محک‌زنی چندسطحی کارایی شرکت‌های توزیع الکتریکی مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها

نیما مستقیم[۱]، محمودرضا حقی‌فام[۲]، محسن سیماب[۳]
[۱و۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
[۳] گروه مهندسی برق – واحد مرودشت - دانشگاه آزاد اسلامی- مرودشت- ایران
[۱] mostaghim@modares.ac.ir, [۲] haghifam@modares.ac.ir, [۳] msimab@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، یک روش محک‌زنی چند سطحی جهت ارزیابی کارایی شرکت‌های توزیع الکتریکی ارائه می‌شود. روش ارائه شده، همکاری مشترک هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری برای بهبود کیفیت خدمات و کاهش تلفات انرژی را در نظر می‌گیرد. در ابتدا، خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means توسط روش ارائه شده به کار گرفته می‌شود تا شرکت‌های مشابه شناسایی شوند. سپس، روش ارائه شده، تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل مازاد را در چند سطح به کار می‌گیرد و از طریق خلق رقابت مجازی میان شرکت‌های توزیع، کارایی شرکت‌ها را تخمین زده و مقادیر هزینه مازاد شرکت‌ها را شناسایی می‌کند. در انتها، روش پیشنهاد شده بر روی شرکت‌های توزیع الکتریکی اعمال شده و نتایج آن در انتهای مقاله گزارش داده شده است.

واژه های کلیدی: محک‌زنی کارایی، تحلیل پوششی داده‌ها، تحلیل مازاد، خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمودرضا حقی‌فام

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، بزرگراه جلال آل‌احمد، پل نصر، دانشگاه تربیت مدرس ، دانشکده مهندسی برق، صندوق پستی : ۱۴۳-۱۴۱۱۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار یافته، سازوکار بازار آزاد، بهبود کارایی نهادهای تولید و فروش صنعت برق را تضمین می‌کنند. درحالی‌که، نهادهای انتقال و توزیع به دلیل ماهیت انحصار ذاتی، قابل ارائه در بازار نبوده و علی‌رغم خصوصی‌سازی، زیر نظر قانون‌گذاران صنعت برق اداره می‌شوند. در سال‌های اخیر، قانون‌گذاران تلاش کرده‌اند تا شرایطی رقابتی را برای بهبود کارایی بخش توزیع به کار گیرند. اغلب روش‌های قانون‌گذاری در عمل، بر پایه محک‌زنی کارایی بوده‌اند که کارایی شرکت‌ها را در مقایسه با یک شرکت مرجع تخمین زده‌اند [۱]. محک‌زنی کارایی می‌تواند با خلق رقابتی مجازی میان شرکت‌هایی که به دلیل ماهیت انحصار ذاتی نمی‌توانند به صورت عادی در معرض رقابت حقیقی قرار گیرند، کارایی آن‌ها را تخمین زند. روش‌های اصلی محک‌زنی کارایی که توسط قانون‌گذاران توزیع به کار گرفته شده‌اند، شامل تحلیل پوششی داده‌ها[۱]، حداقل مربعات معمولی اصلاح‌شده و تحلیل مرزی تصادفی می‌باشد که روش اول بر پایه برنامه‌ریزی خطی و روش‌های دوم و سوم بر پایه تکنیک‌های آماری هستند [۲].

در سال‌های اخیر، تحلیل پوششی داده‌ها به عنوان یکی از روش‌های محک‌زنی کارایی شرکت‌های توزیع بر روش‌های دیگر ارجحیت داده شده است. دلیل این امر آن است که تحلیل پوششی داده‌ها یک رویه غیرپارامتری است که نیازی به در نظر گرفتن فرضیات جهت تشکیل تابع تولید و اوزان مقادیر ورودی و خروجی شرکت‌ها ندارد [۳, ۴]. کاربردهای تحلیل پوششی داده‌ها در صنعت برق به طور خاص در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. سیماب و حقی‌فام، الگوریتمی یکپارچه ارائه داده‌اند که با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها کارایی کلی، فنی و تخصیصی شرکت‌های توزیع را ارزیابی می‌کند [۵]. این مقاله بر مشکلات پیاده‌سازی تحلیل پوششی داده‌ها در شرکت‌های توزیع و روش حل آن تمرکز کرده است. Qingram و همکارش، بهره‌وری نهادهای انتقال-توزیع را با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها ارزیابی کرده‌اند [۶]. این مقاله، یک مدل قانون‌گذاری تشویقی با رقابت یاردستیک را پیشنهاد داده که تنظیم قیمت و معادلات بازار را در بر می‌گیرد. Tenure و همکارانش، رویه‌ای را برای تنظیم اهداف عملکردی مرتبط با قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع ارائه کرده که شاخص‌های متوسط زمان قطعی مشترک[۲] (CAIDI) و متوسط دفعات قطعی مشترک[۳] (CAIFI) را تحلیل می‌کند و یک مدل قانون‌گذاری مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها را پایه‌گذاری می‌کند [۷]. سیماب و همکارانش در مراجع [۸, ۹] از تحلیل پوششی داده‌ها به منظور طراحی طرح پاداش-جریمه در مدل قانون‌گذاری مبتنی بر عملکرد شرکت‌های توزیع استفاده کرده‌اند. کارایی بهره‌برداری ۱۷ مرکز خدمات در شرکت برق تایوان با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها توسط Chein و همکارانش، مورد مطالعه قرار گرفته است و جهت‌های مشخصی برای بهبود ناکارایی‌های مربوطه پیشنهاد شده است [۳]. Resende، کارایی شرکت‌های توزیع برزیل را با استفاده از ابزار تحلیل پوششی داده‌ها مورد ارزیابی قرار داده و سپس، پتانسیل‌ها و مشکلات پیاده‌سازی طرح‌های یاردستیک را بررسی کرده است [۱۰]. Sanhueza و همکارانش عملکرد تحلیل پوششی داده‌ها مورد نیاز در فرآیند تعیین تعرفه توزیع را به عنوان ابزاری برای تعیین ارزش افزوده مورد صحت‌سنجی قرار داده‌اند [۴]. در این مرجع ، جهت افزایش صحت نتایج ارزیابی کارایی، تکنیک خودراه‌اندازی[۴] مورد استفاده قرار گرفته است. Lee، از تحلیل پوششی داده‌ها جهت ارزیابی کارایی واحدهای نیروگاهی استفاده کرده است [۱۱]. این مرجع، روشی جدید مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها برای اندازه‌گیری تأثیر خروجی‌های مطلوب و نامطلوب ارائه داده است. Niu و همکارش یک الگوریتم تکاملی رده‌بندی کارایی برای اندازه‌گیری مستقیم واحدهای تصمیم‌گیر سیستم قدرت ارائه داده‌اند [۱۲]. این الگوریتم مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها بوده و از فرآیندهای تکرار شونده استفاده می‌کند. Li و همکارش به اندازه‌گیری سیاست‌های تبدیل انرژی بر گسترش تولید انرژی‌های سبز پرداخته و از مدل تحلیل پوششی داده‌های سه مرحله‌ای برای ارزیابی قانون‌گذاری کاهش انرژی استفاده می‌کنند [۱۳].

