



بررسی اثر توزیع احتمالاتی جریان بر بهینه‌سازی انرژی برقابی مخزن سد مارون

مریم گودرزی^۱، سید احسان فاطمی^{۲*}، مریم حافظ پرست مودت^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴

مقاله پژوهشی

چکیده

سدها با اهداف گوناگونی از جمله تأمین نیازهای آبی، تولید انرژی برقابی و کنترل سیلاب طراحی می‌شوند، لذا با توجه به عدم قطعیت دبی ورودی به مخزن تعیین دقیق انرژی تولیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق به بررسی اثر توزیع احتمالاتی جریان در بهره‌برداری بهینه سد به منظور تولید انرژی برقابی و حداکثر تأمین نیاز کشاورزی در پایاب سد رویکرد بهینه‌سازی تصادفی صریح و روش برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی پرداخته شده است. از آمار بلندمدت دبی جریان ورودی به سد مارون واقع در استان خوزستان به صورت ماهانه در طی دوره ۵۲ ساله استفاده شده است. ابتدا تابع توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای ماه‌های مختلف با دو رویکرد استفاده از توزیع تجربی ویبول و انتخاب بهترین توزیع آماری به کمک نرم افزاری فیت محاسبه گردید. سپس برای سطح احتمال مشخص تأمین نیاز کشاورزی و ظرفیت نصب ۱۵۰ مگاوات، میزان انرژی برقابی به کمک مدل لینگو بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در رویکرد اول و دوم به ترتیب حداکثر تأمین نیاز کشاورزی ۸۶ و ۸۸ درصد بوده، همچنین انرژی سالانه کل به ترتیب معادل ۱۷۴/۳ و ۱۷۲/۹ گیگاوات ساعت است. بنابراین تعیین بهترین توزیع آماری جریان ورودی به مخزن تأثیر معنی‌داری بر نتایج نداشته و توزیع تجربی ویبول برای این منظور کفایت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی انرژی برقابی، برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی، لینگو، ایزی فیت

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، ۰۹۳۷۱۵۴۴۹۷۲

godarzi.maryam6713@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، ۰۹۱۳۱۰۱۳۸۲۴، se.fatemi@razi.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، ۰۹۹۱۴۴۱۲۹۸۴، hafezparast@razi.ac.ir

مقدمه

محدودیت منابع آب و توزیع غیریکنواخت آن و همچنین استفاده بی‌رویه از این منابع محدود، لزوم مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع موجود را در ایران که جز کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان است بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. همین امر وجود سازه‌هایی که در بخش منابع آب به‌منظور ذخیره و استفاده از منابع آب سطحی استفاده می‌شود را الزامی نموده است. از جمله سازه‌هایی که به‌منظور ذخیره آب استفاده می‌شود مخازن سطحی می‌باشند. در حالت واقعی معمولاً برای بهره‌برداری از یک مخزن، اهداف متفاوتی نظیر تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت در مناطق پایین‌دست، تولید انرژی برقایی و کنترل سیلاب و تفریحات تعریف می‌شوند. وجود مخازن سطحی در کنار مزیت‌هایی که دارد ممکن است دارای معایبی نیز باشد از جمله مشکلات احداث مخازن سطحی آسیب رساندن به محیط‌زیست است. استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برقایی علاوه بر صرفه‌جویی‌های ارزی و ریالی قابل توجه، کاهش آلودگی محیط‌زیست، حل مشکل تأمین انرژی روستاهای صعب‌العبور و دورافتاده، رفع نگرانی روستاییان در تأمین سوخت موردنیاز خود، کاهش نسبی هزینه تولید محصولات کشاورزی و درنهایت افزایش عمر محدود منابع فسیلی را به دنبال خواهد داشت (Shadravan and Mansourzadeh, 2003).

برنامه‌ریزی با قیود احتمالاتی بیش از پنجاه سال پیش توسط (Charnes and Cooper, 1959) معرفی شده و سپس توسط بسیاری از نویسندگان به‌طور گسترده توسعه یافت. (Henrion and Römisch, 2004; Prékopa, 1995; Prékopa, 2003) هر کدام به نحوی در توسعه ریاضی روش حل پایدار با قیود احتمالاتی در برنامه‌ریزی خطی پرداختند. کاربرد این روش برای مدیریت سد را می‌توان در پژوهش‌های (Andrieu et al. 2018) یافت که جهت بهینه‌سازی و مدیریت یک مخزن سد از روش ریاضی و حل عددی جدید در قیود احتمالاتی استفاده نمودند. همچنین این کاربرد توسط Prékopa (1995) و (Prékopa and Szántai, 1979) با ارائه روش ریاضی کنترل بهینه تنظیم سطح آب دریاچه مخزن سد بالتون در مجارستان توسعه یافت.

Wim van Ackooij 2013 و اکثر مطالعات دیگر

روش قیود احتمالاتی را درجایی که متغیرهای تصمیم‌گیری ثابت یا حلقه باز هستند به کار می‌برند، که در این صورت جواب‌ها بردارهای قطعی هستند. et al. 2018 Sethi یک روش برنامه‌ریزی قطعی خطی (DLP) و یک روش برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی (CCLP) برای تخصیص فصلی منابع آب بر اساس نیاز آب آبیاری خالص محصولات به‌عنوان یک متغیر تصادفی توسعه دادند. 2013 Wim van Ackooij قیود احتمالاتی ثوری، الگوریتمی و کاربردی را برای مدیریت انرژی استخراج کرد. در این روش به دو کاربرد از مدیریت انرژی نگاه کرد: مدیریت مخازن آبخاری با وجود عدم قطعیت در جریان ورودی و تعهد واحد با عدم اطمینان از بار مشتری. در هر دو برنامه عدم اطمینان از طریق استفاده از محدودیت‌های احتمالی برطرف می‌شود. به نظر می‌رسد نتایج عددی ارائه‌شده، امکان حل مسئله بهینه‌سازی با محدودیت احتمالی مشترک روی سیستمی با حداکثر ۲۰۰ محدودیت را نشان می‌دهد. در تحقیقی از یک مدل برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک جهت بهینه‌سازی تولید انرژی در یک مخزن سد برقایی استفاده کرد، تابع هدف حداقل کردن خسارت ناشی از کمبود در تولید انرژی مطمئن می‌باشد (شهبازی، ۱۳۹۰). Andrieu et al. 2018 مدل قیود احتمالاتی دینامیکی مشترک را ارائه داد و آن را برای یک مسئله بهینه‌سازی در مدیریت مخزن آب استفاده کرد. این مدل به گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم‌متکی است اما پیوستگی توزیع احتمال را نگه می‌دارد. روش متکی به محاسبه احتمالاتی است که به‌ویژه در حضور متغیرهای تصادفی مستقل بسیار مفید است اما برای متغیرهای وابسته نیز به همان اندازه خوب کار می‌کند. نتایج عددی برای دو تا سه مرحله فراهم‌شده است. ولیسه (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای برقایی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی (LP) به کمک نرم‌افزار لینگو پرداخت. تابع هدف در مدل بهینه‌سازی، حداکثر سازی انرژی تولیدی اولیه و ثانویه با توجه به هزینه‌های مختلف سالیانه در جهت تولید سود بیشتر می‌باشد. در پژوهشی دیگر سیستم منابع آب سد مخزنی بالارود در استان خوزستان که هدف آن تأمین آب مصارف کشاورزی بوده

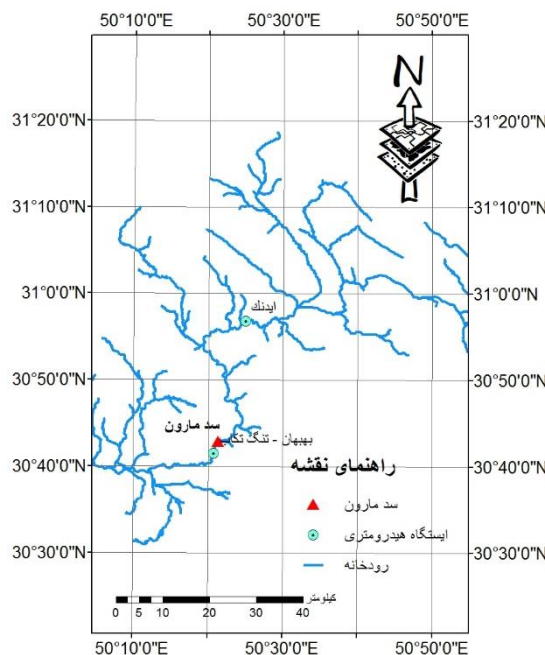
بهینه سازی با پیش‌بینی تصادفی منجر به حفاظت سطح قابل توجهی از خسارت سیل بدون کاهش تولید انرژی برقی می‌شود. Carpentier et al. 2017 به مدیریت بهره‌برداری از سد برق‌آبی با ورودی جریان احتمالاتی مقید به قیمت برق و به اصطلاح "محدودیت گردشگری" به این معنی که سطح ذخیره آب باید در طول فصل گردشگری با احتمال زیاد به اندازه کافی بالا باشد، پرداختند. در تحقیق‌های انجام‌شده خلأ مطالعاتی در خصوص مدل‌سازی انرژی برقی تولیدشده از مخزن سد توسط ورودی‌های احتمالاتی احساس می‌گردد، هدف از این تحقیق تأمین حداکثر نیاز کشاورزی پایاب سد با بیشترین میزان انرژی سالانه تولیدشده می‌باشد به شرطی که ورودی جریان به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود. بدین منظور از بهینه‌سازی با رویکرد برنامه‌ریزی خطی توسط قیود احتمالاتی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی منطقه مطالعاتی

