نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره نهم / تابستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 9 / September 2016

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

ودود نجاری*[۱]
میلاد ارجمند[۲]

چکیده

هدف اصلی این تحقیق مطالعه ۳۲ سد مطرح ایران و بررسی کارایی نیروگاه‌های برق‌آبی آن‌ها و نیز رتبه‌بندی بر اساس عملکرد سال ۱۳۹۳ به کمک تحلیل پوششی داده‌ها و فرآیندهای مرزی تصادفی است. به‌کارگیری 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 گرفته‌شده 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 به‌طوری‌که 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 به‌طوری‌که همبستگی بین نتایج آن‌ها ٪۹۹/۴۱ محاسبه شده است. در این میان سازگاری بین نتایج CCR و BCC 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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۷

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

مقدمه

امروزه بدون شک رشد صنعتی و اقتصادی و نیز ارتقای کیفیت زندگی در هر کشور در گرو صنعت برق است و بی‌دلیل 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، نیروگاه-های 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 برق‌آبی و بقیه مربوط به نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی است. باید توجه داشت که حدود ۲۶ هزار مگاوات ظرفیت تولید برق‌آبی 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 اعلام‌شده قرار است نیروگاه‌های گتوند در سال جاری ۱۵۰۰ مگاوات، سد کارون ۴ معادل هزار مگاوات و سیمره نیز ۵۰۰ مگاوات ظرفیت برق‌آبی 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 برق‌آبی 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. مهرابیان و فرهادی (۱۳۸۲) ضمن تأکید بر نقش انرژی در زندگی بشر به بررسی نیروگاه‌های برق‌آبی 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 ازجمله دی‌اکسید کربن ارائه داده و سپس به بررسی مزایای نیروگاه‌های آبی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها پرداختند و درنهایت راهکارهایی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی ارائه دادند. رتبه‌بندی ۳۱ کشور منتخب ازجمله 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 برق‌آبی با تأمین برق از شبکه سراسری در روستاهای فاقد برق پرداخت و نتیجه گرفت که انرژی برق‌آبی 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 ازنظر 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

[۱] http://files.spac.ir/ هفته۲۰٪ نامه۲۰٪ /برنامه/Barnameh%20gozashteh/240/p9.htm

[۲] Benchmarking

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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[1] 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[2] (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[3] و فرایندهای مرزی تصادفی[4] استفاده می‌کنیم. به‌کارگیری روش توابع مفصلی[5] در فرایندهای مرزی تصادفی در بحث بررسی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری[6] 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.

مواد و روش‌ها

روش‌های اندازه‌گیری کارایی

محاسبه کارایی[7] واحدهای تصمیم‌گیری نقش اساسی در بحث‌های اقتصادی و مدیریتی دارد. فارل[8] 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[9])، تحلیل مرزی پهن (TFA[10]) و تحلیل بدون توزیع (DFA[11]) از روش‌های پارامتریک هستند. از روش‌های ناپارامتریک می‌توان به روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA[12]) و تحلیل بدون رویه (FDH[13]) 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 به‌صورت زیر است:

[1] Gross production
[2] Najjari & Mirzapour
[3] Data envelopment analysis
[4] Stochastic frontier analysis
[5] Copulas
[6] Decision making unit (DMU)
[7] Efficiency
[8] Farrel
[9] Stochastic Frontier Analysis
[10] Thick Frontier Analysis
[11] Distribution Free Analysis
[12] Data Envelopment Analysis
[13] Free Distribution Hull

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

$$\begin{aligned}&\text{Max} \ \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rk}\\&\text{Subject to}\\&\sum_{r=1}^{k} v_i x_{ik} = 1\\&\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} \geq 0; \qquad (۱)\\&v_i, u_r \geq 0, \ i = 1,2,...,m,\\&j = 1,2,...,n, \quad r = 1,2,...,s.\end{aligned}$$

که در آن n تعداد واحدهای تصمیم‌گیری با m ورودی به‌صورت 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[1] 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 به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned}&\text{Min} \ \theta_k\\&\text{Subject to}\\&\theta_k x_{ik} - \sum_{j=1} \lambda_j x_{ij} \geq 0 \qquad (۲)\\&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} - y_{rk} \geq 0\\&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \quad , \quad \lambda_j \geq 0\end{aligned}$$

که در آن θ_k مقدار کارایی واحد تصمیم‌گیری k ام و n تعداد واحدهای تصمیم‌گیری با m ورودی به‌صورت x_{ik} و $i = 1,2,...,m$ و دارای s خروجی به‌صورت y_{rk} , $r = 1,2,...,s$ 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[2] 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 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) به‌صورت 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، نیم-نرمال و گاما در نظر می‌گیرند و عموماً برای v توزیع نرمال در نظر می‌گیرند. علاقه‌مندان برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به آیگر[3] و همکاران (۱۹۷۷) و موسن و وان-دن بروک[4] (۱۹۷۷) مراجعه نمایند.

