

بررسی ۳۲ سد ایرانی و کارایی نیروگاه‌های برق آبی مستقر بر آن‌ها در سال ۱۳۹۳

ودود نجاری^{۱*}میلاذ ارجمند^۲

چکیده

هدف اصلی این تحقیق مطالعه ۳۲ سد مطرح ایران و بررسی کارایی نیروگاه‌های برق آبی آن‌ها و نیز رتبه‌بندی بر اساس عملکرد سال ۱۳۹۳ به کمک تحلیل پوششی داده‌ها و فرآیندهای مرزی تصادفی است. به کارگیری روش توابع مفصلی در فرآیندهای مرزی تصادفی مزیت دیگری است که این تحقیق را در مقایسه با مقالات مشابه متمایز می‌کند. در ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی این نیروگاه‌ها از نرم‌افزار EMS و Matlab کمک گرفته شده و در پایان برای داشتن نتیجه کلی، میانگین کارایی حاصل از چهار روش محاسبه شده است. رتبه اول به نیروگاه سفیدرود و رتبه آخر به نیروگاه طالقان تعلق گرفت. برای مقایسه نتایج هر کدام از مدل‌ها از همبستگی بین رتبه کارایی‌ها استفاده شده است. کمترین سازگاری بین نتایج روش BCC با تحلیل مرزی تصادفی با استفاده از تابع مفصلی کلایتون است به طوری که همبستگی بین نتایج آن‌ها ۶۳/۸۶٪ به دست آمده است. از طرفی بیشترین سازگاری بین نتایج روش تحلیل مرزی تصادفی استاندارد با تحلیل مرزی تصادفی با استفاده از تابع مفصلی کلایتون است به طوری که همبستگی بین نتایج آن‌ها ۹۹/۴۱٪ محاسبه شده است. در این میان سازگاری بین نتایج BCC و CCR برابر ۷۲/۱۰٪ است.

واژه‌های کلیدی

تحلیل پوششی داده‌ها، فرایندهای مرزی تصادفی، توابع مفصلی، کارایی.

۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران، vnajjari@iau-maragheh.ac.ir.

۲. واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران.

مقدمه

امروزه بدون شک رشد صنعتی و اقتصادی و نیز ارتقای کیفیت زندگی در هر کشور در گرو صنعت برق است و بی دلیل نیست که پژوهشگران زیادی بر روی روش‌های نوین تولید برق تحقیق می‌کنند. در اکثر کشورهای دنیا یکی از روش‌های مهم و ایمن تولید برق، استفاده از سدها است که ایران هم از این فناوری بی‌بهره نیست.

طبق بررسی‌ها و آمارهایی که از طرف دفتر معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری^۱ اعلام شده است، نیروگاه‌های گازی رتبه اول در تولید برق کشورمان را به میزان ۱۴ هزار و ۳۰۰ مگاوات به عهده دارند. بخش بخار سیکل ترکیبی ۸ هزار و ۹۰۰ مگاوات، نیروگاه‌های بخاری سهمی معادل ۱۵ هزار و ۵۶۰ مگاوات، نیروگاه‌های آبی ۷ هزار و ۱۰۰ مگاوات و بخش توربین‌های دیزلی ۳۸۰ مگاوات را در تولید برق به خود اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است در نیمه اول سال ۲۰۱۳، ۲۳۷۰ مگاوات واحد جدید نیروگاهی وارد مدار شده که ۶۰۰ مگاوات آن برق آبی و بقیه مربوط به نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی است. باید توجه داشت که حدود ۲۶ هزار مگاوات ظرفیت تولید برق آبی در ایران وجود دارد که بخش عمده آن از حوضه آبریز رودخانه‌های کارون، کرخه و دز تأمین می‌شود. ولی در حال حاضر تنها نیروگاه‌های ۷۱۰۰ مگاوات برق تولید می‌کنند. البته بر اساس برنامه‌ریزی اعلام شده قرار است نیروگاه‌های گتوند در سال جاری ۱۵۰۰ مگاوات، سد کارون ۴ معادل هزار مگاوات و سیمره نیز ۵۰۰ مگاوات ظرفیت برق آبی کشور را افزایش دهند. در مورد توسعه نیروگاه مسجدسلیمان نیز می‌توان گفت تولید این نیروگاه قبلاً هزار مگاوات بوده که در حال حاضر ظرفیت آن به ۱۵۰۰ مگاوات رسیده است.

بحث‌های زیادی در مورد احداث نیروگاه‌های برق آبی مطرح است که در رأس آن‌ها کم‌آبی سال‌های اخیر است. البته هزینه عمرانی احداث سد نیز چشمگیر است. محققین مختلف در کشور در این زمینه به بررسی مشکلات موجود و ارائه راهکار برای حل آن‌ها پرداخته‌اند. مهراییان و فرهادی (۱۳۸۲) ضمن تأکید بر نقش انرژی در زندگی بشر به بررسی نیروگاه‌های

برق آبی از دیدگاه انرژی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اشتغال‌زایی پرداختند و این نیروگاه‌ها را با نیروگاه‌های سوخت فسیلی و همچنین دیگر منابع انرژی تجدید پذیر مقایسه نموده‌اند. بررسی مزایای نیروگاه‌های آبی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها بحث اصلی مقاله عشوری و خدا بخشی (۱۳۸۲) بوده است. ایشان در تحقیق خود اعلام کردند که حدود ۳۰ درصد آلودگی هوای جهان ناشی از تولید برق است. همچنین توضیحی در مورد بحران تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن ارائه داده و سپس به بررسی مزایای نیروگاه‌های آبی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها پرداختند و در نهایت راهکارهایی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی ارائه دادند. رتبه‌بندی ۳۱ کشور منتخب از جمله ایران بر مبنای کارایی در تولید برق تجدید پذیر با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها با رویکرد بنچ مارکینگ^۲ حاصل پژوهش سید اصفهانی و همکاران (۲۰۰۶) است. آن‌ها کل ظرفیت نصب شده جهت تولید برق از منابع تجدید پذیر، جمعیت و مساحت هر کشور را به‌عنوان ورودی و تولید ناخالص برق حاصل از این منابع و معکوس میزان انتشار دی‌اکسید کربن را خروجی‌های مدل خود در نظر گرفتند. بر اساس نتایج محاسبات ایشان، ایران در رتبه ۲۳ قرار گرفت.