سد مارون که سدی از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی است بر روی رودخانه مارون واقع در جنوب شرقی استان خوزستان با مختصات "۳۶'۴۲" شمالی و "۵۴'۲۱" شرقی احداث شده است. دریاچه این سد با گنجایش ۱۰۷۹ میلیون مترمکعب آب، طولی معادل ۳۰ کیلومتر دارد. شکل ۱ و ۲ موقعیت سد مارون در استان خوزستان و سیستم منابع و مصارف حوضه سد مارون به صورت شماتیک نشان می‌دهد. اهداف این سد تأمین انرژی برقی با ظرفیت نصب ۱۵۰ مگاوات (۲ توربین با ظرفیت ۷۵ مگاوات) و تأمین نیاز کشاورزی دشت‌های بهبهان، جایزان، خلف آباد، شادگان با مجموع نیاز سالیانه معادل ۵۷۲/۶۵ میلیون مترمکعب می‌باشد که توزیع ماهانه آن به در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقدار متوسط سالانه ارتفاع تبخیر از سطح آزاد آب در محل سد مارون برابر ۲۰۰۹ میلی‌متر بوده و مقادیر درصد ارتفاع تبخیر از سطح مخزن سد مارون در ماه‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

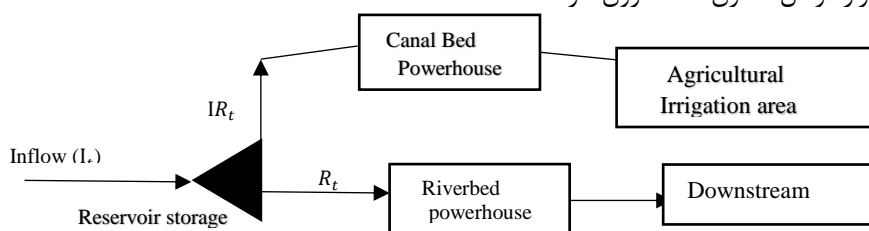
است را با استفاده از نرم‌افزار ARSP شبیه‌سازی کرد در این روش با در نظر گرفتن ظرفیت‌های نصب مختلف نیروگاه در سیستم، تولید انرژی تنها بر اساس آب ره‌اشده برای کشاورزی مورد ارزیابی قرار داده شده است (تقیان، ۱۳۹۲). به منظور بهینه‌سازی عملکرد سد برای تأمین نیاز برقی از الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر الگوریتم ژنتیک بهره‌گرفتند (فرخنده کیش و صادقیان، ۱۳۹۳). افشاریان زاده و موسوی (۱۳۹۴) در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم برقی مخازن و نیروگاه‌های متوالی کارون دو و سه، با هدف حداکثر ساختن مقدار انرژی تولیدی، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح توسعه دادند. تأثیر خروجی و ذخیره مخزن را بر روی حداکثر انرژی برقی تولیدشده از سد با رویکرد بهینه‌سازی توسط (Yoo 2009) بررسی شد و سیاست بهینه‌سازی را با توجه به نسبت بین دو پارامتر خروجی و ذخیره مخزن در نظر گرفت. در حالتی که تابع هدف را خطی در نظر گرفت نتایج نشان داد که حداکثر تولید انرژی سالانه حدود ۱۸۴ گیگاوات ساعت است که نشان می‌دهد ۸۶٪ از سطح تولید انرژی پتانسیل می‌باشد. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم تک مخزنه‌ای با تابع هدف ماکزیمم نمودن تولید انرژی برقی در شرایط عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن که با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است توسط Zhou and Yong (2012) انجام شد و نتایج حاکی از کارایی الگوریتم ژنتیک در شرایط عدم قطعیت است. Jothiprakash and Arunkumar 2014 در تحقیقی از یک سیستم چندمخزنه با نیروگاه‌های برقی متعدد استفاده کردند به منظور به حداکثر رساندن تولید انرژی برقی و تأمین نیاز آبیاری با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) بهینه‌سازی انجام داده‌اند. et al. 2016 Fan به بررسی مخزن آبی چندمنظوره در منطقه گرمسیری در برزیل که اهداف آن تولید انرژی برقی و کنترل سیل پایین دست می‌باشد را بررسی کرده، این مطالعه با دو هدف اصلی صورت گرفته است که از پیش‌بینی بارش بر اساس داده‌های مشاهده شده، به صورت قطعی و احتمالی استفاده شده است، نتایج نشان داد



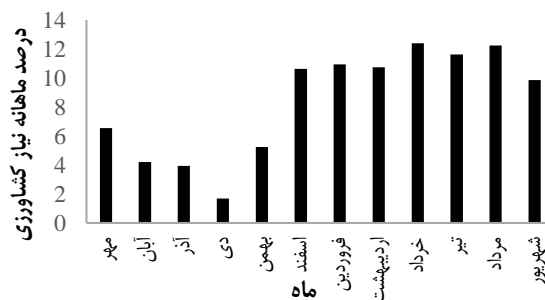
شکل (۱): محل سد مخزنی مارون در استان خوزستان

چهار ماه آذر لغایت اسفندماه نمی‌بایست از رقوم ۴۹۳ متر از سطح دریا تجاوز نماید. تراز حداقل بهره‌برداری مخزن سد مارون معادل ۴۴۰ متر از سطح دریا منظور شده است. حداقل حجم مخزن برابر ۱۲۱/۹ میلیون مترمکعب و حداکثر حجم مخزن معادل ۱۰۷۹ میلیون مترمکعب است.

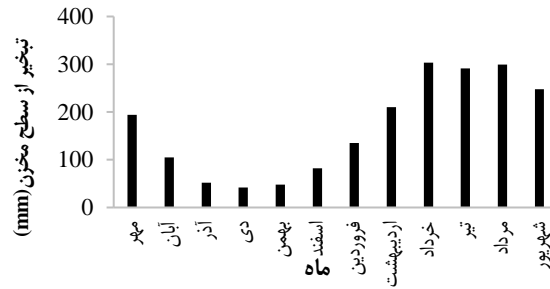
تراز نرمال مخزن سد مارون ۵۰۵ متر از سطح دریا می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از تخلیه سیلاب‌های بزرگ و کنترل حجم جریان ناشی از سیلاب، بخشی از حجم مفید مخزن طی ماه‌های سیلابی برای کنترل سیلاب در نظر گرفته‌شده است. از این‌رو تراز نرمال مخزن سد مارون در



شکل (۲): شکل شماتیک منابع و مصارف و نیروگاه سد مارون



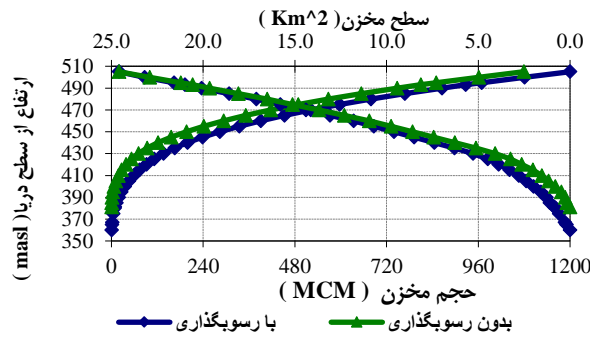
شکل (۳): درصد توزیع ماهانه نیازهای کشاورزی پایاب سد مارون



شکل (۴): توزیع ماهانه تبخیر از سطح مخزن سد مارون

بالایی قبل از اینکه جریان آب به تأمین نیاز کشاورزی بپردازد در نیروگاه واقع در بستر کانال، به محاسبه انرژی برقایی آن پرداخته شده و در شاخه پایینی، از آبهای سرریزی و مازاد تأمین نیاز کشاورزی به تولید انرژی برقایی بهره گرفته شده است.

