مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال شانزدهم، شماره چهارم (پیاپی ۶۳)، زمستان ۹۸، ص ص ۱۳۱-۱۰۹
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

ارزیابی کارایی هزینه با رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها با در نظرگرفتن خروجی‌های نامطلوب مبتنی بر اصل دسترسی‌پذیری ضعیف (مطالعه موردی: ٥٦ نیروگاه حرارتی تولید برق کشور)

مهدی کرمی خرم آبادی [۱]، مجید یاراحمدی [۲*]، مجتبی غیاثی [۳]
۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه لرستان، گروه ریاضی و علوم کامپیوتر، خرم آباد، ایران
۲- استادیار، دانشگاه لرستان، گروه ریاضی و علوم کامپیوتر، خرم آباد، ایران
۳- استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه مدیریت، شاهرود، ایران

رسید مقاله: ۱۹ اسفند ۱۳۹۷
پذیرش مقاله: ۲۷ شهریور ۱۳۹۸

چکیده
کارایی هزینه در تحلیل پوششی داده‌ها موضوعی مهم و برجسته می‌باشد. به همین دلیل تمرکز روی این موضوع از اهمیت خاصی برخوردار است. این مقاله مدل کارایی هزینه‌ای کلاسیک را که در آن تمامی قیمت‌های ورودی برای هر واحد تصمیم‌گیرنده ثابت و شناخته شده است، با در نظرگرفتن خروجی‌های نامطلوب با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف توسعه می‌دهد. مدل پیشنهاد شده در حالت بازده به مقیاس متغیر یک مدل غیرخطی می‌باشد که برای سهولت حل خطی‌سازی شده است. علاوه بر این برای شبیه‌سازی مدل‌های پیشنهادی و نشان دادن قابلیت‌های علمی آن‌ها، ۵۶ نیروگاه حرارتی تولید برق کشور در سال ۱۳۹۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهدکه تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و همچنین بازده به مقیاس متغیر، بالاترین کارایی هزینه‌ای متعلق به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و بخاری بوده است. علاوه بر این، میانگین کارایی هزینه‌ای نیروگاه‌های مورد بررسی در سال ۱۳۹۴، تحت فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر به ترتیب برابر با ۳۶ و ۵۴ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: کارایی هزینه، خروجی‌های نامطلوب، اصل دسترسی‌پذیری ضعیف، تحلیل پوششی داده‌ها.

۱ مقدمه
تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است و ابتدا آن را چارنز و همکارانش [۱] ارایه دادند. این روش برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده ($DMUs$) به کار می‌رود که وظایف یکسانی انجام می‌دهند، مانند سنجش و مقایسه کارایی نسبی واحدهای سازمانی نظیر ادارات دولتی یک وزارت‌خانه،

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: yarahmadi.m@lu.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

مدارس، بیمارستان‌ها، فروشگاه‌های زنجیره‌ای، شعب بانک‌ها و موارد مشابهی که در آن‌ها واحدهای تصمیم‌گیری همگنی وجود دارد. همچنین تحلیل پوششی داده‌ها به طور گسترده‌ای در الگوبرداری، بهبود مستمر و تحلیل استراتژیک به کار می‌رود.

یکی از مهم‌ترین اطلاعات به‌دست آمده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی هزینه واحدهای تصمیم‌گیرنده است. در واقع یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تحلیل تولید سازمان‌ها، اندازه‌گیری کارایی هزینه و درآمد آن‌ها می‌باشد [۲]. مدل کارایی هزینه، جهت محاسبه‌ی کارایی هزینه DMU_o، در واقع در پی یافتن واحدی می‌باشد که کم‌ترین هزینه را برای خرید ورودی‌های نابیش‌تر از ورودی‌های واحد تحت ارزیابی، برای تولید خروجی‌هایی برابر با خروجی‌های واحد تحت ارزیابی، مصرف کند. محاسبات کارایی هزینه‌ای شامل مواردی است که قیمت‌ها در هر واحد تصمیم‌گیرنده دقیقاً معلوم و شناخته شده (برای جزییات بیش‌تر به مقالات تن [۳]، جهانشاهلو و همکاران [۴]، غیاثی [۵]، خانجانی شیراز و همکاران [۶]، سید بویر و همکاران [۷]، اشرفی و منصوری کلیبر [۸] مراجعه نمایید.) و حتی مواردی که اطلاعات قیمت‌ها در هر واحد تصمیم‌گیرنده مبهم و نادقیق (برای جزییات بیش‌تر به مقالات تامپسون و همکاران [۹]، اسچافنیت و همکاران [۱۰]، کاسمانن و پست [۱۲،۱۱]، کمانهو و دیسن [۱۳]، مصطفایی و سلجوقی [۱۴]، فنگ و هچنگ [۱۵]، باقرزاده ولامی [۱۶]، پوری و یاداو [۱۷] مراجعه نمایید.) می‌باشد. این موارد نشان می‌دهد که مدل‌های DEA می‌توانند یک تقریب قوی از کارایی هزینه‌ای؛ حتی در حالتی ارایه دهند که قیمت‌ها نامعلوم هستند. کارایی هزینه‌ای ابتدا توسط فارل [۲] و سپس توسط فار و همکاران [۱۸،۱۹] توسعه داده شد. در جایی که اطلاعات قیمت ورودی‌ها در هر DMU در دسترس هست، ارزیابی کارایی هزینه‌ای می‌تواند بر اساس روش فارل انجام گردد و در بقیه موارد، که قیمت‌های دقیق ورودی‌ها در هر DMU شناخته شده نیست و فقط کران‌های بالا و پایین این قیمت‌ها در دسترس می‌باشند، لازم است که یک روش مناسب جهت محاسبه اندازه کارایی پیشنهاد شود. پژوهش‌ها بر روی برآورد کارایی هزینه‌ای با قیمت‌های نامعلوم و نادقیق نخستین بار توسط تامپسون و همکاران [۹] و اسچافنیت و همکاران [۱۰] بنیان نهاده شد. نتیجه پژوهش‌های آن‌ها شامل محاسبه‌ی یک کران بالا برای کارایی هزینه‌ای با استفاده از تکنیک های وزنی - محدودیتی در شکل مخروط ناحیه اطمینان ورودی (تامپسون و همکاران [۲۰]) بوده است و همچنین نیاز به برآورد کران پایین کارایی هزینه‌ای اولین بار توسط کاسمانن و پست [۱۱] مطرح شد. آن‌ها مدل‌های جدید DEA را برای محاسبه‌ی کران‌های بالا و پایین اندازه کارایی هزینه پیشنهاد کردند. کمانهو و دیسن [۱۳] برخی از مدل‌های برآورد کران‌های کارایی هزینه را با استفاده از محدودیت‌های وزنی با فرض در نظر گرفتن قیمت‌های ورودی نامشخص توسعه دادند. جهانشاهلو و همکاران [۲۱] نسخه‌ی ساده‌تری از مدل کارایی هزینه‌ای مطرح شده توسط کمانهو و دیسن [۱۳] ارایه کردند، مدلی که آن‌ها برای اندازه‌گیری کارایی هزینه ارایه دادند حجم محاسبات را به طور قابل ملاحظه‌ای از طریق کاهش محدودیت‌ها و متغیرها کاهش داد. باقرزاده ولامی [۱۶] مدل کارایی هزینه ارایه شده توسط فارل را با فرض در نظرگرفتن قیمت‌های ورودی از نوع اعدادی فازی مثلثی توسعه داد. امیرتیموری و همکاران [۲۲] دو مدل مبتنی بر DEA برای به‌دست آوردن کران بالا و پایین کارایی هزینه برای هر واحد تصمیم‌گیرنده با دیدگاه خوشبینانه و بدبینانه ارایه دادند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

سند چشم‌انداز ۱۴۰۴، ایران را توسعه‌یافته، فعال و تأثیرگذار در اقتصاد جهانی معرفی می‌کند، بر مبنای این سند، یکی از راه‌های اساسی موفقیت کشور، افزایش توان رقابت با سایرکشورهای منطقه مبتنی بر نوآوری، بهبود کارایی و بهره‌وری تولید داخلی است که رشد و توسعه اقتصادی کشور را با ملاحظات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ترکیب می‌کند [۲۳]. اغلب واحدهای کسب وکار از جمله کارخانجات، بیمارستان‌ها، مراکز تجاری، علاوه بر خروجی‌های مطلوب، خروجی‌های نامطلوبی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، پسماندهای تولید، فاضلاب‌های مسموم، مواد مضر معلق در هوا، ضایعات و اثرات نامطلوب دیگری مانند آلودگی‌های صوتی تولید می‌کنند. از این رو مدل‌سازی این خروجی‌ها همواره در تئوری اقتصاد و تولید مورد توجه بوده است. وجود خروجی‌هایی از این قبیل، تحت عنوان عوامل محیطی، نقش مهمی در محاسبه میزان کارایی زیست‌محیطی این واحدها دارند. در ارزیابی چنین واحدهایی، هدف استفاده از روشی است که علاوه بر سازگاری با مفاهیم تئوری تولید، به کمک آن قادر به کاهش خروجی‌های نامطلوب و افزایش خروجی‌های مطلوب باشیم [۲۴].