در برآورد مدل‌های فرایندهای مرزی تصادفی، عموماً فرض بر این است که خطاهای v و u مستقل از هم هستند. اسمیت[5] (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 ازجمله کارتا و استیل[6] (۲۰۱۲)، المهدی و هافنر[7] (۲۰۱۳)، آمسلر 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 فرایند 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 موسن و وان دن بروک (۱۹۷۷) در بحث اقتصادی مطرح شد. این روش هم به‌صورت پارامتری و هم به‌صورت ناپارامتری

[1] Banker
[2] Efficient
[3] Aigner
[4] Meeusen & Van Den Broeck
[5] Smith
[6] Carta & Steel
[7] El Mehdi & Hafner

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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

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

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

$$y_i = f(x_i;\beta;).\exp(-u_i).\exp(v_i) \qquad (۴)$$

چنانچه فرض کنیم $f(x_i;\beta)$ فرم لگاریتمی کب-داگلاس[1] را داشته باشد، رابطه (۴) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

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

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[2]

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

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

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

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

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

به‌عبارت‌دیگر، 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 موردتوجه قرار دارند: اولا 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 اسکلار[3] 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 به‌طوری‌که برای هر x,y داریم، $H(x,y) = C(F(x),G(y))$. درصورتی‌که F و G پیوسته باشند توابع مفصلی C منحصربه‌فرد است (عکس قضیه نیز برقرار است). به‌عنوان نتیجه‌ای از قضیه اسکلار، توابع مفصلی، توابع توزیع توأم را با توزیع‌های حاشیه‌ای یک‌بعدی آن‌ها مرتبط می‌کند. توابع مفصلی را به دو دسته بیضوی[4] و ارشمیدسی[5] تقسیم کرده‌اند (حبیب اله[6]، ۲۰۰۷). البته این دسته‌بندی از دیدگاه متخصصین این رشته ممکن است به‌صورت دیگری باشد که از بحث ما خارج است. توابع مفصلی بیضوی، توزیع بیضوی دارند به‌عبارت‌دیگر قالبی بیضوی یا کروی داشته و درنتیجه در دنباله‌ها متقارن هستند. از توابع مفصلی مطرح در این خانواده تابع مفصلی گاوسی[7] و تابع مفصلی استیودنت[8] 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 درنهایت نمایش ارشمیدسی، توابع مفصلی چند متغیره را به‌صورت تابع

[1] Cobb-Douglas
[2] Copulas functions
[3] Sklar
[4] Elliptical
[5] Archimedean
[6] Habiboellah
[7] Gaussian
[8] Student

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

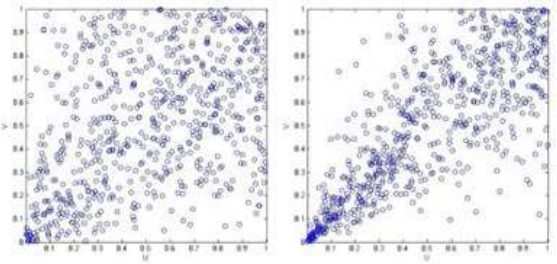
یک پارامتری بیان می‌کند که به این تابع تک پارامتری، مولد تابع مفصلی ارشمیدسی گفته می‌شود. بدیهی است که این مولد نقش اساسی در محاسبه اندازه‌های توابع مفصلی ارشمیدسی از قبیل ضریب همبستگی کندال[۱]، اسپیرمن[۲]، گینی[۳]، ... و نیز محاسبه همبستگی در دنباله‌ها و سایر اندازه‌های توابع مفصلی را بر عهده دارد. 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 به‌طوری‌که $\varphi(1)=0$ و φ^{-1} وارون φ است آنگاه $C(u,v)$ که به‌صورت $C(u,v)=\varphi^{-1}(\varphi(u)+\varphi(v))$ 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 کلایتون اکتفا خواهیم کرد که مشخصات آن عبارت‌اند از:

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

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

ضریب همبستگی کندال برای این تابع مفصلی $\tau=\frac{\theta}{\theta+2}$ است به‌طوری‌که $\tau\in(0,1]$. در شکل (۱) نمودار نقطه‌ای تابع مفصلی کلایتون 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.