تأکید بر لزوم استفاده بهینه از نیروگاه‌های موجود به دلیل پرهزینه بودن احداث، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات یک نیروگاه، بحثی است که خامنه و جواهری (۱۳۸۸) مطرح کردند و به کمک تحلیل پوششی داده‌ها عملکرد نیروگاه‌های کشور را ارزیابی نمودند. غلامی (۱۳۸۸) به مقایسه هزینه برق خورشیدی و برق آبی با تأمین برق از شبکه سراسری در روستاهای فاقد برق پرداخت و نتیجه گرفت که انرژی برق آبی کوچک‌مقیاس در تأمین انرژی روستاهایی که ذخایر آبی کافی دارند دارای توجیه اقتصادی است. شجاعی و همکاران (۱۳۹۲) مطالعه بسیار وسیع و جامعی در مورد اثرات حاصل از یک نیروگاه هسته‌ای و سایر نیروگاه‌ها از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی جهت تعیین گزینه بهینه انجام دادند. نتیجه حاصل از تحقیق ایشان این بود که اگر هزینه‌های خارجی شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای در این بخش در نظر گرفته شود، برق

^۲ Benchmarking^۱ هفته ۲۰٪ نامه ۲۰٪ <http://files.spac.ir/>

Barnameh%20gozashteh/240/p9.htm

مواد و روش‌ها

روش‌های اندازه‌گیری کارایی

محاسبه کارایی^۷ واحدهای تصمیم‌گیری نقش اساسی در بحث‌های اقتصادی و مدیریتی دارد. فارل^۸ از اولین افرادی بود که مجموعه روش‌های مبتنی بر نظریه اندازه‌گیری کارایی را بیان کرد و امکان عملی اندازه‌گیری آن در دهه ۱۹۷۰ به دو روش پارامتریک و ناپارامتریک ممکن شد. یادآوری می‌شود که روش‌های ناپارامتری نیاز به فرضیه‌های کمی راجع به ساختار تابع تولید و نیز اعمال محدودیت به ورودی و خروجی دارند. روش تحلیل مرزی تصادفی (SFA)^۹، تحلیل مرزی پهن (TFA)^{۱۰} و تحلیل بدون توزیع (DFA)^{۱۱} از روش‌های پارامتریک هستند. از روش‌های ناپارامتریک می‌توان به روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^{۱۲} و تحلیل بدون رویه (FDH)^{۱۳} اشاره کرد.

در این پژوهش، برای محاسبه کارایی نیروگاه‌های برق‌آبی از روش ناپارامتری تحلیل پوششی داده‌ها، روش پارامتری فرایندهای مرزی تصادفی و نیز روش توابع مفصلی در روش پارامتری فرایندهای مرزی تصادفی استفاده شده است. جزئیات این سه روش در ادامه ارائه شده است.

تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها روشی ناپارامتری برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری است که اولین مدل آن توسط چارنس و همکاران (۱۹۷۸) مطرح شد. مدل آن‌ها CCR نام گرفته است که شامل حرف اول هر کدام از نویسندگان است. شکل اصلی با رویکرد ورودی این مدل برای ارزیابی کارایی واحد تصمیم‌گیری k ام به صورت زیر است:

هسته‌ای به‌عنوان یک گزینه قابل‌رقابت و جایگزین است. البته مدیریت پسماندهای هسته‌ای و نیز تأمین ایمنی کامل و جلوگیری از بروز حوادث به‌عنوان معضلات، پیش رو قرار دارد. تحقیق دیگری توسط شاهین و همکاران (۱۳۹۲) به‌منظور رتبه‌بندی ۳۰ واحد نیروگاه برق‌آبی در ایران انجام شد. آن‌ها از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده کرده و متوسط ساعت کارکرد و مصرف داخلی نیروگاه را به‌عنوان ورودی و ظرفیت عملی و تولید ناویژه^۱ را به‌عنوان خروجی‌های مدل خود در نظر گرفتند. در این بررسی تنها شش نیروگاه کارا بوده و نتایج رتبه‌بندی حاکی از رتبه یک برای نیروگاه مسجدسلیمان است. نجاری و میرزاپور^۲ (۲۰۱۵) تحلیل پوششی داده‌ها و فرایندهای مرزی تصادفی را در تعیین اولویت محل احداث نیروگاه برق به کار گرفته و ۲۸ محل پیشنهادی در کشور ترکیه را اولویت‌بندی نمودند. آن‌ها در مدل خود از ۹ پارامتر به‌عنوان ورودی و یک پارامتر به‌عنوان خروجی استفاده کردند. هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه ۳۲ نیروگاه برق‌آبی مطرح ایران و سپس محاسبه کارایی و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس عملکرد سال ۱۳۹۳ است. در بررسی کارایی نیروگاه‌های مذکور، از تحلیل پوششی داده‌ها^۳ و فرایندهای مرزی تصادفی^۴ استفاده می‌کنیم. به‌کارگیری روش توابع مفصلی^۵ در فرایندهای مرزی تصادفی در بحث بررسی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری^۶ از دیگر مزایای این مقاله در مقایسه با مقالات مشابه است. پس از محاسبه کارایی و رتبه نیروگاه‌ها با روش‌های موردنظر به‌منظور مقایسه نتایج حاصل، ماتریس همبستگی بین رتبه‌های نیروگاه‌ها در هر مدل را به‌دست آورده و میزان سازگاری نتایج روش‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

در بخش دوم این تحقیق به مروری بر روش‌های ارزیابی کارایی به کار گرفته شده، پرداخته شده است. بخش سوم به کاربرد مدل‌های مطرح‌شده در بررسی کارایی نیروگاه‌های برق‌آبی اشاره شده است و در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش چهارم ارائه شده است.

⁸ Farrel

⁹ Stochastic Frontier Analysis

¹⁰ Thick Frontier Analysis

¹¹ Distribution Free Analysis

¹² Data Envelopment Analysis

¹³ Free Distribution Hull

¹ Gross production

² Najjari & Mirzapour

³ Data envelopment analysis

⁴ Stochastic frontier analysis

⁵ Copulas

⁶ Decision making unit (DMU)

⁷ Efficiency

ورودی و خروجی دارند. همچنین این روش‌ها اختلال‌های موجود را وارد مدل نمی‌کنند و فرض بر این است که تمامی اختلاف‌ها از مرز کارایی ناشی از ناکارآمدی سیستم است. درحالی‌که در روش‌های پارامتری مانند فرایندهای مرزی تصادفی خطای مدل (یعنی ε) به صورت ترکیب دو نوع خطای $\varepsilon = u + v$ است. u خطای ناشی از ناکارایی سیستم و v خطای ناشی از عوامل غیر قابل پیش‌بینی مانند تغییرات آب‌وهوا، محیط کارگاه، رکود و غیره است. معمولاً برای u توزیع نمایی، نیم‌نرمال و گاما در نظر می‌گیرند و عموماً برای v توزیع نرمال در نظر می‌گیرند. علاقه‌مندان برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به آیگر^۳ و همکاران (۱۹۷۷) و مووسن و وان-دن بروک^۴ (۱۹۷۷) مراجعه نمایند.

در برآورد مدل‌های فرایندهای مرزی تصادفی، عموماً فرض بر این است که خطاهای v و u مستقل از هم هستند. اسمیت^۵ (۲۰۰۸) یکی از اولین افرادی بود که پیشنهاد وجود پتانسیل همبستگی بین این دو خطا را مطرح کرد. سپس برای مدل‌سازی این همبستگی توابع مفصلی را پیشنهاد داد تا پس از به کار بردن توابع مفصلی، پارامترهای مدل مرزی تصادفی تخمین زده شود. بسیاری از محققین از جمله کارتا و استیل^۶ (۲۰۱۲)، المهدی و هافنر^۷ (۲۰۱۳)، آملسر و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد اسمیت را پذیرفته و راه او را ادامه دادند. البته لازم به ذکر است به کار گرفتن توابع مفصلی در مدل‌های مرزی تصادفی از دید تئوری و محاسباتی موضوع روز است و محققان در ارائه پیشنهادها جدید بر این بحث در رقابت هستند. در ادامه مروری بر فرایندهای مرزی تصادفی انجام شده و نحوه برآورد پارامترهای آن و نیز به دست آوردن کارایی توضیح داده خواهد شد. از طرفی دیگر مزایا و نحوه به‌کارگیری توابع مفصلی نیز ارائه شده است.