مشخصات هندسی مخزن سد مارون قبل و بعد از رسوب گذاری در شکل ۵ ارائه شده است. کلیه داده ها از گزارش برنامه ریزی منابع آب اسفند سال ۱۳۸۶ شرکت سهامی سازمان آب و برق تهیه شده است. با توجه به شماتیک رسم شده، جریان ورودی پس از وارد شدن به مخزن سد به دوشاخه تقسیم شده است، در شاخه



شکل (۵): روابط هندسی مخزن سد مارون با و بدون رسوب گذاری

EB_t : توان تولیدی محاسبه شده در دوره t
(۲) قید شماره یک $prob[IR_t \geq D_t] \geq P$
 IR_t = دبی خروجی از سد برای آبیاری در دوره t
 D_t = نیاز کشاورزی در دوره t
 P = سطح اطمینان برای تأمین نیاز کشاورزی
(۳) $S_{t+1} = S_t + I_t - IR_t - R_t - E_t$
در فرمول بالا S_t ، S_{t+1} ، E_t ، I_t و R_t به ترتیب حجم مخزن در انتهای دوره بهینه سازی، حجم مخزن در ابتدای دوره بهینه سازی، جریان ورودی تصادفی به مخزن در دوره t ، حجم تبخیر از مخزن در دوره t و دبی خروجی از سد به شاخه پایین سد در دوره t می باشد. با استفاده از مشخصات $H_t = \gamma \left[\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right] + \delta$

بهینه سازی انرژی برقایی با استفاده از رویکرد CCLP^۱

تابع هدف در بهینه سازی با رویکرد CCLP ماکزیمم کردن توان تولیدی خروجی از سد می باشد در حالی که ورودی به مخزن غیر قطعی است، با استفاده از معادله بیلان مخزن سد و تعریف یک رابطه ریاضی تصمیم گیری خطی مناسب به عنوان معادله کمکی LDR حجم مخزن در پایان هر دوره برابر یک پارامتر قطعی محاسبه می گردد، همچنین تابع هدف (معادله ۱) و قیدهای مربوط به حجم مخزن، معادله پیوستگی، ارتفاع و توان به شکل احتمالی در معادلات ۲ تا ۱۹ به صورت زیر بیان شده است.

$$(۱) \text{ تابع هدف: } \text{Maximize } \sum_{t=1}^{T} EB_t$$

^۱ Chance constrained linear programming (cclp)

(۱۲) قید شماره چهارم و پنجم

$$b_{t-1} \leq K_T$$

$$b_{t-1} \geq K_d$$

K_T و K_d به ترتیب حجم کل و حجم مرده مخزن می‌باشند. با استفاده از مشخصات فیزیکی مخزن، رابطه H_t هد آب در مخزن برحسب تغییرات حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره بهینه‌سازی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۱۳)

که در آن γ و δ به ترتیب ضریب شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی سازی شده ارتفاع با تغییرات حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره بهینه‌سازی و برابر 0.0606 و 0.442 است.

برای محاسبه هد خالص نیاز به منظور نمودن ارتفاع آب روی توربین (tail water) و افت مسیر انتقال آب به توربین (h_f) می‌باشد، که نهایتاً رابطه ۱۴ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EB_t = C[R_t(H_t - H_{TAIL} - h_f)] \quad (14)$$

$$H_{Net\ t} = H_t - H_{tail} - h_f \quad (15)$$

برای محاسبه توان تولیدی از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود در این رابطه R_t مقدار آب خروجی سددرشاخه پایین می‌باشد.

$EB_t =$ توان تولیدی محاسبه شده در هر دوره زمانی، H_{TAIL} ارتفاع هد آب روی توربین و C ضریب ثابت که حاصل ضرب تبدیل واحد در راندمان توربین (۰.۹۰ در صد) است و به ترتیب برابر با 375 متر و 0.034060 می‌باشند.

با توجه به اینکه حاصل ضرب دبی جریان ورودی به نیروگاه در ارتفاع مخزن $R_t H_t$ یک رابطه غیرخطی می‌باشد با استفاده از رابطه پیشنهادی (Loucks et al, 1981) معادله به یک رابطه خطی به صورت رابطه ۱۶ تبدیل می‌شود.

$$R_t H_t = R_t H_{t0} + R_{t0} H_t - R_{t0} H_{t0} \quad (16)$$

که مقادیر R_{t0} و H_{t0} به صورت میانگین خروجی مخزن و میانگین ارتفاع هد آب در مخزن در دوره t در نظر گرفته

فیزیکی مخزن، مقدار حجم تبخیر در مخزن به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود، در این رابطه روابط حجم با سطح مخزن سد به صورت یک رابطه خطی مرتبط می‌گردد.

$$E_t = A_0 e_t + a \left[\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right] e_t \quad (4)$$

که e_t ارتفاع تبخیر، A_0 سطح مخزن در حجم مرده و a ضریب خطی سازی سطح با حجم مخزن می‌باشد و در این مطالعه به ترتیب ۶ و 0.175 در نظر گرفته شده است. همان گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد جهت برقراری ارتباط بین پارامترهای غیرخطی با یک پارامتر قطعی در رویکرد CCLP نیاز به تعریف یک معادله تصمیم‌گیری خطی کمکی (۵) به صورت رابطه زیر است.

$$LDR: IR_t = S_t + I_t - R_t - E_t - b_t \quad (5)$$

b_t پارامتر قطعی و متغیر تصمیم در هر دوره می‌باشد. در رابطه ۵ کلیه متغیرها قبلاً توضیح داده شده و فقط متغیر b_t به عنوان یک پارامتر قطعی در هر دوره بهینه‌سازی تعریف می‌گردد. با استفاده از حل هم‌زمان معادله ۳ و ۵ و جایگذاری رابطه ۵ در معادله بیلان سد، متغیر حجم مخزن در انتهای هر دوره برابر پارامتر قطعی محاسبه می‌گردد، لذا حجم مخزن در انتهای دوره برابر پارامتر قطعی b_t خواهد شد.

$$S_{t+1} = b_t \quad (6)$$

با استفاده از رابطه ۶ می‌توان نتیجه گرفت:

$$S_t = b_{t-1} \quad (7)$$

بعد از تعمیم رابطه حجم تبخیر در معادله LDR و جایگذاری در قید شماره ۱ رابطه‌های زیر به دست آمده

$$IR_t = (1 - \beta) S_t - (1 + \beta) S_{t+1} + I_t - R_t - \alpha \quad (8)$$

$$Pr[(1 + \beta) S_{t+1} - (1 - \beta) S_t + R_t + \alpha + D_t \leq I_t] > P \quad (9)$$

(۱۰) قید شماره دو

$$(1 + \beta) b_t - (1 - \beta) b_{t-1} + R_t + \alpha + D_t \leq F_{I_t} (1 - p)$$

$$F_{I_t} = (1 - p) = \text{جریان ورودی به مخزن در طول دوره } t$$

با احتمال $(1 - P)$ درصد یا همان CDF جریان ورودی به مخزن.

$$EB_t \leq BC \quad (11)$$

قید شماره سه

$BC =$ ظرفیت نصب فرض طراحی

هرماه محاسبه شده و در نهایت به مقایسه نتایج دو روش پرداخته شده است. نرم افزار ایزی فیت با داشتن ۶۴ توزیع آماری مختلف و پر کاربرد بهترین توزیع را بر اساس معیارهای مختلف تصمیم گیری (کای اسکور، کلموگروف-اسمیرونوف و اندرسون دارلینگ) معرفی و انتخاب می نماید، بنابراین به کمک این نرم افزار بهترین توزیع جریان ورودی در هر ماه انتخاب و تابع توزیع تجمعی مربوط به آن به همراه پارامترهای مدل از این نرم افزار استخراج گردید.

