمرات کارایی در تحلیل پنجره دربردارنده تغییرات بهره‌وری واحدها و تغییرات جزئی مرزهای کارا در بین دوره‌های موجود در تحلیل هستند. تغییر بهره‌وری یک واحد در بین دو تحلیل متوالی در تحلیل پنجره فقط ناشی از تغییر در عملکرد خود واحد نیست [۲]؛ بلکه انتقال در مرزهای کارا را نیز اندازه‌گیری می‌کند.

در این پژوهش به دلیل رعایت ظرافت‌های آماری، آزمون ویل کاکسون<sup>۱</sup> و فریدمن<sup>۲</sup> با اندازه‌های تکراری به‌عنوان جایگزین این دو آزمون مستقل معرفی می‌شوند. آزمون ویل کاکسون به‌منظور تعیین وضعیت انتقال مرزها در بین دو دوره زمانی و آزمون فریدمن در بین بیش از دو دوره با هدف تعیین تعداد دوره‌ها در تحلیل پنجره به‌کار می‌رود [۳، ۵].

ابتدا نمرات کارایی واحدها در هر یک از دوره‌ها به‌طور مستقل محاسبه شد. واحدهای بهبودیافته در هر دوره به‌دست آمد و درنهایت نمرات کارایی مجموعه واحدهای کارا و بهبودیافته در یک مجموعه مجدداً محاسبه و با به‌کارگیری آزمون‌های فریدمن و ویل کاکسون در سطح معناداری ۱ درصد انجام شد که نتایج آن به‌صورت خلاصه در جدول ۲، آمده است.

جدول ۲. خلاصه‌ای از آزمون‌های آماری

دوره‌ها	نوع آزمون	آماره آزمون	مقدار بحرانی	تصمیم نهایی
۱۳۹۲-۱۳۹۱	ویل کاکسون	-۱/۲۶۹	$\pm ۱/۶۴۵$	پذیرش فرض صفر
۱۳۹۳-۱۳۹۲-۱۳۹۱	فریدمن	۰/۳۲۶	۵/۹۹۱۴۷	پذیرش فرض صفر

با توجه به نتایج در بین سه دوره موردنظر تغییر مرز کارا رخ نداده است و تحلیل پنجره در سه دوره زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ انجام می‌گیرد.

محاسبه نمرات کارایی. در مرحله اول کارایی ۳۵ نیروگاه در قالب ۱۶ ناحیه با استفاده از مدل ۲ ارزیابی شد. متغیرهای ورودی و خروجی نیروگاه‌ها در ۱۶ ناحیه به‌صورت مجموع اندازه متغیرهای ورودی و خروجی در قالب ۱۶ ناحیه در نظر گرفته شده است. نمرات کارایی مرحله دوم، یعنی انتقال صنعت برق در قالب ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای، با استفاده از مدل ۳، ارزیابی

1. Wilcoxon Test  
2. Freidman Test

شد؛ درنهایت کارایی کل مرحله تولید و انتقال صنعت برق با استفاده از مدل ۱، مورد ارزیابی قرار گرفت. نمرات کارایی مرحله اول، مرحله دوم و کارایی کل در جدول ۳، آمده است.