شکل (۱). نمودار نقطه‌ای تابع مفصلی کلایتون 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 آمسلر[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 آیگنر[۹] و همکاران (۱۹۷۷) و همچنین موسن و وان‌دن برووک[۱۰] (۱۹۷۷) در نظر گرفته شده است. برای هر $i=1,2,...,I$ داریم:

$$\ln y_i=\beta_0+\sum_n \beta_n \ln x_{ni}+v_i-u_i\ , \qquad (۶)$$

فرض می‌شود که u_iها (و نیز v_iها) 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 اسکلار تابع مفصلی C_θ وجود دارد به‌طوری‌که در رابطه زیر صدق می‌کند،

$$H(u,v)=C_\theta(G_1(u),G_2(v))$$

و از این رابطه تابع چگالی توأم به‌صورت زیر قابل‌محاسبه است،

$$h(u,v)=g_1(u)g_2(v)C_\theta(G_1(u),G_2(v)) \qquad (۷)$$

[1] Kendall's correlation coefficient
[2] Spearman
[3] Gini
[4] Nelsen
[5] Smith
[6] Carta & Steel
[7] El Mehdi & Hafner
[8] Amsler
[9] Aigner
[10] Meeusen & Van Den Broeck

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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

$$h(\varepsilon) = \int_0^{+\infty} g_1(u) g_2(u+\varepsilon) C_\theta(G_1(u), G_2(u+\varepsilon)) du \qquad (۸)$$

با جایگذاری $\varepsilon = \ln y - f(x;\beta)$ در رابطه (۸) تابع چگالی y حاصل می‌شود. با استفاده از روش برآورد حداکثر درستنمایی[1] برآوردی قابل‌قبول از پارامترهای مدل مرزی تصادفی به دست می‌آید. ازآنجایی‌که 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 به‌صورت زیر است:

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

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

$$TE = \frac{1}{h(\varepsilon)} \int_{\Re^+} \exp\{-u\} h(u,\varepsilon) du \qquad (۹)$$

برای جزئیات بیشتر به اسمیت (۲۰۰۸) و المهدی و هافنر (۲۰۱۳) مراجعه شود. جهت به‌کارگیری این روابط فرض بر این است که $u \sim N^+(0,\sigma_u^2),\ u \geq 0$ و $u \sim N(0,\sigma_v^2), v \geq 0$ و ازاین‌رو $E(u) = \sigma_u \sqrt{2/\pi}$ و $Var(u) = \left(\pi - 2/\pi\right)\sigma_u^2$ خواهد بود. اگر فرض کنیم برآورد پارامترهای $\upsilon = (\sigma_u, \sigma_v, \theta, \beta)$ با روش حداکثر درستنمایی $\hat{\upsilon} = (\hat{\sigma}_u, \hat{\sigma}_v, \hat{\theta}, \hat{\beta})$ باشند با جایگذاری آن‌ها در رابطه (۹)، برآوردی از کارایی روشی واحدهای تصمیم‌گیری حاصل خواهد شد. از طرفی $\varepsilon = u - v$ و نیز داریم،

$$Var(\varepsilon) = Var(u) + Var(v) - 2Cov(u,v) \qquad (۱۰)$$

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 درنتیجه 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 موردبحث به همراه مشخصات موردنیاز آن‌ها ارائه شده است. داده‌ها، مربوط به عملکرد سال ۱۳۹۳ بوده و از ترازنامه انرژی ۹۳ وزارت نیرو قابل‌دسترسی است. برای جزئیات بیشتر به مرجع شماره (۱) مراجعه شود.

همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، میزان مصرف داخلی نیروگاه برحسب مگاوات ساعت، متوسط کارکرد سالانه نیروگاه برحسب ساعت و درنهایت

جدول (۱): مشخصات نیروگاه‌های سدهای موردتحقیق

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	لتیان	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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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 وکخدان	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

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 مرزی تصادفی از نرم‌افزار Matlab و با در نظر گرفتن توزیع‌های نرمال و نیم-نرمال به ترتیب برای v و u استفاده شده است. لازم به ذکر است فرمان fminsearchbnd[1] 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 کلایتون در این محاسبات به کار گرفته شده است. در جدول (۲) پارامترهای برآورد شده در مدل تحلیل مرزی تصادفی ارائه

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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 ازاین‌رو 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 درنتیجه 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 هرکدام 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 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 مطرح‌شده‌اند. 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 وBCC برابر ۷۲/۱۰ درصد است.