کلید موفقیت یک طرح قانون‌گذاری این است که هم قانون‌گذار و شرکت‌های تحت مقررات، درک عمیقی از سیگنال‌های هدایتگر خلق‌شده توسط طرح داشته باشند [۱۴]. همچنین، اطمینان از این امر که سیگنال‌های هدایتگر طرح حاوی اهداف اصلی قانون‌گذاری هستند و منجر به بهبود کارایی مجازی نمی‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۲]. در نظر گرفته شدن هزینه‌های بهره‌برداری در ارزیابی کارایی شرکت‌ها بدون در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، منجر به بهبود کارایی مجازی و انتقال هزینه‌های بهره‌برداری در هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌گردد [۱۵]. بنابراین، این مقاله قصد دارد تا روشی را برای ارزیابی کارایی هزینه‌های شرکت‌های توزیع الکتریکی پیشنهاد داده و جهت‌های بهبود کارایی را برای شرکت‌های توزیع مشخص کند. روش پیشنهاد شده جنبه‌های مختلف کارایی شرکت‌ها را در یک رویه یکپارچه و بر اساس دلایل فنیِ صرفِ هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری مورد ارزیابی قرار می‌دهد. همچنین، در این روش، همکاری مشترک هزینه بهره‌برداری و هزینه سرمایه‌گذاری در بهبود کیفیت خدمات شرکت‌ها و کاهش تلفات انرژی مورد توجه قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی، هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شرکت‌های توزیع را به جهات مختلف ارزیابی کرده و مقادیر قابلِ قبول این هزینه‌ها را تعیین می‌کند. در نهایت، با استفاده از مقادیر قابلِ قبول هزینه‌ها، مقادیر مازاد آن‌ها محاسبه شده و جهت‌های بهبود کارایی برای هر شرکت تعیین می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

در ادامه مقاله، بخش ۲ به ارائه ساختار روش پیشنهادی خواهد پرداخت. سپس، بخش۳ جزئیات پیاده‌سازی روش و نتایج حاصل از آن را ارائه خواهد کرد. در انتها، بخش ۴ به نتیجه‌گیری خواهد پرداخت.

۲- ساختار روش پیشنهادی

روش پیشنهادی، یک روش محک‌زنی چندسطحی جهت ارزیابی کارایی هزینه شرکت‌های توزیع مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل مازاد[۵] می‌باشد. این روش، جنبه‌های مختلف کارایی هزینه‌های شرکت‌های توزیع را ارزیابی کرده و مقادیر قابلِ قبول هزینه‌ها را بر اساس نتایج محک‌زنی و تحلیل مازاد محاسبه می‌کند. مقادیر قابلِ قبول هزینه در واقع مقادیری هستند که شرکت‌ها در صورتی که هزینه‌های خود را بر اساس این مقادیر کاهش دهند، خواهند توانست به شرکت‌هایی کارا تبدیل شوند.

به منظور محک‌زنی جنبه‌های مختلف کارایی هزینه‌های شرکت‌های توزیع الکتریکی، این هزینه‌ها می‌توانند بر اساس اهداف اصلی هزینه‌ای دسته‌بندی شوند. دسته‌بندی هزینه‌های شرکت‌های توزیع الکتریکی در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل (۱): دسته‌بندی هزینه‌های شرکت‌های توزیع الکتریکی

اساساً، هزینه سرمایه‌گذاری به منظور ایجاد ظرفیت در شبکه و تغذیه مشترکین شرکت‌ها صرف می‌گردد. با این حال، اغلب اوقات شرکت‌های توزیع مجبور می‌شوند به منظور بهبود کیفیت خدمات و کاهش تلفات انرژی خود، سرمایه‌گذاری بیشتری را در شبکه خود انجام دهند. این هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر، از یک طرف منجر به کاهش هزینه خرید انرژی‌ای که در شبکه آن‌ها تلف می‌گردد، می‌شود و از طرف دیگر، در سطح کیفیت خدمات مشابه، باعث کاهش در هزینه‌های بهره‌برداری برای تعمیر و نگهداری اجزاء شبکه و عملیات بازگردانی می‌گردد. بنابراین، می‌توان اینگونه بیان کرد که بهبود کیفیت خدمات و کاهش هزینه خرید انرژی تلف شده در شبکه بر اساس همکاری مشترک بین هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری شرکت‌ها ایجاد می‌گردد و برای جلوگیری از انتقال هزینه بهره‌برداری در هزینه سرمایه‌گذاری و برعکس، محک‌زنی کارایی هزینه شرکت‌های توزیع می‌بایستی با در نظر گرفتن این همکاری مشترک صورت پذیرد. همچنین، بخش باقیمانده از هزینه بهره‌برداری عموماً هزینه‌های بهره‌برداری مستقل از شبکه مانند هزینه‌های اندازه‌گیری و صدور صورت‌حساب مشترکین بوده که محک‌زنی و تعیین مقدار قابلِ قبول آن خارج از حوزه مطالعه این مقاله می‌باشد.

در بخش‌های باقیمانده از این مقاله، هزینه بهره‌برداری به منظور تعمیر و نگهداری اجزاء شبکه و عملیات بازگردانی، هزینه بهره‌برداری برای کیفیت و هزینه بهره‌برداری به منظور خرید انرژی‌ای که در شبکه توزیع تلف می‌شود، هزینه بهره‌برداری برای تلفات انرژی نامیده می‌شود.

با در نظر گرفتن دسته‌بندی هزینه شرکت‌ها در شکل (۱)، روش پیشنهادی ارائه شده، مقادیر مختلف هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری را دریافت کرده و با به‌کارگیری تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل مازاد در چندین سطح، رقابتی مجازی را میان شرکت‌های توزیع خلق کرده و مقادیر قابلِ قبول بخش‌های مختلف هزینه شرکت‌ها را محاسبه می‌کند. اختلاف میان مقادیر قابلِ قبول محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی و مقادیر هزینه شده شرکت‌ها، پتانسیل‌های کاهش هزینه شرکت‌ها را نشان می‌دهند که می‌توانند جهت‌گیری هزینه شرکت‌ها را در دوره‌های بعدی قانون‌گذاری شکل داده و آن‌ها را به سمت افزایش کارایی سوق دهد.

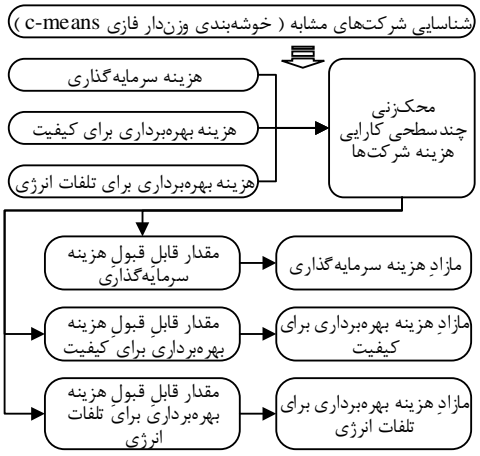
عوامل موثر بر کارایی شرکت‌های توزیع را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی کرد [۱۶]:

- عوامل ذاتی مانند شرایط آب و هوایی و چگالی مشترکین که خارج ار کنترل شرکت‌های توزیع می‌باشند.
- عوامل موروثی مانند طراحی شبکه که آثار طولانی مدت بر کیفیت خدمات و تلفات انرژی شرکت‌های توزیع دارند.
- عوامل تحمیلی مانند عملکرد مدیریتی، تعمیر و نگهداری تجهیزات و به‌کارگیری مؤثر منابع که می‌توانند در بازه‌های زمانی میان‌مدت و کوتاه‌مدت کیفیت خدمات و تلفات انرژی شرکت‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

بنابراین، در ابتدا، با توجه به ماهیت رقابتی مدل پیشنهادی محک‌زنی چندسطحی، از روش خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means [۶] استفاده می‌شود تا آثار عوامل ذاتی بر نتایج محک‌زنی کارایی کاسته شود. با استفاده از روش خوشه‌بندی مذکور، شرکت‌های مشابه شناسایی و خوشه‌بندی می‌شوند. سپس، روش محک‌زنی چندسطحی، کارایی هر بخش از هزینه‌های شرکت‌ها در هر یک از خوشه‌های مشابه را ارزیابی کرده و مقادیر قابلِ قبول هزینه را محاسبه می‌کند. محک‌زنی چندسطحی کارایی با در نظر گرفتن این امر انجام می‌گیرد که شرکت‌های می‌توانند بر همه عوامل موروثی و تحمیلی را تأثیر بگذارند درحالی‌که عوامل ذاتی خارج از کنترل شرکت‌ها می‌باشند. این روش ، به شرکت‌ها با امتیاز کارایی بالاتر، مقدار هزینه قابلِ قبول بالاتری را نسبت داده و به شرکت‌ها با کارایی پایین‌تر، مقدار هزینه قابلِ قبول پایین‌تری را نسبت می‌دهد. ساختار روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]



شکل (۲): ساختار روش محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه شرکت‌های توزیع

در ادامه این بخش، ابتدا ابزارهای ریاضی به کار گرفته شده در روش پیشنهادی به اختصار توضیح داده می‌شوند و سپس، جزئیات روش محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه شرکت‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۱- ابزارهای ریاضی