تحلیل مرزی تصادفی

تحلیل مرزی تصادفی در ابتدا توسط آیگر و همکاران (۱۹۷۷) و مووسن و وان دن بروک (۱۹۷۷) در بحث اقتصادی مطرح شد. این روش هم به صورت پارامتری و هم به صورت ناپارامتری

$$\begin{aligned} & \text{Max } \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \\ & \text{Subject to} \\ & \sum_{r=1}^k v_r x_{rk} = 1 \\ & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0; \\ & v_i, u_r \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ & j = 1, 2, \dots, n, \quad r = 1, 2, \dots, s. \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن n تعداد واحدهای تصمیم‌گیری با m ورودی به صورت x_{ik} و دارای s خروجی است که با y_{rk} نشان داده شده است. u_r, v_i به ترتیب وزن‌های ورودی i ام و خروجی r ام هستند. مدل تغییر یافته و یا به عبارتی بهبود یافته CCR، توسط بنکر^۱ و همکاران (۱۹۸۴) ارائه شد و با حرف اول نویسندگان مقاله مدل BCC نام گرفت. این مدل با استفاده از مرز کارایی، مقدار کارایی محض واحدهای تصمیم‌گیری را مشخص می‌کند. فرم اولیه با رویکرد ورودی این مدل برای ارزیابی کارایی واحد تصمیم‌گیری k ام به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \theta_k \\ & \text{Subject to} \\ & \theta_k x_{ik} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - y_{rk} \geq 0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن θ_k مقدار کارایی واحد تصمیم‌گیری k ام و n تعداد واحدهای تصمیم‌گیری با m ورودی به صورت x_{ik} و $i = 1, 2, \dots, m$ دارای s خروجی به صورت $y_{rk}, r = 1, 2, \dots, s$ و نیز λ_k شدت یا وزن واحد تصمیم‌گیری k ام است. اگر θ_k برابر یک به دست آید به این معناست که آن واحد تصمیم‌گیری، کارا^۲ است.

تحلیل مرزی تصادفی و توابع مفصلی

یادآوری می‌شود که روش‌های ناپارامتری نیاز به فرضیه‌های کمی راجع به ساختار تابع تولید و نیز اعمال محدودیت به

⁵ Smith

⁶ Carta & Steel

⁷ El Mehdi & Hafner

¹ Banker

² Efficient

³ Aigner

⁴ Meeusen & Van Den Broeck

(ب) به ازای هر u_1, u_2, v_1, v_2 از $[0,1]$ به طوری که $u_1 \leq u_2, v_1 \leq v_2$ داریم،

$$C(u_2, v_2) - C(u_2, v_1) - C(u_1, v_2) + C(u_1, v_1) \geq 0$$

به عبارت دیگر، توابع مفصلی توابع توزیع چند متغیره هستند که توابع حاشیه‌ای یک‌بعدی آن‌ها بر بازه $(0,1)$ یکنواخت است. به دو دلیل این توابع در مباحث آماری مورد توجه قرار دارند: املا این توابع مستقل از مقیاس‌های اندازه‌گیری هستند. ثانیاً برای شبیه‌سازی در توابع توزیع کارایی زیادی دارند. توابع مفصلی ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی ساختارهای وابستگی هستند و به‌ویژه زمانی که توزیع داده‌ها بیضوی نباشد، این توابع نقش اساسی در همبستگی ایفا می‌کنند. اهمیت این توابع به خاطر قضیه اسکالر^۲ است؛ فرض کنیم متغیرهای تصادفی X, Y دارای تابع توزیع توأم H و به ترتیب دارای توزیع‌های حاشیه‌ای F و G باشند. آنگاه تابع مفصلی مانند C وجود دارد به طوری که برای هر x, y داریم، $H(x, y) = C(F(x), G(y))$ در صورتی که F و G پیوسته باشند توابع مفصلی C منحصر به فرد است (عکس قضیه نیز برقرار است). به عنوان نتیجه‌ای از قضیه اسکالر، توابع مفصلی، توابع توزیع توأم را با توزیع‌های حاشیه‌ای یک‌بعدی آن‌ها مرتبط می‌کند. توابع مفصلی را به دو دسته بیضوی^۴ و ارشمیدسی^۵ تقسیم کرده‌اند (حبیب اله^۶، ۲۰۰۷). البته این دسته‌بندی از دیدگاه متخصصین این رشته ممکن است به صورت دیگری باشد که از بحث ما خارج است. توابع مفصلی بیضوی، توزیع بیضوی دارند به عبارت دیگر قالبی بیضوی یا کروی داشته و در نتیجه در دنباله‌ها متقارن هستند. از توابع مفصلی مطرح در این خانواده تابع مفصلی گاوسی^۷ و تابع مفصلی استیودنت^۸ است و از بین این دو، تابع مفصلی گاوسی کاربردی‌تر است زیرا فرم ساده‌تری نسبت به تابع مفصلی استیودنت دارد.

توابع مفصلی ارشمیدسی شامل تعداد زیادی از توابع مفصلی است و به چند دلیل کاربرد این توابع به سرعت گسترش یافته است، اولاً پیکربندی این توابع فوق‌العاده ساده است. ثانیاً گروه عمده توابع مفصلی به خانواده ارشمیدسی تعلق دارد و در نهایت نمایش ارشمیدسی، توابع مفصلی چند متغیره را به صورت تابع

قابل فرمول‌بندی است؛ باین وجود در مباحث کاربردی اکثراً حالت پارامتری این روش به کار می‌رود (المهدی و هافنر، ۲۰۱۳). مدل تولید مرزی بدون مؤلفه تصادفی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$y_i = f(x_i; \beta); TE_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (۳)$$

که در آن y_i خروجی مشاهده شده، x_i برداری شامل N ورودی به کار گرفته شده توسط تولیدی i ام، $f(x_i; \beta) =$ مرز تولید و $\beta =$ برداری از پارامترهای روشی که باید برآورد شود. در این رابطه، TE_i به عنوان کارایی روشی واحد i ام است و عبارت است از خروجی مشاهده شده بر حداکثر خروجی ممکن واحد تولیدی i ام. فرض کنیم TE_i یک متغیر تصادفی است، در این صورت می‌توان آن را به صورت $TE_i = \exp(-u_i)$ نوشت به طوری که $u_i \geq 0$. با فرض مؤلفه تصادفی شوک به صورت $\exp(v_i)$ (که ممکن است ناشی از تغییرات آب‌وهوا، مشکلات اقتصادی، رکود و غیره باشد) و اعمال آن به رابطه (۳) برای هر $i = 1, 2, \dots, I$ داریم:

$$y_i = f(x_i; \beta) \cdot \exp(-u_i) \cdot \exp(v_i) \quad (۴)$$

چنانچه فرض کنیم $f(x_i; \beta)$ فرم لگاریتمی کب-داگلاس^۱ را داشته باشد، رابطه (۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ln y_i = \beta_0 + \sum_n \beta_n \ln x_{ni} + v_i - u_i \quad (۵)$$

علاقه‌مندان برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به آیگر و همکاران (۱۹۷۷) و مووسن و وان‌دن بروک (۱۹۷۷) مراجعه کنند. در این مقاله با استفاده از مدل (۵) و در نظر گرفتن توزیع‌های نرمال و نیم-نرمال به ترتیب برای v و u نتایج را محاسبه خواهیم کرد.