به عنوان مثال، در یک نیروگاه حرارتی، الکتریسیته تولید شده خروجی مطلوب و مقدارهای NO_2 و CO_2 تولید شده خروجی‌های نامطلوب هستند. در راستای ارزیابی کارایی واحدهای با خروجی‌های نامطلوب مبتنی بر مدل‌های DEA رویکردهای متفاوتی مطرح شده است، یکی از این رویکردها در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب به عنوان ورودی مطلوب (یا دسترسی پذیری قوی خروجی‌های نامطلوب) است. مزیت استفاده از این روش این است که می‌توان به ورودی‌های مختلف، وزن‌های متفاوتی داد و کارایی زیست‌محیطی را بر اساس وزن‌هایی که به ورودی‌ها داده می‌شود، محاسبه کرد [۲۵]. این روش به اختصار INP نامیده می‌شود، از جمله پژوهش‌های انجام شده بر پایه این روش می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط هایلو و ویمن [۲۶]، کورهونن و لوپتاسیک [۲۷]، یانگ و پولیت [۲۸]، اشاره کرد. فار و گراسکوف [۲۹] معتقدند که از نظر فنی امکان‌پذیر نیست که ورودی‌های مطلوب و خروجی‌های نامطلوب جانشین هم شوند، به عنوان مثال در نیروگاه تولید برق با سوخت زغال‌سنگ این امکان وجود ندارد که برای تولید سطح مشخص از نیرو، SO_2 را جایگزین زغال‌سنگ بکنیم. از طرفی سیفورد و ژو [۳۰] بیان کردند که اگر خروجی‌های نامطلوب به عنوان ورودی‌های مطلوب در نظر گرفته شوند نتایج حاصل از روش DEA فرایند واقعی تولید را منعکس نمی‌کنند، ازطرفی ما به دنبال کاهش خروجی‌های نامطلوب و افزایش خروجی‌های مطلوب هستیم؛ یعنی بهینه‌سازی همزمان دو هدف متضاد با این دو نوع خروجی مدنظر خواهد بود که در روش‌های معمولی DEA این مساله مدنظر قرار نمی‌گیرد.

از دیگر رویکردها تحت عنوان روش‌های انتقال داده مطرح شده‌اند. در این روش‌ها، با استفاده از توابع انتقال، خروجی‌های نامطلوب را به خروجی‌های مطلوب تبدیل می‌کنند؛ لذا، بر اساس این روش‌ها نحوه مشارکت خروجی‌های نامطلوب بر پایه انتقال می‌باشد. یکی از روش‌های انتقال روش معکوس جمعی است این روش به اختصار ADD نامیده می‌شود در این روش خروجی‌های نامطلوب U، به خروجی‌های مطلوب با مقدار $f(U) = -U$ منتقل می‌گردند. این روش نخستین بار توسط کوپمن [۳۱] پیشنهاد شد و توسط برگ و همکاران [۳۲] مورد استفاده قرار گرفته، و توسعه داده شده است. نوع دیگری از انتقال بر اساس $f(U) = -U + \beta$ می‌باشد، این روش به اختصار $TR\beta$ نامیده می‌شود و همه چیز وابسته به β است، از جمله کسانی که از این روش

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

استفاده کردند می‌توان به علی و سیفورد [۳۳]، اسچیل [۳۴]، سیفورد و ژو [۳۰]، وینچه و همکاران [۳۵]، لیو و همکاران [۳۶] اشاره کرد. نوع دیگری از انتقال بر اساس $f(U)=1/U$ می‌باشد که معکوس حاصل ضربی نامیده می‌شود و به اختصار آن را با MLT نمایش می‌دهند، این روش انتقال توسط گولانی و رول [۳۷] پیشنهاد شد. از جمله کسانی که از این روش انتقال استفاده کردند، می‌توان به لاول و همکاران [۳۸]، آنانوسپولوس و تاناسولیس [۳۹] اشاره کرد. کوپر و همکاران [۴۰] معتقدند که این روش منجر به تغییر شکل مرزهای کارایی می‌شود و ممکن است تفاسیر متفاوتی از وضعیت کارایی واحد تحت ارزیابی به‌وجود آید.

رویکرد اندازه‌گیری هایپربولیک (یا هذلولی) یکی دیگر از رویکردهای برخورد با خروجی‌های نامطلوب می‌باشد. در سال ۱۹۸۳ پیتمن [۴۱] مقاله‌ای با موضوع برخورد با خروجی‌های نامطلوب به انتشار رسانده است، که در آن مقاله، پیتمن مدلی با استفاده از قیمت‌های سایه ارایه داده است. فار و همکاران [۴۲] با الهام گرفتن از مقاله پیتمن، به فکر کاهش مقدار خروجی‌های نامطلوب افتادند، آن‌ها برای کاهش خروجی‌های نامطلوب، باید آن‌ها را بر روی عددی بزرگ‌تر از یک تقسیم کنند، به طوری که جواب در فضای شدنی قرار داشته باشد و همچنین قادر به محاسبه کارایی در حضور خروجی‌های نامطلوب باشد، آنها نتایج خود را در سال ۱۹۸۹ تحت مقاله "مقایسه بهره‌وری چندجانبه وقتی که بعضی از خروجی‌ها نامطلوب هستند: با رویکرد ناپارامتریک " به چاپ رساندند. آن‌ها در این مقاله نظریه متفاوتی را ارایه کردند که در آن خروجی‌های مطلوب و نامطلوب در یک مدل با هم ترکیب می‌شوند، آن‌ها در این روش اجازه می‌دهند که خروجی‌های مطلوب افزایش، و به همان اندازه و در همان زمان خروجی‌های نامطلوب با همان سهم و تناسب کاهش یابند، این روش به عنوان روش هایپربولیک یا هذلولی نام‌گذاری شده است. و یک نکته قابل توجه این است که دو تفاوت اساسی بین مدل فار و همکاران و مدل پیتمن وجود دارد، تفاوت اول: داده‌های مورد نیاز دو مدل باهم متفاوت است. مدل پیتمن نیازمند قیمت تمام خروجی‌های نامطلوب بوده، در حالی که مدل فار و همکاران به قیمت‌های خروجی‌های نامطلوب نیاز ندارد و تنها از مقادیر خروجی‌های نامطلوب استفاده می‌کند. و دومین تفاوت بین مدل فار و همکاران نسبت به مدل پیتمن این است که مدل فار و همکاران برای هر DMU یک مقدار بهبود می‌دهد؛ درحالی‌که مدل پیتمن چنین کاری را انجام نمی‌دهد. و از نواقص این رویکرد می‌توان به این مورد اشاره کرد، که این روش به یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی منجر می‌شود که برای جامعه‌ای با DMUها وخروجی‌ها و ورودی‌های زیاد علاوه بر زمان‌بر بودن، حل آن مشکل و با خطا همراه است. با تمام این توضیحات که گفته شد، با جرأت می‌توان ادعا کرد که مقاله فار و همکاران [۴۲] در برخورد با خروجی‌های نامطلوب یکی از بنیادی‌ترین مقالات در حوزه خروجی‌های نامطلوب محسوب می‌شود. از طرف دیگر، رویکرد جدیدی برای مدل‌سازی خروجی‌های نامطلوب در DEA ارایه گردیده که تحت عنوان اصل دسترسی‌پذیری ضعیف می‌باشد. در سال‌های اخیر بسیاری از محققان سعی کردند خروجی‌های نامطلوب را در چارچوب DEA مدل کنند، در رابطه با این موضوع فار و همکاران [۴۲،۴۳] اولین کسانی بودند که تأکید بر مدل‌سازی خروجی‌های نامطلوب تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف را داشتند. شفرد [۴۴،۴۵] اولین بار اصل دسترسی‌پذیری ضعیف بین خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را معرفی کرد، بر اساس این اصل، او فناوری برخورد با خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را ارایه داد. فار و گراسکوف [۴۶] توضیح دادند که

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

اگر خروجی‌های نامطلوب را به عنوان ورودی مطلوب در نظر بگیریم دو مشکل اساسی به وجود می‌آید، اول این‌که اصل دسترسی‌پذیری آزاد بین ورودی‌ها و خروجی‌های نامطلوب باعث می‌شود که مقدار متناهی از ورودی‌ها، بتواند مقدار نامتناهی از خروجی‌های نامطلوب را تولید کند که این با قوانین فیزیکی و اصول پایه‌ای تئوری تولید (شفرد) تناقض دارد، به عنوان مثال با به کار بردن مقدار ثابتی از انرژی، نیروی انسانی، سرمایه و مواد اولیه می‌توان مقدار نامحدوی از خروجی‌های نامطلوب مانند جامدات معلق و غیره تولید کرد، که این از نظر فیزیکی غیر ممکن است. دوم این‌که اصل دسترسی‌پذیری آزاد، ارتباط بین خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را مشخص نمی‌کند، مخصوصاً این موضوع که آلاینده‌ها با همان نسبتی می‌توانند کاهش یابند که خروجی‌های مطلوب کاهش می‌یابند، این ویژگی به اصل دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌های مطلوب و نامطلوب معروف است و همان‌طور که گفتیم اولین بار توسط شفرد مطرح شد. در مدل‌سازی ارایه شده توسط فار و گراسکوف [۴۶] برای استفاده از اصل دسترسی‌پذیری ضعیف در کنترل خروجی‌های نامطلوب تنها یک فاکتور انقباض یکنواخت برای همه DMUها به کار برده می‌شود و مجموعه امکان تولید بر اساس همین فاکتور انقباض تولید می‌شود. سپس کاسمانن [۴۷] فرمول‌بندی غیرپارامتری خود از اصل دسترسی‌پذیری ضعیف را ارایه داد که خاصیت خطی بودن مجموعه فناوری را حفظ می‌کند او در مدل خود برای هر DMU یک فاکتور انقباض جداگانه در نظر گرفت و مجموعه امکان تولید را بر اساس آن ساخت، او همچنین در مقاله‌ی خود استدلال کرد که اصل دسترسی‌پذیری ضعیف شفرد که توسط فار و گراسکوف ارایه شده، درست نیست. بعد از آن فار و گراسکوف [۴۸] در مقاله‌ای بیان کردندکه در مفهوم اولیه شفرد، یک پارامتر دسترسی‌پذیری واحد برای همه‌ی فعالیت‌های خروجی در نظر گرفته شده است، و همچنین ادعا کردند که مجموعه امکان تولید شده توسط مدل‌سازی کاسمانن بزرگ‌تر از حد نیاز برای صدق دادن اصل دسترسی‌پذیری ضعیف شفرد است. در همان سال کاسمانن و پودینوسکی [۴۹]، در مقاله‌ی خود با ارایه یک مثال عددی نشان دادند مجموعه‌ی امکان تولیدکه با فناوری شفرد مدل‌سازی شده توسط فار و گراسکوف که یک فاکتور انقباض را به کار می‌برد شامل همه‌ی نقاط تولید شدنی نبوده و منجر به نقض تحدب، یکی از فرض‌های پایه‌ای مدل، می‌شود. همچنین ثابت کردند مجموعه امکان تولید ساخته شده با فناوری کاسمانن در اصل کمینه‌ی برون‌یابی صدق می‌کند و کوچک‌ترین توسیع محدب (پوسته‌ی محدب) مجموعه امکان تولید با فناوری شفرد است، و تنها در یک مورد خاص این دو مجموعه یکسان هستند [۲۴]. از دیگر پژوهش‌های انجام شده با توجه به اصل دسترسی‌پذیری ضعیف، می‌توان به پودینوسکی و کاسمانن [۵۰]، کاسمانن و کاظمی متین [۵۱]، فنگ [۵۲]، کلهر و کاظمی متین [۵۳]، رشدی و همکاران [۵۴] اشاره کرد.