۲-۱-۱- خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means

خوشه‌بندی، روشی برای دسته‌بندی داده‌ها در خوشه‌های همگن است که داده‌های قرار گرفته در هر خوشه بیشترین شباهت را نسبت به هم و بیشترین تفاوت را نسبت به داده‌های خوشه‌های دیگر دارا می‌باشند. به دلیلی که در واقعیت، مرز واضحی میان خوشه‌ها وجود ندارند، خوشه‌بندی فازی بر اساس مفهوم عضویت جزئی مورد توجه بسیار قرار گرفته است. روش خوشه‌بندی فازی c-means پیشنهاد شده در مرجع [۱۷] در اغلب کاربردهای خوشه‌بندی فازی مورد استفاده قرار گرفته است. روش [۱۸] نشان داده شده که اوزان مختلف مشخصه‌ها می‌توانند عملکرد خوشه‌بندی فازی c-means را به شدت تحت تأثیر قرار دهند و اگر این اوزان به درستی انتخاب نشوند، عملکرد این روش خوشه‌بندی به شدت کاهش می‌یابد. در این مقاله، روش خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means که در روش [۱۹] ارائه شده است، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. کیفیت نتایج خوشه‌بندی با استفاده از شاخص‌های مختلف صحت‌سنجی مانند ضریب تفکیک[۷] (PC)، آنتروپی خوشه‌بندی[۸] (CE) [۱۷]، شاخص فوکویاما-ساگنو[۹] (FS) [۱۹] و شاخص زای-بنی[۱۰] (XB) [۲۰] قابل ارزیابی می‌باشد.

در گام اول خوشه‌بندی، اوزان مشخصه‌ها با استفاده از تکنیک خودراه‌اندازی محاسبه می‌گردد. بدین منظور، در ابتدا، B نمونه مستقل $X_j^b=\left(x_{j1}^b,...,x_{jp}^b\right)$ به صورت $X^b=\left\{X_1^b,...,X_n^b\right\}$, $b=1,...,B$ با جایگزینی از $X=\left\{X_1,...,X_n\right\}$ انتخاب می‌گردد. مقدار خودراه‌انداز با استفاده روابط ذیل محاسبه می‌گردد.

$$\hat{w}(b)=\frac{CV_k(b)}{\sum_{i=1}^{p}CV_i(b)} \quad (۱)$$

$$CV_k(b)=\frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(x_{jk}^b-\bar{x}_k^b\right)^2/(n-1)}}{\bar{x}_k^b} \quad (۲)$$

$$\bar{x}_k^b=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{jk}^b, k=1,...,p \quad (۳)$$

وزن مشخصه w_k با استفاده از میانگین نمونه‌های B محاسبه می‌گردد.

$$\hat{w}_k=\frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}\hat{w}_k(b), k=1,...,p \quad (۴)$$

با استفاده از قانون قدرتمند تعداد زیاد[۱۱] (SLLN)، $\hat{w}_k$ به w_k همگرا می‌گردد. هر چه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت تکنیک خودراه‌اندازی بالاتر می‌رود.

بعد از محاسبه اوزان مشخصه‌های خوشه‌بندی با استفاده از تکنیک خودراه‌اندازی، فاصله اقلیدسی وزندار با فاصله اقلیدسی در روش خوشه‌بندی فازی جایگزین می‌گردد. روش خوشه‌بندی بر اساس حداقل کردن تابع هدف برای دستیابی به بهترین خوشه‌بندی می‌باشد.

$$J_{WFCM}=\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n}\mu_{ij}^m\left(d_{ij}^{(\hat{w})}\right)^2 \quad (۵)$$

$$d_{ij}^{(\hat{w})}=\sqrt{\sum_{k=1}^{p}\hat{w}_k\left(x_{jk}-v_{ik}\right)^2} \quad (۶)$$

داده‌های $X=\{x_1,x_2,...,x_n\}$ را در نظر بگیرید، بطوریکه n تعداد داده‌ها و $V=\{v_1,v_2,...,v_c\}$ میانگین خوشه‌ها و c تعداد خوشه‌ها باشد. μ_{ij} درجه عضویت داده x_i با میانگین v_j و یک درایه از ماتریس $U=[\mu_{ij}]$ می‌باشد. پارامتر m را اندیس فازی می‌گویند و برای کنترل درجه عضویت هر داده به کار می‌رود. مقدار m باید بین محدوده $m\in[1,\infty]$ باشد. روش خوشه‌بندی فازی الگوریتمی تکرارشونده شامل مراحل زیر دارد.

۱. تعداد کلاس‌ها c و مقدار پارامتر m را تنظیم کنید.

۲. تعیین مقادیر اولیه μ_{ij} به طوریکه معادله (۷) ارضا شود.

$$\sum_{j=1}^{c}\mu_{ij}=1, i=1,...,n \quad (۷)$$

۳. محاسبه میانگین خوشه‌ها v_j با استفاده از رابطه (۸)

$$v_j=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\mu_{ij})^m x_i}{\sum_{i=1}^{n}(\mu_{ij})^m}, j=1,...,c \quad (۸)$$

۴. محاسبه ماتریس عضویت با استفاده از رابطه (۹)

$$\mu_{ij}=\frac{\left(d_{ij}^{(\hat{w})}\right)^{-2/(m-1)}}{\sum_{k=1}^{c}\left(d_{kj}^{(\hat{w})}\right)^{-2/(m-1)}} \quad (۹)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

۵. تکرار مراحل ۳ و ۴ تا زمانی‌که معادله (۱۰) ارضا شود. l تعداد تکرار است.

$$\left|\{J^{l}_{WFCM} - J^{l-1}_{WFCM}\}\right| \le \varepsilon \qquad (۱۰)$$

۲-۱-۲- تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها، یک روش غیرپارامتری به منظور اندازه‌گیری کارایی تعدادی همگن از واحدهای تصمیم‌گیر می‌باشد که وظایف مشابهی را بر عهده دارند. تحلیل پوششی داده‌ها بر تعیین واحد تصمیم‌گیر کارا به عنوان واحد مرجع تمرکز دارد و در مقایسه با این واحد مرجع، کارایی باقیمانده واحدها را محاسبه می‌کند. تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی واحد تصمیم‌گیر با چند متغیر ورودی و چند متغیر خروجی را با توجه به نسبت وزن‌دار این متغیرها محاسبه می‌کند. با توجه به اینکه، اندازه‌گیری ناکارایی در متغیرهای ورودی، هدف مدل محک‌زنی چندسطحی کارایی می‌باشد، در این مقاله از مدل CCR ورودی محور تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است [۲۱].

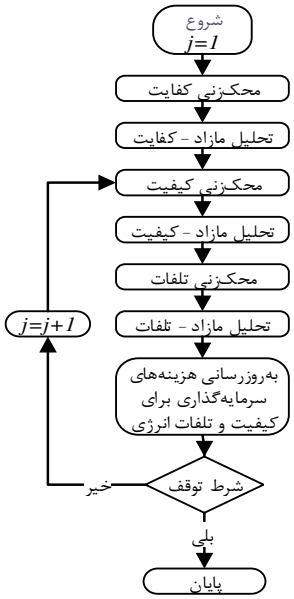
۲-۱-۳- تحلیل مازاد

همراه با به کارگیری تحلیل پوششی داده‌ها، تحلیل مازاد ابزاری مورد توجه به منظور شناسایی جهت‌های بهبود کارایی برای شرکت‌های ناکاراست. تحلیل مازاد، تغییرات نسبی مختلفی را در متغیرهای ورودی و خروجی مدل تحلیل پوششی داده‌ها ارائه می‌دهد تا ناکارایی خود را جبران کنند. مازاد در متغیر ورودی به معنای نیاز به کاهش در متغیرهای ورودی و مازاد در متغیر خروجی به معنای نیاز به افزایش در متغیرهای خروجی مدل است تا شرکت‌ها کارا شوند [۸].