بحث و نتایج

در این بخش ابتدا به بهینه سازی توان تولیدی خروجی از سد مارون در حالت عدم قطعیت با رویکرد CCLP با استفاده از توزیع تجربی و بیول برای محاسبه CDF جریان ورودی به مخزن در سطوح احتمال مختلف پرداخته شده است، توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن با استفاده از توزیع تجربی و بیول برای سطوح احتمال ۱۰ تا ۵۰ درصد محاسبه و در جدول ۱ بیان شده است. دلیل انتخاب این سطوح احتمالاتی به سبب تأمین نیاز کشاورزی ۵۰ تا ۹۰ درصد می باشد. به منظور اینکه مرز دقیق جواب مدل نوشته شده برای سطوح احتمالی بین احتمال ۱۰ تا ۱۵ درصد محاسبه گردد فواصل انتخابی در این رنج به فاصله ۱ درصد از هم انتخاب شده و مدل برای آن اجرا و بهینه شده است. در ادامه توابع تجمعی توزیع احتمالاتی بهینه در ماه های مختلف به کمک نرم افزار ایزی فیت استخراج و مسئله بار دیگر در این شرایط حل شده است و در نهایت نتایج دو رویکرد تعیین CDF جریان ورودی به مخزن در مقادیر بهینه سازی تولید انرژی و سطوح تأمین نیاز کشاورزی مقایسه گردید. مرز غیرقابل اجرا شدن مدل در رویکرد اول، سطح احتمال ۱۴ درصد محاسبه شده است، این بدین معنی است که سطح تأمین نیاز کشاورزی معادل ۸۶ درصد است

می شود و محاسبات تا جایی ادامه می یابد که اختلاف رابطه خطی سازی شده با رابطه غیرخطی توان تولیدی در هر دوره شبیه سازی به کمتر از 10^{-5} برسد. این مهم به صورت رابطه ۱۷ نشان داده شده است.

$$R_t H_t - (R_t H_{t0} + R_{t0} H_t - R_{t0} H_{t0}) = 10^{-5} \quad (17)$$

بنابراین با جایگذاری روابط فوق معادله ۱۵ به صورت رابطه ۱۸ بازنویسی می گردد و معادله زیر به دست می آید:

$$EB_t = C[R_t(H_{t0} - H_{TAIL} - h_f) + R_{t0}(H_t - H_{TAIL} - h_f) - R_{t0}(H_{t0} - H_{TAIL} - h_f)] \quad (18)$$

$$(19) \text{ قید شماره ششم} \quad H_{min} \leq H_{Net_t} \leq H_{max}$$

بدیهی است که در این رابطه مقدار تغییرات هد خالص در هر دوره بایستی بین حداکثر و حداقل ارتفاع مخزن قرار می گیرد که در قید شماره ششم ارائه شده است. در این قید H_{min} و H_{max} به ترتیب از حاصل تفریق تراز نرمال و حداقل تراز بهره برداری مخزن از تراز آب روی توربین HTAIL و کل افت مسیر انتقال آب به نیروگاه h_f محاسبه می گردد که به ترتیب برابر ۱۲۷ و ۶۲ متر می باشد. با توجه به مطالب گفته شده قیدهای مطرح شده به همراه تابع هدف که حداکثر نمودن انرژی تولید سالانه است در نرم افزار تخصصی بهینه سازی Lingo برنامه نویسی شد. برای محاسبه توان تولیدی در حالت عدم قطعیت با رویکرد برنامه ریزی خطی توسط قیود احتمالاتی، نیاز به استفاده از تابع تجمعی توزیع احتمالاتی دبی جریان ورودی^۱ به مخزن در هرماه می باشد (قید شماره دو) برای این منظور از دو روش به محاسبه CDF جریان در هرماه پرداخته شده است، ابتدا در مرحله اول با استفاده از توزیع تجربی و بیول^۲، تابع توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای ماه های مختلف محاسبه می گردد. سپس به کمک نرم افزار ایزی فیت توزیع های مختلف آماری بر روی داده های جریان ورودی برای هرماه برازش داده شده و بهترین توزیع برای

^۱Weibull

^۲ Cumulative distribution function (CDF)

جدول (۱): توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن با توزیع تجربی ویبول برحسب میلیون مترمکعب برای سطح احتمال ۱۰ تا ۵۰ درصد

سطح احتمال P (%)	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰
مهر	۲۷/۹	۲۵/۵	۲۴/۴	۲۱/۶	۲۱/۳	۲۰/۱	۱۹/۵	۱۷/۴	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۶/۹	۱۶/۵	۱۶/۵
آبان	۳۱/۷	۲۹/۹	۲۹/۴	۲۹/۰	۲۶/۸	۲۵/۳	۲۱/۲	۱۹/۰	۱۸/۸	۱۸/۶	۱۸/۳	۱۸/۰	۱۸/۰
آذر	۷۵/۱	۵۸/۲	۵۷/۳	۵۱/۴	۴۶/۷	۴۲/۵	۳۶/۲	۳۱/۷	۳۰/۲	۲۸/۶	۲۷/۰	۲۵/۵	۲۵/۵
دی	۱۱۴/۶	۱۰۰/۷	۹۴/۷	۸۹/۸	۷۸/۵	۷۵/۰	۵۹/۸	۵۱/۶	۴۹/۱	۴۶/۵	۴۶/۳	۴۶/۱	۴۶/۱
بهمن	۲۰۰/۱	۱۷۹/۸	۱۶۵/۴	۱۴۷/۹	۱۱۳/۶	۱۰۸/۶	۹۳/۶	۸۵/۹	۷۹/۴	۷۳/۷	۶۳/۶	۵۳/۵	۵۳/۵
اسفند	۲۲۸/۶	۲۰۸/۶	۲۰۰/۸	۱۷۶/۶	۱۵۸/۷	۱۳۸/۷	۱۲۱/۰	۱۰۴/۳	۹۸/۵	۹۲/۷	۸۷/۶	۸۲/۴	۸۲/۴
فروردین	۲۴۸/۵	۲۳۷/۰	۲۳۲/۴	۲۲۷/۳	۱۸۵/۱	۱۸۰/۰	۱۴۳/۹	۱۲۵/۵	۱۲۴/۳	۱۲۳/۰	۱۲۱/۵	۱۱۹/۹	۱۱۹/۹
اردیبهشت	۱۷۰/۱	۱۵۶/۹	۱۴۹/۲	۱۴۳/۷	۱۳۹/۱	۱۲۷/۷	۱۰۸/۹	۸۰/۵	۷۸/۸	۷۷/۱	۷۵/۰	۷۲/۹	۷۲/۹
خرداد	۸۶/۷	۸۳/۹	۷۹/۳	۷۳/۳	۷۰/۳	۶۹/۰	۶۰/۶	۴۲/۳	۴۱/۷	۴۱/۱	۴۰/۶	۴۰/۰	۴۰/۰
تیر	۵۲/۶	۴۸/۵	۴۷/۹	۴۴/۹	۳۶/۱	۳۵/۲	۳۱/۶	۲۹/۳	۲۷/۹	۲۶/۴	۲۶/۳	۲۶/۲	۲۶/۲
مرداد	۳۷/۳	۳۴/۱	۳۳/۳	۳۲/۰	۲۸/۴	۲۷/۱	۲۲/۹	۲۱/۹	۲۱/۹	۲۱/۹	۲۱/۷	۲۱/۴	۲۱/۴
شهریور	۳۰/۱	۲۸/۷	۲۷/۹	۲۶/۳	۲۴/۵	۲۳/۲	۱۹/۸	۱۹/۲	۱۹/۰	۱۸/۸	۱۸/۵	۱۸/۲	۱۸/۲
سالیانه	۱۳۰۳/۷	۱۱۹۲/۳	۱۱۴۲/۴	۱۰۶۳/۷	۹۲۹/۵	۸۷۲/۹	۷۳۹/۷	۶۲۸/۳	۶۰۷/۴	۵۸۶/۴	۵۶۳/۷	۵۴۱/۱	۵۴۱/۱

جدول (۲): پارامترهای بهترین توزیع آماری بر روی داده‌های جریان ورودی در هر ماه

ماه	بهترین توزیع آماری	پارامترهای مدل
مهر	Gamma(3p)	$\alpha = ۳/۹۱$ $\beta = ۲/۱$ $\gamma = ۲/۷$
آبان	Burr	$K = ۰/۳۸$ $\alpha = ۵/۱۹$ $\beta = ۸/۹۴$
آذر	Frechet(3p)	$\alpha = ۱/۳$ $\beta = ۲۰/۱۹$ $\gamma = -۰/۲۱$
دی	Inv.Gaussian(3p)	$\lambda = ۵۸/۸۴$ $\mu = ۶۳/۵۲$ $\gamma = ۳/۰۲$
بهمن	Dagum	$k = ۰/۷۴$ $\alpha = ۲/۶۱$ $\beta = ۸۱/۷۷$
اسفند	Log-Pearson3	$\alpha = ۱۰۷/۱۳$ $\beta = -۰/۰۶۶$ $\gamma = ۱۱.۵۸۴$
فروردین	Weibull(3p)	$\alpha = ۱/۳۳$ $\beta = ۸۹/۷$ $\gamma = ۲۷/۰۹۷$
اردیبهشت	Wakeby	$\beta = ۸/۵۶$ $\alpha = ۲۳۲/۶۷$ $\gamma = ۴۲/۹۹$ $\delta = -۰/۱۶$
خرداد	Gen.logistic	$k = ۰/۱۹۸۹$ $\delta = ۹/۵۵$ $\mu = ۳۲/۹۸$
تیر	Beta	$\alpha_1 = ۲۲/۲۸$ $\alpha_2 = ۲/۲۴$ $a = ۴/۴۵$ $b = ۱۸۹/۳۱$
مرداد	Burr(4p)	$\alpha = ۱/۷۳۱۱$ $k = ۱۸۱/۴۸$ $\beta = ۲۴۶/۷$ $\gamma = ۴/۰۹$
شهریور	Burr(4p)	$\alpha = ۱/۳۸$ $k = ۳۳/۱۱$ $\beta = ۶۱/۱۰$ $\gamma = ۳/۶۵$

آماري متفاوتی نظیر توزیع بتا، لوگ پیروسون سه پارامتری و گامای سه پارامتری و ... در هر ماه به عنوان بهترین توزیع احتمالاتی دبی جریان آب با توجه به معیارهای سه گانه شامل کای اسکوتر، کلموگروف-اسمیرنوف و اندرسون دارلینگ معرفی شده در نرم افزار ایزی فیت انتخاب شده است. در جدول ۳ برای هر توزیع آماری مقادیر پارامترهای هر توزیع محاسبه و ارائه شده است.