صنعت برق به دلیل نقش زیربنایی و ارتباط تنگاتنگ با عوامل مؤثر بر رشد اقتصادی، صنعتی پویا و تأثیرگذار است و افزایش کارایی و بهره‌وری در آن از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. در صنعت برق، افزایش تولید از دو روش افزایش عوامل تولید و استفاده بهتر از عوامل تولید با اتخاذ مدیریت بهتر بر این منابع و به کارگیری روش‌های جدیدتر در ترکیب آن‌ها قابل حصول است. بخش تولید برق (نیروگاه‌ها) مهم‌ترین و در عین حال سرمایه برترین بخش در صنعت برق می‌باشد [۵۵]. یکی از راه‌های دستیابی به کارایی بالا در

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

نیروگاه‌های برق، استفاده مناسب از نیروی کار، عملکرد با ظرفیت اسمی نیروگاه جهت تولید برق با استفاده از مفاهیم کارایی و توجه به مدیریت هزینه‌های تولید است؛ بنابراین، افزایش کارایی و بهینه‌سازی منابع، در تمام صنایع کشور به ویژه صنعت برق، راهی مطمئن جهت رسیدن به رشد اقتصادی و توسعه همه جانبه با همان منابع و امکانات موجود است؛ بنابراین با توجه به ضرورت این موضوع و اهمیت نیروگاه‌ها در تولید برق مطمئن و پایدار، هدف از این پژوهش ارزیابی کارایی هزینه‌ای ۵۶ نیروگاه حرارتی تولید برق کشور در سال ۱۳۹۴ با رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها با در نظرگرفتن خروجی‌های نامطلوب مبتنی بر اصل دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌های مطلوب و نامطلوب می‌باشد.

در ادامه بخش‌های مختلف این پژوهش به شرح زیر سازمان‌دهی می‌گردد: در بخش ۲، مفهوم کارایی هزینه بیان می‌شود. سپس در بخش ۳، به مدل‌سازی خروجی‌های نامطلوب در تحلیل پوششی داده‌ها می‌پردازیم. در بخش ۴، ارزیابی کارایی هزینه با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب ارایه می‌شود. در بخش ۵، یک کاربرد تجربی جهت اجرای مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی به آن تشریح شده است. نهایتاً نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی در بخش ۶ آورده می‌شود.

۲ کارایی هزینه

فرض می‌کنیم مجموعه‌ای شامل K واحد تصمیم‌گیرنده $(DMU_k,\ k=1,...,K)$ به شرح زیر داریم، که هر کدام N ورودی را برای تولید M خروجی استفاده می‌کنند:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{x}^k=(x_1^k,...,x_N^k)^T,\quad x_n^k\geq 0,\ \boldsymbol{x}^k\neq 0, && n=1,2,...,N,\\ &\boldsymbol{v}^k=(v_1^k,...,v_M^k)^T,\quad v_m^k\geq 0,\ \boldsymbol{v}^k\neq 0, && m=1,2,...,M, \end{aligned} \qquad (1)$$

همچنین هزینه خریداری مواد اولیه (بردار هزینه) متناظر با بردارهای ورودی را با بردار $\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,...,c_N)^T$ نمایش می‌دهیم. علاوه بر این، این بردار هزینه، مشخص و قابل دسترس و برای همه واحد یکسان است.

همان‌طور که در مقدمه گفته شد در حقیقت مدل کارایی هزینه در پی یافتن واحدی می‌باشد که کم‌ترین هزینه را برای خرید ورودی‌های نابیش‌تر از ورودی‌های واحد تحت ارزیابی، جهت تولید خروجی‌هایی برابر با خروجی‌های واحد تحت ارزیابی مصرف می‌کند. فرض کنید DMU_o واحد تحت ارزیابی باشد، مدل اولیه کارایی هزینه برای ارزیابی DMU_o تحت فرض بازده به مقیاس متغیر[1] (VRS) به صورت زیر می‌باشد:

[1] Variable Returns to Scale

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{n=1}^{N} c_n x_n \\
s.t. \quad & \\
& \sum_{k=1}^{K} z^k x_n^k \le x_n, \qquad n = 1,2,...,N, \\
& \sum_{k=1}^{K} z^k v_m^k \ge v_m^o, \qquad m = 1,2,...,M, \\
& \sum_{k=1}^{K} z^k = 1, \\
& z^k \ge 0, \qquad k = 1,2,...,K \\
& x_n \ge 0, \qquad n = 1,2,...,N.
\end{aligned} \tag{۲}
$$

$z^k\,(k=1,2,...,K)$ و $x_n\,(n=1,2,...,N)$ متغیرهای مدل (۲) هستند، و همچنین x_n نشان دهنده مقدار ورودی مورد نیاز برای تولید مقدار خروجی مشخص می‌باشد. در واقع همان‌طور که گفته شد، مدل (۲) کم‌ترین هزینه را برای تولید خروجی معین، با توجه به بردار هزینه ورودی معین $\boldsymbol{c}$ به دست می‌آورد. اگر $\left(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{z}^*\right)$ جواب بهینه مدل (۲) باشد، کارایی هزینه کلی o امین واحد به صورت زیر می‌باشد:

$$
CE_{VRS}^{o} = \frac{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^*}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^o} = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^*}{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^o}. \tag{۳}
$$

مقدار کارایی هزینه کلی همیشه عددی در بازه $[0,1]$ می‌باشد.

تعریف ۱. DMU_k کارای هزینه نامند اگر و فقط اگر $CE_{VRS}^{k} = 1$.

۳ مدل‌سازی خروجی‌های نامطلوب در تحلیل پوششی داده‌ها

همان‌طور که در مقدمه گفته شد در تحلیل پوششی داده‌ها برخی از خروجی‌ها ممکن است نامطلوب باشند. به عنوان مثال در یک نیروگاه تولید برق، الکتریسیته تولید شده خروجی مطلوب و مقدارهای NO_2 و CO_2 تولید شده خروجی‌های نامطلوب هستند. در این راستا پژوهشگران زیادی به بررسی اثر خروجی‌های نامطلوب در مدل‌های DEA پرداخته‌اند که ما در این میان به رویکرد فار و گراسکوف می‌پردازیم.

فار و همکاران [۴۳،۴۲] اولین کسانی بودند که تأکید بر مدل‌سازی خروجی‌های نامطلوب تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف را داشتند. فار و گراسگوف بر اساس دیدگاه شفرد [۴۵،۴۴]، این اصل را به صورت زیر ارایه دادند:

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

K واحد تصمیم‌گیرنده DMU_k $(k = ۱,...,K)$ را در نظر بگیرید، فرض کنید $\boldsymbol{x} = (x_۱, x_۲, ..., x_N) \in \mathbb{R}_+^N$ بردار ورودی‌ها، $\boldsymbol{v} = (v_۱, v_۲, ..., v_M) \in \mathbb{R}_+^M$ بردار خروجی‌های مطلوب و $\boldsymbol{w} = (w_۱, w_۲, ..., w_J) \in \mathbb{R}_+^J$ بردار خروجی‌های نامطلوب باشند. دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها به این معناست که اگر ورودی‌ها معین باشند، یک کاهش در خروجی‌های نامطلوب به همان نسبت کاهش را در خروجی‌های مطلوب نتیجه دهد. به عبارت دیگر برای مجموعه امکان تولید T داریم:

$$(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}) \in T, ۰ \le \theta \le ۱ \Rightarrow (\boldsymbol{x}, \theta \boldsymbol{v}, \theta \boldsymbol{w}) \in T \qquad (۴)$$

دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها با عنوان "تراکم خروجی[۱]" نیز معروف است. این اصل به طور کلی حاکی از آن است که کاهش برخی خروجی‌ها، نیاز به کاهش متناظر در خروجی‌های دیگر دارد یا اینکه کاهش یک خروجی، بدون کاهش خروجی‌های دیگر امکان‌پذیر نیست. برای فناوری‌هایی که هم خروجی مطلوب و هم خروجی نامطلوب تولید می‌کنند، دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها اغلب روی فناوری زیر بنایی تحمیل شده است، به طوری که کاهش خروجی‌های نامطلوب، نیاز به کاهش مشترک در خروجی‌های مطلوب دارد [۵۶].

