

تحلیل هیدرولوژیکی مخزن سد قشلاق و برداشت بهینه از آن بر مبنای تحلیل خشکسالی‌های حوضه رودخانه

مهری کاکي^۱، احمد فاخری فرد^{۲*}، مطلب بایزیدی^۳، سینا شکیبی^۴

۱. کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنج، ایران

۴. کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۶/۲۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۸/۰۵)

چکیده

در بیشتر شهرهای ایران برای تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی از مخازن سدهای در حال بهره‌برداری استفاده می‌شود، اما به دلیل نبود قانون بهره‌برداری مناسب یا متوازن نبودن میزان تقاضا و حجم مخزن (از زمان ساخت تا کنون)، باید دستورات بهره‌برداری مناسب برحسب شرایط موجود تغییر یابد. بررسی عملکرد حجم ذخیره مخزن سد قشلاق از نظر بیشترین برداشت بهینه مطمئن برای مصرف کشاورزی و با فرض تأمین ۱۰۰ درصد آب شرب و تعیین میزان حجم ذخیره، هدف مطالعه حاضر است. برای این منظور از روش برنامه‌ریزی خطی در محیط متلب استفاده شد. دوره بحرانی ۵۱ ماه به‌روش هرست به‌دست آمد و براساس آن مقدار بهینه آب آزاد شده برای تأمین آب کشاورزی در دوره آماری (مهر ۱۳۶۶ تا شهریور ۱۳۹۱) ۱/۳۳۴ میلیون مترمکعب به‌دست آمد. با مقایسه پتانسیل مصرفی کشاورزی منطقه و میزان برداشت بهینه محاسبه‌شده مشخص شد که فقط ۶۰ درصد از نیازها برآورده شده و این مقدار نیاز آبیاری ماه‌های تیر (۲/۲ میلیون مترمکعب)، مرداد (۲/۴۷ میلیون مترمکعب) و شهریور (۲/۲۹ میلیون مترمکعب) را تأمین نکرده است. ضریب همبستگی بین مقادیر حجم ذخیره ماهانه به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی و حجم ذخیره ماهانه واقعی در مخزن ۰/۸۴ به‌دست آمد. نتایج نشان داد بیشترین ذخیره ماندگاری در حجم ۱۶۲ میلیون مترمکعب (که برابر ۳/۴ حجم مخزن است) با احتمال (۵۰ درصد) رخ می‌دهد. همچنین از برازش توزیع‌های آماری بر مقادیر سرریزها طی دوره آماری مشخص شد که بهترین توزیع با کمترین خطا، توزیع گامبل است. به‌طور کلی، نتایج بهینه‌سازی نشان داد به‌کارگیری برنامه‌ریزی خطی می‌تواند کاربران را در استفاده بهینه از منابع آبی برای مصارف کشاورزی و صنعتی کمک کند.

کلیدواژگان: برنامه‌ریزی خطی (LP)، بهینه‌سازی، حجم‌های ماندگار، خشکسالی، هرست.

مقدمه

رودخانه‌ها یکی از منابع اصلی سیستم‌های تأمین آب برای برآورد تقاضاهای مختلف از قبیل آب شرب، آب کشاورزی، مصارف صنعتی و تجاری محسوب می‌شوند. زمانی که مقدار تقاضای کل در مقایسه با جریان رودخانه‌ها، کم باشد این نوع تقاضاها می‌توانند به وسیله جریان‌های طبیعی رودخانه تأمین شوند در حالی که اگر تقاضا از جریان‌های طبیعی رودخانه بیشتر شود، کمبود آب بین تقاضا و جریان رودخانه می‌تواند به وسیله ذخیره‌سازی جریان سطحی در دوره‌های پرآبی تأمین شود. بنابراین، مخازن ذخیره آب‌های سطحی که برای کنترل و تنظیم جریان‌های رودخانه‌ها، طرح و بهره‌برداری می‌شوند مهم‌ترین اجزای سیستم‌های منابع آب شناخته می‌شوند. با توجه به اینکه ایران آب و هوای گرم و خشک با بارشی کمتر از ۱/۳ متوسط بارش دنیا دارد، با محدودیت منابع آب و افزایش تقاضای آب برای شرب، کشاورزی و صنعت روبه‌روست، که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در طراحی، اجرا و بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب را امری اجتناب‌ناپذیر می‌کند. در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌های ریاضی از جمله برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و نیز الگوریتم‌های ژنتیک، جست‌وجوی هارمونی و مورچگان برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در حال توسعه است. در این تحقیق با توجه به ماهیت برون‌سالی عمل کردن مخزن که همیشه ذخیره دارد، هدف برداشت بهینه مطمئن ثابت در کل دوره برای مصارف کشاورزی با ورودی‌های ماهانه به مخزن، و مقایسه آن با مقدار نیاز آبی برای مصرف کشاورزی در منطقه صورت می‌گیرد؛ همچنین تعیین حجم بهینه به‌ازای برداشت کامل برای مصارف و مقایسه با حجم فعلی و بالاخره مطالعه رفتار مخزن و تعیین پارامترهای هیدرولوژیکی که در مدیریت کاربرد مخزن نقش مؤثری دارند از جمله آنالیز فرکانس سرریز و تعیین نمودار احتمالاتی حجم‌های ذخیره در هر ماه برای ماه بعدی معین می‌شود.

