نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۵، بهمن-اسفند ۱۴۰۰، ص. ۱۳۱۴-۱۳۰۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 15, Feb.-Mar. 2022, p. 1300-1314

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی تخصیص آب از سد قشلاق در رویکرد برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی

ثنا عبایی[۱]، سید احسان فاطمی[۲*]، فرهنگ سرگردی[۳]، آرش آذری[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها یکی از مسائل مهم در حوزه مدیریت منابع آب است. این تحقیق باهدف بهره‌برداری بهینه از سد به‌منظور تأمین حداکثری نیازهای پایاب سد، در حالت قطعی و همچنین احتمالاتی موردبررسی قرارگرفته است. با احتمالاتی نمودن جریان ورودی و بررسی اثر تابع توزیع تجمعی جریان احتمالاتی بر تأمین نیازها، شرایط تخصیص بهینه سیستم بررسی گردید. در رویکرد غیرقطعی جریان ورودی به مخزن از روش برنامه‌ریزی خطی با استفاده از قیود احتمالاتی استفاده‌شده است. منطقه موردمطالعه سد قشلاق واقع بر رودخانه مریم نگار در استان کرمانشاه در نظر گرفته‌شده است. بهینه‌سازی تأمین نیازهای پایاب سد با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار LINGO در دو حالت مختلف ارائه‌شده است. نتایج بهینه‌سازی با رویکرد قطعی نشان داد که تأمین در بخش کشاورزی، شرب و زیست‌محیطی به ترتیب ۹۲، ۹۵ و ۹۵ درصد می‌باشد. در رویکرد احتمالاتی با لحاظ نمودن عدم قطعیت در جریان ورودی به مخزن با دو شیوه متفاوت، نتایج نشان داد که نه‌تنها نیازی به انتخاب بهترین مدل توزیع آماری دبی ورودی به مخزن سد نیست و توزیع تجربی ویبول برای این منظور کفایت می‌کند، بلکه با توجه به کاهش حجم جریان ورودی به مخزن، حجم بهینه مخزن سد با سطح اطمینان ۶۰ درصد معادل ۲۷/۳ MCM برآورد گردید. در این حجم، مخزن سد به‌طور کامل قادر به تأمین نیازهای پایاب سد قشلاق است. لذا با توجه به غیرقطعی بودن پدیده بارش و به‌تبع آن دبی ورودی به مخزن سد و نتایج به‌دست‌آمده، این رویکرد امری ضروری در طراحی و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی، توزیع ویبول، لینگو، قیود احتمالاتی

مقدمه

با توجه به افزایش فاصله بین عرضه و تقاضا، توجه جدی به مبانی تخصیص بهینه آب امری اجتناب‌ناپذیر بوده و مدیریت عرضه و تقاضای آب امری ضروری است، از طرفی به دلیل توسعه اقتصادی و افزایش جمعیت در سراسر جهان، تقاضای آب نیز رو به رشد بوده است که باعث کاهش کل منابع آب شیرین شده است (li et all., 2020). آگاهی از میزان بارندگی در منطقه، به‌عنوان عامل اصلی تأمین‌کننده منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، جهت برنامه‌ریزی منابع آبی امری ضروری می‌باشد، از طرفی بهره‌برداری بهینه از مخازن یکی از مسائل پیچیده می‌باشد که نیازمند تصمیم‌گیری و ارائه راهکارهای مناسب می‌باشد، ازجمله روش‌های استفاده از آن، روش‌های مختلف ریاضی می‌باشد که مدل برنامه‌ریزی خطی ازجمله روش‌های موجود می‌باشد. سیاست تصمیم‌گیری خطی، سیاستی است که به دو صورت قطعی و احتمالاتی بیان می‌گردد که تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه هر دو پرداخته‌شده است. دیواکار و همکاران در تایلند از مدل ترکیبی تعیین آب قابل‌دسترس و مدل بهینه‌ساز تخصیص استفاده نموده و نشان دادند که سطح رضایت‌مندی و بازگشت اقتصادی حالت بهینه نسبت به تجارب وضعیت موجود بهبودیافته است (Divakar et al., 2013). لی و گوو مدل توسعه‌یافته‌ای برای بهره‌برداری بهینه تخصیص منابع آب در مناطق آبیاری مینقین، استان گانسو، چین در شرایط عدم قطعیت جهت بهینه کردن مزایای اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی اراضی ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این مدل چندمنظوره پیشنهادی با در نظر گرفتن اقدامات صرفه‌جویی در مصرف آب، عوامل مؤثر بر کیفیت آب آبیاری و تغییرات پویای مقدار استفاده‌شده آب‌های زیرزمینی در سیستم تخصیص بهینه منابع آب بی‌نظیر است. همچنین نتایج

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- استادیارگروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- استادیارگروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۴- استادیارگروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: e_fatemi78@yahoo.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.6.6

به‌دست‌آمده برای حمایت از تعدیل الگوهای آبیاری موجود و شناسایی یک طرح اختصاص آب موردنیاز برای آبیاری تحت عدم قطعیت‌های متعدد ارزشمند است (Li and Guo 2014). گودرزی و همکاران بهره‌برداری بهینه از مخزن درود زن شیراز توسط روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تصادفی انجام شد که از مدل بهینه‌سازی خطی بر اساس سیاست جیره‌بندی توسط نرم‌افزار LINGO و تولید جریان مصنوعی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، میزان رهاسازی بهینه را به دست آوردند. نتایج تحقیق نشان داد که روش مورداستفاده در تحقیق می‌تواند روش مؤثری در بهره‌برداری از مخازن باشد (Goodarzi et al., 2015). حسن اصفهانی و همکاران در پژوهش خود پیرامون تخصیص بهینه آب آبیاری، بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری با استفاده از دیدگاه بیلان آب و صرفه‌جویی ۲۰ درصدی در مصرف آب بدون کاهش سود را از نتایج مدیریت صحیح و بهینه‌سازی تخصیص و مصرف آب گزارش نموده‌اند (Hasan-Esfahani et al., 2015). کوتیر و همکاران برای مدیریت پایدار منابع آبی و توسعه کشاورزی حوضه رودخانه ولتا در کشور غنا، از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار STELLA استفاده کردند. در این بررسی، سه سناریو توسعه زیرساخت‌های آبی، توسعه زمین‌های کشاورزی و اعمال شرایط خشک‌سالی بر مدل اعمال گردید که بر طبق نتایج حاصل، علیرغم تأثیر مثبت سناریو اول، درنهایت همه سناریوها با محدودیت رشد مواجه خواهند شد (kotir et al., 2016). فن و همکاران در مطالعه‌ای از یک مخزن آبی چندمنظوره در یک منطقه گرمسیری در برزیل استفاده کردند که از اهداف آن کنترل سیل پایین‌دست است، در این مطالعه از پیش‌بینی بارش بر اساس داده‌های مشاهده‌شده، پیش‌بینی قطعی و احتمالی استفاده‌شده است، به‌منظور پیش‌بینی جریان رودخانه در یک مدل هیدرولوژیکی از یک دوره دوساله استفاده‌شده، درنهایت نتایج نشان داده بهینه‌سازی به کمک پیش‌بینی تصادفی منجر به سطح قابل‌توجهی حفاظت از سیل می‌شود (Fan et. al., 2016). شهبازی و صادقیان (۱۳۸۸) در تحقیقی به‌منظور محاسبه حداکثر انرژی تولیدی برقابی سد و نیروگاه کارون ۴ به توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی LP در محیط نرم‌افزاری Lingo پرداختند. در این مطالعه تابع هدف در مدل بهینه‌سازی، حداکثر سازی انرژی تولیدی اولیه و ثانویه با توجه به هزینه‌های مختلف سالیانه در جهت تولید سود بیشتر بوده است. نتایج کاربرد این مدل نشان داده است که این مدل به لحاظ کیفیت جواب‌های حاصل، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مشابه داشته است، با توجه به اینکه مدل‌های دیگر نیازمند تلاش محاسباتی بیشتر و صرف مدت‌زمان طولانی‌تری می‌باشند. فرخ‌زاد و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی برای بررسی الگوی کشت دشت همدان–بهار و تدوین سناریوهای مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار لینگو استفاده کردند. این مدل باهدف تعیین الگوی کشت بهینه، تعیین میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و حداکثر کردن سود حاصل از کشت محصولات با توجه به قیود و محدودیت‌ها به اجرا درآمد. نوذری و همکاران (۱۳۹۶) با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بررسی منابع رویکرد اصلی در استفاده از مدل‌های ویپ و لینگو توزیع بهره‌برداری بهینه از منابع آب با در نظر گرفتن نیاز زیست‌محیطی با توجه به قابلیت‌های این دو مدل است. مرادی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که بهینه‌سازی تخصیص منابع یکی از راهکارهای مناسب برای دستیابی به توسعه پایدار و کاهش هدر رفت منابع است. در دشت اسلام‌آباد غرب استان کرمانشاه به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار و تخصیص بهینه اراضی به محصولات الگوی کشت، محدودیت‌های موجود لحاظ گردید و برای بیشینه‌سازی سود تولید، توابع هدف و محدودیت با برنامه-ریزی خطی فرموله و با استفاده از روش سیمپلکس به کمک نرم‌افزار LINGO حل شد. سلیمی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از دبی (۴۰ ساله) رودخانه کمیش به شبیه‌سازی مخزن سد هرسین پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن الگوهای کشت مختلف مقدار اطمینان‌پذیری نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی محاسبه شد و الگوی کشت مناسب که پایداری بیشتر سیستم را به همراه دارد انتخاب گردید. سپس در مدل LINGO بهینه‌سازی باهدف حداقل کردن کمبود نیازهای پایین‌دست سد صورت گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که درصد کمبودها به کمتر از ۱ درصد می‌رسد همچنین حالت بهینه کمترین هدر رفت آب را دارد، بنابراین با برنامه‌ریزی و مدیریت درست می‌توان تا حد قابل‌توجهی مقدار کمبودها را بخصوص در زمینه کشاورزی کاهش داد. تان و همکاران یک مدل تخصیص بهینه برای یک سیستم مدیریت منابع آب در چین ارائه کرده‌اند. تابع هدف این مطالعه، حداقل کمبود آب برای کاربران مختلف تعریف‌شده است. برای حل مسئله، ترکیبی از روش‌های تجزیه[۱]– هماهنگی و دیفرانسیل پویا[۲] استفاده‌شده است. نتایج نشان داده است که مقادیر تخصیص بهینه از مخزن نزدیک به مقادیر واقعی است (Tan et al., 2019).