جدول ۳. مقادیر کارایی نیروگاه‌های تولید برق و شرکت‌های برق منطقه‌ای

کارایی کل	کارایی مرحله تولید	کارایی مرحله انتقال برق	
<b>سال ۱۳۹۳</b>			
۰/۷۵۸	۰/۳۲۶	۰/۸۵۶	ناحیه آذربایجان
۰/۸۳۱	۰/۳۵۱	۰/۸۷۴	ناحیه اصفهان
۰/۸۵۷	۰/۲۵۱	۰/۸۵۲	ناحیه باختر
۱/۰۰۰	۰/۳۵۸	۱/۰۰۰	ناحیه تهران
۱/۰۰۰	۰/۴۵۹	۱/۰۰۰	ناحیه خراسان
۰/۹۶۵	۰/۲۶۲	۰/۹۶۵	ناحیه خوزستان
۰/۸۱۱	۰/۳۲۲	۰/۹۰۰	ناحیه زنجان
۱/۰۰۰	۰/۳۳۱	۱/۰۰۰	ناحیه سمنان
۰/۶۱۹	۰/۳۱۸	۰/۶۹۲	ناحیه سیستان
۰/۷۰۵	۰/۳۰۱	۰/۷۱۰	ناحیه غرب
۰/۷۸۷	۰/۵۲۱	۱/۰۰۰	ناحیه فارس
۰/۷۴۹	۰/۳۱۱	۰/۷۴۹	ناحیه کرمان
۱/۰۰۰	۰/۳۱۴	۱/۰۰۰	ناحیه گیلان
۰/۷۴۷	۰/۳۰۱	۰/۷۴۷	ناحیه مازندران
۰/۶۴۳	۰/۳۱۵	۰/۶۴۳	ناحیه هرمزگان
۱/۰۰۰	۰/۲۰۳	۱/۰۰۰	ناحیه یزد
<b>سال ۱۳۹۲</b>			
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۲۷	ناحیه آذربایجان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	ناحیه اصفهان
۰/۶۹۷	۰/۶۵۹	۰/۶۹۷	ناحیه باختر
۰/۹۵۱	۰/۵۳۹	۰/۹۵۱	ناحیه تهران
۰/۹۷۵	۰/۵۵۷	۰/۹۹۹	ناحیه خراسان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	ناحیه خوزستان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۰۸	ناحیه زنجان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۶۱	ناحیه سمنان
۰/۵۸۰	۱/۰۰۰	۰/۵۸۹	ناحیه سیستان
۰/۷۰۴	۰/۴۵۸	۰/۸۴۳	ناحیه غرب
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۰۸	ناحیه فارس

۰/۷۲۳	۰/۹۳۴	۰/۷۳۸	ناحیه کرمان
۰/۸۸۹	۰/۶۳۱	۰/۸۸۹	ناحیه گیلان
۰/۷۴۰	۰/۶۲۳	۰/۷۴۰	ناحیه مازندران
۰/۵۹۵	۰/۵۰۵	۰/۹۶۸	ناحیه هرمزگان
۰/۸۳۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	ناحیه یزد
<b>سال ۱۳۹۱</b>			
۰/۸۵۵	۰/۷۲۰	۱/۰۰۰	ناحیه آذربایجان
۱/۰۰۰	۰/۶۳۶	۱/۰۰۰	ناحیه اصفهان
۱/۰۰۰	۰/۳۹۰	۰/۷۹۱	ناحیه باختر
۱/۰۰۰	۰/۴۸۲	۰/۹۴۹	ناحیه تهران
۱/۰۰۰	۰/۴۵۶	۱/۰۰۰	ناحیه خراسان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	ناحیه خوزستان
۱/۰۰۰	۰/۹۸۵	۰/۸۸۴	ناحیه زنجان
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	ناحیه سمنان
۰/۷۰۹	۰/۴۷۱	۰/۶۲۶	ناحیه سیستان
۰/۹۰۵	۰/۴۳۷	۰/۷۵۹	ناحیه غرب
۰/۸۸۱	۰/۵۲۷	۰/۸۲۳	ناحیه فارس
۰/۹۵۰	۰/۵۷۶	۰/۸۰۷	ناحیه کرمان
۱/۰۰۰	۰/۴۵۹	۰/۹۸۶	ناحیه گیلان
۰/۸۸۲	۰/۵۱۰	۰/۸۴۹	ناحیه مازندران
۰/۸۲۵	۰/۴۱۴	۰/۷۰۷	ناحیه هرمزگان
۱/۰۰۰	۰/۵۵۱	۰/۹۱۷	ناحیه یزد

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحلیل پوششی داده‌های سنتی در طی زمان، با سیستم‌های تولید همانند یک جعبه سیاه برخورد می‌کند و فرایندهای داخلی سیستم را نادیده می‌گیرد. نتایج مفید و کاربردی بیشتر هنگامی حاصل می‌شود که روابط بین فرایندهای داخلی سیستم در محاسبات کارایی سیستم در نظر گرفته شود.

در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد نواحی شانزده‌گانه تولید و انتقال برق در طی دوره زمانی سه‌ساله ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با تحلیل پنجره DEA ترکیب شده است.

تحلیل پنجره دارای مجموعه امکان ادغام‌شده‌ای است که واحدها در دوره‌های موجود در تحلیل را در قالب یک مجموعه امکان ترکیبی از دوره‌ها وارد محاسبات می‌کند. در این صورت

تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده موجود در تحلیل به اندازه حاصل ضرب تعداد واحدها ( $J=1, 2, \dots, n$ ) در یک دوره در تعداد دوره‌ها ( $t=1, 2, \dots, T$ ) خواهد بود ( $n*T$ ). با توجه به این ویژگی تحلیل پنجره می‌تواند مشکل تعداد کم نواحی مورد ارزیابی را در مقایسه با تعداد متغیرهای ورودی و خروجی را جبران می‌کند. با توجه به ۱۶ ناحیه و سه دوره زمانی تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده در این تحلیل به ۴۸ واحد می‌رسد.