در مرحله بعد با استفاده از رویکرد دوم بهترین توزیع برای هر ماه مطابق جدول ۲ بیان شده است. توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن با استفاده از این رویکرد نیز برای هر ماه محاسبه شد که در این حالت مرز غیرقابل اجرا شدن مدل، سطح احتمال ۱۲ درصد می باشد. همان طور که از جدول فوق قابل مشاهده است با توجه به خصوصیات متفاوت دبی جریان آب در ماه های مختلف، توزیع های



جدول (۳): توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن با تعیین بهترین توزیع برحسب میلیون مترمکعب برای سطح احتمال ۱۰ تا ۵۰ درصد

سطح احتمال P (%)	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰
مهر	۲۶/۵	۲۵/۳	۲۴/۱	۲۲/۸	۲۱/۶	۲۰/۴	۱۹/۱	۱۷/۸	۱۷/۵	۱۷/۲	۱۶/۸	۱۶/۵	۱۶/۲
آبان	۳۱/۸	۳۰/۰	۲۸/۳	۲۶/۷	۲۵/۲	۲۳/۷	۲۲/۲	۲۰/۵	۲۰/۱	۱۹/۸	۱۹/۴	۱۹/۰	۱۸/۶
آذر	۶۸/۸	۶۱/۶	۵۵/۴	۴۹/۸	۴۴/۸	۴۰/۱	۳۵/۷	۳۱/۴	۳۰/۵	۲۹/۷	۲۸/۸	۲۷/۹	۲۷/۰
دی	۱۱۶/۳	۱۰۴/۶	۹۴/۱	۸۴/۶	۷۵/۹	۶۷/۸	۶۰/۱	۵۲/۶	۵۱/۱	۴۹/۶	۴۸/۱	۴۶/۵	۴۵
بهمن	۱۷۹/۳	۱۶۴/۵	۱۵۰/۵	۱۳۷/۰	۱۲۳/۷	۱۱۰/۴	۹۶/۶	۸۲/۰	۷۸/۹	۷۵/۷	۷۲/۴	۶۹/۱	۶۵/۶
اسفند	۲۲۱/۵	۲۰۳/۱	۱۸۵/۸	۱۶۹/۴	۱۵۳/۵	۱۳۷/۱	۱۲۲/۳	۱۰۶/۱	۱۰۲/۷	۹۹/۳	۹۵/۸	۹۲/۲	۸۸/۵
فروردین	۲۵۵/۰	۲۳۵/۹	۲۱۷/۷	۲۰۰/۳	۱۸۳/۴	۱۶۶/۹	۱۵۰/۵	۱۳۴/۰	۱۳۰/۷	۱۲۷/۳	۱۲۳/۹	۱۲۰/۴	۱۱۷
اردیبهشت	۱۷۰/۰	۱۵۹/۹	۱۵۰/۲	۱۴۰/۸	۱۳۱/۱	۱۲۰/۸	۱۰۹/۱	۹۵/۰	۹۱/۸	۸۸/۴	۸۴/۸	۸۱/۱	۷۷/۱
خرداد	۸۸/۳	۸۳/۳	۷۸/۳	۷۳/۴	۶۸/۳	۶۳/۰	۵۷/۳	۵۰/۸	۴۹/۳	۴۷/۸	۴۶/۲	۴۴/۵	۴۲/۸
تیر	۵۱/۷	۴۸/۴	۴۵/۲	۴۲/۱	۳۹/۱	۳۶/۰	۳۲/۹	۲۹/۶	۲۸/۹	۲۸/۳	۲۷/۵	۲۶/۸	۲۶/۱
مرداد	۳۷/۴	۳۵/۲	۳۳/۱	۳۱/۰	۲۸/۹	۲۶/۸	۲۴/۶	۲۲/۳	۲۱/۹	۲۱/۴	۲۰/۹	۲۰/۳	۱۹/۸
شهریور	۳۰/۳	۲۸/۷	۲۷/۲	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۲/۵	۲۰/۹	۱۹/۱	۱۸/۷	۱۸/۴	۱۸/۰	۱۷/۶	۱۷/۲
سالیانه	۱۲۷۷/۶	۱۱۸۸	۱۰۹۰/۵	۴۳۸۶۲	۹۲۰/۳	۸۳۷	۷۵۱/۸	۶۶۱/۷	۶۴۲/۶	۶۲۳/۱	۶۰۳/۱	۵۸۲/۴	۵۶۱/۱

آبدهی در سطوح احتمالاتی مختلف مقادیر سالانه انرژی کل در قسمت‌های مختلف محاسبه و در جدول ۴ ارائه گردید.

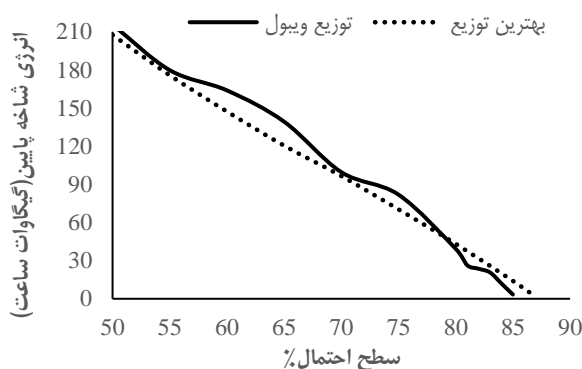
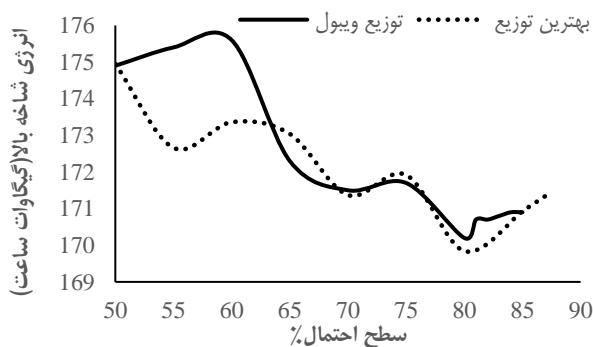
حال به کمک بهترین توزیع و پارامترهای به‌دست‌آمده برای هر ماه توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای سطح احتمال ۱۰ تا ۵۰ درصد مطابق جدول ۳ از نرم‌افزار ایزی‌فیت به‌دست‌آمده است. در ادامه با داشتن مقادیر

جدول (۴): مقادیر انرژی سالانه کل با استفاده از توزیع تجربی ویبول و از بهترین توزیع آماری