بائوهوی و همکاران برای تخصیص بهینه منابع آب از روش توسعه‌یافته‌ای برای پیش‌بینی عرضه و تقاضای آب استفاده کرده‌اند؛ اما با توجه به اینکه این روش دقت کمی در پیش‌بینی دارد به‌خصوص در مواردی که داده‌های اصلی خیلی تغییرپذیر هستند لذا برای حل این مشکل از یک روش ابتکاری با استفاده از مدل میانگین متحرک و بهینه‌سازی مقادیر پس‌زمینه[۳] استفاده‌شده است. سپس مدل چندهدفه پیشنهادی برای تخصیص بهینه منابع آب در بازه زمانی

۱- Decomposition-Coordination (DC)
۲- Discrete Differential Dynamic
۳- Background

کوتاه‌مدت به کار گرفته‌شده است. نتایج نشان داده است که تقاضای بخش‌های صنعت و کشاورزی به‌خوبی تأمین‌شده است، درحالی‌که تأمین آب بخش‌های شرب و زیست‌محیطی با کمبود مواجه شده است (Baohui et al., 2019). آئین و همکاران (۱۳۹۷) یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی باهدف تعیین سیمای بهینه توسعه منابع آب در حوضه آبریز رودخانه حله را توسعه دادند، بدین منظور از الگوریتم بهینه‌ساز دسته ذرات (PSO) استفاده نمودند، درنهایت از مدل توسعه‌یافته برای بهینه‌سازی اقدامات و طرح‌های زیرساختی (ساخت سدها و شبکه‌های آبیاری) و همچنین سیاست‌های بهره‌برداری (الگوی کشت، قواعد بهره‌برداری و تخصیص آب) بهره جستند. محسن زاده (۱۳۹۱) به‌منظور تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه آق‌قلا در استان گلستان از نرم‌افزار لینگو و الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. از دیگر روش‌های فرا کاوشی الگوریتم کلونی مورچگان (ACO)[1] است که کاربرد اصلی آن، یافتن مسیر بهینه در مسائل پیوسته است، در این راستا معینی (۱۳۹۳) در تحقیقی مسئله بهره‌برداری بهینه از سدها به‌منظور تولید انرژی برق موردنیاز را در دو دوره بهره‌برداری ۵ و ۲۰ ساله مدل‌سازی نمودند، نتایج نشان داد که با استفاده از این الگوریتم، جواب مناسبی همراه با هزینه محاسباتی مناسب حاصل می‌شود. پارامترهای هیدرولوژیکی با توجه به ماهیت عدم قطعیت خود با بررسی در قالب مدل‌های احتمالاتی، منجر به حصول اطمینان و اعتمادپذیری بیشتری در تصمیم‌گیری‌ها می‌شود.

قاسمی و همکاران مدیریت آب اختصاص‌یافته به بخش کشاورزی را در شرایط عدم قطعیت با مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی موردبررسی قراردادند. با استفاده از این سیاست، مدیران در حالت سود خاص مثبت، خوش‌بینانه عمل کرده و میزان آب زیادی را به کشاورزان وعده می‌دهند و برعکس در شرایط سود خالص منفی، وعده آب کمتری را می‌دهند (Mohammad et al., 2016 Ghasemi). فاطمی و همکاران (۱۳۹۶) بهره‌برداری بهینه سیستم‌های منابع آب با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، کمبود منابع آب را تا حدی کاهش می‌دهد. یکی از این روش‌ها برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)[2] است که با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت برخی پارامترهای بهره‌برداری، می‌تواند اطمینان‌پذیری بیشتری را جهت به حداقل رساندن کمبودها نسبت به سایر روش‌های بهره‌برداری از خود نشان دهد. در این تحقیق قواعد سیاست بهره-برداری بهینه از مخزن سد جامیشان با در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان ورودی استخراج گردیده است. قاعده رهاسازی مخزن سد جامیشان در فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان نسبت به کلاس‌های مختلف حجم جریان ورودی و میزان حجم مخزن محاسبه و ارائه‌شده است. خسروجردی و همکاران از برنامه‌ریزی فازی تصادفی دومرحله‌ای[3] با پارامترهای فاصله‌ای برای تخصیص بهینه منابع آب به کاربران مختلف تحت عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. این مدل برای مطالعه موردی تخصیص منابع آب در یک مخزن چندمنظوره در منطقه زرند کرمان اعمال‌شده است. نتایج نشان داده است که مدل این تحقیق قادر به ارائه راه‌حل‌های معقولی، به‌صورت فاصله زمانی و اطلاعات فازی تحت سناریوهای مختلف است که می‌تواند به مدیران در ارائه برنامه‌های تخصیص بهینه منابع آب کمک کند (khosrojerdi et al., 2019). با توجه به عدم قطعیتی که در منابع آب به سبب ویژگی‌های هیدرولوژیکی وجود دارد خلأ این موضوع در خصوص احتمالاتی در نظر گرفتن جریان ورودی به مخزن و بررسی شرایط تأمین نیازها در شرایط استوکستیکی احساس می-گردد، بنابراین در این تحقیق بهینه‌سازی تخصیص نیازهای سد قشلاق با رویکرد احتمالاتی در آبدهی ورودی به مخزن سد محاسبه گردیده و با رویکرد جریان ورودی قطعی مقایسه و همچنین حجم مخزن بهینه باوجود قیود احتمالاتی تعیین‌شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مطالعاتی

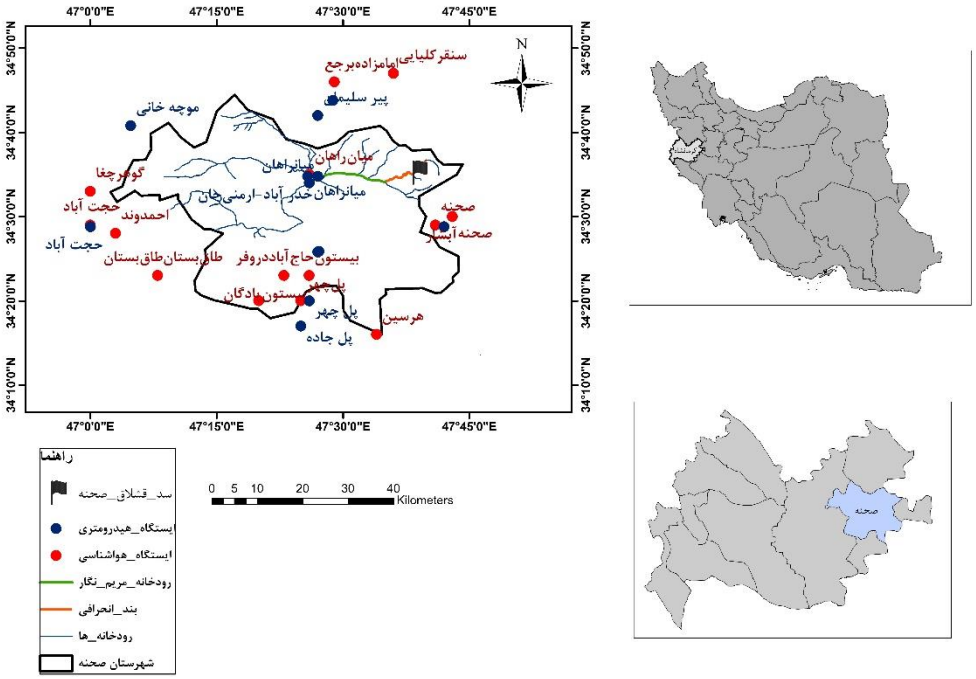
سد قشلاق از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی بر روی رودخانه مریم نگار با مختصات جغرافیایی، ´۳۴ °۳۶ عرض جغرافیایی و ´ °۳۹ ۴۷ طول جغرافیایی در استان کرمانشاه، در ۶۰ کیلومتری شهر کرمانشاه و ۱۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان صحنه واقع‌شده است. مساحت حوضه آبریز ۲۹۰ کیلومترمربع و میانگین آبدهی سالانه در محل سد ۵۰/۹ میلیون مترمکعب است. هدف از احداث سد مخزنی قشلاق تأمین آب شهری شهرستان صحنه و آب موردنیاز ۱۵۰۰ هکتار اراضی کشاورزی دشت‌های صحنه (جیحون آباد و آب باریک) و بخشی از دشت چمچمال و تأمین نیاز زیست‌محیطی در پایین‌دست بند انحرافی مریم نگار است. موقعیت جغرافیایی سد در شکل (۱) نشان داده‌شده است.