توابع مفصلی^۲

تابع مفصلی ۲-متغیره تابعی به صورت $C: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ است که دارای خواص زیر است:

(الف) به ازای هر u و v از $[0,1]$ داریم:

$$C(u, 0) = C(0, v) = 0, \quad C(u, 1) = u, \quad C(1, v) = v$$

⁶ Habiboallah

⁷ Gaussian

⁸ Student

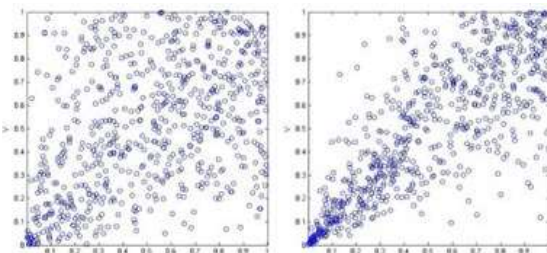
¹ Cobb-Douglas

² Copulas functions

³ Sklar

⁴ Elliptical

⁵ Archimedean



شکل (۱). نمودار نقطه‌ای تابع مفصلی کلاپتون با $\theta = 1$ (سمت چپ) و $\theta = 3$ (سمت راست)

تحلیل مرزی تصادفی و توابع مفصلی

تحقیقات بسیار کمی می‌توان یافت که مرتبط با تحلیل مرزی تصادفی و توابع مفصلی باشند. اسمیت^۵ (۲۰۰۸) از اولین افرادی بود که کاربرد توابع مفصلی را در تحلیل مرزی تصادفی پیشنهاد داد. اخیراً کارتا و استیل^۶ (۲۰۱۲) روشی برای تولید مرزی چند خروجی ارائه دادند که بر پایه توابع مفصلی است. مقاله دیگری از طرف المهدی و هافنر^۷ (۲۰۱۳) و همچنین آمسler^۸ (۲۰۱۴) در ارتباط با تحلیل مرزی تصادفی و توابع مفصلی ارائه شده است. در این بخش از مقاله هدف تشریح نحوه به‌کارگیری توابع مفصلی در تحلیل مرزی تصادفی است. مدل کلاسیک مرزی تصادفی پیشنهادی توسط آگنر^۹ و همکاران (۱۹۷۷) و همچنین مووسن و وان‌دن برووک^{۱۰} (۱۹۷۷) در نظر گرفته شده است. برای هر $i = 1, 2, \dots, I$ داریم:

$$\ln y_i = \beta_0 + \sum_n \beta_n \ln x_{ni} + v_i - u_i, \quad (6)$$

فرض می‌شود که u_i ها (و نیز v_i ها) برای هر واحد تصمیم‌گیری i ام مستقل هستند و از طرفی یک پتانسیل همبستگی بین u و v موجود است. فرض کنیم $u \sim G_1$ و $v \sim G_2$ (منظور از \sim همان توزیع آماری است) و H تابع توزیع توأم u و v باشد. در این صورت بنا به قضیه اسکالر تابع مفصلی C_θ وجود دارد به طوری که در رابطه زیر صدق می‌کند،
 $H(u, v) = C_\theta(G_1(u), G_2(v))$
 و از این رابطه تابع چگالی توأم به صورت زیر قابل محاسبه است،
 $h(u, v) = g_1(u)g_2(v)C_\theta(G_1(u), G_2(v)) \quad (7)$

یک پارامتری بیان می‌کند که به این تابع تک پارامتری، مولد تابع مفصلی ارشمیدسی گفته می‌شود. بدیهی است که این مولد نقش اساسی در محاسبه اندازه‌های توابع مفصلی ارشمیدسی از قبیل ضریب همبستگی کندال^۱، اسپیرمن^۲، گینی^۳، ... و نیز محاسبه همبستگی در دنباله‌ها و سایر اندازه‌های توابع مفصلی را بر عهده دارد. محاسبه اکثر این اندازه‌ها در اغلب توابع مفصلی به دلیل پیچیدگی محاسبات مشکل است و فرم بسته‌ای برای این اندازه‌ها در دسترس نیست.

اگر φ تابعی پیوسته و اکیداً نزولی از $[0, 1]$ به $[0, \infty)$ باشد به طوری که $\varphi(1) = 0$ و φ^{-1} وارون φ است آنگاه $C(u, v)$ که به صورت $C(u, v) = \varphi^{-1}(\varphi(u) + \varphi(v))$ تعریف می‌شود شرایط توابع مفصلی را داراست اگر و تنها اگر φ تابعی محدب باشد. توابع مفصلی که از رابطه $C(u, v) = \varphi^{-1}(\varphi(u) + \varphi(v))$ حاصل می‌شوند توابع مفصلی ارشمیدسی نامیده می‌شوند. تابع φ مولد تابع مفصلی نام دارد و اگر $\varphi(0) = \infty$ باشد، گفته می‌شود φ مولد اکید است و در این حالت تابع مفصلی ارشمیدسی اکید نامیده می‌شود. در این تحقیق نیز ما به یکی از کاپولاهای مطرح و پرکاربرد ارشمیدسی به نام کلاپتون اکتفا خواهیم کرد که مشخصات آن عبارت‌اند از:

$$C(u, v) = \max\left(\left[u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1\right]^{\frac{-1}{\theta}}, 0\right),$$

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{\theta}(t^{-\theta} - 1), \quad \theta \in [-1, \infty) - \{0\}$$

ضریب همبستگی کندال برای این تابع مفصلی $\tau = \frac{\theta}{\theta + 2}$ است به طوری که $\tau \in (0, 1]$ در شکل (۱) نمودار نقطه‌ای تابع مفصلی کلاپتون با $\theta = 1$ و $\theta = 3$ نشان داده شده است. برای این خانواده همبستگی در دنباله بالایی صفر است ولی در دنباله پایینی برابر $2^{\frac{-1}{\theta}}$ است. برای اطلاعات بیشتر در مورد توابع مفصلی کتاب نلسون^۴ (۲۰۰۶) پیشنهاد می‌گردد.

⁶ Carta & Steel

⁷ El Mehdi & Hafner

⁸ Amsler

⁹ Aigner

¹⁰ Meeusen & Van Den Broeck

¹ Kendall's correlation coefficient

² Spearman

³ Gini

⁴ Nelsen

⁵ Smith

درست‌نمایی $\hat{U} = (\hat{\sigma}_u, \hat{\sigma}_v, \hat{\theta}, \hat{\beta})$ باشد با جایگذاری آن‌ها در رابطه (۹)، برآوردی از کارایی روشی واحدهای تصمیم‌گیری حاصل خواهد شد. از طرفی $\varepsilon = u - v$ و نیز داریم،

$$Var(\varepsilon) = Var(u) + Var(v) - 2Cov(u, v) \quad (10)$$

یعنی همبستگی مستقیم بین v و u مقدار $Var(\varepsilon)$ را کاهش می‌دهد و همبستگی معکوس بین v و u واریانس $Var(\varepsilon)$ را افزایش می‌دهد. کاهش واریانس $Var(\varepsilon)$ در مدل (۶) باعث بروز خطای کمتر و در نتیجه محاسبه دقیق‌تر کارایی روشی می‌شود.