۲-۲- روش محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه شرکت‌ها

با استفاده از مفهوم رقابت یاردستیک، روش محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه، رقابت مجازی میان شرکت‌های توزیع را به وجود می‌آورد. این روش، تحلیل پوششی داده‌ها ورودی محور و تحلیل مازاد را در چندین سطح با استفاده از یک الگوریتم تکرارشونده به کار می‌گیرد تا مقادیر قابل قبول هزینه شرکت‌ها را محاسبه کند. تحلیل پوششی داده‌های به کار گرفته شده، یک مدل CCR ورودی‌محور برای اندازه‌گیری امتیاز کارایی کلی شرکت‌هاست. این مدل، سعی می‌کند تا با ثابت نگه داشتن مقادیر خروجی مدل کارایی، مقادیر ورودی را کمینه سازد [۲۱]. همچنین، تحلیل مازاد کمک می‌کند تا مقدار کاهش مطلوب در مقادیر ورودی شرکت‌ها بر اساس امتیازات کارایی محاسبه گردد. الگوریتم تکرارشونده محک‌زنی چند سطحی کارایی در شکل (۳) نشان داده شده است.

همه مقادیر به کار گرفته شده در الگوریتم تکرارشونده محک‌زنی چند سطحی کارایی مقادیر متوسط دوره قبلی قانون‌گذاری شرکت‌ها می‌باشند، زیرا کارایی و کیفیت خدمات شرکت‌ها به طور اساسی در بازه زمانی طولانی‌مدت توسط عوامل موروثی و تحمیلی قابل تغییر می‌باشند.



شکل (۳): الگوریتم تکرارشونده محک‌زنی چند سطحی کارایی

در گام اول، محک‌زنی کفایت با این فرض انجام می‌گیرد که شرکت‌های توزیع می‌توانند تمامی عوامل موروثی و تحمیلی خود به کار گیرند تا هزینه سرمایه‌گذاری خود را به منظور ایجاد ظرفیت شبکه و تغذیه مشترکین به حداقل رسانند. بهبود کیفیت خدمات و کاهش تلفات انرژی در این محک‌زنی مورد توجه قرار نمی‌گیرد. بنابراین، در ابتدا، تمامی هزینه سرمایه‌گذاری شرکت‌ها به عنوان هزینه سرمایه‌گذاری برای ایجاد ظرفیت شبکه و تنها متغیر ورودی محک‌زنی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، مشخصات مشترکین شرکت به عنوان متغیرهای خروجی محک‌زنی کفایت در نظر گرفته می‌شود. این امر در رابطه ذیل نشان داده شده است:

$$DEA\begin{cases} Input: EX_{CA,i} = EX_{C,i} \\ Outputs: Characteristics\ of \\ \qquad company\text{'s } customers_i \\ Result: \theta_{A,i} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در گام بعدی، با استفاده از مفهوم بیشینه کاهش نسبی در متغیر ورودی، تحلیل مازاد صورت می‌گیرد تا بر اساس نتایج محک‌زنی کفایت، مقدار مازاد در متغیر ورودی محاسبه گردد. مازاد محاسبه شده یک مازاد واقعی نیست و می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری اضافی شرکت‌ها به منظور بهبود کیفیت خدمات یا کاهش تلفات انرژی باشد. این امر در روابط ذیل نشان داده شده است:

$$sEX_{CA,i} = EX^{j}_{CQ,i} + EX^{j}_{CL,i} \qquad (۱۲)$$

$$EX^{j}_{CQ,i} = m^{j}_{i} sEX_{CA,i} \quad \& \quad EX^{j}_{CL,i} = n^{j}_{i} sEX_{CA,i} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

در اولین تکرارِ الگوریتم، مقادیر m^j و n^j باهم برابر و مساوی ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، مقدار قابل قبول هزینه سرمایه‌گذاری برای کفایت بر اساس رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$rEX_{CA,i} = EX_{CA,i} - sEX_{CA,i} \quad (۱۴)$$

در گام بعدی از روش محک‌زنی چندسطحی کارایی، محک‌زنی کیفیت با در نظر گرفتن این فرض انجام می‌گیرد که شرکت‌ها می‌توانند تمامی عوامل موروثی و تحمیلی خود را به منظور کمینه‌سازی هزینه کیفیت خدمات و بیشینه‌سازی سطح کیفیت خدمات به کار گیرند. در این سطح از محک‌زنی کارایی، کمینه‌سازی هزینه ایجاد ظرفیت شبکه در محک‌زنی کفایت مورد ارزیابی قرار گرفته و فرض بر این است که کمینه‌سازی هزینه تلفات انرژی مد نظر قرار نمی‌گیرد. بنابراین، هر دو هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری به منظور بهبود کیفیت خدمات به عنوان متغیرهای ورودی محک‌زنی کارایی در نظر گرفته شده و مشخصات مشترکین شرکت‌ها و سطح کیفیت خدمات فراهم آورده شده به عنوان متغیرهای خروجی محک‌زنی در نظر گرفته می‌شود. این امر، در رابطه ذیل به طور خلاصه نشان داده شده است:

$$DEA\begin{cases} Inputs: EX^j_{CQ,i}, EX_{OQ,i} \\ Outputs: Characteristics\ of \\ \qquad company's\ customers_i,\ Quality\ level_i \\ Result: \theta^j_{Q,i} \end{cases} \quad (۱۵)$$

شاخص‌های کیفیت خدمات، متغیرهای خروجی نامطلوبی برای مدل تحلیل پوششی داده‌ها محسوب می‌شوند، زیرا با افزایش مقادیر آن‌ها کارایی شرکت‌ها در واقع کاهش می‌یابد. بنابراین، روش پیشنهاد شده توسط مرجع [۲۲] به منظور غلبه بر این مشکل به کار گرفته می‌شود. در این روش هر متغیر خروجی نامطلوب در عدد ۱- ضرب شده و سپس با یک مقدار ثابت مثبت جمع بسته می‌شود تا کلیه مقادیر نامطلوب مجدداً به صورت مقادیر مثبت درآیند.

تحلیل مازاد کیفیت در گام بعدی بر اساس امتیازات کارایی کیفیت به دست آمده و ضرب عامل (1-θ) در مقادیر ورودی که ناشی از مفهوم بیشینه کاهش نسبی در متغیرهای ورودی است، محاسبه می‌شود. در این مفهوم، به منظور تبدیل یک شرکت ناکارا به یک شرکت کارا، بیشینه کاهش یکپارچه در مقادیر متغیرهای ورودی محاسبه می‌گردد. مقادیر قابلِ قبول هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری به منظور بهبود کیفیت خدمات توسط روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$rEX^j_{CQ,i} = EX^j_{CQ,i} - sEX^j_{CQ,i} \quad (۱۶)$$

$$rEX^j_{OQ,i} = EX^j_{OQ,i} - sEX^j_{OQ,i} \quad (۱۷)$$

سومین محک‌زنی کارایی با روشی مشابه دو محک‌زنی کارایی صورت می‌پذیرد. در محک‌زنی تلفات، فرض بر این است که شرکت‌ها می‌توانند تمامی عوامل موروثی و تحمیلی را به کار گیرند تا هزینه تلفات انرژی خود را کمینه کنند. در این سطح از محک‌زنی، کمینه‌سازی هزینه ایجاد ظرفیت شبکه در محک‌زنی کفایت صورت پذیرفته و بهبود کیفیت خدمات مورد توجه قرار نمی‌گیرد. بنابراین، هزینه بهره‌برداری و هزینه سرمایه‌گذاری برای تلفات انرژی به عنوان متغیرهای ورودی محک‌زنی کارایی در نظر گرفته شده و مشخصات مشترکین شرکت‌ها به عنوان متغیرهای خروجی شرکت‌ها در نظر گرفته می‌شود. این امر در رابطه ذیل به طور خلاصه نشان داده شده است

$$DEA\begin{cases} Inputs: EX^j_{CL,i}, EX_{OL,i} \\ Outputs: Characteristics\ of \\ \qquad company's\ customers_i \\ Result: \theta^j_{L,i} \end{cases} \quad (۱۸)$$