رویکرد بهینه‌سازی در حالت قطعی- سیاست بهره‌برداری استاندارد[4] (SOP) و قیود احتمالاتی:

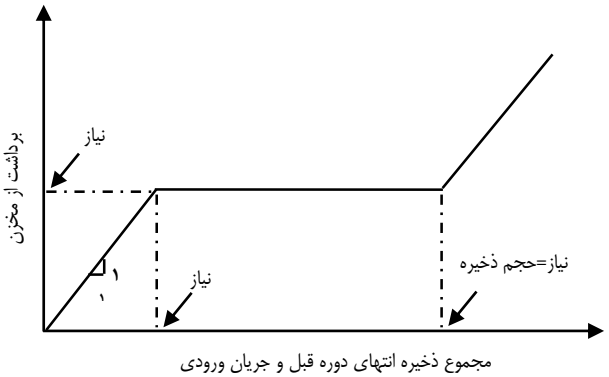
در این سیاست، رهاسازی از مخزن تنها بر اساس نیاز هر دوره انجام می‌پذیرد. بدین معنی که اگر آب کافی برای رفع نیاز موجود نباشد، مخزن خالی و اگر آب بیش از نیاز موجود باشد، مخزن پرشده و سپس سرریز خواهد نمود. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است

۱- Ant System
۲- Stochastic Dynamic Programming
۳- Two-Stage Stochastic Programming
۴- Standard Operation Policy

محدوده مجاز رهاسازی بدون کمبود، بین دو خط موازی محدودشده است. سیاست بهره‌برداری استاندارد یا SOP بالاترین اولویت را به رهاسازی آب برای بیشترین سود و تأمین نیاز حال حاضر اختصاص می‌دهد. اگر آب بیشتری موجود باشد تا جایی که ظرفیت ذخیره مخزن پر شود و بقیه آن سرریز می‌کند. در این روش بهره‌برداری بهینه، هدف حداقل کردن مجموع کمبودها است. کلمز و همکاران نشان دادند که با افزایش عدم قطعیت هیدرولوژیکی، سیاست بهره-برداری بهینه به قانون SOP همگرا خواهد بود (klemes et all 1997).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد قشلاق، ایستگاه هیدرومتری و هواشناسی حوضه



شکل ۲- منحنی S شکل، سیاست بهره‌برداری استاندارد

بهینه‌سازی از سال ماه اول و سال آغاز و تا پایان آخرین ماه ادامه می‌یابد. داده‌های ورودی به مدل LINGO شامل ۴۱ سال آمار بلندمدت آبدهی ماهانه رودخانه مریم نگار، نیاز ماهانه کشاورزی و درصد آب برگشتی به میزان ۱۵ درصد، حجم مخزن، تبخیر و منحنی حجم–سطح–ارتفاع است. در LINGO با واردکردن مقدار ارتفاع تبخیر ماهانه و منحنی حجم–سطح میزان حجم تبخیر در هرماه با توجه به سطح مخزن محاسبه می‌شود. بدین ترتیب که با تغییرات حجم مخزن مقدار سطح معادل مخزن آن (به کمک رابطه

خطی سازی شده سطح با حجم) محاسبه‌شده و از حاصل‌ضرب ارتفاع تبخیر در مساحت محاسبه‌شده در هرماه میزان حجم تبخیر محاسبه می‌گردد. درنهایت با در نظر گرفتن کل ورودی و خروجی‌ها، میزان تأمین نیازها در هرماه و به‌صورت سالانه مشخص می‌شود. در حالت کلی بر اساس اینکه چه سهمی از Q_t در تأمین نیازها مشارکت داشته باشد حالت‌های مختلفی را می‌توان برای قاعده تصمیم‌گیری خطی LDR[۱] تعریف کرد، با لحاظ کردن پارامتر β دو سیاست متفاوت کلی در قاعده بهره‌برداری استاندارد ایجاد می‌گردد؛ سیاست خوش‌بینانه، اگر از همه دبی ورودی به مخزن به‌طور کامل در خروجی مخزن استفاده شود ($\beta = 1$)، اما سیاست محافظه‌کارانه که فقط بر روی حجم ذخیره مخزن سرمایه‌گذاری می‌شود و هیچ دبی ورودی در سیاست‌گذاری تخصیص لحاظ نمی‌شود($\beta = 0$) .

$$R_t = S_t + \beta\, Q_t - E_t - b_t \qquad 0 \le \beta \le 1 \qquad (۱)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t - spill_t \qquad (۲)$$

معادله پیوستگی مخزن که در آن S_{t+1}، S_t، Q_t، E_t و $spill_t$ به ترتیب حجم مخزن در انتهای دوره بهینه‌سازی، حجم مخزن در ابتدای دوره بهینه‌سازی، دبی ورودی قطعی به مخزن در دوره t، حجم تبخیر از مخزن در دوره t و حجم آب سرریزی مخزن سد است. بهینه‌سازی محدوده موردمطالعه بر اساس معادله پیوستگی و سیاست خوش‌بینانه با استفاده از نرم‌افزار LINGO انجام‌شده است که نتایج خروجی مدل در قسمت نتایج ذکر گردیده است.

بهینه‌سازی تأمین نیازهای سد قشلاق

در این تحقیق بهینه‌سازی تأمین نیازهای پایاب سد قشلاق برای بررسی حالت استوکستیک سیستم روش برنامه‌ریزی خطی با استفاده از قیود احتمالاتی، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی در محیط نرم-افزار LINGO کد نویسی شده است. در این روش که یکی از روش-های کلاسیک صریح بشمار می‌آید، تابع هدف خطی و قیدها احتمالاتی می‌باشند. تابع هدف و قیود مسئله به‌صورت زیر تعریف گردیده است.

تابع هدف $\boldsymbol{F = Maximize\left(\frac{\sum R_{ij}}{\sum D_{ij}}\right)}$

R_{ij}: مجموع خروجی مخزن برای نیازها، D_{ij}: مجموع نیازها، i: نوع مصرف (کشاورزی، شرب، زیست‌محیطی) و j: شماره ماه

بهینه‌سازی با رویکرد برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی

با توجه به غیرقطعی بودن پدیده بارش در میان رویکردهای مختلف برنامه‌ریزی خطی احتمالاتی، در این پژوهش روش برنامه-ریزی خطی با قیود احتمالاتی انتخاب گردیده است. به‌منظور نتیجه‌گیری روی تئوری‌های برنامه‌ریزی احتمالاتی هدف اصلی تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت است که معادله قطعی مدل برنامه‌ریزی تصادفی از آن استخراج گردیده است. تابع هدف در بهینه‌سازی همانند حالت قطعی، ماکزیمم رساندن نسبت مجموع تأمین نیازها به مجموع نیازها است.

معادله قیود احتمالاتی

$$Pr[R_t \ge D_t] \ge P \qquad (۳)$$

R_t : دبی خروجی از سد برای تأمین نیاز در دوره t، D_t: نیاز کشاورزی و شرب در دوره t، P : سطح اطمینان برای تأمین نیازها

معادله LDR قاعده تصمیم‌گیری خطی است که ارتباط بین خروجی‌ها و ورودی‌های مخزن را ایجاد می‌کند و به‌صورت معادله (۴) تعریف می‌گردد.

$$\mathrm{LDR}: \mathrm{R_t} = \mathrm{S_t} + \mathrm{Q_t} - \mathrm{E_t} - \mathrm{b_t} \qquad (۴)$$

$\mathrm{b_t}$ پارامتری قطعی است که جهت برقراری ارتباط بین پارامترهای غیرقطعی تعریف می‌گردد. دیگر پارامترها قبلاً توضیح داده‌شده است.

معادله بیلان مخزن $S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t$

با حل هم‌زمان معادله LDR و معادله بیلان سد، حجم مخزن در انتهای هر دوره برابر پارامتر قطعی $\mathrm{b_t}$ محاسبه می‌گردد.

$$S_{t+1}=b_t \qquad (۵)$$

به کمک رابطه بیلان مخزن و معادله LDR می‌توان قیود احتمالاتی را به حالت قطعی تبدیل کرد.

$$Pr[Q_t \ge D_t + b_t + E_t - b_{t-1}] \ge P$$
$$Pr[Q_t \le D_t + b_t + E_t - b_{t-1}] \ge 1 - P \qquad (۶)$$

معادله نهایی قید شماره (۱)

$$(D_t + b_t + E_t - b_{t-1}) \le F_{Qt}^{-1}(1-P)$$

$F_{Qt}^{-1}(1-p)$: CDF جریان ورودی به مخزن با احتمال $(1-p)$

دیگر قیود حجم مخزن که عبارت‌اند از: برابری حجم مخزن در ابتدا و انتها دوره بهینه‌سازی و همچنین حجم در هر دوره بهره‌برداری در بازه حداکثر و حداقل حجم مخزن قرار گیرد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$S_0=S_{12} \qquad (۷)$$

$$b_{t-1} \le S_{max} \qquad (۸)$$

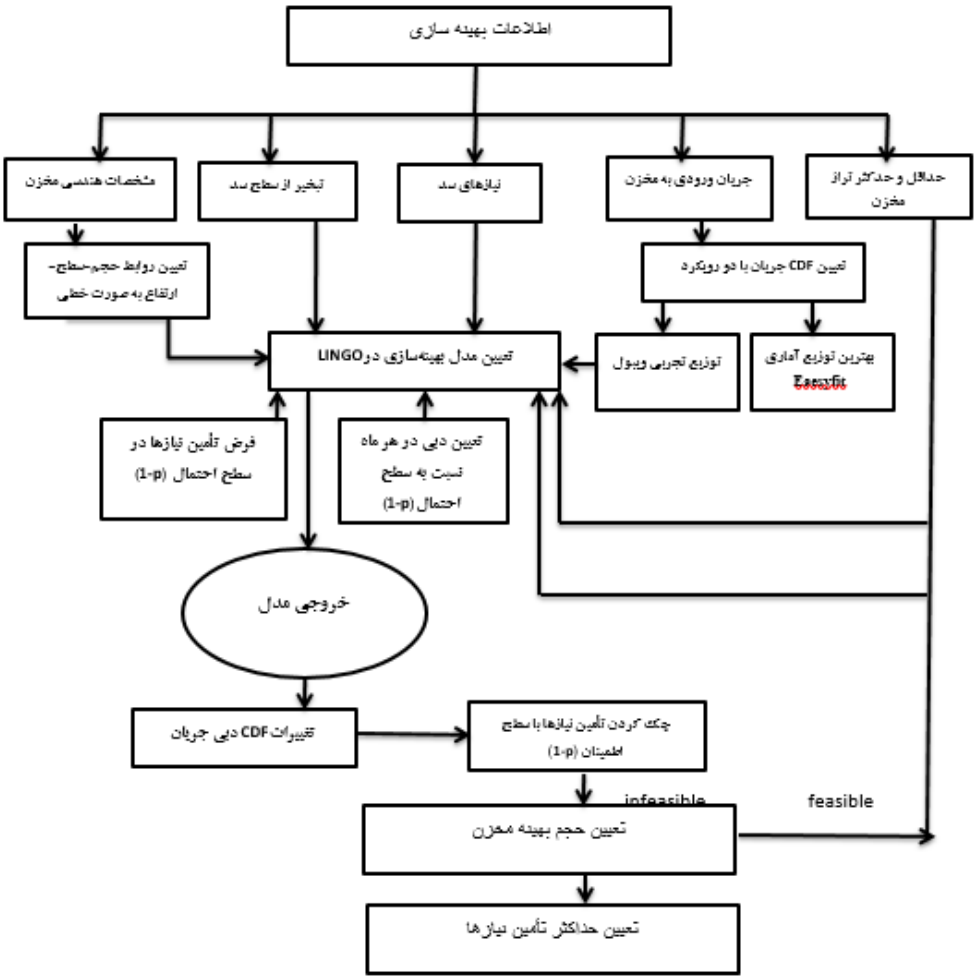
$$b_{t-1} \ge S_{min} \qquad (۹)$$

تابع توزیع تجمعی احتمال جریان ورودی

برای تخصیص بهینه نیازهای پایین‌دست سد در حالت عدم قطعیت با رویکرد برنامه‌ریزی خطی با قیود احتمالاتی، از تابع تجمعی