نتایج نشان می‌دهد که در تعیین کارایی مرحله اول، یعنی تولید برق در سال ۱۳۹۳، در میان نیروگاه‌های تولیدکننده برق هیچ یک از واحدها کارا نبوده و می‌توان کاهش تعداد واحدهای کارای کل در مقایسه با واحدهای کارای مرحله انتقال برق را کارایی پایین واحدهای موجود در مرحله تولید برق دانست؛ در حالی که در سال ۱۳۹۲، تعداد واحدهای کارا در مرحله تولید برق در مقایسه با واحدهای کارای کل و واحدهای کارای موجود در مرحله انتقال برق را به دلیل کارایی بالای واحدهای تولیدکننده برق دانست. در سال ۱۳۹۱ همانند سال ۱۳۹۳، کارایی کل سیستم در مقایسه با کارایی‌های دو مرحله نیز به دلیل کارایی پایین مرحله تولید برق کاهش یافته است. به طور خلاصه تعداد واحدهای کارا در تعیین کارایی کل سیستم، کارایی مرحله تولید و مرحله انتقال برق به صورت درصد در جدول ۴، آمده است.

جدول ۴. خلاصه‌ای از کارایی کل سیستم و فرایندها

انواع کارایی	کارایی کل (درصد)	کارایی مرحله تولید برق (درصد)	کارایی مرحله انتقال برق (درصد)	دوره زمانی
	۳۱/۲۵	۰۰/۰۰	۳۷/۵۰	سال ۱۳۹۳
	۴۳/۷۵	۵۰/۰۰	۱۲/۵۰	سال ۱۳۹۲
	۳۱/۲۵	۱۲/۵۰	۵۶/۲۵	سال ۱۳۹۱

کارایی کل هر یک از ۴۸ واحد موجود در تحلیل را می‌توان بر اساس نمرات کارایی واحدهای موجود در مرحله تولید و انتقال برق به صورت کلی تفکیک و تحلیل کرد. برای مثال، کارایی ناحیه آذربایجان را در طی دوره سه سال را می‌توان به این صورت تفکیک کرد که در سال ۱۳۹۳ کارایی مرحله تولید برق ۳۲/۶۰ درصد، کارایی مرحله انتقال برق ۸۵/۶۰ درصد و کارایی کل ۷۵/۸۰ درصد به دست آمده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کارایی پایین مرحله تولید برق باعث کاهش کارایی کل ناحیه آذربایجان شده است. به طور کلی واحدهای تولیدکننده برق در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۱ دارای نمرات کارایی پایین تری در مقایسه با نمرات کارایی واحدهای برق منطقه‌ای بودند و این امر به کاهش نمرات

کارایی کل این نواحی در سال‌های موردنظر منجر می‌شود؛ درحالی‌که در سال ۱۳۹۲، نمرات کارایی مرحله اول به‌طور تقریبی از نمرات کارایی مرحله دوم بیشتر بوده و به افزایش نسبی نمرات کارایی کل سال ۱۳۹۲ نسبت به دو سال دیگر منجر می‌شود.

بررسی علل ناکارایی مرحله تولید برق یکی از مواردی است که می‌تواند مبنای کار پژوهشی دیگری قرار گیرد. در این پژوهش از فرم حاصل‌ضربی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای استفاده شده است. استفاده از رویکردهای پوششی، شبکه‌های مستقل و مرتبط نیز برای ارزیابی عملکرد و مقایسه نتایج نیز از دیگر مواردی است که نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر دارد؛ علاوه بر این استفاده از مدل‌های مختلف رابطه‌ای و رهبر-پیرو با محوریت مراحل مختلف نیز می‌تواند مبنای مناسبی برای بررسی و مطالعه دقیق‌تر این واحدها در طی زمان قرار گیرد.

با توجه به این امر که در سال‌های تحت‌بررسی منشأ اصلی ناکارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده کارایی پایین مرحله تولید برق است، توجه و بررسی علل ناکارایی نیروگاه‌های تولید برق به‌عنوان راهی برای افزایش کارایی در صنعت برق پیشنهاد می‌شود؛ از طرفی با توجه به نوع نیروگاه‌ها، بررسی تأثیر انواع نیروگاه‌ها در کارایی و ناکارایی نواحی تولید برق مهم به نظر می‌رسد.