در گام بعدی، تحلیل مازاد بر اساس نتایج محک‌زنی کارایی تلفات انجام می‌گیرد. در این گام نیز، از مفهوم بیشینه کاهش نسبی در متغیرهای ورودی استفاده شده و مقادیر قابلِ قبول متغیرهای ورودی بر اساس روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$rEX^j_{CL,i} = EX^j_{CL,i} - sEX^j_{CL,i} \quad (۱۹)$$

$$rEX^j_{OL,i} = EX^j_{OL,i} - sEX^j_{OL,i} \quad (۲۰)$$

به‌روزرسانی هزینه سرمایه‌گذاری برای کیفیت خدمات و تلفات انرژی در تکرار بعدی الگوریتم بر اساس روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$m^{j+1}_i = \frac{rEX^j_{CQ,i}}{rEX^j_{CQ,i} + rEX^j_{CL,i}} \quad (۲۱)$$

$$n^{j+1}_i = \frac{rEX^j_{CL,i}}{rEX^j_{CQ,i} + rEX^j_{CL,i}} \quad (۲۲)$$

همچنین، مقادیر قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری برای هر شرکت بر اساس رابط ذیل محاسبه می‌شود:

$$rEX^j_{C,i} = rEX^j_{CA,i} + rEX^j_{CQ,i} + rEX^j_{CL,i} \quad (۲۳)$$

شرط توقف الگوریتم تکرارشونده محک‌زنی چندسطحی کارایی وقتی اتفاق می‌افتد که مقادیر محاسبه شده هزینه سرمایه‌گذاری هر شرکت تغییرات اندکی داشته باشد. این امر در رابطه ذیل نشان داده شده است:

$$\left| rEX^j_{C,i} - rEX^{j-1}_{C,i} \right| < \varepsilon \quad (۲۴)$$

۳- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

روش پیشنهاد شده جهت محک‌زنی چند سطحی کارایی هزینه شرکت‌های توزیع، بر روی شرکت‌ها توزیع ایران که زیر نظر شرکت مادر تخصصی توانیر به عنوان نهاد حکومتی فعالیت می‌کنند، پیاده‌سازی شد. اطلاعات آماری این شرکت‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است.

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

جدول (۱): خلاصه اطلاعات آماری شرکت‌های توزیع ایران

متغیرهای آماری	متوسط	کمینه	بیشینه
متوسط بار (مگاوات)	۵۲۰	۱۲۰	۲۱۱۸
متوسط تلفات انرژی (درصد)	۱۴/۸۲	۷/۶۹	۲۴/۶۲
متوسط CAIDI (دقیقه)	۱۵۹	۶۴	۴۴۷
متوسط SAIDI (دقیقه)	۶۵۰	۱۵۵	۳۰۷۷
متوسط SAIFI	۳/۷۸	۱/۸۵	۶/۸۸
تعداد مشترکین (هزارمشترک)	۶۹۶	۱۶۹	۳۸۲۴
هزینه بهره‌برداری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	۱۰/۰۸۲	۱/۷۷۴	۴۷/۰۷۷
هزینه بهره‌برداری برای کیفیت (میلیون دلار)	۵/۶۸۵	۰/۹۱۱	۳۰/۲۱۳
پیک بار (مگاوات)	۹۰۵	۱۸۷	۳۶۷۵
هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	۱۴/۴۶۵	۳/۸۰۲	۳۶/۱۴۳
ناحیه تحت پوشش (کیلومترمربع)	۴۲۱۲۶	۱۰۰۵	۱۷۸۴۳۱
انرژی تغذیه شده (مگاوات‌ساعت)	۴۵۵۹	۱۰۵۳	۱۸۵۵۳

۳-۱- شناسایی شرکت‌های مشابه با استفاده از خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means

همان‌طوری که پیش از این گفته شد، کارایی و کیفیت خدمات شرکت‌های توزیع می‌تواند توسط عوامل ذاتی تحت تأثیر قرار گیرد [۱۶]. این عوامل، خارج از کنترل شرکت‌ها بوده و به منظور رقابت‌پذیری شرکت‌ها در پروسه محک‌زنی، شرکت‌های توزیع ایران می‌توانند بر اساس عوامل ذاتی مؤثر خوشه‌بندی شده و شرکت‌های مشابه در یک خوشه قرار داده شوند. بدین منظور، خوشه‌بندی وزن‌دار فازی c-means بر روی این شرکت‌ها بر اساس مشخصه‌های ذیل اعمال شد:

- عوامل محیطی: بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد)، کمینه دما (درجه سانتی‌گراد)، رطوبت (درصد) و متوسط سرعت باد (کیلومتر در ساعت)
- شرایط شبکه: چگالی مشترک (تعداد مشترک در کیلومترمربع) و متوسط بار (مگاوات)

اوزان مشخصه‌های در نظر گرفته شده در خوشه‌بندی، با استفاده از الگوریتم تکنیک خودراه‌اندازی که در مرجع [۱۹] پیشنهاد شده است، محاسبه گردید. اوزان محاسبه شده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): اوزان مشخصه‌های خوشه‌بندی

مشخصه	وزن
چگالی مشترک (تعداد مشترک در کیلومترمربع)	۰/۲۷۱
متوسط بار (مگاوات)	۰/۲۳۹
بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد)	۰/۱۱۳
کمینه دما (درجه سانتی‌گراد)	۰/۱۳۲
رطوبت (درصد)	۰/۱۵۹
متوسط سرعت باد (کیلومتر در ساعت)	۰/۰۸۶

مقادیر شاخص‌های صحت‌سنجی خوشه‌بندی براساس تعداد خوشه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طوری که در مرجع [۵] ذکر شده است، هیچ‌کدام از شاخص‌های صحت‌سنجی به تنهایی قابل اعتماد نیستند و بهینه تعداد خوشه‌ها تنها می‌تواند بر اساس مقایسه شاخص‌های مختلف شناسایی شود.

جدول (۳): مقادیر شاخص‌های صحت‌سنجی خوشه‌بندی براساس تعداد خوشه‌ها

تعداد خوشه‌ها	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
PC	۰/۵۰۰	۰/۳۳۳	۰/۲۵۰	۰/۲۰۰	۰/۱۶۷	۰/۱۴۳	۰/۱۲۵
CE	۰/۶۹۳	۱/۰۹۹	۱/۳۸۶	۱/۶۰۹	۱/۷۹۲	۱/۹۴۶	۲/۰۷۹
FS	۰/۰۹۹	۰/۰۶۶	۰/۰۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۵
XB	۱۳۰۸	۱۸۶۶۳	۱۶۵۰۳	۱۱۸۵۵	۹۶۵۵۱	۱۷۷۸۷	۲۵۳۸۰

بهینه تعداد خوشه‌ها زمانی حاصل می‌شود که شاخص PC بیشترین مقدار خود و شاخص‌های CE، FS و XB کمترین مقدار خود را داشته باشند. بر اساس جدول (۳)، این امر در تعداد خوشه برابر ۲ برای شاخص‌های PC، CE و XB و در تعداد خوشه برابر ۸ برای شاخص FS اتفاق افتاده است. بنابراین، شرکت‌های توزیع ایران در دو خوشه دسته بندی شدند که خوشه اول (A) دارای ۱۵ عضو و خوشه دوم (B) دارای ۲۴ عضو می‌باشد. همچنین، درجه عضویت تعلق گرفته به هر شرکت نشان دهنده میزان تعلق آن شرکت به خوشه مربوطه می‌باشد و بر اساس آن، هر شرکت به خوشه‌ای که بالاترین درجه عضویت مربوطه را دارا می‌باشد، اختصاص داده شد.

۳-۲- محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه شرکت‌های توزیع

در این مرحله، روش پیشنهاد شده که در بخش پیشین ارائه شد، بر روی شرکت‌های هر خوشه پیاده شد. به منظور انتخاب متغیرهای خروجی روش محک‌زنی چندسطحی کارایی، تمامی متغیرهایی که می‌توانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شرکت‌های توزیع را تحت تأثیر قرار دهند، جمع‌آوری شد. سپس، از طریق مصاحبه با متخصصین صنعت برق، متغیرهایی که با توجه به شیوه بهره‌برداری و طراحی شبکه شرکت‌ها تغییر می‌کنند، از لیست متغیرهای خروجی حذف گردیدند؛ زیرا این متغیرها مبتنی بر تصمیمات خود شرکت‌های توزیع بوده و نمی‌توانند به عنوان مقادیر خروجی شرکت‌ها در نظر گرفته شوند. متغیرهای خروجی نهایی شده محک‌زنی در جدول (۴) لیست شده‌اند.