۱- Linear Decision Rule (LDR)

احتمالاتی دبی جریان ورودی به مخزن استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از تابع توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای ماه‌های مختلف با استفاده از توزیع ویبول و بهترین توزیع آماری برازش یافته، مقدار CDF جریان به‌دست‌آمده و با استفاده از آن محاسبات بهینه‌سازی تخصیص از مخزن سد انجام گردید. در توزیع تجربی ویبول با استفاده از فرمول تجربی $p = \frac{m}{n+1}$ که در این فرمول p احتمال وقوع، m شماره ردیف و n تعداد داده‌هاست، مقدار احتمال تجاوز از دبی موردنظر محاسبه می‌گردد. مطابق این توزیع تجربی، ۴۱ سال داده تاریخی مربوط به جریان ورودی به مخزن سد قشلاق را به ترتیب نزولی مرتب‌شده است، به‌این‌ترتیب احتمال وقوع هر یک از داده‌ها محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit بهترین توزیع آماری برازش یافته برای هرماه انتخاب و جریان ورودی احتمالاتی به مخزن سد محاسبه گردید. Easyfit نرم‌افزاری است برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های آماری که به‌منظور متناسب نمودن توزیع تصادفی داده‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. به کمک این نرم‌افزار تعداد قابل‌توجهی از توزیع‌ها را می‌توان برداده‌ی موردنظر برازش داد و بهترین مدل توزیع تصادفی را در مدت‌زمان اندک به دست آورد. نهایتاً در شکل (۳) الگوریتم انجام بهینه‌سازی در رویکرد احتمالاتی ارائه‌شده است.



شکل ۳- الگوریتم روش حل مسئله با رویکرد احتمالاتی

نتایج و بحث

تحلیل آبدهی جریان در رویکرد احتمالاتی

به‌منظور بررسی جریان ورودی به مخزن به‌صورت احتمالاتی و تأمین نیازها در سطح احتمال ۵۰ تا ۹۵ درصد از دو روش توزیع تجربی ویبول و بهترین توزیع آماری استفاده‌شده است. جریان ورودی احتمالاتی به‌عنوان ورودی مدل در نرم‌افزار لینگو جهت بهینه‌سازی تأمین نیازها مورداستفاده قرارگرفته است. از سطح احتمال ۵ تا ۵۰ درصد با فواصل احتمالاتی ۵ درصد مدل بهینه‌سازی اجراشده است، این روند تا زمانی ادامه یافته است که مدل توسعه داده‌شده در مدل

Lingo غیرقابل اجرا[۱] شود که نتایج آن در جداول (۱) ارائـه و سـپس به تحلیل نتایج حاصله پرداخته‌شده است.

با توجه به جدول (۱) توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای همه ماه‌ها به کمک توزیع ویبـول بـرای سـطوح احتمـالاتی مختلـف بررسی گردید، همان‌طور کـه ملاحظـه مـی‌گـردد بـا کـاهش سـطح احتمالاتی میزان جریان ورودی به مخزن نیز کاهش می‌یابـد و بـرای سطح احتمالاتی بالاتر جریـان ورودی بـزرگ‌تـر مـی‌شـود. در ادامـه بهتـرین توزیـع تجمعـی جریـان ورودی بـرای هرمـاه را بـه کمـک نرم‌افزار Easy fit استخراج کرده، معیاری که بـرای انتخـاب بهتـرین توزیع به کمک نرم‌افزار Easy fit به کار گرفته‌شده اسـت، معیارهـای تصمیم‌گیری (کـای اسـکوتر، کلمـوگروف- اسـمیرونوف و اندرسـون دارلینگ) است، با استفاده از ایـن معیارهـا و انتخـاب بهتـرین توزیـع، پارامترهای به‌دست‌آمده از هر توزیع احتمالاتی محاسـبه‌شـده اسـت. درنهایت این عمل برای هرماه به‌صورت مجزا انجـام‌شـده و بهتـرین توزیع تجمعی احتمالاتی دبـی جریـان ممکـن بـر اسـاس معیارهـای گفته‌شده استخراج و در جدول (۲) ارائه‌شده است. به‌عنوان نمونه برای مهرماه با استفاده از نرم‌افـزار Easyfit از بـین ۶۴ توزیـع احتمـالاتی، مطابق شکل (۴) بهترین توزیع بر مبنای معیارهای تصمیم‌گیری (کای اسکوئر، کلموگروف- اسمیرونوف و اندرسون دارلینگ) که هر سه، بـا مرتبه‌ی ۱ توزیع Wakeby انتخاب شد است. سپس پارامترهای ایـن مدل k, α, β مطابق شکل (۵) از این نرم‌افزار استخراج‌شده است به همین ترتیب توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن با استفاده بهترین توزیع به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Easyfit برای سطح احتمـال۵۰ تـا ۹۵ درصد در جدول (۳) برای همه ماه‌های سال محاسبه و ارائه‌شده است.

درنهایت این عمل بـرای هرمـاه بـه‌صـورت مجـزا انجـام‌شـده و بهترین توزیـع تجمعـی احتمـالاتی دبـی جریـان ممکـن بـر اسـاس معیارهای گفته‌شده استخراج و در جدول (۲) ارائه‌شده است.

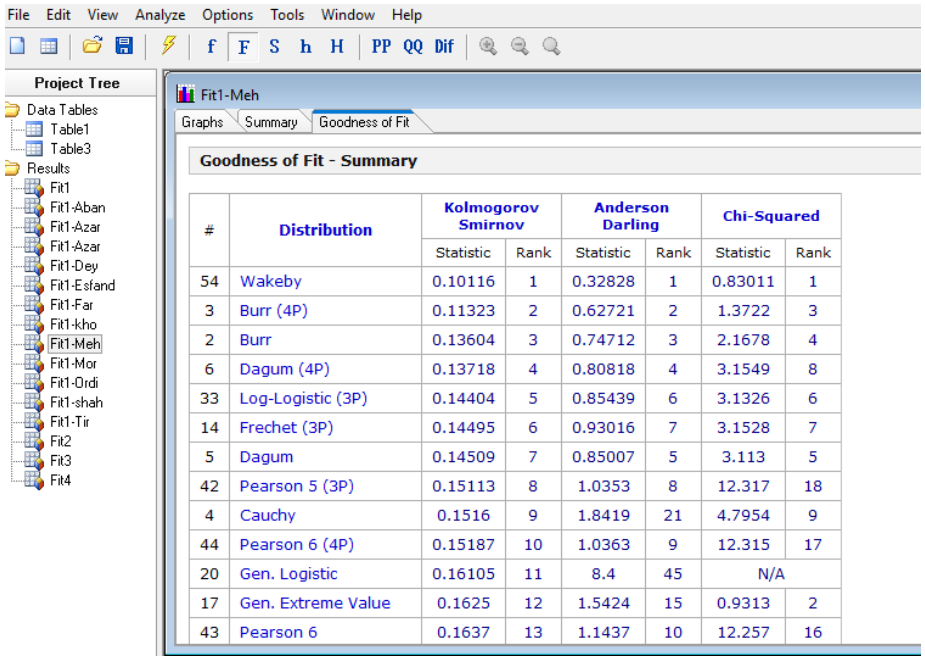
۱- No feasible

جدول ۱- جریان احتمالاتی ورودی به مخزن با استفاده از توزیع تجربی ویبول درصد برحسب میلیون مترمکعب