## منابع

1. Arocena, P. (2008). Cost and quality gains from diversification and vertical integration in the electricity industry: A DEA approach. *Energy Economics*, 30, 39–58.
2. Asmild, M., Paradi, C.V., Aggarwall, V., Schaffnit, C. (2004). Combining DEA window analysis with the Malmquist Index approach in a study of the Canadian banking industry, *Journal of Productivity Analysis*, 21(1), 67–89.
3. Avkiran, A., K., (2015), an illustration of dynamic network DEA in commercial banking including robustness tests, *Omega*, (55), 141-150.
4. Bisschop, J. (2012), AIMMS Optimization Modeling, *Paragon Decision Technology, Bellevue, WA 98004, USA*.
5. Chen Y, Cook WD, Li N, Zhu J. (2009). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA, *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170–6.
6. Chen Y, Zhu J., (2004). Measuring information technology's indirect impact on firm performance, *Information Technology and Management*, 5 (1), 9– 22.
7. Chen C, Yan H., (2011). Network DEA model for supply chain performance evaluation, *European Journal of Operational Research*; 213(1), 17– 55.
8. Chen P-C, Chang C-C, Yu M-M, & Hsu S-H. (2012). Performance measurement for incineration plants using multi-activity network data envelopment analysis: The case of Taiwan., *Journal of Environmental Management*, 93(1), 95–103.
9. Cook WD, Liang L, & Zhu J. (2010), Measuring performance of two-stage network structures by DEA: a review and future perspective. *Omega*, 38(6), 423–30.
10. Du JA, Liang LA, Chen Y, Cook WD, Zhu J., (2011). A bargaining game model for measuring performance of two-stage network structures. *European Journal of Operational Research*; 210(2), 390–7.
11. Färe R., (1991). Measuring Farrell efficiency for a firm with intermediate inputs. *Academia Economic, Papers 19*, 329–40.
12. Färe R, and Grosskopf S., (1996), Productivity and intermediate products: A frontier approach. *Econ Left 1996*; 50 (1): 65–70.
13. Färe R, Grosskopf S., (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34(1). 35–49.
14. Fukuyama H, Weber WL. (2010). A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs, *Omega*, 38(5). 398– 409.
15. Herrera-Restrepo, O., Triantis, K., Trainor, J., Murray-Tuite, P., & Edara, P. (2016). A multi-perspective dynamic network performance efficiency measurement of an evacuation: A dynamic network-DEA approach, *Omega*, (60), 45-59.
16. Kao C, Hwang S-N. (2010). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 418–429.
17. Khalili- Damghani, K., Shahmir, S. (2015). Uncertain network data envelopment analysis with undesirable outputs to evaluate the efficiency of electricity power production and distribution processes, *Computers & Industrial Engineering*, (88), 131-150.
18. Kopsakangas, M. & Svento, R. (2008), Estimation of cost-effectiveness of the Finnish electricity distribution utilities. *Energy Economics*, 30, 212-29.

19. Kordrostami S, Amirteimoori A. (2005). Un-desirable factors in multi-component performance measurement. *Applied Mathematics and Computation*, 171(2), 721-9.
20. Liang L, Cook WD, Zhu J. (2008). DEA models for two-stage processes: game approach and efficiency decomposition. *Naval Res Logistics (NRL)*, 55(7), 643-53.
21. Lozano S, Gutierrez E, and Moreno P, (2013). Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 1665- 1676.
22. Maghbouli M, Amirteimoori A, Kordrostami S. (2014). Two-stage network structures with undesirable outputs: a DEA based approach. *Measurement*, 48(0), 109- 18.
23. Seiford LM, Zhu J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation, *European Journal of Operational Research*; 142(1), 16-20.
24. Tone K, & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slack-based measure approach. *European Journal of Operational Research*; 197(1), 243-52.
25. Tone K. & Tsutsui, M., (2014), Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach, *Omega*, (42), 124-131.
26. Wang K, Huang W, Wu J, Liu Y-N. (2014). Efficiency measures of the Chinese commercial banking system using an additive two-stage DEA. *Omega*, 44 (0), 5-20.
27. Zhou Z, Sun L, Yang W, Liu W, Ma C. (2013). A bargaining game model for efficiency decomposition in the centralized model of two-stage systems. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), 103- 8.