برای مثال، اگر با سوزاندن زغال‌سنگ، الکتریسیته (خروجی مطلوب) و دی‌اکسیدگوگرد (خروجی نامطلوب) تولید شود، آن‌گاه طبق اصل دسترسی‌پذیری ضعیف نتیجه می‌دهد که با ثابت نگه‌داشتن ورودی، برای ۱۰٪ کاهش در انتشار دی‌اکسیدگوگرد می‌باید ۱۰٪ کاهش در الکتریسیته تولید شده داشته باشیم [۵۷].

یکی دیگر از راه‌های تصور این موضوع این است که اگر کاهش آلاینده‌ها مدنظر باشد، می‌توان مقداری از بردار ورودی را به تصفیه آلاینده‌ها معطوف داشت که باعث می‌شود ورودی کم‌تری برای تولید الکتریسیته در دسترس باشد، در نتیجه خروجی‌های مطلوب و نامطلوب با هم کاهش می‌یابند [۴۶].

فرض کنید در یک فعالیت تولیدی، N ورودی در تولید M خروجی مطلوب و J خروجی نامطلوب به کار برده شود. $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}_+^N$ بردار مصرف شده و $\boldsymbol{v} \in \mathbb{R}_+^M$، $\boldsymbol{w} \in \mathbb{R}_+^J$ به ترتیب نشان دهنده‌ی بردارهای خروجی‌های مطلوب و خروجی‌های نامطلوب باشند، و مجموعه مشاهدات با K نشان داده شود، فار و گراسکوف مجموعه امکان تولید را طبق اصول زیر ساختند:

۱ F شمول مشاهدات: مجموعه امکان تولید، همه‌ی مشاهدات را در بر می‌گیرد. به عبارت دیگر:

$$\forall k \in \{۱,...,K\} : (x^k, v^k, w^k) \in T \qquad (۵)$$

۲ F دسترسی‌پذیری آزاد برای ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب:

$$\forall (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}),\ \forall \boldsymbol{x}', \forall \boldsymbol{v}' : \big((\boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}) \in T, ۰ \le \boldsymbol{v}' \le \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}' \ge \boldsymbol{x} \Rightarrow (\boldsymbol{x}', \boldsymbol{v}', \boldsymbol{w}) \in T \big) \qquad (۶)$$

۳ F دسترسی‌پذیری ضعیف برای خروجی‌های مطلوب و نامطلوب:

[۱] Output Congestion

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

$$\forall(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w}),\ \forall\theta:\big((\boldsymbol{x},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})\in T,\circ\le\theta\le\text{۱}\Rightarrow(\boldsymbol{x},\theta\boldsymbol{v},\theta\boldsymbol{w})\in T\big) \qquad (\text{۷})$$

٤ F تحدب

فناوری تولید شامل همه $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})$ شدنی است که به‌وسیله $\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})\mid T=\}$ می‌تواند $(\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})$ را تولید کند نمادگذاری می‌شود. به طور معادل مجموعه خروجی‌ها به صورت $P(x)=\{(\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})\mid(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})\in T\}$ نمادگذاری می‌شود. طبق اصول **۱** F تا **٤** F در بالا، فار و همکاران [۴۲،۴۶،۵۸] مجموعه‌های امکان تولید خروجی را با فرض بازده به مقیاس ثابت[۱] (CRS) و همچنین بازده به مقیاس متغیر (VRS) تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها به صورت‌های زیر ارایه دادند:

$$\begin{aligned}P_{CRS}^{FGL}(x)=\{(v,w)\Big|&\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k x_n^k\le x_n, && n=\text{۱},\text{۲},\dots,N,\\ &\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k v_m^k\ge v_m, && m=\text{۱},\text{۲},\dots,M,\\ &\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k w_j^k=w_j, && j=\text{۱},\text{۲},\dots,J,\\ &z^k\ge\circ, && k=\text{۱},\text{۲},\dots,K\}.\end{aligned} \qquad (\text{۸})$$

$$\begin{aligned}P_{VRS}^{FG}(x)=\{(v,w)\Big|&\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k x_n^k\le x_n, && n=\text{۱},\text{۲},\dots,N,\\ &\theta\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k v_m^k\ge v_m, && m=\text{۱},\text{۲},\dots,M,\\ &\theta\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k w_j^k=w_j, && j=\text{۱},\text{۲},\dots,J,\\ &\sum_{k=\text{۱}}^{K}z^k=\text{۱}, &&\\ &z^k\ge\circ, && k=\text{۱},\text{۲},\dots,K,\\ &\circ\le\theta\le\text{۱}\}.\end{aligned} \qquad (\text{۹})$$

پارامتر θ متناظر با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف اجازه‌ی انقباض یکنواخت خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را می‌دهد.

٤ ارزیابی کارایی هزینه با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب

هدف این بخش ارایه مدلی جدید برای اندازه‌گیری کارایی هزینه‌ای با در نظرگرفتن خروجی‌های نامطلوب می‌باشد. ما در بخش قبل رویکرد فار و گراسکوف در نحوه برخورد با خروجی‌های نامطلوب و فناوری‌های امکان تولید ایجاد شده را بر اساس این رویکرد دیدیم، حال در این بخش نحوه اندازه‌گیری کارایی هزینه‌ای را در حضور خروجی‌های نامطلوب بر اساس این رویکرد ارایه می‌دهیم.

[۱] Constant Returns to Scale

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

فرض می‌کنیم مجموعه‌ای شامل K واحد تصمیم‌گیرنده $(DMU_k,\ k=1,...,K)$ به شرح زیر داریم، که هر کدام N ورودی را برای تولید M خروجی مطلوب و J خروجی نامطلوب استفاده می‌کنند:

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{x}^k=(x_1^k,...,x_N^k)^T,\quad x_n^k\geq 0,\ \boldsymbol{x}^k\neq 0, && n=1,2,...,N,\\
&\boldsymbol{v}^k=(v_1^k,...,v_M^k)^T,\quad v_m^k\geq 0,\ \boldsymbol{v}^k\neq 0, && m=1,2,...,M,\\
&\boldsymbol{w}^k=(w_1^k,...,w_J^k)^T,\quad w_j^k\geq 0,\ \boldsymbol{w}^k\neq 0, && j=1,2,...,J,
\end{aligned} \qquad (10)$$

همچنین هزینه خریداری مواد اولیه (بردار هزینه) متناظر با بردارهای ورودی را با بردار $\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,...,c_N)^T$ نمایش می‌دهیم. علاوه بر این، این بردار هزینه مشخص و قابل دسترس و برای همه واحد یکسان است.

فرض کنید DMU_o واحد تحت ارزیابی باشد، مدل‌های کارایی هزینه‌ای را برای ارزیابی DMU_o با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب بر اساس مجموعه‌های امکان تولید خروجی با فرض CRS و همچنین VRS تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها به صورت‌های زیر ارایه می‌دهیم:

$$\begin{aligned}
&\min \quad FG_{CRS}=\sum_{n=1}^{N}c_n x_n\\
&s.t\\
&\sum_{k=1}^{K}z^k x_n^k\leq x_n, && n=1,2,...,N,\\
&\sum_{k=1}^{K}z^k v_m^k\geq v_m^o, && m=1,2,...,M,\\
&\sum_{k=1}^{K}z^k w_j^k=w_j^o, && j=1,2,...,J,\\
&z^k\geq 0, && k=1,2,...,K.
\end{aligned} \qquad (11)$$

$$\begin{aligned}
NLP:\quad &\min \quad FG_{VRS}=\sum_{n=1}^{N}c_n x_n\\
&s.t\\
&\sum_{k=1}^{K}z^k x_n^k\leq x_n, && n=1,2,...,N,\\
&\theta\sum_{k=1}^{K}z^k v_m^k\geq v_m^o, && m=1,2,...,M,\\
&\theta\sum_{k=1}^{K}z^k w_j^k=w_j^o, && j=1,2,...,J,\\
&\sum_{k=1}^{K}z^k=1,\\
&z^k\geq 0, && k=1,2,...,K,\\
&0\leq\theta\leq 1
\end{aligned} \qquad (12)$$

که در آن‌ها $z^k\ (k=1,2,...,K)$، $x_n\ (n=1,2,...,N)$ و θ متغیرهای مدل‌های (۱۱) و (۱۲) هستند؛ و همچنین x_n نشان‌دهنده مقدار ورودی مورد نیاز برای تولید مقدار خروجی (مطلوب و نامطلوب) مشخص می‌باشد. درواقع

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

مدل‌های (۱۱) و (۱۲) کم‌ترین هزینه را برای تولید خروجی معین در دو حالت CRS و VRS تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌ها، با توجه به هزینه ورودی معین $\boldsymbol{c}$ به دست می‌آورد.