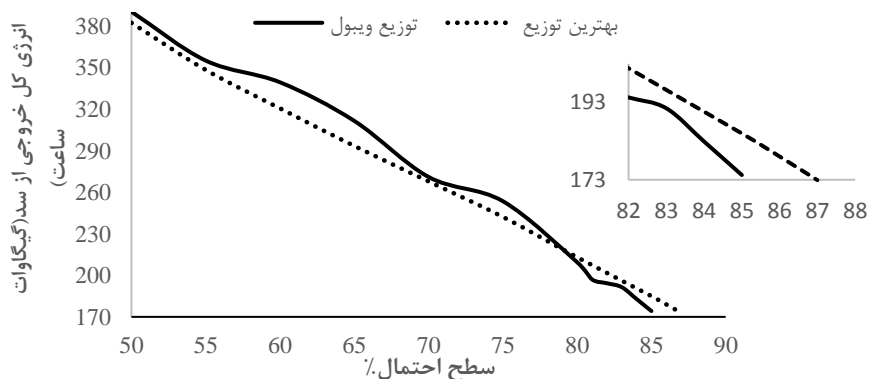
رویکرد	درصد	انرژی سالانه در شاخه کشتاورزی	انرژی سالانه در شاخه بالایی	انرژی کل سالانه	رویکرد	درصد	انرژی سالانه در شاخه پایینی	انرژی سالانه در شاخه بالایی	انرژی کل سالانه
توزیع تجربی ویبول	۵۰	۲۱۵/۶	۱۷۴/۹	۳۹۰/۵	بهترین توزیع آماری	۵۰	۲۰۷/۵	۱۷۴/۹	۳۸۳/۴
	۵۵	۱۷۹/۸	۱۷۵/۴	۳۵۵/۳		۵۵	۱۷۵/۸	۱۷۲/۷	۳۴۸/۵
	۶۰	۱۶۳/۹	۱۷۵/۶	۳۳۹/۵		۶۰	۱۴۷/۲	۱۷۳/۴	۳۲۰/۶
	۶۵	۱۳۹/۳	۱۷۲/۳	۳۱۱/۶		۶۵	۱۲۰/۵	۱۷۳/۰	۲۹۳/۵
	۷۰	۹۹/۶	۱۷۱/۵	۲۷۱/۱		۷۰	۹۶/۵	۱۷۱/۴	۲۶۷/۹
	۷۵	۸۱/۹	۱۷۱/۷	۲۵۳/۷		۷۵	۷۰/۳	۱۷۱/۹	۲۴۲/۲
	۸۰	۳۹/۳	۱۷۰/۲	۲۰۹/۵		۸۰	۴۳/۲	۱۶۹/۸	۲۱۳/۱
	۸۳	۲۰/۷	۱۷۰/۸	۱۹۱/۶		۸۵	۱۴/۱	۱۷۰/۹	۱۸۵/۰
	۸۴	۱۲/۰	۱۷۰/۹	۱۸۲/۹		۸۶	۷/۹	۱۷۱/۱	۱۷۹/۰
	۸۵	۳/۳	۱۷۰/۹	۱۷۴/۳		۸۷	۱/۶	۱۷۱/۴	۱۷۳/۰
۸۶	جواب ندارد	جواب ندارد	-	۸۸	جواب ندارد	جواب ندارد	-		

در شاخه بالا می‌باشد در نتیجه جریان ورودی بیشتری در شاخه بالا استفاده می‌شود به تبع آن جریان در شاخه پایین کاهش یافته است. بنابراین انرژی برقی تولیدی در شاخه پایین نیز کاهش می‌یابد. در ادامه به مقایسه نتایج تولید انرژی به دست آمده با دو رویکرد مختلف پرداخته شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل بهینه‌سازی Lingo در جدول ۴، همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد تأمین نیاز کشاورزی انرژی برقی تولید شده در شاخه پایین کاهش یافته است از آنجایی که انرژی برقی وارد شده به جریان ورودی می‌باشد با توجه به اینکه اولویت اول تأمین اراضی کشاورزی و تأمین حداکثر نیاز کشاورزی



شکل (۶): از راست به چپ به ترتیب، مقایسه انرژی برقی تولیدی در شاخه بالا و پایین در روش‌های مختلف



شکل (۷): مقایسه انرژی برقی تولیدی کل در روش‌های مختلف

بوده و در سطح احتمال ۷۰ درصد این دو مقدار به هم خیلی نزدیک هستند اما در سطح احتمال‌های بالای ۷۸ درصد عکس این موضوع می‌باشد. البته این تغییرات خیلی زیاد

با توجه به شکل ۶ و مقایسه دو گراف، انرژی برقی تولید شده در شاخه پایین با استفاده از رویکرد اول در احتمال‌های ۵۰ تا ۷۸ درصد نسبت به رویکرد دوم بیشتر

برقایی کل خروجی از سد با استفاده از رویکرد اول در احتمال‌های ۵۰ تا ۷۵ درصد بیشتر از انرژی برقایی کل تولیدشده با استفاده از رویکرد دوم است و در سطح احتمال ۷۰ درصد این دو مقدار به هم خیلی نزدیک هستند اما در سطح احتمال‌های بالای ۸۰ درصد عکس این مطلب می‌باشد. نهایتاً به محاسبه بیان مخزن سد مارون در دو رویکرد پرداخته شد.

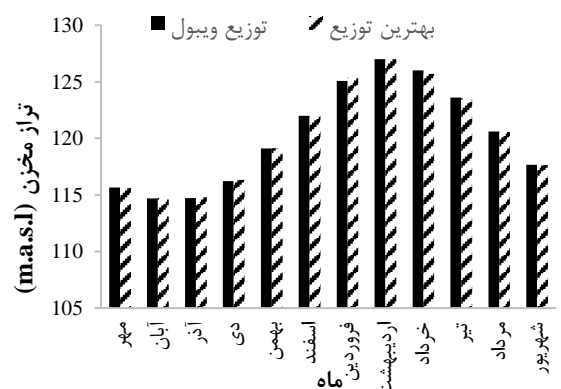
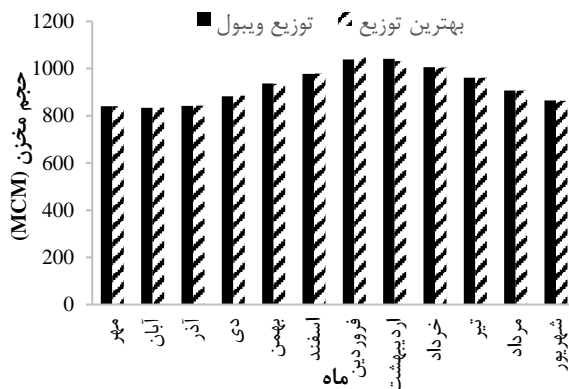
نیست و مربوط به اختلافات اندک در CDFهای جریان ورودی در دو رویکرد به ازای همراه می‌باشد. با توجه به شکل ۶ انرژی برقایی تولیدشده در شاخه بالا با استفاده از دو رویکرد بین احتمال ۵۰ تا ۷۰ درصد در حال نوسان بوده و روند خاصی را نشان نمی‌دهد در احتمال ۷۰ تا ۷۵ درصد این دو مقدار خیلی به هم نزدیک بوده و در احتمال ۸۵ درصد تقریباً باهم برابر شده‌اند. با توجه به شکل ۷ انرژی

جدول (۵): بیان مخزن در سطح ۸۵ درصد تأمین نیاز کشاورزی برای روش‌های مختلف - میلیون مترمکعب

سناریو	هد خالص (m)	جریان ورودی به شاخه پایینی	حجم مخزن	جریان ورودی با سطح احتمال ۸۵ درصد	نیاز کشاورزی	حجم تبخیر
توزیع تجربی ویبول	۱۲۰/۲	۳۴/۱۰	۹۲۷/۶۴	۶۲۸/۴	۵۷۲/۶۵	۴۵/۳۹
بهترین توزیع آماری	۱۲۰/۲	۴۳/۷	۹۲۷/۶۴	۶۶۱/۷	۵۷۲/۶۵	۴۵/۳۶

افزایش جریان ورودی سبب شده تا حجم آب سالانه ورودی به نیروگاه واقع در بستر رودخانه به همراه آب سرریزی بیش از ۳ برابر نسبت به رویکرد اول افزایش یابد. توان تولیدی و هد موردنیاز برای تولید انرژی برقایی در دو حالت استفاده از تابع توزیع تجربی ویبول و همچنین بهترین توزیع منتخب به کمک نرم‌افزار ایزی‌فیت برای همراه به‌عنوان CDF جریان ورودی برای ۸۵ درصد تأمین نیاز کشاورزی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تغییر معنی‌داری در انرژی کل تولیدی در دو سناریوی مطرح‌شده وجود ندارد.

همان‌گونه که از جدول ۵ مشاهده می‌گردد میزان جریان سالانه ورودی به مخزن در سطح تأمین نیاز کشاورزی ۸۵ درصد معادل ۶۲۸/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد که از این مقدار به ترتیب حدود ۵۷۲/۷، ۱۰/۳ و ۴۵/۴ میلیون مترمکعب در سال صرف تأمین نیاز کشاورزی، حجم آب ورودی به نیروگاه بستر رودخانه همراه آب سرریزی و در نهایت حجم تبخیر از سطح مخزن سد می‌باشد. میزان جریان ورودی سالانه به مخزن در سطح تأمین نیاز کشاورزی ۸۵ درصد در رویکرد دوم نسبت به رویکرد اول حدود ۳٫۵ درصد افزایش پیدا کرده است و این



شکل (۷): تراز مخزن و منحنی فرمان سد مارون در سطح ۸۵ درصد تأمین نیاز کشاورزی در روش‌های مختلف

نتیجه گیری

بهره برداری بهینه از مخازن سدها یکی از مسائل مهم در حوزه مدیریت منابع آب است، لذا در این تحقیق بهره برداری بهینه از سد مارون به منظور تولید انرژی برقایی و حداکثر تأمین نیاز کشاورزی در پایاب سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اینکه بارش یک پدیده غیرقطعی می باشد و اثرگذاری مستقیمی بر جریان ورودی به مخزن دارد، به کمک رویکرد بهینه سازی تصادفی صریح و روش برنامه ریزی خطی با قیود احتمالاتی به مدل سازی انرژی برقایی مخزن پرداخته شد. سد مارون بر روی رودخانه مارون واقع در جنوب شرقی استان خوزستان احداث شده و هدف از احداث این سد کنترل سیلاب های مخرب، تأمین آب مورد نیاز اراضی کشاورزی پایین دست و تولید انرژی برقایی با توان ۱۵۰ مگاوات می باشد.