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

ردیف	نیروگاه‌ها	CCR		BCC		SFA-Clayton		SFA	
		کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه
۱	ارس	۵۹/۷۶%	۲۳	۷۳/۹۸%	۱۹	۷۷/۰۷%	۱۲	۷۶/۴۸%	۱۱
۲	مهاباد	۵۴/۹۸%	۲۶	۶۱/۷۹%	۲۶	۵۸/۶۶%	۲۴	۵۷/۴۵%	۲۴
۳	زاینده‌رود	۷۸/۵۳%	۱۱	۹۷/۳۴%	۱۳	۹۵/۵۵%	۵	۹۴/۵۹%	۵
۴	کلان	۳۴/۲۹%	۳۱	۳۸/۶۱%	۳۱	۳۸/۶۸%	۳۱	۳۸/۴۹%	۳۱
۵	امیرکبیر	۷۸/۲۴%	۱۲	۸۰/۲۶%	۱۶	۷۳/۲۵%	۱۵	۷۴/۳۵%	۱۵
۶	لتیان	۸۱/۵۰%	۸	۹۸/۰۹%	۱۲	۷۱/۲۳%	۱۸	۷۱/۹۳%	۱۷
۷	طالقان	۲۸/۴۸%	۳۲	۵۵/۵۱%	۲۹	۲۹/۸۸%	۳۲	۲۹/۷۱%	۳۲
۸	لوارک	۱۰۰%	۱	۱۰۰%	٦	۸۷/۱۷%	۱۰	۸۳/۳۰%	۱۰
۹	کارون ۴	۹۰/۹۱%	۷	۹۳/۴۵%	۱۵	۹۱/۳۳%	۷	۹۲/۹۰%	۶
۱۰	کوهرنگ	۵۷/۴۰%	۲۴	۵۹/۹۹%	۲۷	۶۷/۱۱%	۱۹	۶۶/۴۷%	۲۰
۱۱	دز	۶۰/۱۰%	۲۲	۱۰۰%	۱	۸۷/۸۱%	۹	۸۷/۰۴%	۸
۱۲	شهیدعباسپور	۳۷/۰۷%	۳۰	۳۷/۲۲%	۳۲	۴۳/۸۲%	۳۰	۴۴/۱۴%	۳۰
۱۳	مسجدسلیمان	۶۹/۳۸%	۱۴	۷۰/۵۳%	۲۱	۷۲/۶۰%	۱۶	۷۳/۴۱%	۱۶
۱۴	کرخه	۶۷/۱۰%	۱۸	۱۰۰%	۵	۴۷/۰۶%	۲۸	۴۸/۷۰%	۲۷
۱۵	کارون ۳	۶۹/۱۷%	۱۵	۷۰/۹۵%	۲۰	۶۴/۴۵%	۲۲	۶۶/۵۱%	۱۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