مدل (۱۲) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشد، مشابه با آنچه کاسمانن [۴۷] انجام داد، می‌توان مدل (۱۲) را خطی کرد، برای این کار وزن های DMU_k؛ یعنی z^k را به دو مولفه به صورت زیر تجزیه می کنیم:

$$z^k = \underbrace{\theta z^k}_{\lambda^k} + \underbrace{(1-\theta)z^k}_{\mu^k} \qquad (k = 1,2,...,K) \tag{۱۳}$$

مولفه‌ی اول؛ یعنی λ^k، نشان‌دهنده‌ی قسمتی از خروجی واحد kام است که فعال باقی می‌ماند (یعنی $\lambda^k = \theta z^k$). و همچنین مولفه‌ی دوم؛ یعنی μ^k نشان‌دهنده‌ی قسمتی از خروجی واحد kام است که سطح فعالیت را کاهش می‌دهد (یعنی $\mu^k = (1-\theta)z^k$). با به کار بردن این نمادگذاری در مدل غیرخطی (۱۲)، معادل خطی آن به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} LP: \quad & \min \quad FG_{VRS} = \sum_{n=1}^{N} c_n x_n \\ & s.t \\ & \sum_{k=1}^{K} (\lambda^k + \mu^k) x_n^k \le x_n, \qquad n = 1,2,...,N, \\ & \sum_{k=1}^{K} \lambda^k v_m^k \ge v_m^o, \qquad m = 1,2,...,M, \\ & \sum_{k=1}^{K} \lambda^k w_j^k = w_j^o, \qquad j = 1,2,...,J, \\ & \sum_{k=1}^{K} (\lambda^k + \mu^k) = 1, \\ & \lambda^k, \mu^k \ge 0, \qquad k = 1,2,...,K, \end{aligned} \tag{۱۴}$$

اگر $(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{z}^*)$ و $(\boldsymbol{x}^{**}, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$ به ترتیب جواب بهینه مدل‌های (۱۱) و (۱۴) باشند، کارایی هزینه کلی o امین واحد در دو حالت CRS و VRS به صورت‌های زیر می‌باشد:

$$CE_{CRS}^o = \frac{FG_{CRS}^*}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^o} = \frac{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^*}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^o} = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^*}{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^o} \tag{۱۵}$$

$$CE_{VRS}^o = \frac{FG_{VRS}^{**}}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^o} = \frac{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^{**}}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x}^o} = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^{**}}{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n^o} \tag{۱۶}$$

مثال عددی ۱. پنج واحد تصمیم‌گیرنده A، B، C، D و E با در نظرگرفتن هزینه‌های ورودی ثابت $\boldsymbol{c}$ مطابق با جدول ۱ را در نظر بگیرید که هر کدام از این واحدها با مصرف ورودی x، خروجی مطلوب v و خروجی نامطلوب w را تولید می‌کنند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

جدول ۱. داده‌های مثال عددی ۱

DMU	x	v	w	c
A	۸	۷	۲	۱/۵
B	۶	۲	۱	۱/۵
C	۷	۷	۴	۱/۵
D	۹	۸	۵	۱/۵
E	۲	۶	۳	۱/۵

حال با اجرای مدل‌های پیشنهاد شده برای داده‌های جدول ۱ (به ترتیب با استفاده مدل‌های (۱۱) و (۱۴) و رابطه‌های (۱۵) و (۱۶)) نتایج حاصل از ارزیابی کارایی هزینه‌ای کلی تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف برای خروجی‌ها در جدول۲ قابل مشاهده خواهد بود.

جدول ۲. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی هزینه‌ای

DMU	تحت فرض CRS	تحت فرض VRS
A	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
B	۰/۱۱۱	۰/۳۳۳
C	۰/۳۸۱	۰/۷۸۶
D	۰/۳۷۰	۱/۰۰۰
E	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

بر اساس جدول ۲ واحدهای A و E تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف و همچنین واحدهای A، D و E تحت فرض VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای واحد می‌باشند.

۵ مطالعه موردی و تجزیه و تحلیل نتایج آن

حال در این بخش به بررسی کارایی هزینه‌ای در نیروگاه‌های تولید برق کشور می‌پردازیم. اهمیت نیروگاه‌های تولید برق کشور بر هیچ کس پوشیده نیست. صنعت برق به خاطر نقش زیربنایی و ارتباط زیادی که با کلیه عوامل موثر بر رشد اقتصادی دارد، صنعتی پویا و تاثیرگذار است. انرژی برق امروزه به عنوان عاملی کلیدی در توسعه‌ی صنعتی، رونق اقتصادی و رفاه اجتماعی شناخته می‌شود. تأمین برق صنایع و خدمات مختلف (از جزیی‌ترین خدمات برقی گرفته تا تأمین برق بزرگ‌ترین کارخانه‌ها) امر مهمی است که هر روز به وسیله‌ی صنعت برق کشور صورت می‌گیرد که همین اهمیت بالای صنعت برق و نیروگاه‌ها بهانه‌ای برای بررسی وضعیت کارایی هزینه‌ای نیروگاه‌ها می‌باشد. کشور ما به دلیل دارا بودن منابع غنی نفت و گاز (به منزله‌ی سوخت اصلی نیروگاه‌های حرارتی) در استفاده از این نیروگاه‌ها دارای مزیت نسبی است. باید خاطر نشان ساخت که اکثر نیروگاه‌های برق کشور از نوع حرارتی بوده و نزدیک به ۹۰ درصد برق مورد نیاز کشور از ناحیه این نیروگاه‌ها

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

تأمین می‌گردد. به طورکلی انواع نیروگاه‌های تولید برق عبارتند از: نیروگاه‌های اتمی، نیروگاه‌های آبی، نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی، چرخه ترکیبی، دیزل، بخار و گاز توأم)، نیروگاه‌های خورشیدی و سایر نیروگاه‌ها [۵۹].

اهمیت استراتژیک منابع مورد استفاده در نیروگاه‌های حرارتی در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران فوق‌العاده بالا است؛ زیرا این منابع تجدیدناپذیر بوده و باید به صورت بهینه بهره‌برداری شوند. علاوه بر این اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های تولید برق را نمی‌توان نادیده گرفت؛ زیرا از یک سو توجه کشورهای جهان به مسایل زیست‌محیطی در پیمان‌نامه‌های بین‌المللی مانند کیوتو نمایان شده است و از سوی دیگر این اثرات در سیاست‌های پایش زیست‌محیطی کشور مورد توجه قرار گرفته است [۶۰]؛ بنابراین این پژوهش بر روی نیروگاه‌های حرارتی متمرکز شده است. از این نیروگاه‌ها نیز، نیروگاه‌های دیزل به دلیل فناوری قدیمی و سایر مسایل زیست‌محیطی و فنی تنها در شرایط خاصی (مانند تأمین برق برخی پادگان‌ها، برخی مناطق که امکان تأمین برق از شبکه سراسری مقدور نیست) مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ لذا در اینجا به سایر نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی، چرخه ترکیبی) می‌پردازیم. این نیروگاه‌ها به دلیل مکانیزم و ساختار مشابهی که دارند، واحدهای مشابه محسوب می‌شوند و در استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی کارایی هزینه‌ای این نیروگاه‌ها هیچ مشکلی وجود ندارد [۵۹].

در این پژوهش هر نیروگاه را، یک واحد تصمیم‌گیری در نظر می‌گیریم و همچنین اساس انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در ارزیابی عملکرد نیروگاه‌ها به روش تحلیل پوششی داده‌ها می‌باشد. عدم انتخاب صحیح متغیرهای موردنیاز، نتایج ارزیابی را بی‌اعتبار می‌سازد. اساس انتخاب ورودی و خروجی‌های مدل *DEA* میزان تأثیر آن‌ها در عملکرد نیروگاه و نیز در دسترس بودن داده‌های مربوطه می‌باشد. متغیرهایی که در این قسمت انتخاب شده‌اند متغیرهایی هستند که یا از مطالعات مربوط به ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی با استفاده از روش *DEA* در کشورهای مختلف استخراج شده‌اند و یا با استفاده از نظرات کارفرما شناسایی شده است، در واقع ملاک انتخاب این متغیرها نقش آن‌ها در ارزیابی کارایی هزینه‌ای نیروگاه‌ها، به کارگیری آن‌ها در مطالعات مشابه و در دسترس بودن داده‌های مربوطه بوده است؛ بنابراین متغیرهای ورودی و خروجی این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

الف) متغیرهای ورودی

۱- نیروی کار: منظور از این نیروی کار در این پژوهش، تعداد نیروی انسانی شاغل در هر نیروگاه بر حسب نفر می‌باشد. لازم به ذکر است که هدف ما تفکیک نیروهای متخصص از غیرمتخصص بود؛ ولی متأسفانه در طول پژوهش دسترسی به آمار تفکیک شده نیروی انسانی امکان‌پذیر نشد.

قیمت نیروی کار: متوسط حقوق در سال ۱۳۹۴ در نظر گرفته شده است.

۲- ظرفیت نصب شده (ظرفیت اسمی): در این پژوهش، به جای شاخص سرمایه از متغیر جایگزین آن؛ یعنی ظرفیت اسمی در هر نیروگاه بر حسب مگاوات استفاده می‌کنیم. علت این امر وجود مشکلاتی در نیروگاه‌هاست که مانع از محاسبه سرمایه می‌شود.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

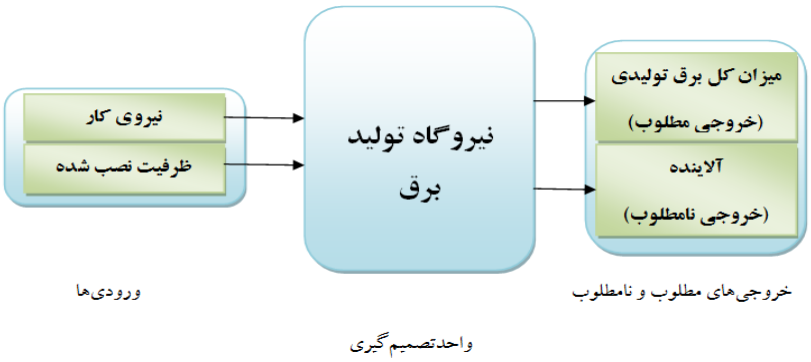
قیمت ظرفیت نصب شده: از میانگین ظرفیت نصب شده این ۵۶ نیروگاه به عنوان قیمت ظرفیت نصب شده استفاده شده است.

ب) متغیرهای خروجی

۱- میزان کل برق تولیدی: خروجی مطلوب حاصل از هر نیروگاه، میزان کل برق تولید شده می‌باشد که بر حسب مگاوات ساعت اندازه‌گیری می‌شود.

۲- آلاینده: این متغیر از نظر منطقی یک خروجی نامطلوب به حساب می‌آید که بر خلاف خروجی مطلوب تمایل به کاهش آن داریم.