جدول (۴): متغیرهای خروجی نهایی شده محک‌زنی

نوع محک‌زنی	متغیرهای خروجی
محک‌زنی کفایت	انرژی تغذیه شده (مگاوات‌ساعت)، پیک بار (مگاوات) و تعداد مشترکین (هزارمشترک)
محک‌زنی کیفیت	متوسط بار اصلاح شده (مگاوات)، SAIDI (دقیقه) و SAIFI
محک‌زنی تلفات	انرژی تغذیه شده (مگاوات‌ساعت)، پیک بار (مگاوات) و تعداد مشترکین (هزارمشترک)

در این پیاده‌سازی، پیوستگی اتصال[۱۲] به عنوان هدف کیفیت خدمات در نظر گرفته شده است و کیفیت تجاری و کیفیت ولتاژ در این پیاده‌سازی مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، شاخص متوسط تعداد قطعی سیستم[۱۳] (SAIFI) و شاخص متوسط زمان قطعی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

سیستم[۱۴] (SAIDI) بـه عنـوان دو شـاخص کیفیـت خـدمات در نظـر گرفته شدند. این دو شـاخص دربرگیرنـده تعـداد و زمـان قطعـی‌هـای سیستم به عنـوان دو مشخصـه اصـلی پیوسـتگی اتصـال مـی‌باشـند و می‌توانند نمایش مناسبی از سطح کیفیت خدمات باشند. همچنین، به دلیل اختلاف بین ارزش قطعی در بین گروه‌هـای مختلـف مشـترکین، متوسط بار شرکت‌ها در این پیاده‌سازی بر اساس ارزش قطعی‌ها مـورد بازنگری قرار گرفته‌اند. این بازنگری، با وزن‌دهی به متوسط بار هر گروه از مشترکین هر شرکت بر اسـاس تـابع خسـارت گروهـی مشـترکین[۱۵] (SCDF) صورت پذیرفته است. این امر در رابطه ذیل نشان داده شده است:

$$mAL_i = \frac{\sum_{s=1}^{S} SCDF_i^s(CAIDI_i) \times AL_i^s}{\sum_{s=1}^{S} SCDF_i^s(CAIDI_i)} \qquad (۲۵)$$

تابع خسارت گروهی مشترکین ، تـابعی زمـان قطعـی مشـترکین می‌باشد. بنابراین، مقدار این تابع بر اساس شاخص متوسط زمان قطعی مشترکین محاسبه شده است. شرکت توانیر در سـال ۱۳۷۴ مطالعـاتی در زمینـه هزینـه قطعـی مشـترکین انجـام داد کـه نتـایج سـه گـروه مشترکین مورد مطالعه در جدول (۵) به عنوان تـابع خسـارت گروهـی مشترکین نشان داده شده است [۲۳].

جدول (۵): تابع خسارت گروهی مشترکین

زمان قطعی	خسارت (دلار بر کیلووات)		
	خانگی	تجاری	صنعتی
دو ثانیه	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۱۸۰
یک دقیقه	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	/۱۸۰
بیست دقیقه	۰/۰۰۰	۰/۰۶۵	۰/۳۰۴
یک ساعت	۰/۷۹۳	۱/۲۱۳	۱/۹۲۰
دو ساعت	۲/۳۸۰	۳/۶۴۰	۴/۸۰۰

در جدول (۶) نتایج پیـاده‌سـازی روش محـک‌زنـی چندسـطحی کارایی هزینه بر روی شرکت‌های توزیع ایران ارائه شده است. امتیازات محک‌زنی کفایت، کیفیت و تلفات به ترتیب در ستون‌های سوم، چهارم و پنجم این جدول ارائه شده است. متوسط امتیازات محک‌زنی کفایت، کیفیت و تلفات به ترتیب برابر با ۰/۷۲۵، ۰/۸۳۳ و ۰/۸۰۱ مـی‌باشـد. همان‌طوری که نتایج پیاده‌سازی نشان می‌دهنـد، شـرکت‌هـایی ماننـد شرکت B8 در خوشه B که توانسته‌اند در هر سه محـک‌زنـی بـالاترین امتیاز ممکن را کسب کنند، شرکت‌های کارا شناخته شـده‌انـد و روش پیشنهادی مازادی را برای آن‌ها در نظر نگرفته است. شرکت‌هایی مانند شرکت A7 در خوشه A نتوانسته‌انـد در محـک‌زنـی کفایـت بـالاترین امتیاز را کسب کنند، اما در دو محک‌زنـی دیگـر توانسـته‌انـد بـالاترین امتیاز را کسب کنند. این امـر نشـان دهنـده ایـن امـر اسـت کـه ایـن شرکت‌ها علی‌رغمی که هزینـه‌هـایی اضـافی در سـرمایه‌گـذاری خـود داشته‌اند، اما توانسته‌انـد بـه درسـتی سـرمایه‌گـذاری اضـافی خـود را جهت‌دهی کرده و بیشینه کیفیت خدمات و کمینه تلفـات انـرژی را از آن به دست آورند. بنابراین، از دیدگاه قانون‌گـذار ایـن شـرکت نیـز بـه عنوان شرکت‌هایی کارا شناخته می‌شوند. همچنین، شرکت‌هایی ماننـد B1 در خوشه B و شرکت A11 در خوشـه A نـه تنهـا در محـک‌زنـی کفایت نتوانسته‌اند بالاترین امتیاز را کسب کنند، بلکـه در محـک‌زنـی کیفیت یا تلفات نیز نتوانسته‌اند به عنوان شـرکتی کـارا امتیـاز کسـب کنند. این امر نشان‌دهنده این امر است که این شرکت‌ها نتوانسـته‌انـد سرمایه‌گذاری اضـافه خـود را بـه درسـتی در راسـتای بهبـود کیفیـت خدمات یا کاهش تلفات انرژی جهت‌دهی کننـد. شـرکت‌هـایی ماننـد A10 در خوشه A نیز که در هر سه محک‌زنی ناکارا بوده‌اند، می‌توانند هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گـذاری خـود بـا توجـه مقـادیر مـازاد محاسبه شده کاهش داده و کارایی هزینه خود را افزایش دهند.

ستون‌های ششم، هفتم و هشتم جـدول (۶) مقـادیر قابـلِ قبـول سرمایه‌گذاری را به ترتیب برای کفایت، کیفیت و تلفات نشان می‌دهند. مقادیر قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری برای کیفیت و هزینه بهره‌برداری برای تلفـات انـرژی در سـتون‌هـای نهـم، دهـم و یازدهم ارائه شده است. همچنـین، سـتون‌هـای دوازدهـم، سـیزدهم و چهاردهم جدول (۶) نشان دهنده مقادیر مازاد هزینه سـرمایه‌گـذاری، مازاد هزینه بهره‌برداری برای کیفیت و مازاد هزینه بهـره‌بـرداری بـرای تلفات انرژی به تفکیک هر شرکت می‌باشد. مقادیر مازاد نشـان‌دهنـده اختلاف بین هزینه‌های شرکت‌ها به مقادیر قابلِ قبول مربوطه می‌باشند که شرکت‌ها می‌توانند با کاهش با توجه به این مقـادیر کـارایی هزینـه خود را افزایش دهند.