جهت بهینه سازی توان تولیدی خروجی این سد، از آمار بلندمدت دبی جریان ورودی به سد به صورت ماهانه بر مبنای دوره آماری ۵۲ ساله (۱۳۳۲ لغایت ۱۳۸۳) استفاده شده است، برای این منظور ابتدا با استفاده از توزیع تجربی ویبول تابع توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای ماه های مختلف محاسبه گردید. سپس برای یک سطح احتمال مشخص تأمین نیاز کشاورزی و ظرفیت نصب ۱۵۰ مگاوات، میزان انرژی برقایی خروجی از سد به کمک مدل Lingo بهینه سازی شد. در ادامه به کمک نرم افزار ایزی فیت توزیع های مختلف آماری بر روی داده های جریان ورودی به مخزن برای هر ماه برازش داده شده و بهترین توزیع برای هر ماه مشخص گردید. نتایج نشان می دهد در حالتی که جریان ورودی به مخزن سد از توزیع تجربی ویبول تبعیت کند، حداکثر تأمین نیاز کشاورزی ۸۶ درصد خواهد بود و انرژی سالانه کل خروجی از سد معادل ۱۷۴/۳ گیگاوات ساعت است. این در حالی است که در استفاده از بهترین توزیع های آماری جریان ورودی به

سد، حداکثر تأمین نیاز کشاورزی به ۸۸ درصد خواهد رسید، همچنین انرژی سالانه کل خروجی از سد معادل ۱۷۲/۹ گیگاوات ساعت برآورد شده است. در نتیجه می توان گفت که تعیین بهترین توزیع های آماری جریان ورودی به مخزن تأثیر بسیار ناچیزی بر نتایج بهینه سازی تولید انرژی و تأمین نیاز دارد، به طوریکه در این تحقیق کمتر از ۲ درصد در تأمین نیاز کشاورزی و تولید انرژی برقایی تأثیر داشته است. بنابراین با برازش دادن توزیع احتمالی تجربی ویبول بر روی داده های جریان ورودی به سد نیازی به انتخاب بهترین توزیع های آماری نیست و توزیع تجربی ویبول برای این منظور کفایت می کند. Arunkumar et al. 2012 نیز در مطالعه ای بر روی مخزن سد کوینا از یک روش غیرخطی و نصب نیروگاه در کانال انتقال آب به اراضی کشاورزی به منظور افزایش انرژی تولیدی استفاده نمودند. استخراج قوانین بهره برداری بهینه برای چنین مخزن بزرگ چندمنظوره ای که اهداف مختلفی مانند آبیاری، نیروگاه آبی و کنترل سیل را در اختیار دارد پیچیده است، در مطالعه آن ها برای به حداکثر رساندن تولید برق آبی به شرط تأمین نیاز آبیاری با استفاده از یک مدل برنامه ریزی غیرخطی بهینه شده است. تولید برق آبی از مخزن برای سه شرایط مختلف جریان قابل اطمینان قابل تجزیه و تحلیل، نشان دهنده سال های مرطوب، نرمال و خشک است. برای هر شرایط ورودی قابل اعتماد، سناریوهای مختلف بر اساس محدودیت های موجود در انتشار تجزیه و تحلیل شده و نتایج مقایسه شده است. از سناریوهای مختلف، مشاهده می شود که اگر محدودیت های خروجی مخزن آزاد شو ند، می توان انرژی برق بیشتری را برای شرایط مختلف ورودی قابل اطمینان تولید کرد و سد کوینا پتانسیل تولید برق آبی بیشتری دارد. همان گونه که مشاهده می شود نتایج به دست آمده محققین در راستای مطالعه انجام شده روی مخزن سد مارون است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت آب و برق خوزستان و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس که اطلاعات مورد نیاز را در اختیار این پژوهش قرار داده اند تشکر و قدردانی می نمایند.



منابع

افشاریان زاده، ن.، موسوی، س.ج. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برقایی پیاپی با ارتباط هیدرولیکی. سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری.

تقیان، م. ۱۳۹۲. استفاده بهینه از پتانسیل سدهای مخزنی با اهداف کشاورزی جهت تولید انرژی برقایی. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی.

شادروان، بهنام و منصور زاده، سید هادی. ۱۳۸۲. جایگاه انرژی برق‌آبی در جهان، اولین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور. تهران.

شهبازی، ت. ۱۳۹۰. به‌گزینی بهره‌برداری در مخازن تک و چندمنظوره برقایی تحت مدل برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب‌و خاک کشور.

فرخنده کیش، ع.، صادقیان، م. ۱۳۹۳. کاربرد الگوریتم ژنتیک در تدوین قوانین بهینه بهره‌برداری از مخازن برقایی. همایش ملی آب، انسان و زمین

ولیسسه، م. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای برقایی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی. همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب.

Andrieu L., Henrion R., and W. Römisich. 2010. A model for dynamic chance constraints in hydro power reservoir management. *European Journal of Operations Research*. 207:579-589.

Arunkumar, R., Jothiprakash, V. 2012. Optimal Reservoir Operation for Hydropower Generation using Non-linear Programming Model. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 93, 111–120.

Charnes A. and Cooper W. 1959. Chance-constrained programming, *Management Science*. 6(1):73-79.

Fan. FM., Schwanenberg. D., Alvarado. R. 2016. Performance of Deterministic and Probabilistic Hydrological Forecasts for the Short-Term Optimization of a Tropical Hydropower Reservoir. *Journal of Hydrology Water Resources Management*. 30: 3609-3625.

Henrion R. and Römisich W. 2004. Hölder and Lipschitz stability of solution sets in programs with probabilistic constraints. *Mathematical Programming*. 100(3): 589-611.

Jothiprakash V. and Arunkumar R. 2014. Multi-reservoir optimization for hydropower production using NLP technique. *Water Engineering*. 18(1): 344–354.

Loucks, D.P. Stedinger. JR. and Haith, D.A. 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.

Sethi L.M., Panda S.N. and Nayak, M.K. 2006. Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa. *India. Agricultural Water Management*. 83 (3). 209–220

Pierre Carpentier, Jean-Christophe Alais, Michel de Lara. 2017. Multi-usage hydropower single dam management: chance-constrained optimization and stochastic viability. *Energy Systems*. Springer. 8 (1): 7-30 .

Prékopa A.. 1995. *Stochastic Programming. Mathematics and Its Applications*.

Prékopa A. and Szántai T. 1979. On optimal regulation of a storage level with application to the water level regulation of a lake. *European Journal of Operational Research*. 3(3): 175-189.

Prékopa A.. 2003. Probabilistic programming. *Stochastic Programming*. 10: 267-351.

Van-ackooij W., Zorgati R., Henrion R. and A. Möller. 2014. Joint chance-constrained programming for hydro reservoir management. *Optimization and Engineering*. 15: 509-531.

Wim van Ackooij. 2013. *Chance Constrained Programming: with applications in Energy Management*. Other Ecole Centrale Paris. English .



Yoo, JH. 2009. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model. *Journal of Hydrology*. 376: 182-187.

Zhou R. and Yong K. 2012. Optimal operation study of Qing river cascade reservoirs based on GA with uncertainty and flow transmission considered procedia. *Procedia Engineering*. 28: 44-48.



Assessment of Discharge Probability Distribution Effect on Hydropower Energy Optimization of Maroun Reservoir

¹ Maryam Godarzi, ^{2*} Seyed Ehsan Fatemi, ³ Maryam Hafezparast Mavadat

Abstract

Reservoirs are operated and designed in several aims such as, water demand supply, hydropower energy generation and flood control reduction. Optimization of reservoir operation is one of the most important issue in water basin. In this study, optimization of reservoir operation to obtain the maximum agriculture water supply and hydropower energy production are considered by using chance constrained linear programming (CCLP). Monthly inflow of 52 years is used to modeling of experimental Weibul probability distribution for each month. Annual energy production of Maroon reservoir is obtained by Lingo 16.0 software for a known agriculture water supply (P) and installed capacity 150 MW. Then, the best probability distribution of reservoir inflow is obtained by Easyfit software 6.0 for each month. The results showed that the maximum P are calculated 85% and 87% and also the annual hydropower energy is 174.3 and 172.9 Giga watt-hour (GWh) using experimental Weibul probability distribution and the best probability distribution of reservoir inflow, respectively. Thus, obtaining the best Inflow probability distribution does have insignificant effect on optimization. So, considering only the experimental Weibul probability distribution of reservoir inflow is sufficient in hydropower optimization using CCLP approach.