شکل ۱ ساختار یک نیروگاه تولید برق به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار یک نیروگاه به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری

یکی از مهم‌ترین مراحل پژوهش جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز در رابطه با تحقیق می‌باشد. جامعه آماری پژوهش حاضر شامل ۵۶ نیروگاه تولید برق تحت پوشش وزارت نیرو می‌باشد. آمار و اطلاعات گردآوری شده مربوط به هر یک از متغیرهای فوق (برای هر نیروگاه) مربوط به سال ۱۳۹۴ می‌باشد که از شرکت مادر تخصصی توانیر گردآوری شده است و تنها خلاصه‌ای از داده‌های آماری در جدول ۳ آورده شده است. برای رعایت حقوق مالکیت معنوی (نام تجاری) نیروگاه‌های تولید برق از ذکر نام واحدهای تحت ارزیابی خودداری شده است. همچنین شایان ذکر است جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار *GAMS* 24.5 استفاده شده است.

جدول ۳. خلاصه داده‌های آماری نیروگاه‌های منتخب در سال ۱۳۹۴

نام متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار
نیروی کار	۴۲	۲۸۶۸	۷۹۵/۷۸۵۷	۶۰۵/۴۶۹
ظرفیت نصب شده	۵۳	۷۶۵	۲۵۲/۸۰۳۶	۱۷۵/۳۱۱۴
میزان کل برق تولیدی	۶۱/۴۵۲	۱۵۱۶۹۵۲۲	۳۸۷۷۳۸۷	۳۶۹۹۹۱۵
آلاینده	۲۶۲۲	۲۹۳۶۵۴۷	۸۳۲۶۶۱	۶۹۳۵۱۸/۸

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

در نهایت کارایی هزینه‌ای کلی این ۵۶ نیروگاه تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف به ترتیب با استفاده از مدل‌های (۱۱) و (۱۴) و رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) ارزیابی گردیده است و نتایج حاصل در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ٤. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی هزینه‌ای نیروگاه‌های منتخب در سال ۱۳۹۴

نیروگاه	تحت فرض CRS	تحت فرض VRS
	نیروگاه‌های چرخه ترکیبی	
CC۱	۰/۹۰۱	۱/۰۰۰
CC۲	۰/۵۱۹	۰/۵۳۲
CC۳	۰/۳۱۳	۰/۳۳۲
CC۴	۰/۶۲۴	۰/۶۴۹
CC۵	۰/۵۵۲	۰/۶۲۹
CC۶	۰/۲۵۳	۰/۳۷۳
CC۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
CC۸	۰/۲۸۸	۰/۲۹۱
CC۹	۰/۱۹۵	۰/۲۶۳
CC۱۰	۰/۱۱۷	۰/۱۲۳
CC۱۱	۰/۱۹۵	۰/۲۹۸
CC۱۲	۰/۶۴۹	۱/۰۰۰
CC۱۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
CC۱۴	۰/۲۳۴	۰/۲۳۷
CC۱۵	۰/۲۶۹	۰/۷۱۸
CC۱۶	۰/۳۲۹	۰/۶۹۴
CC۱۷	۰/۰۶۹	۰/۴۱۵
CC۱۸	۰/۱۸۲	۰/۲۷۳
CC۱۹	۰/۴۲۴	۰/۴۹۲
CC۲۰	۰/۸۷۵	۱/۰۰۰
CC۲۱	۰/۹۱۹	۱/۰۰۰
CC۲۲	۰/۸۰۶	۰/۸۶۹
	نیروگاه‌های بخاری	
T۱	۰/۶۷۷	۰/۷۲۸
T۲	۰/۴۹۰	۰/۵۳۰
T۳	۰/۳۱۱	۰/۸۶۷
T۴	۰/۳۰۲	۰/۴۸۶
T۵	۰/۳۸۱	۰/۳۹۵

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

T ۶	۰/۱۲۱	۰/۳۴۳
T ۷	۰/۱۸۹	۰/۶۱۱
T ۸	۰/۱۴۸	۰/۳۱۲
T ۹	۰/۲۴۳	۰/۲۴۶
T ۱۰	۰/۱۳۳	۰/۲۵۷
T ۱۱	۰/۵۶۰	۱/۰۰۰
T ۱۲	۰/۱۷۴	۱/۰۰۰
T ۱۳	۰/۰۵۵	۰/۴۹۱
T ۱۴	۰/۵۱۳	۱/۰۰۰
T ۱۵	۰/۱۹۱	۰/۳۶۴
T ۱۶	۰/۰۸۱	۰/۱۸۳
	نیروگاه‌های گازی	
G ۱	۰/۲۰۹	۰/۳۶۰
G ۲	۰/۱۷۵	۱/۰۰۰
G ۳	۰/۰۳۰	۰/۳۲۷
G ۴	۰/۰۱۶	۰/۰۷۱
G ۵	۰/۰۵۴	۰/۱۱۲
G ۶	۰/۰۲۱	۰/۵۵۸
G ۷	۰/۰۱۹	۰/۲۰۸
G ۸	۰/۰۴۱	۰/۱۴۲
G ۹	۰/۵۵۴	۰/۷۷۱
G ۱۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
G ۱۱	۰/۴۰۷	۰/۴۳۴
G ۱۲	۰/۷۲۹	۰/۷۵۳
G ۱۳	۰/۲۱۲	۰/۳۶۵
G ۱۴	۰/۳۰۸	۰/۳۶۲
G ۱۵	۰/۰۶۲	۰/۰۸۹
G ۱۶	۰/۰۲۹	۰/۵۲۹
G ۱۷	۰/۹۰۹	۱/۰۰۰
G ۱۸	۰/۱۸۳	۰/۳۴۹
متوسط کل نیروگاه‌ها	۰/۳۶۱	۰/۵۴۳

با توجه به جدول ۴، متوسط کارایی هزینه‌ای کلی این ۵۶ نیروگاه تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف، به ترتیب برابر با ۳۶ و ۵۴ درصد است؛ یعنی اگر به طور متوسط نیروگاه‌های منتخب

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

بدون تغییر در مقدار برق تولیدی و میزان آلاینده، استفاده از ورودی‌های خود را به ترتیب به میزان ۶۴ و ۴۶ درصد کاهش دهند، بر روی مرز هزینه تحت فرض‌های CRS و VRS قرار می‌گیرند.

جدول‌های۵ و ۶ به ترتیب طبقه‌بندی عملکرد این ۵۶ نیروگاه را تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف، بر اساس نمرات کارایی هزینه‌ای (CE) آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵. طبقه‌بندی عملکرد نیروگاه‌های منتخب در سال ۱۳۹۴ تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف

تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف			
$CE=۱$	$۰/۷\le CE<۱$	$۰/۴\le CE<۰/۷$	$CE<۰/۴$
نیروگاه‌های چرخه ترکیبی			
$CC۷, CC۱۳$	$CC۱, CC۲۰, CC۲۱$ $CC۲۲$	$CC۲, CC۴, CC۵$ $CC۱۲, CC۱۹$	$CC۳, CC۶, CC۸$ $CC۹, CC۱۰, CC۱۱$ $CC۱۴, CC۱۵,$ $CC۱۶$ $CC۱۷, CC۱۸$
نیروگاه‌های بخاری			
-	-	$T۱, T۲, T۱۱, T۱۴$	$T۳, T۴, T۵, T۶,$ $T۷, T۸, T۹, T۱۰$ $T۱۲, T۱۳, T۱۵,$ $T۱۶$
نیروگاه‌های گازی			
$G۱۰$	$G۱۲, G۱۷$	$G۹, G۱۱$	$G۱, G۲, G۳, G۴,$ $G۵, G۶, G۷, G۸$ $G۱۳, G۱۴, G۱۵,$ $G۱۶ G۱۸$

جدول ٦. طبقه‌بندی عملکرد نیروگاه‌های منتخب در سال ۱۳۹۴ تحت فرض VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف

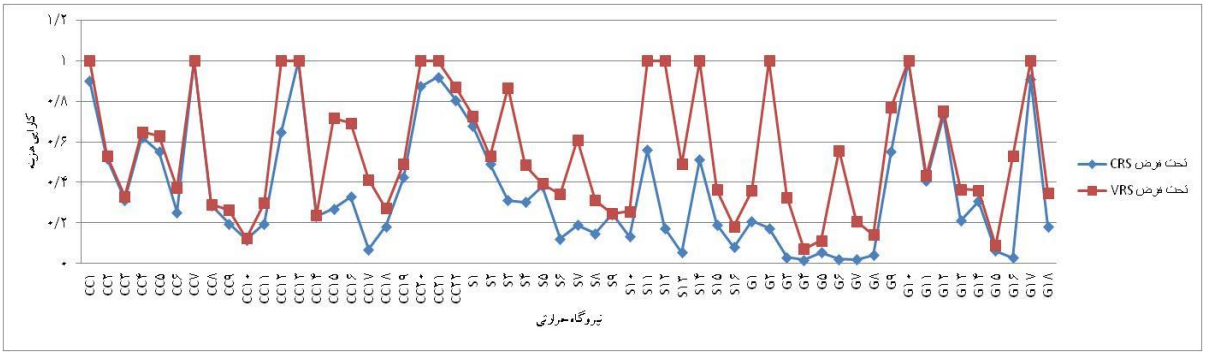
تحت فرض VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف			
$CE=۱$	$۰/۷\le CE<۱$	$۰/۴\le CE<۰/۷$	$CE<۰/۴$
نیروگاه‌های چرخه ترکیبی			
$CC۱, CC۷, CC۱۲$ $, CC۱۳, CC۲۰,$ $CC۲۱$	$CC۱۵, CC۲۲$	$CC۲, CC۴, CC۵,$ $CC۱۶, CC۱۷,$ $CC۱۹$	$CC۳, CC۶, CC۸,$ $CC۹, CC۱۰, CC۱۱$ $, CC۱۴, CC۱۸$
نیروگاه‌های بخاری			
$T۱۱, T۱۲, T۱۴$	$T۱, T۳$	$T۲, T۴, T۷, T۱۳$	$T۵, T۶, T۸, T۹,$ $T۱۰, T۱۵, T۱۶$
نیروگاه‌های گازی			

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

$G۲, G۱۰, G۱۷$	$G۹, G۱۲$	$G۶, G۱۱, G۱۶$	$G۱, G۳, G۴, G۵, G۷, G۸, G۱۳, G۱۴, G۱۵, G۱۸$

همچنین شکل ۲ به مقایسه‌ی سطح کارایی هزینه‌ای این ۵۶ نیروگاه حرارتی تحت دو فرض CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف می‌پردازد.