سطح احتمال(p)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
مهر	۰/۰۶۵	۰/۱۱۶	۰/۱۸۱	۰/۲۳۹	۰/۲۵۳	۰/۲۵۳	۰/۲۷۰	۰/۲۸۵	۰/۳۰۸	۰/۳۳۳
آبان	۰/۱۲۹	۰/۱۸۱	۰/۲۵۹	۰/۳۱۱	۰/۳۷۴	۰/۴۱۴	۰/۵۱۸	۰/۵۴۹	۰/۷۷۷	۰/۸۵۵
آذر	۰/۳۵۷	۱/۲۷۰	۱/۳۲۰	۱/۷۴۰	۱/۹۴۰	۲/۰۲۲	۲/۰۷۰	۲/۱۷۰	۲/۴۱۰	۲/۵۴۰
دی	۱/۰۲۰	۱/۵۹۰	۱/۸۴۰	۲/۱۷۰	۲/۳۵۰	۲/۴۳۰	۲/۵۱۰	۲/۵۹۰	۲/۷۷۰	۲/۸۰۰
بهمن	۱/۶۵۰	۱/۷۱۰	۱/۷۸۰	۲/۳۵۰	۲/۴۳۰	۲/۷۲۲	۲/۹۰۰	۳/۲۱۵	۳/۲۵۰	۳/۳۴۴
اسفند	۲/۷۹۰	۴/۳۲۰	۴/۹۲۰	۶/۱۱۰	۶/۷۷۰	۶/۹۶۷	۷/۱۱۰	۷/۷۷۰	۸/۴۴۰	۸/۷۴۰
فروردین	۲/۱۹۰	۳/۹۶۰	۴/۸۴۰	۶/۵۱۰	۷/۵۰۰	۸/۴۱۳	۹/۱۸۰	۱۰/۷۹۰	۱۱/۷۴۰	۱۴/۷۶۰
اردیبهشت	۱/۸۲۰	۲/۸۶۰	۳/۸۵۰	۴/۹۶۰	۵/۷۳۰	۷/۲۸۷	۸/۲۲۰	۸/۶۰۰	۸/۷۳۰	۹/۱۸۰
خرداد	۰/۳۰۰	۱/۰۱۰	۱/۰۹۰	۱/۱۹۰	۱/۲۸۰	۱/۳۸۰	۱/۴۲۰	۱/۴۴۰	۱/۷۱۴	۱/۷۶۰
تیر	۰/۰۵۳	۰/۱۰۱	۰/۱۸۷	۰/۲۶۷	۰/۲۶۷	۰/۲۷۹	۰/۳۲۱	۰/۳۴۴	۰/۳۷۵	۰/۴۰۱
مرداد	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳	۰/۱۱۲	۰/۱۸۷	۰/۲۱۴	۰/۲۴۱	۰/۲۴۳	۰/۲۶۷	۰/۲۹۴	۰/۳۱۵
شهریور	۰/۰۰۳	۰/۰۵۴	۰/۱۰۷	۰/۱۳۳	۰/۱۸۸	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۵۷	۰/۲۶۷	۰/۲۶۷

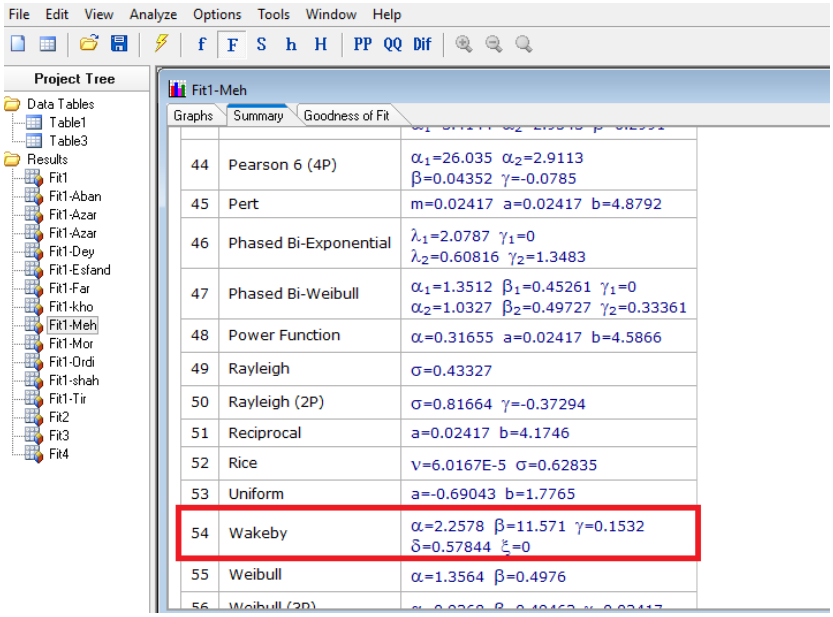
جدول ۲- انتخاب بهترین توزیع آماری و تعیین پارامترها در مدل Easy fit

ماه	بهترین توزیع	پارامترها			
مهر	Wakeby	α=2.2578	β=11.571	γ=0.1532	δ=0.57844
آبان	Log-Logistic(3P)	α=1.0901	β=0.75363	γ=0.1015	
آذر	Wakeby	α=12.332	β=5.5957	γ=0.41826	δ=0.59057
دی	Wakeby	α=46.122	β=19.462	γ=1.2997	δ=-0.02601
بهمن	Pearson 5	α=2.8844	β=8.8738	γ=0	
اسفند	Dagum	k=0.66309	α=4.5566	β=9.6214	γ=0
فروردین	Wakeby	α=20.886	β=0.92895	γ=1.5782	δ=0.6126
اردیبهشت	Gen. Logistic	k=0.07205	σ=2.7135	μ=9.1317	
خرداد	Wakeby	α=45.206	β=31.767	γ=1.3775	δ=-0.04974
تیر	Wakeby	α=3.9964	β=14.565	γ=0.3119	δ=-0.00752
مرداد	Gen. Extreme value	k=0.15488	σ=0.19154	μ=0.24035	
شهریور	Wakeby	α=1.3727	β=5.0907	γ=0.08129	δ=0.27008



#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
54	Wakeby	0.10116	1	0.32828	1	0.83011	1
3	Burr (4P)	0.11323	2	0.62721	2	1.3722	3
2	Burr	0.13604	3	0.74712	3	2.1678	4
6	Dagum (4P)	0.13718	4	0.80818	4	3.1549	8
33	Log-Logistic (3P)	0.14404	5	0.85439	6	3.1326	6
14	Frechet (3P)	0.14495	6	0.93016	7	3.1528	7
5	Dagum	0.14509	7	0.85007	5	3.113	5
42	Pearson 5 (3P)	0.15113	8	1.0353	8	12.317	18
4	Cauchy	0.1516	9	1.8419	21	4.7954	9
44	Pearson 6 (4P)	0.15187	10	1.0363	9	12.315	17
20	Gen. Logistic	0.16105	11	8.4	45	N/A	
17	Gen. Extreme Value	0.1625	12	1.5424	15	0.9313	2
43	Pearson 6	0.1637	13	1.1437	10	12.257	16

شکل ٤- انتخاب بهترین توزیع آماری مهرماه در مدل Easyfit



44	Pearson 6 (4P)	α_1=26.035 α_2=2.9113 β=0.04352 γ=-0.0785
45	Pert	m=0.02417 a=0.02417 b=4.8792
46	Phased Bi-Exponential	λ_1=2.0787 γ_1=0 λ_2=0.60816 γ_2=1.3483
47	Phased Bi-Weibull	α_1=1.3512 β_1=0.45261 γ_1=0 α_2=1.0327 β_2=0.49727 γ_2=0.33361
48	Power Function	α=0.31655 a=0.02417 b=4.5866
49	Rayleigh	σ=0.43327
50	Rayleigh (2P)	σ=0.81664 γ=-0.37294
51	Reciprocal	a=0.02417 b=4.1746
52	Rice	ν=6.0167E-5 σ=0.62835
53	Uniform	a=-0.69043 b=1.7765
54	Wakeby	α=2.2578 β=11.571 γ=0.1532 δ=0.57844 ξ=0
55	Weibull	α=1.3564 β=0.4976

شکل ٥- نمونه‌ای از تعیین پارامترها بهترین توزیع آماری انتخاب‌شده مهرماه در مدل Easyfit

همان‌طور که از جدول فوق قابل‌مشاهده است با توجه به خصوصیات متفاوت دبی جریان آب در ماه‌های مختلف، توزیع‌های آماری متفاوتی نظیر توزیع پیرسون ٥، لگاریتم ٣ پارامتری و ... در هرماه به‌عنوان بهترین توزیع احتمالاتی دبی جریان آب با توجه به معیارهای سه‌گانه معرفی‌شده در نرم‌افزار Easy fit انتخاب‌شده است، همچنین در این جدول برای هر توزیع آماری مقادیر پارامترهای هر توزیع محاسبه و ارائه‌شده است.

حال به کمک بهترین توزیع و پارامترهای به‌دست‌آمده برای هرماه توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن برای سطح احتمال ٥٠ تا ٩٥ درصد مطابق جدول (٣) از نرم‌افزار Easy fit به‌دست‌آمده است. همان‌گونه که از جدول فوق مشاهده می‌گردد با افزایش سطح احتمال میزان جریان تجمعی دبی جریان افزایش می‌یابد.

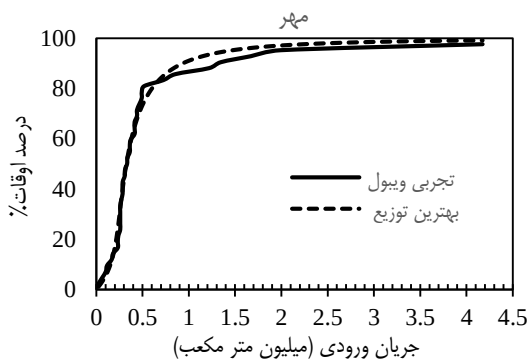
جدول ۳- جریان احتمالاتی ورودی به مخزن با استفاده از مناسب‌ترین توزیع آماری در هرماه در نرم‌افزار Easy Fit برحسب میلیون مترمکعب