۴- نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه، روش محـک‌زنـی چنـد سـطحی کـارایی هزینـه شرکت‌های توزیع الکتریکی ارائه شد. محک‌زنی چنـد سـطحی کـارایی ارائه شده، همکاری مشترک هزینه‌های بهره‌بـرداری و سـرمایه‌گـذاری برای بهبود کیفیت خدمات و کاهش تلفات انرژی در نظر می‌گیـرد. بـا توجه به خوشه‌بندی شرکت‌هـا در ایـن روش بـر اسـاس خوشـه‌بنـدی وزن‌دار فازی c-means و دسته‌بندی شرکت‌هـای مشـابه و همچنـین محک‌زنی شرکت‌ها بر اساس اطلاعات آماری خود شرکت‌ها بـر مبنـای تحلیل پوششی داده‌ها، روش ارائه شـده، روشـی منصـفانه و کـاربردی جهت محک‌زنی شرکت‌های توزیع می‌باشد. روش پیشنهادی، به خوبی می‌تواند هزینه‌های شرکت‌های توزیع را تحلیل کرده و با ارائـه مقـادیر مازاد، کاهش هزینه شرکت‌ها به منظور افزایش کـارایی را جهـت‌دهـی کند. در نهایت، روش ارائه شده بر روی شـرکت‌هـای توزیـع الکتریکـی ایران پیاده‌سازی شد و نتایج آن به طور کامل ارائه و بررسی شد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

جدول (۶): نتایج پیاده‌سازی روش محک‌زنی چندسطحی کارایی هزینه بر روی شرکت‌های توزیع ایران

خوشه	شرکت	θ_A	θ_Q	θ_L	rEX_{CA} (M$)	rEX_{CQ} (M$)	rEX_{CL} (M$)	rEX_C (M$)	rEX_{OQ} (M$)	rEX_{OL} (M$)	sEX_C (M$)	sEX_{OQ} (M$)	sEX_{OL} (M$)
A	A1	۰/۵۴۴	۰/۷۵۸	۰/۵۹۳	۸/۹۹	۵/۷۱	۰/۰۰	۴/۸۶	۶/۳۸	۱۴/۷۰	۱/۸۲	۱/۵۵	۴/۳۷
	A2	۰/۶۷۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۶/۵۹	۵/۱۰	۲/۷۶	۵/۲۱	۱۰/۹۲	۲۴/۴۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	A3	۰/۵۲۰	۰/۹۱۰	۰/۹۱۰	۹/۲۹	۶/۴۸	۱/۳۴	۴/۳۴	۶/۱۸	۱۷/۱۰	۰/۷۷	۰/۴۳	۰/۶۱
	A4	۰/۶۰۶	۰/۶۳۹	۰/۴۶۳	۱۵/۶۵	۶/۵۲	۰/۰۰	۴/۶۲	۱۱//۱۰	۲۲/۱۷	۳/۶۸	۲/۶۱	۱۲/۹۰
	A5	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۳۶/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۲۱	۲۵/۶۵	۳۶/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	A6	۰/۷۰۴	۰/۴۶۹	۰/۴۴۲	۱۵/۲۰	۲/۹۸	۰/۰۰	۶/۳۳	۱۰/۷۹	۱۸/۱۸	۳/۴۰	۷/۲۳	۱۳/۶۰
	A7	۰/۶۳۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۱/۰۸	۲/۶۲	۳/۶۳	۵/۸۴	۶/۶۸	۱۷/۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	A8	۰/۴۷۷	۰/۶۳۴	۰/۶۳۴	۱۳/۱۲	۲/۴۴	۶/۷۰	۶/۷۹	۷/۷۸	۲۲/۲۶	۵/۲۷	۳/۹۲	۴/۴۹
	A9	۰/۹۲۳	۱/۰۰۰	۰/۴۹۲	۳۲/۶۳	۲/۷۱	۰/۰۰	۶/۸۲	۲۳/۱۵	۳۵/۳۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۳/۹۲
	A10	۰/۶۴۹	۰/۴۰۳	۰/۴۶۴	۹/۴۳	۰/۰۰	۲/۳۷	۶/۷۲	۶/۲۰	۱۱/۸۰	۲/۷۳	۹/۹۵	۷/۱۶
	A11	۰/۶۱۳	۱/۰۰۰	۰/۶۵۰	۹/۵۹	۶/۰۵	۰/۰۰	۴/۳۰	۶/۸۱	۱۵/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۶۶
	A12	۰/۴۷۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۱/۱۰	۶/۱۷	۶/۱۷	۳/۲۰	۶/۵۴	۲۳/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	A13	۰/۸۲۱	۰/۹۲۷	۰/۸۶۴	۱۰/۲۸	۲/۰۸	۰/۰۰	۸/۰۰	۷/۳۰	۱۲/۳۷	۰/۱۶	۰/۶۳	۱/۱۴
	A14	۰/۸۵۲	۱/۰۰۰	۰/۷۳۲	۱۳/۱۵	۲/۲۹	۰/۰۰	۷/۵۷	۹/۳۳	۱۵/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۴۱
	A15	۰/۵۷۹	۰/۵۹۷	۰/۵۹۷	۱۵/۰۶	۲/۰۲	۴/۵۰	۴/۸۴	۹/۷۴	۲۱/۵۸	۴/۴۰	۳/۲۷	۶/۵۷
B	B1	۰/۸۵۱	۰/۷۵۲	۱/۰۰۰	۸/۴۶	۰/۰۰	۱/۴۸	۴/۱۱	۵/۳۷	۹/۹۳	۰/۰۰	۱/۳۵	۰/۰۰
	B2	۱/۰۰۰	۰/۴۱۷	۱/۰۰۰	۶/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۶۲	۵/۸۵	۶/۷۵	۰/۰۰	۵/۰۸	۰/۰۰
	B3	۰/۵۴۹	۰/۶۹۵	۰/۹۸۷	۴/۲۹	۰/۰۰	۳/۴۸	۲/۸۸	۲/۷۴	۷/۷۷	۰/۰۵	۱/۲۷	۰/۰۴
	B4	۰/۹۱۳	۰/۷۷۳	۰/۷۷۳	۳/۴۷	۰/۱۳	۰/۱۲	۲/۴۷	۲/۴۲	۳/۷۳	۰/۰۷	۰/۷۳	۰/۷۱
	B5	۰/۸۶۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۰/۸۰	۱/۶۶	۰/۱۰	۳/۰۵	۸/۵۲	۱۲/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B6	۰/۵۹۶	۰/۵۵۶	۰/۵۵۶	۷/۸۸	۰/۰۶	۲/۹۲	۳/۳۰	۴/۳۳	۱۰/۸۹	۲/۳۸	۲/۶۳	۳/۴۶
	B7	۰/۶۲۹	۰/۵۸۸	۰/۵۸۷	۶/۴۴	۱/۸۲	۰/۴۱	۱/۶۸	۴/۲۵	۸/۶۷	۱/۵۶	۱/۱۸	۲/۹۹
	B8	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۶/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۱۷	۵/۷۱	۶/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B9	۰/۷۷۵	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۳/۲۹	۰/۱۷	۰/۷۹	۲/۱۰	۱/۷۷	۴/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B10	۰/۵۸۸	۰/۹۳۹	۰/۹۳۹	۲/۸۲	۰/۱۰	۱/۷۶	۲/۳۹	۱/۸۲	۴/۶۸	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۲
	B11	۰/۷۱۸	۰/۸۲۲	۰/۵۹۷	۲۰/۲۷	۶/۵۴	۰/۰۰	۴/۸۵	۱۷/۶۲	۲۶/۸۲	۱/۴۲	۱/۰۵	۱۱/۸۷
	B12	۰/۵۴۱	۰/۸۵۱	۰/۷۳۵	۳/۲۶	۲/۳۵	۰/۰۰	۱/۶۰	۲/۸۱	۵/۶۱	۰/۴۱	۰/۲۸	۱/۰۱
	B13	۰/۸۲۶	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۷/۱۴	۱/۳۲	۰/۱۹	۲/۱۷	۴/۶۷	۸/۶۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B14	۰/۹۲۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۹/۸۶	۰/۴۱	۰/۳۷	۳/۲۰	۵/۶۶	۱۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B15	۰/۹۰۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۵/۶۴	۰/۳۰	۰/۳۰	۲/۴۸	۲/۵۷	۶/۲۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B16	۰/۶۷۰	۰/۷۶۹	۰/۶۵۸	۶/۶۶	۲/۵۳	۰/۰۰	۱/۶۹	۵/۷۸	۹/۱۹	۰/۷۶	۰/۵۱	۳/۰۱
	B17	۰/۶۲۵	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۵/۱۵	۰/۱۳	۲/۹۵	۲/۲۹	۳/۲۹	۸/۲۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B18	۰/۳۷۶	۱/۰۰۰	۰/۶۳۹	۲/۸۰	۴/۶۴	۰/۰۰	۰/۹۱	۲/۴۳	۷/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۳۷
	B19	۰/۸۲۲	۰/۹۰۴	۰/۸۶۶	۱۱/۲۶	۵/۲۰	۰/۰۰	۲/۴۱	۹/۷۵	۱۳/۴۶	۰/۲۳	۰/۲۶	۱/۵۰
	B20	۰/۷۶۲	۰/۵۸۲	۰/۵۸۲	۹/۶۳	۰/۷۶	۰/۹۹	۲/۷۲	۴/۳۹	۱۱/۳۸	۱/۲۵	۱/۹۶	۳/۱۵
	B21	۰/۶۳۳	۰/۶۸۰	۰/۶۸۰	۱۱/۵۵	۴/۲۲	۰/۳۳	۲/۹۳	۷/۴۰	۱۶/۱۰	۲/۱۴	۱/۳۷	۳/۴۷
	B22	۰/۸۰۱	۰/۹۶۷	۰/۹۶۷	۴/۶۰	۰/۶۵	۰/۴۵	۲/۱۲	۳/۵۶	۵/۷۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۲
	B23	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۶/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۸۹	۵/۶۵	۶/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	B24	۰/۸۳۶	۰/۸۴۷	۰/۸۴۷	۹/۸۹	۱/۱۶	۰/۴۸	۲/۹۸	۴/۸۱	۱۱/۵۴	۰/۳۰	۰/۵۴	۰/۸۷