شکل ۲. مقایسه‌ی سطح کارایی هزینه‌ای این ۵۶ نیروگاه حرارتی تحت دو فرض CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف

بر اساس جدول ۴، و جهت تفسیر آسان‌تر ارقام مندرج در جدول، نیروگاه‌ها با توجه به نتایج به دست آمده به دو دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول نیروگاه‌هایی که تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای واحد می‌باشند و دسته دوم نیروگاه‌هایی که تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای کوچک‌تر از واحد می‌باشند.

دسته اول

نیروگاه‌هایی که تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای واحد می‌باشند. این نیروگاه‌ها در حقیقت نیروگاه‌هایی هستند که از لحاظ تئوریک به آن‌ها واحدهای کارای هزینه‌ای (واحدهایی که بر روی مرز کارای هزینه قرار گرفته‌اند) اطلاق می‌گردد. با توجه به جدول۴، نیروگاه‌هایی مانند: $CC۷$، $CC۱۳$ و $G۱۰$ از این دسته نیروگاه‌ها می‌باشند که دارای کارایی هزینه‌ای واحد می‌باشند.

دسته دوم

نیروگاه‌هایی که تحت فرض CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای کوچک‌تر از واحد می‌باشند، که از لحاظ تئوریک به آن‌ها نیروگاه‌های ناکارای هزینه‌ای اطلاق می‌شود و با توجه به نتایج مندرج در جدول ۴ نیروگاه‌های باقی‌مانده را شامل می‌شود. این نیروگاه‌ها با وجود آن‌که همگی با توجه به فرض CRS ناکارای هزینه‌ای تلقی می‌گردند؛ اما دارای دلایل یکسانی برای ناکارایی نیستند؛ لذا جهت بررسی شفاف‌تر، آن‌ها به دو گروه تقسیم می‌گردند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

گروه اول

نیروگاه‌هایی که تحت فرض VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای واحد می‌باشند. با توجه به جدول ۴، نیروگاه‌هایی مانند: CC ۱، CC ۱۲، CC ۲۰، CC ۲۱، T ۱۱، T ۱۲، T ۱۴، G ۲ و G ۱۷ جز این دسته از نیروگاه‌ها می‌باشند.

گروه دوم

نیروگاه‌هایی که تحت فرض VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف دارای کارایی هزینه‌ای کم‌تر از واحد می‌باشند. با توجه به جدول ۴، نیروگاه‌هایی مانند: CC ۲ ، CC ۳، CC ۴، CC ۵، CC ۶، CC ۸، CC ۹، CC ۱۰، CC ۱۱، CC ۱۴، CC ۱۵، CC ۱۶، CC ۱۷، CC ۱۸، CC ۱۹، CC ۲۲، T ۱، T ۲، T ۳، T ۴، T ۵، T ۶، T ۷، T ۸، T ۹، T ۱۰، T ۱۳، T ۱۵، T ۱۶، G ۱، G ۳، G ۴، G ۵، G ۶، G ۷، G ۸، G ۹، G ۱۱، G ۱۲، G ۱۳، G ۱۴، G ۱۵، G ۱۶ و G ۱۸ جز این دسته از نیروگاه‌ها می‌باشند.

بررسی نتایج حاصل از ارزیابی کارایی هزینه‌ای این ۵۶ نیروگاه نشان می‌دهد که در حالت CRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف فقط ۳ نیروگاه و همچنین در حالت VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف فقط ۱۲ نیروگاه روی مرز هزینه قرار دارند و با حداقل هزینه فعالیت می‌کنند. علت ناکارایی بعضی از این نیروگاه‌ها ناشی از استفاده بیش از حد از ورودی‌ها یا به کار بردن ترکیب نامناسبی از ورودی‌هاست؛ یعنی اینکه ظرفیت نصب شده و نیروی انسانی این نیروگاه‌ها متناسب با سطح تولید آن‌ها نمی‌باشد. آنچه که می‌توان پیش‌بینی نمود این است که نیروگاه‌هایی که ناکارای هزینه‌ای شناخته شدند، می‌توانند ورودی‌هایشان را کاهش دهند و با ترکیب مطلوبی از ورودی‌ها بدون آنکه تغییری در خروجی‌هایشان داشته باشند به مرز کارای هزینه‌ای برسند.

در ادامه در جدول ۷ میانگین کارایی هزینه‌ای بر حسب نوع نیروگاه، تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف نشان داده شده است.

جدول ۷. میانگین کارایی هزینه ای بر حسب نوع نیروگاه در سال ۱۳۹۴، تحت فرض‌های CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف

نوع نیروگاه	میانگین کارایی هزینه‌ای	
	تحت فرض CRS	تحت فرض VRS
چرخه ترکیبی	۰/۴۸۶	۰/۵۹۹
بخاری	۰/۲۸۵	۰/۵۵۰
گازی	۰/۲۷۵	۰/۴۶۸

همان‌طور که از جدول ۷ نتیجه می‌شود تحت هر دو فرض CRS و VRS با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف، نیروگاه‌های چرخه ترکیبی از میانگین کارایی هزینه‌ای بالاتری نسبت به سایر نیروگاه‌ها برخوردار می‌باشند و به دنبال آن نیروگاه‌های بخاری و گازی قرار دارند. از دلایل اصلی این موضوع می‌توان به دو مورد اشاره کرد، اول این‌که ظرفیت نصب شده و نیروی انسانی این نیروگاه‌ها متناسب با سطح تولید آن‌ها نمی‌باشد. و دوم این‌که اکثر

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

واحدهای این نیروگاه‌ها در ساعات کم باری خارج از شبکه و خاموش می‌باشند و تنها در ساعات اوج مصرف برق (پیک) به شبکه می‌پیوندند و برای همین است که بخشی از ظرفیت نیروگاه‌ها برای مواقع ضروری غیر فعال نگه داشته می‌شود.

٦ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

این مطالعه به توسعه‌ی مدل کارایی هزینه‌ای کلاسیک، که در آن تمامی قیمت‌های ورودی برای هر واحد تصمیم‌گیرنده ثابت و شناخته شده است، با در نظرگرفتن خروجی‌های نامطلوب با اصل دسترسی‌پذیری ضعیف پرداخته است. مدل پیشنهاد شده در حالت بازده به مقیاس متغیر یک مدل غیرخطی می‌باشد که برای سهولت حل خطی‌سازی شده است. در این راستا برای توضیح و تحلیل مدل‌های پیشنهادی و همچنین اهمیت نیروگاه‌های حرارتی که بیش‌ترین سهم تولید برق را در کشور داشته‌اند، به ارزیابی کارایی هزینه‌ای ۵۶ نیروگاه حرارتی تولید برق کشور در سال ۱۳۹۴ پرداخته شده است. مقایسه‌ی نتایج این بررسی نشان می‌دهد که تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و همچنین بازده به مقیاس متغیر، بالاترین کارایی هزینه‌ای متعلق به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و بخاری بوده است. علاوه بر این، میانگین کارایی هزینه‌ای نیروگاه‌های مورد بررسی در سال ۱۳۹۴ تحت فرض بازده به مقیاس ثابت ۳۶ درصد و تحت فرض بازده به مقیاس متغیر ۵۴ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر؛ حتی اگر قرار باشد با ظرفیت فعلی و بدون هیچ توسعه‌ای در ظرفیت نیروگاهی کشور به طور بهینه از امکانات موجود استفاده کنیم، برق تولیدی در حالت اول تا ۶۴ درصد و در حالت دوم تا ۴۶ درصد قابل افزایش است.

در ادامه برای انجام مطالعات بیش‌تر پیرامون یافته‌های این پژوهش، عناوین زیر جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

- توسعه‌ی مدل پیشنهادی با در نظرگرفتن قیمت‌های ورودی نامعین.
- بسط و تعمیم مدل‌های دیگر کارایی هزینه در حضور خروجی‌های نامطلوب تحت اصل دسترسی‌پذیری ضعیف.
- بسط و تعمیم مدل پیشنهادی با داده‌های نادقیق همچون داده‌های فازی و بازه‌ای.

منابع

[۲۳] سجادی فر، س. ح.، عسلی، م.، فتحی، ب.، محمدباقری، ا.، (۱۳۹۴). اندازه‌گیری کارایی انرژی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها با خروجی‌های نامطلوب. فصلنامه برنامه ریزی و بودجه، ۲۰(۴)، ۷۰-۵۵.

[۲۴] کاظمی متین، ر.، (۱۳۹۰). روش‌های ناپارامتری مدل‌بندی خروجی‌های نامطلوب در DEA: رویکرد استفاده از اصل دسترسی‌پذیری ضعیف. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۸(۳)، ۶۹-۵۳.

[۵۳] کلهر، ا.، کاظمی متین، ر.، (۱۳۹۷). مطالعه‌ی تاثیر فاکتورهای انقباضی اصل دسترسی‌پذیری ضعیف در تحلیل پوششی داده‌های شبکه ای با خروجی‌های نامطلوب. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۵(۱)،۱۰۳-۱۲۱.