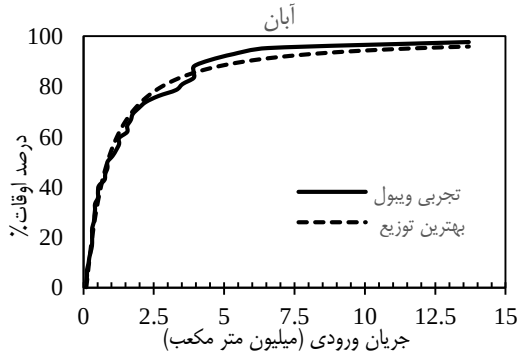
سطح احتمال(p)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
مهر	۰/۰۹۵	۰/۱۵۴	۰/۱۹۱	۰/۲۱۶	۰/۲۳۶	۰/۲۵۳	۰/۲۶۸	۰/۲۸۵	۰/۳۰۴	۰/۳۲۶
آبان	۰/۱۵۲	۰/۲۰۱	۰/۲۵۴	۰/۳۱۲	۰/۳۷۶	۰/۴۴۷	۰/۵۲۸	۰/۶۲۱	۰/۷۲۸	۰/۸۵۵
آذر	۰/۵۶۴	۱/۰۲۰	۱/۳۸۰	۱/۶۶۰	۱/۸۸۰	۲/۰۶۰	۲/۲۰۰	۲/۳۱۰	۲/۴۱۰	۲/۵۰۰
دی	۱/۱۴۰	۱/۷۸۰	۲/۰۶۰	۲/۲۰۰	۲/۳۱۰	۲/۴۰۰	۲/۵۰۰	۲/۶۰۰	۲/۷۲۰	۲/۸۴۰
بهمن	۱/۴۴۰	۱/۷۱۰	۱/۹۴۰	۲/۱۴۰	۲/۳۴۰	۲/۵۴۰	۲/۷۵۰	۲/۹۴۰	۳/۲۱۰	۳/۴۶۰
اسفند	۳/۵۷۰	۴/۵۲۰	۵/۲۰۰	۵/۷۶۰	۶/۲۵۰	۶/۷۱۰	۷/۱۴۰	۷/۵۷۰	۷/۹۸۰	۸/۴۱۰
فروردین	۲/۴۶۰	۳/۶۰۰	۴/۷۵۰	۵/۹۱۰	۷/۱۰۰	۸/۳۰۰	۹/۵۲۰	۱۰/۷۵۰	۱۲/۰۵۴	۱۳/۳۷۰
اردیبهشت	۱/۹۳۰	۳/۶۱۰	۴/۷۰۰	۵/۵۵۰	۶/۲۶۰	۶/۹۰۰	۷/۴۸۰	۸/۰۴۰	۸/۵۹۰	۹/۱۳۰
خرداد	۰/۶۵۶	۰/۹۵۹	۱/۰۷۰	۱/۱۶۰	۱/۲۵۰	۱/۳۵۰	۱/۴۵۰	۱/۵۵۰	۱/۶۷۰	۱/۸۰۰
تیر	۰/۱۴۵	۰/۱۷۸	۰/۲۰۵	۰/۲۳۰	۰/۲۵۴	۰/۲۷۹	۰/۳۰۴	۰/۳۳۰	۰/۳۵۷	۰/۳۸۷
مرداد	۰/۰۴۷	۰/۰۹۰	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲	۰/۱۷۹	۰/۲۰۵	۰/۲۳۱	۰/۲۵۷	۰/۲۸۴	۰/۳۱۲
شهریور	۰/۰۱۷	۰/۰۷۲	۰/۱۱۶	۰/۱۵۳	۰/۱۸۲	۰/۲۰۷	۰/۲۲۷	۰/۲۴۵	۰/۲۶۰	۰/۲۷۴

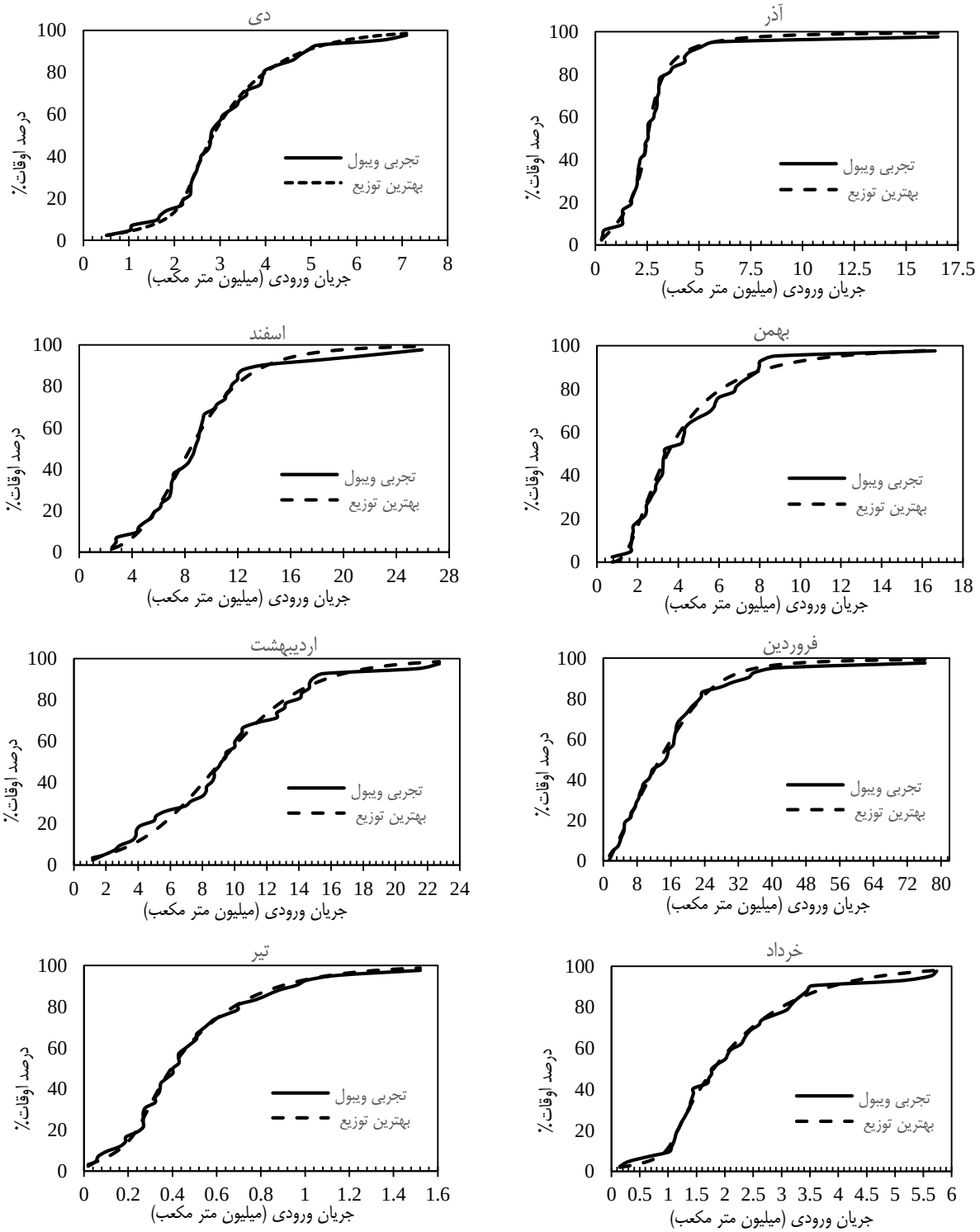
به‌منظور مقایسه دو رویکرد با توجه به جریان ورودی در فروردین‌ماه که بیشترین بارندگی را دارد، میانه مقدار بارندگی در توزیع تجربی ویبول MCM ۱۴/۷۶ است که در نرم‌افزار Easy Fit، MCM ۱۳/۴۳ است، در دیگر ماه‌های سال نیز با مقایسه‌ی درصدهای مشابه در هر دو حالت می‌توان دریافت که هر دو حالت نتایج مشابهی را حاصل می‌شود، بنابراین انتخاب بهترین توزیع آماری در هرماه با استفاده از بهترین توزیع نسبت به توزیع تجربی ویبول معنی‌دار نبوده و بر اساس توزیع تجربی ویبول جریان احتمالاتی محاسبه و به‌عنوان ورودی مدل بهینه‌ساز لحاظ می‌گردد. برای تحلیل بیشتر نمودار CDF جریان ماهانه ورودی به مخزن سد قشلاق در هردو رویکرد مقایسه گردید.

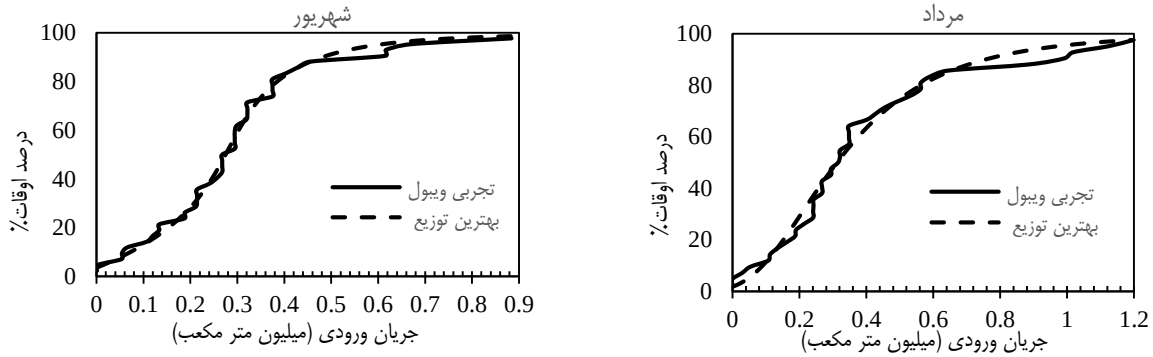
CDF جریان ورودی به مخزن

پس از مشخص شدن جریان تجمعی ورودی با استفاده از رویکرد توزیع ویبول، به‌منظور بررسی دقیق جریان، CDF جریان در هرماه به‌صورت جداگانه رسم و مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل (۶) نشان داده‌شده است.