ردیف	نیروگاه‌ها	CCR		BCC		SFA-Clayton		SFA	
		کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه	کارایی	رتبه
۱۶	مارون	۷۳/۵۳%	۱۳	۱۰۰%	۳	۱۰۰%	۱	۹۸/۲۹%	۲
۱۷	گتوند	۷۹/۳۰%	۱۰	۹۶/۴۵%	۱۴	۹۱/۵۶%	۶	۹۲/۳۲%	۷
۱۸	ملاصدرا	۶۶/۱۷%	۱۹	۶۷/۶۳%	۲۴	۶۶/۰۴%	۲۱	۶۶/۳۶%	۲۱
۱۹	درودزن	۱۰۰%	۲	۱۰۰%	۸	۹۶/۲۸%	۴	۹۵/۲۴%	۳
۲۰	شهیدطالبی (سپیدان)	۱۰۰%	۳	۱۰۰%	٤	۶۲/۹۹%	۲۳	۵۹/۴۳%	۲۳
۲۱	جیرفت	۶۸/۴۱%	۱۶	۷۴/۲۰%	۱۸	۷۶/۵۷%	13	۷۵/۲۶%	۱۳
۲۲	پیران	۸۱/۴۴%	۹	۱۰۰%	۹	۷۴/۷۷%	14	۷۴/۵۳%	۱۴
۲۳	پل کلو ۴	۹۱/۲۶%	۶	۱۰۰%	۷	۹۷/۳۴%	3	۹۵/۰۴%	۴
۲۴	کریک ۲	۹۷/۸۸%	۴	۹۹/۸۳%	۱۱	۸۸/۰۰%	8	۸۵/۴۳%	۹
۲۵	کریک ۳	۶۷/۸۹%	۱۷	۷۰/۲۳%	۲۲	۷۱/۲۸%	17	۶۹/۴۸%	۱۸
۲۶	پل کلو ۲ وکخدان	۴۵/۲۱%	۲۹	۵۶/۳۷%	۲۸	۴۸/۳۸%	26	۴۷/۱۹%	۲۸
۲۷	پل کلو ۱	۴۶/۵۵%	۲۸	۶۶/۴۹%	۲۵	۴۶/۸۹%	29	۴۵/۷۴%	۲۹
۲۸	سفیدرود	۹۷/۱۲%	۵	۱۰۰%	۱۰	۱۰۰%	2	۱۰۰%	۱
۲۹	تاکام (شهیدرجایی)	۶۵/۲۴%	۲۰	۷۴/۶۶%	۱۷	۷۷/۵۱%	11	۷۶/۱۷%	۱۲
۳۰	سیاه پیشه	۵۷/۲۰%	۲۵	۶۸/۴۱%	۲۳	۴۸/۳۲%	27	۴۹/۷۵%	۲۶
۳۱	گاماسیاب	۴۹/۰۲%	۲۷	۵۰/۸۳%	۳۰	۵۶/۲۴%	25	۵۴/۵۳%	۲۵
۳۲	دره تخت ۲	۶۴/۰۱%	۲۱	۱۰۰%	۲	۶۷/۰۸%	20	۶۳/۸۲%	۲۲

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

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

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

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

ردیف	نیروگاه	کارایی	رتبه	ردیف	نیروگاه	کارایی	رتبه
۱۲	شهیدعباسپور	۴۰/۵۶%	۳۰	۲۸	سفیدرود	۹۹/۲۸%	۱
۱۳	مسجدسلیمان	71/48%	۱۹	۲۹	تاکام (شهیدرجایی)	۷۳/۳۹%	۱۷
۱۴	کرخه	65/71%	۲۳	۳۰	سیاه پیشه	۵۵/۹۲%	۲۶
۱۵	کارون ۳	67/77%	۲۱	۳۱	گاماسیاب	۵۲/۶۵%	۲۷
۱۶	مارون	92/95%	۴	۳۲	دره تخت ۲	۷۳/۷۳%	۱۵

با توجه به اینکه نتیجه کارایی و رتبه حاصل از هر چهار روش برای نیروگاه‌ها متفاوت است، میانگین کارایی حاصل از چهار روش به‌دست‌آمده 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 به‌عنوان 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 به‌عنوان ورودی و میزان بهره‌برداری از ظرفیت نیروگاه به‌عنوان خروجی انتخاب شدند. محاسبات نشان داد که نتیجه کارایی و رتبه حاصل از هر یک از چهار روش برای نیروگاه‌ها متفاوت است. ازاین‌رو به‌عنوان نتیجه کلی، میانگین کارایی حاصل از چهار روش محاسبه شد و سپس رتبه نیروگاه‌ها با توجه با 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 دسته‌بندی می‌شوند. ازآنجایی‌که 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 درنتیجه 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[1]، ...) 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. هم اندیشان انرژی کیمیا. شهر تهران.

۴- سیداصفهانی، م. م.، آیت‌اللهی، س .ا .ح.، آیت‌اللهی، س .م .ر. (۱۳۸۵). "رتبه‌بندی کشورهای منتخب بر اساس کارایی در

[1] Independent Copula

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

تولید برق تجدیدپذیر با استفاده از تکنیک با رویکرد بنچ 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 برق‌آبی کشور در سال ۱۳۹۰". دومین کنفراس 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 برق‌آبی با تأمین برق از شبکه سراسری در روستاهای فاقد برق". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و حسابداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

۹- مهرابیان، م. ع. و فرهادی، م. (۱۳۸۲). "بررسی نیروگاه‌های برق‌آبی 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.

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- Habiboellah, 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 á 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]

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 Proffessor, 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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.4]