نشانه‌ها

متوسط بار (مگاوات)	AL
شاخص متوسط زمان قطعی مشترکین (دقیقه)	$CAIDI$
هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	EX_C
هزینه سرمایه‌گذاری برای کفایت (میلیون دلار)	EX_{CA}
هزینه سرمایه‌گذاری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	EX_{CL}
هزینه سرمایه‌گذاری برای کیفیت (میلیون دلار)	EX_{CQ}
هزینه بهره‌برداری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	EX_{OL}
هزینه بهره‌برداری برای کیفیت (میلیون دلار)	EX_{OQ}
اندیس شرکت‌ها	i
اندیس تکرار الگوریتم	j
ضریبِ هزینه سرمایه‌گذاری برای کیفیت	m
متوسط بار اصلاح‌شده (مگاوات)	mAL
ضریبِ هزینه سرمایه‌گذاری برای تلفات انرژی	n
مقدار قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	rEX_C
مقدار قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری برای کفایت (میلیون دلار)	rEX_{CA}
مقدار قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	rEX_{CL}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]

مقدار قابلِ قبول هزینه سرمایه‌گذاری برای کیفیت (میلیون دلار)	rEX_{CQ}
مقدار قابلِ قبول هزینه بهره‌برداری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	rEX_{OL}
مقدار قابلِ قبول هزینه بهره‌برداری برای کیفیت (میلیون دلار)	rEX_{OQ}
اندیس گروه مشترکین	s
مازادِ هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	sEX_C
مازادِ هزینه سرمایه‌گذاری برای کفایت (میلیون دلار)	sEX_{CA}
مازادِ هزینه سرمایه‌گذاری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	sEX_{CL}
مازادِ هزینه سرمایه‌گذاری برای کیفیت (میلیون دلار)	sEX_{CQ}
مازادِ هزینه بهره‌برداری برای تلفات انرژی (میلیون دلار)	sEX_{OL}
مازادِ هزینه بهره‌برداری برای کیفیت (میلیون دلار)	sEX_{OQ}
امتیاز محک‌زنی کفایت	θ_A
امتیاز محک‌زنی تلفات	θ_L
امتیاز محک‌زنی کیفیت	θ_Q

مراجع

[1] M. Farsi, A. Fetz, and M. Filippini, "Benchmarking and regulation in the electricity distribution sector," *Servizi Pubblici: Nuovo tendenze nella regolametazione nella produzione et nel finanziamento. Franco Angeli, Milano,* pp. 159-176, 2007.

[2] T. Jamasb and M. Pollitt, "International benchmarking and regulation: an application to European electricity distribution utilities," *Energy Policy,* vol. 31, pp. 1609-1622, 2003.

[3] C.-F. Chien, F.-Y. Lo, and J. T. Lin, "Using DEA to measure the relative efficiency of the service center and improve operation efficiency through reorganization," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 18, pp. 366-373, 2003.

[4] R. Sanhueza, H. Rudnick, and H. Lagunas, "DEA efficiency for the determination of the electric power distribution added value," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 19, pp. 919-925, 2004.

[5] M. Simab and M.-R. Haghifam, "Using integrated model to assess the efficiency of electric distribution companies," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 25, pp. 1806-1814, 2010.

[6] W. Qingran and Z. Lizi, "Transmission-Distribution Pricing Regulation Based on Yardstick Competition Incorporated with Market Equilibrium," in *Management and Service Science, 2009. MASS'09. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.

[7] J. Tanure, C. M. V. Tahan, and J. M. Lima, "Establishing quality performance of distribution companies based on Yardstick regulation," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 21, pp. 1148-1153, 2006.

[8] M. Simab, K. Alvehag, L. Söder, and M.-R. Haghifam, "Designing reward and penalty scheme in performance-based regulation for electric distribution companies," *IET generation, transmission & distribution,* vol. 6, pp. 893-901, 2012.

[9] M. Simab and M. R. Haghifam, "Quality performance based regulation through designing reward and penalty scheme for electric distribution companies," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* vol. 43, pp. 539-545, 2012.

[10] M. Resende, "Relative efficiency measurement and prospects for yardstick competition in Brazilian electricity distribution," *Energy Policy,* vol. 30, pp. 637-647, 2002.

[11] C.-Y. Lee, "Distinguishing operational performance in power production: a new measure of effectiveness by DEA," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 30, pp. 3160-3167, 2015.

[12] M. Niu and Z. Xu, "Efficiency ranking-based evolutionary algorithm for power system planning and operation," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 29, pp. 1437-1438, 2014.

[13] K. Li and B. Lin, "Impact of energy conservation policies on the green productivity in China's manufacturing sector: Evidence from a three-stage DEA model," *Applied Energy,* vol. 168, pp. 351-363, 2016.

[14] D. Parker, "Price cap regulation, profitability and returns to investors in the UK regulated industries," *Utilities Policy,* vol. 6, pp. 303-315, 1997.

[15] S. Viljainen, "Regulation design in the electricity distribution sector. Theory and practice," *Acta Universitatis Lappeenrantaensis,* vol. 8, pp. 1-134, 2006.

[16] E. Fumagalli, L. Lo Schiavo, and F. Delestre, *Service quality regulation in electricity distribution and retail*, 2007.

[17] J. C. Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*: Kluwer Academic Publishers, 1981.

[18] X. Wang, Y. Wang, and L. Wang, "Improving fuzzy c-means clustering based on feature-weight learning," *Pattern Recognition Letters,* vol. 25, pp. 1123-1132, 2004.

[19] W.-L. Hung, M.-S. Yang, and D.-H. Chen, "Bootstrapping approach to feature-weight selection in fuzzy c-means algorithms with an application in color image segmentation," *Pattern Recognition Letters,* vol. 29, pp. 1317-1325, 2008.

[20] Y. Xie, V. V. Raghavan, and X. Zhao, "3M algorithm: finding an optimal fuzzy cluster scheme for proximity data," in *Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on*, 2002, pp. 627-632.

[21] A. Charnes, W. W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *European journal of operational research,* vol. 2, pp. 429-444, 1978.

[22] L. M. Seiford and J. Zhu, "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation," *European Journal of Operational Research,* vol. 142, pp. 16-20, 2002.

زیرنویس‌ها

۱ Data Envelopment Analysis
۲ Customer Average Interruption Duration Index
۳ Customer Average Interruption Frequency Index
۴ Bootstrapping Technique
۵ Slack Analysis
۶ Weighted Fuzzy c-means Clustering
۷ Partition Coefficient
۸ Classification Entropy
۹ Fukuyama-Sugeno's Index
۱۰ Xie-Beni Index
۱۱ Strong Law of Large Numbers
۱۲ Continuity of Supply
۱۳ System Average Interruption Frequency Index
۱۴ System Average Interruption Duration Index
۱۵ Sector Customer Damage Function

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.5.5]