نتایج

تحلیل کارایی نیروگاه‌ها

هدف اصلی در این بخش اعمال مدل‌های بحث شده در بخش دوم بر روی نیروگاه‌های مستقر بر ۳۲ سد آبی مطرح ایران و تعیین میزان کارایی آن‌هاست. در جدول (۱) نیروگاه‌های مورد بحث به همراه مشخصات مورد نیاز آن‌ها ارائه شده است. داده‌ها، مربوط به عملکرد سال ۱۳۹۳ بوده و از ترازنامه انرژی ۹۳ وزارت نیرو قابل دسترسی است. برای جزئیات بیشتر به مرجع شماره (۱) مراجعه شود. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، میزان مصرف داخلی نیروگاه بر حسب مگاوات ساعت، متوسط کارکرد سالانه نیروگاه بر حسب ساعت و در نهایت

با در نظر گرفتن $\varepsilon = u - v$ و توزیع‌های حاشیه‌ای $h(u, v)$ داریم،

$$h(\varepsilon) = \int_0^{+\infty} g_1(u)g_2(u+\varepsilon)C_{\theta}(G_1(u), G_2(u+\varepsilon))du \quad (8)$$

با جایگذاری $\varepsilon = \ln y - f(x; \beta)$ در رابطه (۸) تابع چگالی y حاصل می‌شود. با استفاده از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی^۱ برآوردی قابل قبول از پارامترهای مدل مرزی تصادفی به دست می‌آید. از آنجایی که توابع مفصلی، توزیع‌های حاشیه‌ای را مستقل از ساختار همبستگی آن‌ها مدل‌سازی می‌کنند بنابراین تابع توزیع توأم انعطاف‌پذیری حاصل می‌شود که توزیع حاشیه‌های آن‌ها می‌تواند توسط محقق مشخص شود. بدیهی است پس از تخمین مدل مرزی تصادفی هدف محاسبه کارایی روشی واحدهای تصمیم‌گیری است. این کارایی روشی به صورت زیر است:

$$TE = E(\exp\{-u\} | \varepsilon)$$

و با استفاده از روابط (۷) و (۸) داریم:

$$TE = \frac{1}{h(\varepsilon)} \int_{\mathbb{R}^+} \exp\{-u\} h(u, \varepsilon) du \quad (9)$$

برای جزئیات بیشتر به اسمیت (۲۰۰۸) و المهدی و هافتر (۲۰۱۳) مراجعه شود. جهت به کارگیری این روابط فرض بر این است که $u \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ ، $u \geq 0$ و $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ ، $v \geq 0$ و $E(u) = \sigma_u \sqrt{2/\pi}$ و از این رو $Var(u) = (\pi - 2/\pi) \sigma_u^2$ خواهد بود. اگر فرض کنیم برآورد پارامترهای $U = (\sigma_u, \sigma_v, \theta, \beta)$ با روش حداکثر

جدول (۱): مشخصات نیروگاه‌های سدهای مورد تحقیق

ردیف	نیروگاه	مصرف داخلی (مگاوات ساعت)	متوسط کارکرد (سالانه ساعت)	درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی
۱	ارس	۲۳۳۵	۴۷۲۸	۲۵/۹۰
۲	مهاباد	۳۲	۲۳۴۰	۱۱/۲۰
۳	زاینده‌رود	۶۷۲	۳۶۱۲	۲۶/۰۰
۴	کلان	۵۹۹	۲۷۳۶	۸/۶۰
۵	امیرکبیر	۱۴۹۴	۱۴۶۴	۱۰/۵۰
۶	لنیان	۲۲۹	۱۰۴۴	۷/۸۰
۷	طالقان	۱۸۲	۱۹۹۲	۵/۲۰
۸	لوارک	۱	۲۵۰۸	۱۶/۷۰
۹	کارون ۴	۵۸۹۶	۲۰۱۶	۱۶/۸۰
۱۰	کوهرنگ	۴۲۲	۳۰۶۰	۱۶/۱۰

¹ Maximum-Likelihood Estimation

ردیف	نیروگاه	مصرف داخلی (مگاوات ساعت)	متوسط کارکرد (سالانه (ساعت))	درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی
۱۱	دز	۱۰۶۴۹	۷۹۶۸	۴۳/۹۰
۱۲	شهیدعباسپور	۹۸۰۷	۳۷۰۸	۱۲/۶۰
۱۳	مسجدسلیمان	۳۶۵۲	۲۲۸۰	۱۴/۵۰
۱۴	کرخه	۸۲۹	۵۰۴	۳/۱۰
۱۵	کارون ۳	۲۷۱۰۴	۱۶۵۶	۱۰/۵۰
۱۶	مارون	۸۸۱	۵۴۶۰	۳۶/۸۰
۱۷	گتوند	۸۵۹۸	۳۳۸۴	۲۴/۶۰
۱۸	ملاصدرا	۶۱۳	۱۷۶۴	۱۰/۷۰
۱۹	درودزن	۲۲	۱۳۲۰	۱۲/۱۰
۲۰	شهیدطالبی (سپیدان)	۱	۴۵۰۰	۱۸/۴۰
۲۱	جیرفت	۵۸	۲۳۷۶	۱۴/۹۰
۲۲	پیران	۴۵	۱۱۵۲	۸/۶۰
۲۳	پل کلو ۴	۳۱	۲۶۶۴	۲۰/۴۰
۲۴	کریک ۲	۹	۱۳۷۶	۱۶/۷۰
۲۵	کریک ۳	۲۸	۲۷۸۴	۱۵/۴۰
۲۶	پل کلو ۲ و کخندان	۳۱	۲۷۹۶	۱۰/۵۰
۲۷	پل کلو ۱	۲۳	۲۵۵۶	۹/۵۰
۲۸	سفیدرود	۳۹۵	۱۹۳۲	۱۷/۲۰
۲۹	تاکام (شهیدرجایی)	۱۲۹	۳۰۶۰	۱۸/۳۰
۳۰	سیاه پیشه	۴۵۷۳	۱۰۶۸	۵/۶۰
۳۱	گاماسیاب	۳۹	۳۹۱۲	۱۵/۶۰
۳۲	دره تخت ۲	۵	۴۹۹۸	۲۱/۶۰

جدول (۲): پارامترهای برآورد شده در مدل تحلیل مرزی تصادفی

	$\hat{\sigma}_u$	$\hat{\sigma}_v$	$\hat{\theta}$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	τ
SFA	۰/۱۸۴۷	۰/۸۳۱۶	-	-۲/۸۲۱۱	۰/۰۰۶۸	۰/۷۴۳۵	-
SFA-Clayton	۰/۰۲۲۳	۰/۸۴۵۳	۱/۰۰۴۱	-۲/۶۹۶۳	۰/۰۱۳۵	۰/۷۲۱۷	۰/۳۳۴۳

مرزی تصادفی از نرم‌افزار Matlab و با در نظر گرفتن توزیع-های نرمال و نیم-نرمال به ترتیب برای u و v استفاده شده است. لازم به ذکر است فرمان `fminsearchbnd`^۱ در Matlab نقش اساسی در محاسبات را بر عهده دارد. یادآوری می‌شود که در تحلیل مرزی تصادفی از روش توابع مفصلی نیز استفاده شده است و خانواده مفصلی کلاپتون در این محاسبات به کار گرفته شده است. در جدول (۲) پارامترهای برآورد شده در مدل تحلیل مرزی تصادفی ارائه

درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه ارائه شده است. برای ارزیابی کارایی نیروگاه‌ها از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (CCR و BCC) و تحلیل مرزی تصادفی استفاده شده است. برای این منظور در این داده‌ها، دو مورد اول (مصرف داخلی و متوسط کارکرد) به‌عنوان ورودی و میزان بهره‌برداری از ظرفیت نیروگاه به‌عنوان خروجی انتخاب شدند. برای محاسبات کارایی روشی با روش تحلیل پوششی داده‌ها از نرم‌افزار EMS و در محاسبه کارایی روشی با روش تحلیل

¹ function
[x,fval,exitflag,output]=fminsearchbnd(fun,x0,LB,UB,options,varargin)

نیروگاه دز قرار دارد. در این میان با روش تحلیل مرزی استاندارد تنها نیروگاه سفیدرود به‌عنوان کاراترین نیروگاه انتخاب شده ولی با روش تحلیل مرزی تصادفی با تابع مفصلی کلایتون دو نیروگاه به ترتیب مارون و سفیدرود به‌عنوان نیروگاه‌های کارا مطرح شده‌اند. این در حالی است که سد مارون تنها با روش BCC کارا بوده و در رتبه سوم قرار دارد. نیروگاه سفیدرود تنها نیروگاهی است که هر سه روش BCC، تحلیل مرزی تصادفی استاندارد و همچنین تحلیل مرزی با تابع مفصلی کلایتون، آن را کارا معرفی کرده‌اند.

برای مقایسه نتایج مدل‌ها از همبستگی بین رتبه کارایی‌های حاصل استفاده کردیم. در جدول (۴) همبستگی بین رتبه کارایی نیروگاه‌های موردنظر با هر چهار روش نشان داده شده است. از جدول (۴) به‌وضوح دیده می‌شود که کمترین سازگاری بین نتایج روش BCC با تحلیل مرزی تصادفی با استفاده از تابع مفصلی کلایتون است به‌طوری‌که همبستگی بین نتایج آن‌ها ۶۳/۸۶٪ است. از طرفی بیشترین سازگاری بین نتایج روش تحلیل مرزی تصادفی استاندارد با تحلیل مرزی تصادفی با استفاده از تابع مفصلی کلایتون است به‌طوری‌که همبستگی بین نتایج آن‌ها ۹۹/۴۱٪ است. در این میان سازگاری بین نتایج CCR و BCC برابر ۷۲/۱۰ درصد است.

شده است. سطر اول مربوط به مدل تحلیل مرزی تصادفی استاندارد (SFA) و سطر دوم شامل پارامترهای مدل تحلیل مرزی تصادفی به همراه تابع مفصلی کلایتون (SFA-Clayton) است. پارامتر تابع مفصلی برابر ۱,۰۰۴۱ برآورد شده و از این‌رو همبستگی کندال بین v و u برابر ۳۳,۴۳ درصد است. این نشان‌دهنده این است که (توجه به رابطه (۱۰)) همبستگی مستقیمی بین v و u وجود دارد و این همبستگی مستقیم باعث کاهش واریانس $Var(\varepsilon)$ شده و مدل برآوردی دارای خطای کمتر و در نتیجه کارایی روشی دقیق‌تر است. از طرفی در ارزیابی کارایی با تحلیل پوششی داده‌ها دو مدل CCR و BCC هر دو با رویکرد ورودی مدنظر قرار گرفت.

در جدول (۳)، نتایج محاسبات کارایی روشی نیروگاه‌ها به همراه رتبه هر کدام با هر چهار روش بحث شده نشان داده شده است. با روش CCR نیروگاه‌های کارا عبارت‌اند از: لوارک، درودزن و شهیدطالبی (سپیدان) که به ترتیب در رتبه‌های یک تا سه قرار گرفته‌اند. این در حالی است که با روش BCC، ده نیروگاه به‌عنوان نیروگاه‌های کارا مشخص شده و در رأس آن‌ها

جدول (۳): کارایی روشی نیروگاه‌های مورد مطالعه با تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل مرزی تصادفی

ردیف	نیروگاه‌ها	CCR		BCC		SFA-Clayton		SFA	
		رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی
۱	ارس	۲۳	۵۹/۷۶٪	۱۹	۷۳/۹۸٪	۱۲	۷۷/۰۷٪	۱۱	۷۶/۴۸٪
۲	مهاباد	۲۶	۵۴/۹۸٪	۲۶	۶۱/۷۹٪	۲۴	۵۸/۶۶٪	۲۴	۵۷/۴۵٪
۳	زاینده‌رود	۱۱	۷۸/۵۳٪	۱۳	۹۷/۳۴٪	۵	۹۵/۵۵٪	۵	۹۴/۵۹٪
۴	کلان	۳۱	۳۴/۲۹٪	۳۱	۳۸/۶۱٪	۳۱	۳۸/۶۸٪	۳۱	۳۸/۴۹٪
۵	امیرکبیر	۱۲	۷۸/۲۴٪	۱۶	۸۰/۲۶٪	۱۵	۷۳/۲۵٪	۱۵	۷۴/۳۵٪
۶	لتیان	۸	۸۱/۵۰٪	۱۲	۹۸/۰۹٪	۱۸	۷۱/۲۳٪	۱۷	۷۱/۹۳٪
۷	طالقان	۳۲	۲۸/۴۸٪	۲۹	۵۵/۵۱٪	۳۲	۲۹/۸۸٪	۳۲	۲۹/۷۱٪
۸	لوارک	۱	۱۰۰٪	۶	۱۰۰٪	۱۰	۸۷/۱۷٪	۱۰	۸۳/۳۰٪
۹	کارون ۴	۷	۹۰/۹۱٪	۱۵	۹۳/۴۵٪	۷	۹۱/۳۳٪	۶	۹۲/۹۰٪
۱۰	کوهرنگ	۲۴	۵۷/۴۰٪	۲۷	۵۹/۹۹٪	۱۹	۶۷/۱۱٪	۲۰	۶۶/۴۷٪
۱۱	دز	۲۲	۶۰/۱۰٪	۱	۱۰۰٪	۹	۸۷/۸۱٪	۸	۸۷/۰۴٪
۱۲	شهیدعباسپور	۳۰	۳۷/۰۷٪	۳۲	۳۷/۲۲٪	۳۰	۴۳/۸۲٪	۳۰	۴۴/۱۴٪
۱۳	مسجدسلیمان	۱۴	۶۹/۳۸٪	۲۱	۷۰/۵۳٪	۱۶	۷۲/۶۰٪	۱۶	۷۳/۴۱٪
۱۴	کرخه	۱۸	۶۷/۱۰٪	۵	۱۰۰٪	۲۸	۴۷/۰۶٪	۲۷	۴۸/۷۰٪
۱۵	کارون ۳	۱۵	۶۹/۱۷٪	۲۰	۷۰/۹۵٪	۲۲	۶۴/۴۵٪	۱۹	۶۶/۵۱٪