آذر
دی
بهمن
اسفند
فروردین
اردیبهشت
خرداد
تیر
درصد اوقات٪
جریان ورودی (میلیون متر مکعب)
تجربی ویبول
بهترین توزیع



شکل ٦- CDF جریان ورودی در ماه‌های مختلف به ازای توزیع تجربی ویبول و بهترین توزیع آماری

با توجه به نمودارهای CDF رسم شده در هر دوحالت نتایج توزیع تجمعی جریان ورودی به مخزن در هرماه بسیار نزدیک به هم بوده است، به‌عنوان نمونه در مهرماه ۳ درصد اوقات دبی بیشتر از ۲ میلیون مترمکعب، در آبان ماه تنها ۱۵ درصد اوقات دبی بیشتر از ۴ میلیون مترمکعب در این دو ماه تقریباً نیمی از اوقات رودخانه دبی به ترتیب در حدود ۰/۹ و ۰/۳۳ میلیون مترمکعب است. در ماه آذر تنها ۷ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۵ است و ۵۰ درصد اوقات دبی رودخانه از MCM ۲/۵ بیشتر بوده است. دی‌ماه ۷ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۵ و ۳۰ درصد اوقات بیشتر از MCM ۳/۵ بوده است. در بهمن‌ماه ۱۵ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۷ است و ۲۵ درصد اوقات بیشتر از MCM ۵/۵ بوده است. در اسفندماه ۳۵ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۱۰ است و نیمی از اوقات دبی بیشتر از MCM ۸/۷ است. در فروردین‌ماه که بیشترین بارندگی رخداده است، ۱۰ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۳۴ است. در اردیبهشت‌ماه ۱۰ درصد اوقات دبی از MCM ۱۵ بیشتر و ۵۰ درصد اوقات بیشتر از MCM ۹ بوده است. در خردادماه ۱۰ درصد اوقات دبی بیشتر از MCM ۴ است و ۵۰ درصد اوقات از MCM ۱/۷ است. از تیرماه به بعد در ۱۰ درواقع کمتر از ۱ میلیون مترمکعب آب در رودخانه جاری بوده است و بیشترین دبی جریان رودخانه در این سه ماه ۱/۵MCM است. در ادامه به نحوه محاسبه بیلان مخزن سد در رویکردهای مختلف در سناریوهای مختلف دبی ورودی به مخزن سد پرداخته‌شده است.

بهینه‌سازی سد قشلاق در حالت در نظر گرفتن جریان ورودی به مخزن سد به‌صورت قطعی در دوره ۴۱ سال توسط سیاست بهره-برداری استاندارد در نرم‌افزار LINGO باهدف تخصیص بهینه نیازها انجام گردید. به‌منظور تهیه بیلان سد از ورودی و خروجی‌های مدل بهینه‌ساز نوشته‌شده استفاده می‌گردد که خلاصه آن به‌این‌ترتیب است که جریان ورودی سد قشلاق به‌طور متوسط MCM ۵۰/۹ است که با توجه به میزان حجم تبخیر MCM ۲/۴، خروجی سد MCM ۴۸/۵ است. حجم آب سرریزی از مخزن سد MCM ۹/۵ می‌باشد. نهایتاً میزان MCM ۳۸/۷۵ آن به‌عنوان جریان تنظیمی سد به مصارف گوناگون نیازها اختصاص داده می‌شود؛ که از این میزان سهم هر یک به شرح زیر است که تأمین نیاز شرب MCM ۴/۷، تأمین نیاز زیست‌محیطی MCM ۵/۴ و نیاز کشاورزی MCM ۲۸/۶۵ است. خلاصه نتایج مدل، عملکرد بیلان مخزن به لحاظ حجم آورد ورودی، حجم تبخیر، تأمین نیازهای پایاب سد، سرریز در جدول (۴) مورد ارزیابی قرارگرفته است.

جدول ٤- خروجی مدل لینگو در حالت ورودی جریان به‌صورت قطعی (MCM)

ورودی	تأمین نیاز کشاورزی	تأمین نیاز شرب	تأمین نیاز زیست‌محیطی	سرریز	تبخیر
۵۰/۹	۲۸/۶۵	۴/۷	۵/۴	۹/۵	۲/۴

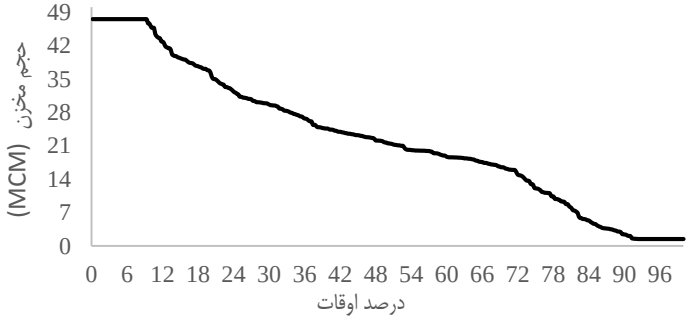
تغییرات حجم مخزن سد در طول دوره بهینه‌سازی

بررسی عملکرد حجم مخزن سد به‌منظور تخصیص بهینه نیازهای پایین سد از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به شکل (۷) که تغییرات حجم مخزن در طول دوره بهینه‌سازی در رویکرد قطعی دبی ورودی به مخزن را نشان می‌دهد که ۹/۳ درصد از کل دوره حجم مخزن کاملاً پر بوده است و ۸/۳ درصد اوقات به حجم مرده و به پایین‌ترین تراز خود به عبارتی حجم ۱/۵ میلیون مترمکعب رسیده است.

نتایج شاخص‌های ارزیابی سیستم

اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری شاخص‌های بسیار پرکاربردی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب می‌باشند،

شاخص اطمینان‌پذیری نسبت تعداد کل ماه‌هایی که سیستم در تأمین آب با موفقیت روبرو بوده به تعداد کل ماه‌های اجرای آن است. توانایی سیستم در تغییر شرایط آن و یا به‌عبارت‌دیگر احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب بازگردد چقدر است را در شاخص برگشت‌پذیری محاسبه می‌شود؛ و شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان نسبت مجموع کل کمبودها به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود اتفاق افتاده تقسیم‌بر کل نیاز تعیین می‌گردد. همچنین شاخص پایداری، معیاری جدیدتری که به‌وسیله سه معیار قبلی محاسبه می‌گردد. این شاخص جمع‌بندی شاخص‌های عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در تصمیم‌گیری بین گزینه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب است که از ریشه سوم حاصل‌ضرب دو شاخص اول در متمم شاخص آسیب‌پذیری محاسبه می‌شود. در جدول (۵) نتایج حاصل از محاسبه معیارهای ارزیابی ارائه‌شده است.



شکل ۷- درصد پر و خالی بودن حجم مخزن در طول دوره بهینه‌سازی

جدول ۵- نتایج معیارهای ارزیابی (٪)

نیاز	اطمینان‌پذیری	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری	پایداری
شرب	۹۵	۲۶	۲۳	۵۷
کشاورزی	۹۲	۳۳	۳۹	۵۷
زیست‌محیطی	۹۵	۲۶	۴۴	۵۱

همان‌گونه که از جدول ۵ مشاهده می‌گردد، درصد اطمینان‌پذیری نیازهای شرب و زیست‌محیطی که از اولویت تأمین بالاتری برخوردارند دارای بیشترین میزان یعنی ۹۵ درصد است و بالاترین میزان برگشت‌پذیری مربوط به نیاز کشاورزی با ۳۳ درصد است. همچنین کمترین درصد آسیب‌پذیری مربوط به نیاز شرب با ۲۳ درصد است. درنهایت بیشترین پایداری در نیازهای شرب و کشاورزی با ۵۷ درصد حاصل‌شده است و نیاز زیست‌محیطی به علت شدت آسیب‌پذیری بالای ۴۴ درصدی دارای پایداری ۵۱ درصدی است.

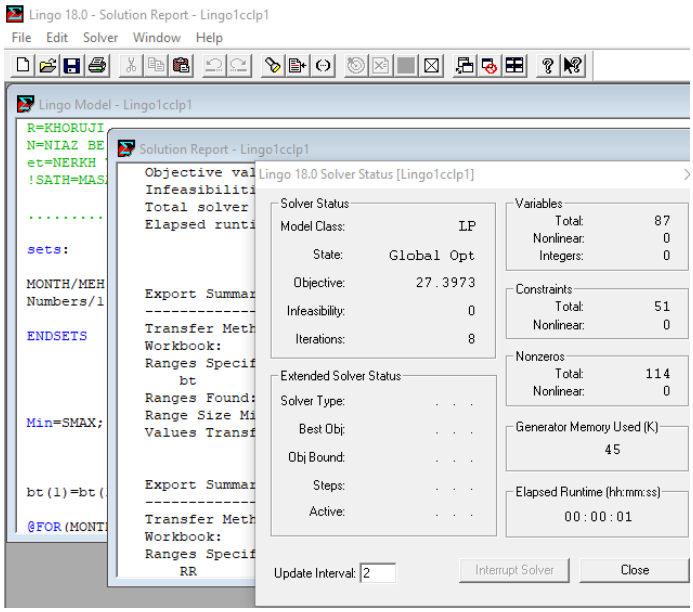
بهینه‌سازی مخزن با رویکرد احتمالاتی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از قسمت تحلیل آبدهی‌ها، مقادیر جریان ورودی به مخزن در رویکرد قطعی، بیشترین مقدار ورودی به مخزن در فروردین‌ماه معادل ۷۶MCM است که این مقدار در رویکرد احتمالاتی ۱۴,۷۶ MCM با سطح تأمین ۵۰ درصد است، بنابراین با توجه به کاهش جریان در رویکرد احتمالاتی حجم طراحی‌شده مخزن (۴۷,۶MCM) حجم بزرگی بوده و با توجه به منابع و مصارف در این حوضه هیچ سرریزی اتفاق نمی‌افتد، لذا با توجه به آبدهی احتمالاتی محاسبه‌شده، نیاز به بهینه‌سازی مجدد حجم مخزن است. بدین منظور با استفاده از CDF جریان ورودی که با استفاده از توزیع تجربی ویبول در سطح احتمال ۵ تا ۵۰ درصد محاسبه و به‌عنوان ورودی جریان به مدل لینگو معرفی گردید، (دلیل انتخاب این سطح احتمالاتی به سبب تأمین نیازها به میزان ۵۰ تا ۹۵ درصد است) بنابراین برای یافتن جواب بهینه اجرای مدل تا زمانی ادامه دارد که مدل غیرقابل اجرا باشد (Infeasible). این بدان معناست که جواب بهینه بیشتری نسبت به حالت قبل قابل دریافت نباشد و با توجه به حجم بهینه مخزن در برابر حداکثر سطح تأمین نیازها محاسبه‌شده است. با توجه به جدول (۶) و شکل (۸) که مربوط به خروجی نتایج برنامه نوشته‌شده در محیط لینگو می‌باشد، با سطح اطمینان ۶۰ درصد در تأمین نیازها، حجم بهینه مخزن ۲۷/۳۹ MCM به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف بهره‌برداری بهینه از مخزن سد به‌منظور تأمین حداکثری نیازهای پایاب سد، در شرایط غیرقطعی آبدهی جریان ورودی به مخزن به سبب ماهیت غیرقطعی بارندگی، در مخزن سد قشلاق واقع بر رودخانه مریم‌نگار در استان کرمانشاه موردبررسی قرارگرفته است. نتایج مدل بهینه‌سازی در رویکرد قطعی نشان داد که

متوسط درازمدت جریان ورودی مخزن سد در یک دوره ۴۱ ساله به میزان ۵۰/۹ MCM است که از این مقدار ۳۸/۷۵ MCM آن به‌عنوان جریان آب قابل تنظیم به مصرف نیازهای پایاب سد می‌رسد.