Keywords: Hydropower Energy Optimization, CCLP, Lingo, Easyfit 6.0.

¹ Master of Water Resources, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, godarzi.maryam6713@gmail.com

² Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, se.fatemi@razi.ac.ir, (*Corresponding Author)

³ Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, hafezparast@razi.ac.ir

Assessment of Discharge Probability Distribution Effect on Hydropower Energy Optimization of Maroun Reservoir

Maryam Godarzi ^a, Seyed Ehsan Fatemi ^{a,*}, Maryam Hafezparast Mavadat ^a

Introduction

The limitation of water resources and its imbalanced distribution, as well as the indiscriminate use of these limited resources, have highlighted the need for optimal management and utilization of existing resources in Iran, which is one of the arid and semi-arid countries in the world. This has necessitated the existence of structures in the water resources sector that are used to store and use surface water resources. The use of hydropower renewable energy, in addition to significant economic savings, will reduce environmental pollution, solve the problem of energy supply to remote villages, reduce the relative cost of agricultural production and ultimately increase the life of fossil resources (Shadravan and Mansourzadeh, 2003). Chance constrain programming was introduced more than fifty years ago by (Charnes and Cooper 1959) and then extensively developed by many authors. (Henrion and Römisch, 2004; Prékopa, 2003; Prékopa, 1995) each of them somehow dealt with the mathematical development of the stable solution method with probabilistic constraints in linear programming. Therefore, in this study, the aim is to provide the maximum agricultural demand of the dam downstream with the highest amount of annual energy produced, provided that the inflow is considered uncertainly. For this purpose, optimization with linear programming approach by chance constraints has been used.

Methodology

Maroon Dam is built on the Maroon River located in the southeast of Khuzestan province with the coordinates 36 '42 30" North and 50 '21 54" East. The lake of this dam with a capacity of 1079 million cubic meters of water is 30 km long. Figure 1 shows schematically the water resource and consumption system of the Maroon Dam basin. The objectives of this dam are to supply hydropower with a capacity of 150 MW, 2 turbines with a capacity of 75 MW, and to meet the agricultural needs of the plains of Behbahan, Jaizan, Khalafabad, Shadegan with a total annual demands of 578.65 million cubic meters.

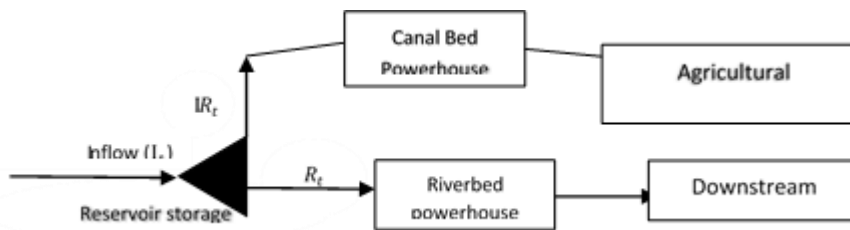


Fig 1. Schematic of the water resource and consumption system at the Maroon Dam basin

The objective function and constrained are used in extended lingo model as below:

- (1) OF: *Maximize* $\sum_{t=1}^n EB_t$; EB_t is the power capacity in period t
- (2) Cons.1: $\text{Prob} [IR_t \geq Dt] \geq P$; IR_t , D_t and P are Dam release to Agriculture demand, Agriculture demand in period t and Reliability level to meet the agricultural demand
- (3) Cons.2: $S_{t+1} = S_t + I_t - IR_t - R_t - E_t$; S_{t+1} , S_t , I_t , E_t and R_t are Reservoir storage at the end of the month t, reservoir storage at the beginning of the month t, random inflow to the reservoir in period t, evaporation volume from the reservoir in period t.
- (4) Cons.3: $E_t = A_0 e_t + a \left[\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right] e_t$; e_t , A_0 and a are the evaporation height in period t, reservoir surface in dead storage and the linearization coefficient of the surface with the reservoir volume. In this study, A_0 and a , 6 and 0.0175 are considered, respectively.

- (5) Cons.4: LDR: $IR_t = S_t + I_t - R_t - E_t - b_t$; b_t is the deterministic parameter and decision variable in period t .
- (6) Cons.5: $H_t = \gamma \left[\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right] + \delta$; H_t , γ and δ are water head in reservoir in period t , slope coefficient and Interception of the linearized relationship of height with changes in reservoir volume. They are calculated 0.0606 and 442.
- (7) Cons.6: $R_t H_t - (R_t H_{t0} + R_{t0} H_t - R_{t0} H_{t0}) = 10^{-5}$; R_{t0} and H_{t0} as the average reservoir release and water head in period t
- (8) Cons.7: $EB_t = C[R_t(H_{t0} - H_{TAIL} - h_f) + R_{t0}(H_t - H_{TAIL} - h_f) - R_{t0}(H_{t0} - H_{TAIL} - h_f)]$; $C=0.0034060$, $H_{TAIL}=375$ meter, $h_f=3$ meter.
- (9) $H_{min} \leq H_{Net_t} \leq H_{max}$; $H_{min}=62$ meter, $H_{max}=127$ meter.

To calculate the generating capacity in the uncertainty case with the linear programming approach by chance constraints, it is necessary to use the cumulative function of the probabilistic distribution of the inflow to the reservoir per month. For this purpose, the CDF flow per month has been calculated from two methods. Using the experimental distribution of Weibull and Easyfit software, different statistical distributions on the inflow for each month were fitted and the best distribution was calculated.

Discussion and Conclusion

According to the results obtained from the optimization model developed in Lingo environment, the results of energy production obtained with two approaches are presented in Figure 2.

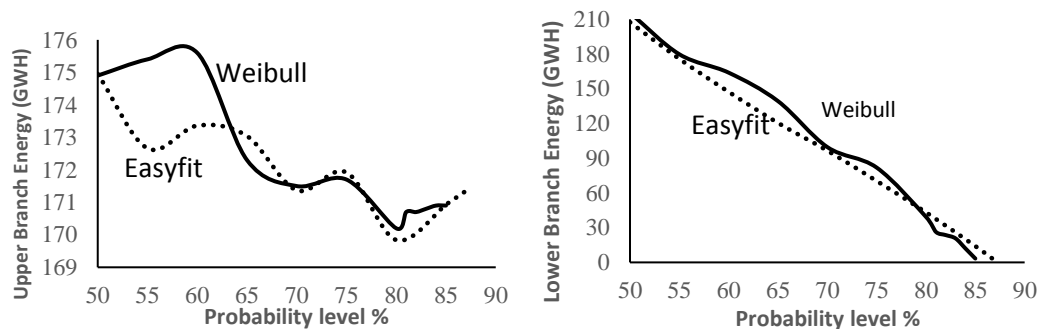


Fig 2. Comparison of generated hydropower energy in the upper and lower branches in different approach

The results show that if the inflow to the reservoir follows the experimental distribution of Weibull, the maximum supply of agricultural demands will be 86% and the total annual energy from the reservoir is equal to 174.3 GWh. While using the best statistical distributions of the inflow to the dam, Using Easyfit, the maximum supply of agricultural demands will reach 88%, also the total annual energy from the reservoir is estimated at 172.9 GWh. As a result, it can be said that determining the best statistical distributions of inflow to the reservoir has no significant effect on the produced energy, so that in this study less than 2% had an effect on agricultural supply and hydropower production. Therefore, by fitting the experimental distribution of Weibull to the reservoir inflow, there is no need to select the best statistical distributions, and it is sufficient for this purpose.

The most important References

- Shadravan, B. and S.H., Mansourzadeh, "The position of hydropower in the world", 2003, the first national conference of hydropower plants in the country. Tehran. Iran.
- Charnes A. and Cooper W., "Chance-constrained programming", *Management Science*, 1959, 6(1):73-79.



- Henrion R. and Römisch W., Hölder and Lipschitz, "Stability of solution sets in programs with probabilistic constraints", *Mathematical Programming*, 2004, 100(3): 589-611.
- Prékopa A., "Stochastic Programming", *Mathematics and Its Applications*, 1995.
- Prékopa A., "Probabilistic programming". *Stochastic Programming*, 2003, 10: 267-351.