SFA		SFA-Clayton		BCC		CCR		نیروگاهها	ردیف
رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی		
۲	۹۸/۲۹%	۱	۱۰۰%	۳	۱۰۰%	۱۳	۷۳/۵۳%	مارون	۱۶
۷	۹۲/۳۲%	۶	۹۱/۵۶%	۱۴	۹۶/۴۵%	۱۰	۷۹/۳۰%	گتوند	۱۷
۲۱	۶۶/۳۶%	۲۱	۶۶/۰۴%	۲۴	۶۷/۶۳%	۱۹	۶۶/۱۷%	ملاصدرا	۱۸
۳	۹۵/۲۴%	۴	۹۶/۲۸%	۸	۱۰۰%	۲	۱۰۰%	درودزن	۱۹
۲۳	۵۹/۴۳%	۲۳	۶۲/۹۹%	۴	۱۰۰%	۳	۱۰۰%	شهیدطالی (سپیدان)	۲۰
۱۳	۷۵/۲۶%	۱۳	۷۶/۵۷%	۱۸	۷۴/۲۰%	۱۶	۶۸/۴۱%	جیرفت	۲۱
۱۴	۷۴/۵۳%	۱۴	۷۴/۷۷%	۹	۱۰۰%	۹	۸۱/۴۴%	پیران	۲۲
۴	۹۵/۰۴%	۳	۹۷/۳۴%	۷	۱۰۰%	۶	۹۱/۲۶%	پل کلو ۴	۲۳
۹	۸۵/۴۳%	۸	۸۸/۰۰%	۱۱	۹۹/۸۳%	۴	۹۷/۸۸%	کریک ۲	۲۴
۱۸	۶۹/۴۸%	۱۷	۷۱/۲۸%	۲۲	۷۰/۲۳%	۱۷	۶۷/۸۹%	کریک ۳	۲۵
۲۸	۴۷/۱۹%	۲۶	۴۸/۳۸%	۲۸	۵۶/۳۷%	۲۹	۴۵/۲۱%	پل ۲ و کخدان	۲۶
۲۹	۴۵/۷۴%	۲۹	۴۶/۸۹%	۲۵	۶۶/۴۹%	۲۸	۴۶/۵۵%	پل کلو ۱	۲۷
۱	۱۰۰%	۲	۱۰۰%	۱۰	۱۰۰%	۵	۹۷/۱۲%	سفیدرود	۲۸
۱۲	۷۶/۱۷%	۱۱	۷۷/۵۱%	۱۷	۷۴/۶۶%	۲۰	۶۵/۲۴%	تاکام (شهیدرجایی)	۲۹
۲۶	۴۹/۷۵%	۲۷	۴۸/۳۲%	۲۳	۶۸/۴۱%	۲۵	۵۷/۲۰%	سیاه پیشه	۳۰
۲۵	۵۴/۵۳%	۲۵	۵۶/۲۴%	۳۰	۵۰/۸۳%	۲۷	۴۹/۰۲%	گاماسیاب	۳۱
۲۲	۶۳/۸۲%	۲۰	۶۷/۰۸%	۲	۱۰۰%	۲۱	۶۴/۰۱%	دره تخت ۲	۳۲

جدول (۴): همبستگی بین رتبه کارایی نیروگاهها با هر چهار روش

SFA	SFA-Clayton	BCC	CCR	
۰/۷۵۱۵	۰/۷۳۷۲	۰/۷۲۱۰	۱	CCR
۰/۶۴۱۵	۰/۶۳۸۶	۱	۰/۷۲۱۰	BCC
۰/۹۹۴۱	۱	۰/۶۳۸۶	۰/۷۳۷۲	SFA-Clayton
۱	۰/۹۹۴۱	۰/۶۴۱۵	۰/۷۵۱۵	SFA

جدول (۵): میانگین کارایی روشی نیروگاههای مورد مطالعه حاصل از تحلیل پوششی دادهها و تحلیل مرزی تصادفی

رتبه	کارایی	نیروگاه	$\hat{\mu}_i$	رتبه	کارایی	نیروگاه	$\hat{\mu}_i$
۹	۸۹/۹۱%	گتوند	۱۷	۱۸	۷۱/۸۲%	ارس	۱
۲۲	۶۶/۵۵%	ملاصدرا	۱۸	۲۵	۵۸/۲۲%	مهاباد	۲
۲	۹۷/۸۸%	درودزن	۱۹	۸	۹۱/۵۰%	زایندهرود	۳
۱۳	۸۰/۶۰%	شهیدطالی (سپیدان)	۲۰	۳۱	۳۷/۵۲%	کلان	۴
۱۶	۷۳/۶۱%	جیرفت	۲۱	۱۴	۷۶/۵۳%	امیرکبیر	۵
۱۱	۸۲/۶۹%	پیران	۲۲	۱۲	۸۰/۶۹%	لتیان	۶
۳	۹۵/۹۱%	پل کلو ۴	۲۳	۳۲	۳۵/۹۰%	طالقان	۶
۵	۹۲/۷۸%	کریک ۲	۲۴	۶	۹۲/۶۲%	لوارک	۸
۲۰	۶۹/۷۲%	کریک ۳	۲۵	۷	۹۲/۱۵%	کارون ۴	۹
۲۹	۴۹/۲۹%	پل کلو ۲ و کخدان	۲۶	۲۴	۶۲/۷۴%	کوهرنگ	۱۰
۲۸	۵۱/۴۲%	پل کلو ۱	۲۷	۱۰	۸۳/۷۴%	دز	۱۱

رتبه	کارایی	نیروگاه	رتبه	کارایی	نیروگاه	رتبه	کارایی
۱	۹۹/۲۸%	سفیدرود	۲۸	۴۰/۵۶%	شهیدعباسپور	۱۲	
۱۷	۷۳/۳۹%	تاکام (شهیدرجایی)	۲۹	71/48%	مسجدسلیمان	۱۳	
۲۶	۵۵/۹۲%	سیاه پیشه	۳۰	65/71%	کرخه	۱۴	
۲۷	۵۲/۶۵%	گاماسیاب	۳۱	67/77%	کارون ۳	۱۵	
۱۵	۷۳/۷۳%	دره تخت ۲	۳۲	92/95%	مارون	۱۶	

دسته‌بندی می‌شوند. از آنجایی که در این تحقیق هیچ‌گونه دسته‌بندی برای سدها و نیروگاه‌های آبی در نظر گرفته نشده است پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی عملکرد، ابتدا دسته‌بندی انجام شده و سپس در هر گروه ارزیابی انجام گیرد. همچنین می‌توان مقایسه را کلی‌تر و در یک بازه میان‌مدت یا بلندمدت انجام شود چراکه ممکن است در منطقه‌ای در یک سال خشکسالی رخ داده باشد در نتیجه در همان سال تولید برق آن نیروگاه کمتر باشد.

همچنین پیشنهاد می‌شود در مدل‌های مرزی تصادفی از انواع توابع مفصلی با ساختارهای همبستگی متفاوت (انواع توابع مفصلی ارشمیدسی، تابع مفصلی استیودنت، تابع مفصلی گاوسی، تابع مفصلی مستقل^۱، ...) استفاده گردد و نتایج حاصل با هم مقایسه شود.