[۵۵] امامی میبدی، ع.، افقه، م.، رحمانی صفتی، م. ح.، (۱۳۸۸). اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی. فصلنامه اقتصاد مقداری (بررسی‌های اقتصادی سابق)، ۶(۳)، ۱۰۳-۷۹.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

[۵۹] پورکاظمی، م. ح.، حیدری، ک.، (۱۳۸۱). استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) در ارزیابی کارآیی نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور. مدرس علوم انسانی، ۶(۱)، ۵۴-۳۵.

[۶۰] ممی پور، س.، نجف زاده، ب.، (۱۳۹۵). ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای: مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی. فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد، ۳(۳)، ۱۷۸-۱۵۳.

[1] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E., (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European journal of operational research, 2(6), 429-444.

[2] Farrell, M. J., (1957). The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 120(3), 253-290.

[3] Tone, K., (2002). A strange case of the cost and allocative efficiencies in DEA. Journal of the Operational Research Society, 53(11), 1225-1231.

[4] Jahanshahloo, G. R., Soleimani-Damaneh, M., & Mostafaee, A., (2007). On the computational complexity of cost efficiency analysis models. Applied mathematics and computation, 188(1), 638-640.

[5] Ghiyasi, M., (2017). Inverse DEA based on cost and revenue efficiency. Computers & Industrial Engineering, 114, 258-263.

[6] Shiraz, R. K., Hatami-Marbini, A., Emrouznejad, A., & Fukuyama, H., (2018). Chance-constrained cost efficiency in data envelopment analysis model with random inputs and outputs. Operational Research, 1-36.

[7] Seyedboveir, S., Kordrostami, S., Daneshian, B., & Amirteimoori, A., (2017). Cost Efficiency Measurement in Data Envelopment Analysis with Dynamic Network Structures: A Relational Model. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 34(05), 1750023.

[8] Ashrafi, A., & Kaleibar, M. M., (2017). Cost, Revenue and Profit Efficiency Models in Generalized Fuzzy Data Envelopment Analysis. Fuzzy Information and Engineering, 9(2), 237-246.

[9] Thompson, R. G., Dharmapala, P. S., Humphrey, D. B., Taylor, W. M., & Thrall, R. M., (1996). Computing DEA/AR efficiency and profit ratio measures with an illustrative bank application. Annals of Operations Research, 68(3), 301-327.

[10] Schaffnit, C., Rosen, D., & Paradi, J. C., (1997). Best practice analysis of bank branches: an application of DEA in a large Canadian bank. European Journal of Operational Research, 98(2), 269-289.

[11] Kuosmanen, T., & Post, T., (2001). Measuring economic efficiency with incomplete price information: With an application to European commercial banks. European journal of operational research, 134(1), 43-58.

[12] Kuosmanen, T., & Post, T., (2003). Measuring economic efficiency with incomplete price information. European Journal of Operational Research, 144(2), 454-457.

[13] Camanho, A. S., & Dyson, R. G., (2005). Cost efficiency measurement with price uncertainty: a DEA application to bank branch assessments. European journal of operational research, 161(2), 432-446.

[14] Mostafaee, A., & Saljooghi, F. H., (2010). Cost efficiency measures in data envelopment analysis with data uncertainty. European Journal of Operational Research, 202(2), 595-603.

[15] Fang, L., & Hecheng, L., (2013). Duality and efficiency computations in the cost efficiency model with price uncertainty. Computers & Operations Research, 40(2), 594-602.

[16] Bagherzadeh Valami, H., (2009). Cost efficiency with triangular fuzzy number input prices: An application of DEA. Chaos, Solitons and Fractals, 42(3), 1631-1637.

[17] Puri, J., & Yadav, S. P., (2016). A fully fuzzy DEA approach for cost and revenue efficiency measurements in the presence of undesirable outputs and its application to the banking sector in India. International Journal of Fuzzy Systems, 18(2), 212-226.

[18] Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A.K., (1985). The Measurement of Efficiency of Production. Klumer-Nijhoff Publishing: Boston.

[19] Färe, R., Grosskopf, S., & Lovell, C. K., (2013). The measurement of efficiency of production (Vol. 6). Springer Science & Business Media.

[20] Thompson, R. G., Singleton Jr, F. D., Thrall, R. M., & Smith, B. A., (1986). Comparative site evaluations for locating a high-energy physics lab in Texas. interfaces, 16(6), 35-49.

[21] Jahanshahloo, G. R., Soleimani-Damaneh, M., & Mostafaee, A., (2008). A simplified version of the DEA cost efficiency model. European Journal of Operational Research, 184(2), 814-815.

[22] Amirteimoori, A., Kordrostami, S., & Rezaitabar, A., (2006). An improvement to the cost efficiency interval: a DEA-based approach. Applied mathematics and computation, 181(1), 775-781.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

[25] Lozano, S., Iribarren, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G., (2009). The link between operational efficiency and environmental impacts: a joint application of life cycle assessment and data envelopment analysis. Science of the total Environment, 407(5), 1744-1754.
[26] Hailu, A., & Veeman, T. S., (2001). Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: an application to the Canadian pulp and paper industry. American Journal of Agricultural Economics, 83(3), 605-616.
[27] Korhonen, P. J., & Luptacik, M., (2004). Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. European journal of operational research, 154(2), 437-446.
[28] Yang, H., & Pollitt, M., (2009). Incorporating both undesirable outputs and uncontrollable variables into DEA: The performance of Chinese coal-fired power plants. European Journal of Operational Research, 197(3), 1095-1105.
[29] Färe R., Grosskopf S., (2004) New Directions: Efficiency and Productivity, Kluwer Academic Publishers.
[30] Seiford, L. M., & Zhu, J., (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. European journal of operational research, 142(1), 16-20.
[31] Koopmans, T. C., (1951). Analysis of production as an efficient combination of activities. Analysis of Production and Allocation, 33-97.
[32] Berg, S. A., Førsund, F. R., & Jansen, E. S., (1992). Malmquist indices of productivity growth during the deregulation of Norwegian banking, 1980-89. The Scandinavian Journal of Economics, S211-S228.
[33] Ali, A. I., & Seiford, L. M., (1990). Translation invariance in data envelopment analysis. Operations research letters, 9(6), 403-405.
[34] Scheel, H., (2001). Undesirable outputs in efficiency valuations. European journal of operational research, 132(2), 400-410.
[35] Vencheh, A. H., Matin, R. K., & Kajani, M. T., (2005). Undesirable factors in efficiency measurement. Applied Mathematics and Computation, 163(2), 547-552.
[36] Liu, X., Chu, J., Yin, P., & Sun, J., (2017). DEA cross-efficiency evaluation considering undesirable output and ranking priority: a case study of eco-efficiency analysis of coal-fired power plants. Journal of Cleaner Production, 142, 877-885.
[37] Golany, B., & Roll, Y., (1989). An application procedure for DEA. Omega, 17(3), 237-250.
[38] Lovell, C. K., Pastor, J. T., & Turner, J. A., (1995). Measuring macroeconomic performance in the OECD: A comparison of European and non-European countries. European journal of operational research, 87(3), 507-518.
[39] Athanassopoulos, A. D., & Thanassoulis, E., (1995). Separating market efficiency from profitability and its implications for planning. Journal of the Operational Research Society, 46(1), 20-34.
[40] Cooper, W. W., Seiford, L. M., Tone, K., (2007). Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Model, Applications, References and DEA-Solver Software, NewYork, Springer.
[41] Pittman, R. W., (1983). Multilateral productivity comparisons with undesirable outputs. The Economic Journal, 93(372), 883-891.
[42] Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., & Pasurka, C., (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. The review of economics and statistics, 90-98.
[43] Färe, R., Grosskopf, S., & Pasurka, C., (1986). Effects on relative efficiency in electric power generation due to environmental controls. Resources and energy, 8(2), 167-184.
[44] Shephard, R. W., (1970). Theory of Cost and Production Functions Princeton University Press. Princeton, New Jersey.
[45] Shephard, R. W., (1974). Indirect production functions. Hain.
[46] Färe, R., & Grosskopf, S., (2003). Nonparametric productivity analysis with undesirable outputs: comment. American Journal of Agricultural Economics, 85(4), 1070-1074.
[47] Kuosmanen, T., (2005). Weak disposability in nonparametric production analysis with undesirable outputs. American Journal of Agricultural Economics, 87(4), 1077-1082.
[48] Färe, R., & Grosskopf, S., (2009). A comment on weak disposability in nonparametric production analysis. American Journal of Agricultural Economics, 91(2), 535-538.
[49] Kuosmanen, T., & Podinovski, V., (2009). Weak disposability in nonparametric production analysis: reply to Färe and Grosskopf. American Journal of Agricultural Economics, 91(2), 539-545.
[50] Podinovski, V. V., & Kuosmanen, T., (2011). Modelling weak disposability in data envelopment analysis under relaxed convexity assumptions. European Journal of Operational Research, 211(3), 577-585.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]

[51] Kuosmanen, T., & Matin, R. K., (2011). Duality of weakly disposable technology. Omega, 39(5), 504-512.
[52] Fang, L., (2015). Congestion measurement in nonparametric analysis under the weakly disposable technology. European Journal of Operational Research, 245(1), 203-208.
[54] Roshdi, I., Hasannasab, M., Margaritis, D., & Rouse, P., (2018). Generalised weak disposability and efficiency measurement in environmental technologies. European Journal of Operational Research, 266(3), 1000-1012.
[56] Färe, R., Kirkley, J. E., & Walden, J. B., (2007). Estimating capacity and efficiency in fisheries with undesirable outputs. Virginia Institute of Marine Science.
[57] Färe, R., & Primont, D., (1995). Multi-output production and duality: Theory and applications. Boston: Kluwer Academic Publishers.
[58] Färe, R., Grosskopf, S., and Lovell, C. A. K., (1994). Production Frontiers, Cambridge. University Press, Cambridge.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.6.1]