شکل ۸- خروجی مدل LINGO در رویکرد احتمالاتی

جدول ٦- حجم بهینه مخزن با توجه به سطح اطمینان‌پذیری نیازها

سطح اطمینان‌پذیری نیازها (P)	حجم مخزن
۵۰	۲۶/۹۰
۵۵	۲۷/۰۳
۶۰	۲۷/۳۹
>۶۰	Infeasible

در این شرایط نیاز به حجم مخزنی معادل ۴۹ میلیون مترمکعب است که حدود ۱۰ درصد مواقع سرریز خواهد داشت. از سوی دیگر، در بهینه‌سازی تخصیص با رویکرد احتمالاتی، دو شیوه مختلف احتمالاتی نمودن جریان ورودی به مخزن موردبررسی قرار گرفت. در حالت اول CDF جریان ورودی به‌وسیله توزیع تجربی ویبول و در حالت دوم توسط انتخاب بهترین توزیع آماری برازش یافته در نرم‌افزار Easy Fit محاسبه و ارائه گردید. مقایسه نتایج در کلیه ماه‌ها و بخصوص در ماه پربارش سال (فروردین‌ماه) نشان داد که نیازی به انتخاب بهترین توزیع آماری نبوده و توزیع ویبول بدین منظور کفایت می‌کند. با انتخاب توزیع تجربی ویبول به‌منظور احتمالاتی نمودن جریان ورودی، CDF جریان برای هرماه به‌صورت جداگانه رسم گردید. در این حالت با توجه به کاهش جریان ورودی، حجم بهینه مخزن در رویکرد غیرقطعی جریان ورودی به مخزن مجدداً محاسبه گردید. در این حالت نتایج نشان داد که متوسط آبدهی سالانه ورودی به مخزن ۳۸/۴ میلیون مترمکعب خواهد بود و در این حالت حجم بهینه مخزن شده با سطح اطمینان ۶۰ درصدی، معادل ۲۷/۴ MCM محاسبه گردید. در این حجم، مخزن سد قادر به تأمین نیازها به‌طور کامل است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد منظور نمودن دبی جریان ورودی با رویکرد احتمالاتی تأثیر معنی‌داری در ابعاد طراحی و بهره‌برداری بهینه از مخزن سد قشلاق داشته و با توجه به غیرقطعی بودن پدیده بارش و به‌تبع آن دبی ورودی به مخزن سد، این رویکرد امری ضروری در طراحی و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها به‌حساب می‌آید. لذا پیشنهاد می‌شود جهت جلوگیری از بیش برآورد حجم مخازن سدها در محاسبات تخصیص بهینه از رویکرد احتمالاتی جریان ورودی به مخازن مطابق روش انجام‌شده در این مطالعه استفاده گردد تا به‌خوبی اثرات عدم قطعیت بارش در برآورد آب ورودی به مخازن دیده‌شده و از بروز مشکلات آتی جلوگیری نماید.

منابع

آئین، ر. علیزاده، ح. ۱۳۹۷. مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای طراحی بهینه طرح‌ها و

سیاست‌های توسعه منابع آب حوضه آبریز رودخانه حله، تحقیقات منابع آب ایران ۱۴(۳): ۲۳۵-۲۲۰.

سلیمی مستعلی، ف.، حافظ پرست، م. و سرگردی، ف. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد تحت سناریوی تغییر الگوی کشت (مطالعه موردی: سد هرسین). تحقیقات آب‌وخاک ایران ۵۱(۱): ۱۲-۱.

شهبازی، ت. و صادقیان، م. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای برقابی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی در محیط برنامه‌نویسی Lingo. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز، ایران.

فاطمی، س.ا. و کوهی، ه. ۱۳۹۶. تخصیص بهینه آب مخزن سد با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی. دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. شهرکرد. دانشگاه شهرکرد. انجمن هیدرولوژی ایران.

فرخزاد، ب.، مهدوی، م.، سلاجقه، ع. و ملکیان، آ. ۱۳۹۶. مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی. مجله پژوهش آب ایران ۲۵: ۱۹ -۱۱.

محسن زاده، ف. ۱۳۹۱. مقایسه تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت در افزایش سود و کارایی مصرف آب با روش‌های مختلف برنامه-ریزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. رشته آبیاری و زهکشی. دانشکده مهندسی آب‌وخاک. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

معینی، ر.۱۳۹۳. بهینه‌سازی مسئله بهره‌برداری برقابی از سد دز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سیستم مورچگان ترتیبی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران. تهران.

مرادی، ح.، جلیلی، خ. و بزرگ حداد، ا. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی تخصیص اراضی و آب آبیاری مبتنی بر دیدگاه بیلان آب با استفاده از برنامه‌ریزی خطی. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۱(۲):۳۸۵-۳۷۲.

نوذری، حامد. ۱۳۹۶. مدیریت بهره‌برداری از آب مخزن سد امیرکبیر به کمک روش پویایی سیستم و مدل برنامه‌ریزی غیرخطی. تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۴۸(۲):۳۳۵-۳۴۷.

Baohui, M., Zhijian, W., Huanlong, L., Zehua, H. and Yangsong, L. 2019. Improved grey prediction method for optimal allocation of water resources: a case study in Beijing in China. Water Supply. 19 (4): 1044–1054.

Divakar L., Babel M.S., Perret S., Das G.A. 2013. Optimal water allocation model based on satisfaction and Economic benefits. International Journal of Water. 7(4):363-381.

Hassan-Esfahani L., Torres-Rua A., and McKee M. 2015. Assessment of optimal irrigation water allocation for Pressurized irrigation system using water balance approach, learning machines, and remotely sensed data. Agricultural Water Management. 153: 42–50.

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

Goodarzi, E., Ziaei, M. and Hossinipour, E. 2015.Optimization Analysis in Hydro-system Engineering, Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality. Springer International Publishing Switzerland. Chapter. 7: 218-238.

Khosrojerdi, T., Moosavirad, S.H., Ariafar, S. and Ghaeini-Hessaroeyeh, M. 2019. Optimal Allocation of Water Resources Using a Two-Stage Stochastic Programming Method with Interval and Fuzzy Parameters. Natural Resources Research. 28(3): 1107–1124.

Klemes V. 1977. Value of information in reservoir optimization.Water Research. 13(5):857-850.

Kotir JH, Smith C., Brown G., Marshall N., Johnstone R. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agriculture development in the Volta river basin. Ghana. Science of the Total Environment. 573:444-457.

Li, X., Wang, X., Guo, H. and Ma, W. 2020. Multi-Water Resources Optimal Allocation Based on Multi-Objective Uncertain Chance-Constrained Programming Model. Water Resource Management. 34(15):4881–4899.

Li M., and Guo P. 2014. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties.Applied Mathematical Modelling. 38(19–20): 4897–4911.

Mohammad Ghasemi, M., SHahraki, J. and Sabouhi Sabouni, M. 2016. Optimization model of Hirmand river basin water resources in the Agricultural Sector Using Stochastic Dynamic Programming under Uncertainty Conditions. International Journal of Agricultural Management. 6(2): 163-171.

Tan, Y., Dong, Z., Xiong, C., Zhong, Z. and Hou, L. 2019. An Optimal Allocation Model for Large Complex Water Resources System Considering Water supply and Ecological Needs. Water. 11 (4): 843-852.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 15, Feb.-Mar. 2022, p. 1300-1314

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۵، بهمن-اسفند ۱۴۰۰، ص. ۱۳۱۴-۱۳۰۰

Optimization of Gheshlaq Dam Water Allocation in Chance-Constrained Linear Programming Approach

S. Abaie[1], S. E. Fatemi[2*], F. Sarordi[3], A. Azari[4]
Recived: Jul.04, 2021 Accepted: Aug.27, 2021

Abstract

Optimal operation of dam reservoirs is one of the important issues in the field of water resources management. In this study, optimal operation of dam has been investigated in a deterministic and probabilistic manner in order to supply maximum water demands of the dam downstream. The optimal allocation conditions of the system are examined by considering the probabilistic inflow and investigating the effect of cumulative distribution function on meeting the water demands. The chance constrained linear programming method has been used in the uncertainty approach for reservoir inflow. The study area is considered in Gheshlagh Dam located on Maryam-Negar River in Kermanshah province. Water supply optimization of water demands on downstream has been presented by using coding in LINGO software environment in two different modes. The results of optimization by deterministic approach show that the supply in the agricultural, domestic, and environmental water demands are 92%, 95% and 95%., respectively. In the probabilistic approach, considering the uncertainty in the inflow to the reservoir in two different ways, the results showed that not only is it not necessary to choose the best statistical distribution model of the inflow to the reservoir and the experimental distribution of Weibull is sufficient for this purpose, but also due to the reduction of the inflow volume to the reservoir, the optimal volume of the dam reservoir with a confidence level of 60% was estimated to be equal to 27.3 MCM. In this volume, the dam reservoir is fully able to supply the downstream demands of Gheshlagh Dam. Therefore, due to the uncertainty of the precipitation phenomenon, consequently the inflow to the dam reservoir and the obtained results, this approach is essential in the design and optimal use of dam reservoirs.

Key words: Chance-constrained, Linear programming, Lingo, Optimization, Weibull distribution

1- Master of Water Resource, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: e_fatemi78@yahoo.com)