مراجع

- ۱- آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی در اسفند ماه سال ۱۳۹۳، شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت منابع انسانی و تحقیقات-دفتر فناوری اطلاعات و آمار.
- ۲- خامنه، ا. م.، جواهری، ز.، (۱۳۸۸). "ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها". اولین کنفرانس ملی صنعت نیروگاه‌های حرارتی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران.
- ۳- سامانی، ح.، ناصح، م. ر.، (۱۳۹۱). "مطالعه و بررسی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نیروگاه جزر و مدی". دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید. هم‌اندیشان انرژی کیمیا. شهر تهران.
- ۴- سیداصفهان، م. م.، آیت‌اللهی، س. ا. ح.، آیت‌اللهی، س. م. ر. (۱۳۸۵). "رتبه‌بندی کشورهای منتخب بر اساس کارایی در

با توجه به اینکه نتیجه کارایی و رتبه حاصل از هر چهار روش برای نیروگاه‌ها متفاوت است، میانگین کارایی حاصل از چهار روش به دست آمده و سپس رتبه نیروگاه‌ها با توجه به میانگین کارایی حاصل، محاسبه شده‌اند. این روش توسط نجاری و میرزاپور (۲۰۱۵) به کار گرفته شده است. نتایج در جدول (۵) ارائه شده است. بدین ترتیب به عنوان نتیجه‌گیری کلی از هر چهار روش می‌توان گفت کارایی نیروگاه دز در رأس نیروگاه‌ها و به ترتیب نیروگاه درودزن و پل کلو ۴ در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. کارایی نیروگاه طالقان در رتبه آخر جای گرفته است.

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی کارایی ۳۲ نیروگاه برق‌آبی ایران از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (مدل‌های CCR و BCC) و تحلیل مرزی تصادفی و نیز روش توابع مفصلی در تحلیل مرزی تصادفی استفاده شده و مصرف داخلی و متوسط کارکرد به عنوان ورودی و میزان بهره‌برداری از ظرفیت نیروگاه به عنوان خروجی انتخاب شدند. محاسبات نشان داد که نتیجه کارایی و رتبه حاصل از هر یک از چهار روش برای نیروگاه‌ها متفاوت است. از این رو به عنوان نتیجه کلی، میانگین کارایی حاصل از چهار روش محاسبه شد و سپس رتبه نیروگاه‌ها با توجه به میانگین کارایی حاصل محاسبه شد که رتبه اول به نیروگاه سفیدرود و رتبه آخر به نیروگاه طالقان تعلق گرفت.

معمولاً نیروگاه‌های آبی بر اساس توانایی در ذخیره‌سازی آب یا جریانی بودن به دو دسته مخزنی و جریانی تقسیم می‌شوند و همچنین بر اساس هدف اولیه یا ثانویه تولید برق

¹ Independent Copula

- 12- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W. (1984). "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis." *Management Science*. 30(1), 1078-1092.
- 13- Carta, A. M. and Steel, F. J. (2012). "Modelling multi-output stochastic frontiers using copulas." *Computational Statistics and Data Analysis*. 56(1), 3757-3773.
- 14- Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E. (1978). "Measuring the Efficiency of Decision Making Units." *European Journal of Operation Research*. 2(1), 429-444.
- 15- El Mehdi, R., Hafner, C. M. (2014). "Inferences in stochastic frontier analysis with dependent error terms." *Mathematics and computers in simulation*. 102 (August), 131-143.
- 16- Habiboallah, F. (2007). "Copulas, modeling dependencies in Financial Risk Management." Purmerend, December.
- 17- Meeusen, W. and Van Den Broeck, J. (1977). "Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error." *International Economic Review*. 18(1), 435-444.
- 18- Najjari, V. and Mirzapour, A. (in press). "Investigating location of solar plants by several methods." *Journal of Applied Statistics*.
- 19- Nelsen, R. B. (2006). *An Introduction to copulas*. Second Edition, New York, Springer.
- 20- Sklar, A. (1959). "Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges." *Publications de l'Institut de statistique de l'Université de Paris*. 8, 229-231.
- 21- Smith, M. D. (2008). "Stochastic frontier models with dependent error components." *The Econometrics Journal*. 11(1), 172-192.
- تولید برق تجدیدپذیر با استفاده از تکنیک با رویکرد پنج مارک و پوشش داده‌ها تعیین جایگاه کشور ایران". اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی. موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی و دانشکده فنی تهران، تهران، ۳۰-۳۱ خرداد.
- ۵- شاهین، آ، ملک پور، ه، توان، ف، کرمی، م. (۱۳۹۲). "رتبه‌بندی نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها، نیروگاه‌های برق آبی کشور در سال ۱۳۹۰". دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد.
- ۶- شجاعی، م، غازی، س. و بیرانوند، م. (۱۳۹۲). "انجام مطالعات اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای و ارائه گزینه بهینه". فصلنامه علوم اقتصادی، دوره ۷، شماره ۲۲، ۲۷-۴۸.
- ۷- عشوری، پ. و خدابخشی، ب. (۱۳۸۲). "جایگاه نیروگاه‌های آبی در محیط‌زیست". اولین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، تهران.
- ۸- غلامی، ف. (۱۳۸۸). "مقایسه هزینه برق خورشیدی و برق آبی با تأمین برق از شبکه سراسری در روستاهای فاقد برق". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و حسابداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.
- ۹- مهربان، م، ع. و فرهادی، م. (۱۳۸۲). "بررسی نیروگاه‌های برق آبی از دیدگاه‌های انرژی، محیط‌زیست اقتصاد، منابع تجدیدپذیر، گردشگری و ایجاد اشتغال". سومین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان. سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور، ۲۶ بهمن، تهران.
- 10- Aigner, D. J., Lovell, C. A. K. and Schmidt, P. (1977). "Formulation and estimation of stochastic frontier production functions." *Journal of Econometrics*. 6(1), 21-37.
- 11- Amsler, C., Prokhorov, A. and Schmidt, P. (2014). "Using copulas to model time dependence in stochastic frontier models." *Econometric Reviews*. 33 (5-6), 497-522.

Investigation of 32 Iranian Dams and the Efficiency of Their Powerplants

Vadoud Najjari ¹
Milad Arjomand ^{*2}

Abstract

The main aim of this research is studying the 32 fundamental Iranian dams and investigating their efficiency scores based on their performance in 1393 and ranking the powerplants by using data envelopment analysis and stochastic frontier analysis methods. Using copula technique in the stochastic frontier analysis is an advantage of this study in comparison to similar researches. EMS and MATLAB are two programs used to evaluate the efficiency of powerplants and the average of the efficiencies calculated by the four methods are used to rank powerplants. Results have shown that Sefidroud is the most efficient center and Taleghan is the least. To compare the results of the models, the correlation between the efficiency calculated by each model is taken into consideration. The least compatibility is obtained between results of BCC and SFA-Clayton models which is 63.86% and the most compatibility is between results of standard SFA and SFA-Clayton models which is 99.41%. Meanwhile the compatibility between results of CCR and BCC models is 72.10%.

Keywords

Data Envelopment Analysis, Stochastic Frontier Analysis, Copulas, Efficiency.

¹* Assistant Professor, Islamic Azad University, Maragheh, Iran, vnajjari@iau-maragheh.ac.ir.

² Islamic Azad University, Maragheh Branch, Maragheh, Iran.

Received: 2016/05/11

Accepted: 2016/07/17