پیشینه تحقیق

در زمینه بررسی خشکسالی، هربست و همکارانش (۱۹۶۶) تحقیقات خود را برای مدت، شدت و شاخص خشکسالی روی داده‌های بارش انجام دادند، که بعدها توسط موهان و رانگاپارایا (۱۹۹۱) برای مناطق خشک اصلاح شد [۱ و ۲]. از جمله کارهای انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی، نیشی کاوا

(۱۹۹۸) نوعی مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را برای مدیریت بهینه مخازن آب شهر سانتاباربرا در یک دوره خشکسالی معین، توسعه داد. وی مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را در سیاست بهره‌برداری سه مخزن به‌کار برد و حساسیت مدل را نسبت به نیاز، ذخیره، تنش‌ها و حجم بررسی کرد [۳]. دوران یلدز و همکارانش (۱۹۹۹) تحقیقات خود را بر این اساس پایه‌ریزی کردند که ورودی‌های طبیعی روی نتایج مسئله بهینه‌سازی تأثیرگذار است، چون این ورودی‌ها ذات تصادفی داشتند و باید در محاسبات دخالت داده می‌شدند، نوعی مدل برنامه‌ریزی خطی^۱ LP با محدودیت احتمالی ارائه کردند تا این فاکتور مهم در محاسبات در نظر گرفته شود. ایشان سیاست‌های بهره‌برداری بهینه ماهانه را برای دوره یک‌ساله، با ورودی‌های متفاوت و با سطوح احتمالی مختلف برای سیستم تأمین آب معین کردند تا در مدل به‌کار رود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد درصد کمبود آب تابع هدف، صفر است. همچنین بیشترین برداشت ثابت را بررسی کردند و گفتند که به‌طور مشابه ممکن است نتایج متفاوتی با درصدهای کمبود مختلف به‌دست‌آمده و ریسک‌های مختص به آن محاسبه شوند. آنها همین‌طور با بررسی نتایج بین مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP) و برنامه‌ریزی پویا^۲ (DP) تفاوت معناداری پیدا نکردند، اما نتایج به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی را که ماهیت احتمالی بودن جریان‌های طبیعی در محاسبات وارد می‌شود، مناسب تشخیص دادند [۴]. کومار و همکارانش (۲۰۰۲) بهره‌برداری بهینه و میزان برداشت از مخزن را با مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی (MOFLP) بررسی کردند. بهینه‌سازی را با دو تابع هدف یعنی ماکزیمم کردن برداشت آب برای آبیاری و تولید برق، با محدودیت مختلف فرمول‌بندی کردند و از تابع‌های خطی برای فازی کردن تابع هدف استفاده کردند. آنها از مدل MOFLP استفاده کردند که هم هدف‌های فازی شده را بهینه می‌کرد و هم سطح رضایت مد نظر را فراهم می‌آورد [۵]. بالیارسینگ و کومار (۱۹۹۷) برنامه‌ریزی خطی احتمالی^۳ (SLP) را برای پیدا کردن یک روش بهره‌برداری مناسب و بهینه برای مخزن سدی در هندوستان به‌کار بردند. این پژوهشگران روش بهره‌برداری را به‌صورت ماهانه در نظر

1. Linear Programming
2. Dynamic Programming
3. Stochastic linear programming (SLP)

کمی بهتر است [۹]. پات‌توار و همکارانش (۲۰۱۳) میزان برداشت از سیستم چند مخزن تک‌منظوره را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی محاسبه کردند. آنها مدل LP را برای برداشت بهینه از سیستم دومخزنه منار هندوستان با هدف برداشت مطمئن برای مصرف آبیاری توسعه دادند. آنها دریافتند که از نظر کارایی و دقت این مدل (برنامه‌ریزی خطی) نسبت به سایر روش‌های دیگر از جمله شبیه‌سازی بهتر عمل می‌کند [۱۰]. نجفی و همکارانش (۲۰۰۵) بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از برنامه‌ریزی خطی را مطالعه و کاربرد آن را در سد وشمگیر بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد سیاست بهره‌برداری کنونی مخزن تنها در ماه‌های پرآب توانایی تأمین نیازها را دارد، در صورتی که ماه‌های بحرانی مصرف، ماه‌های کم‌آب هستند. در ضمن دریافتند که در این سیاست روی سیلاب‌های احتمالی و سرریزهای شدیدی در تعدادی از ماه‌ها و سال‌های آماری مدیریتی اعمال نشده است. میزان ذخیره مخزن با استفاده از برنامه‌ریزی خطی را حدود ۱۷ درصد بیشتر از روش بهره‌برداری کنونی مخزن برآورد کردند. میانگین تأمین نیاز ماهانه با استفاده از روش‌های بهره‌برداری S و SQ به ترتیب حدود ۴۶/۲۳ و ۴۷/۶۳ درصد، به‌دست آوردند در صورتی که این مقدار در روش بهره‌برداری کنونی مخزن حدود ۳۸/۷ درصد بود [۱۱].

مواد و روش‌ها

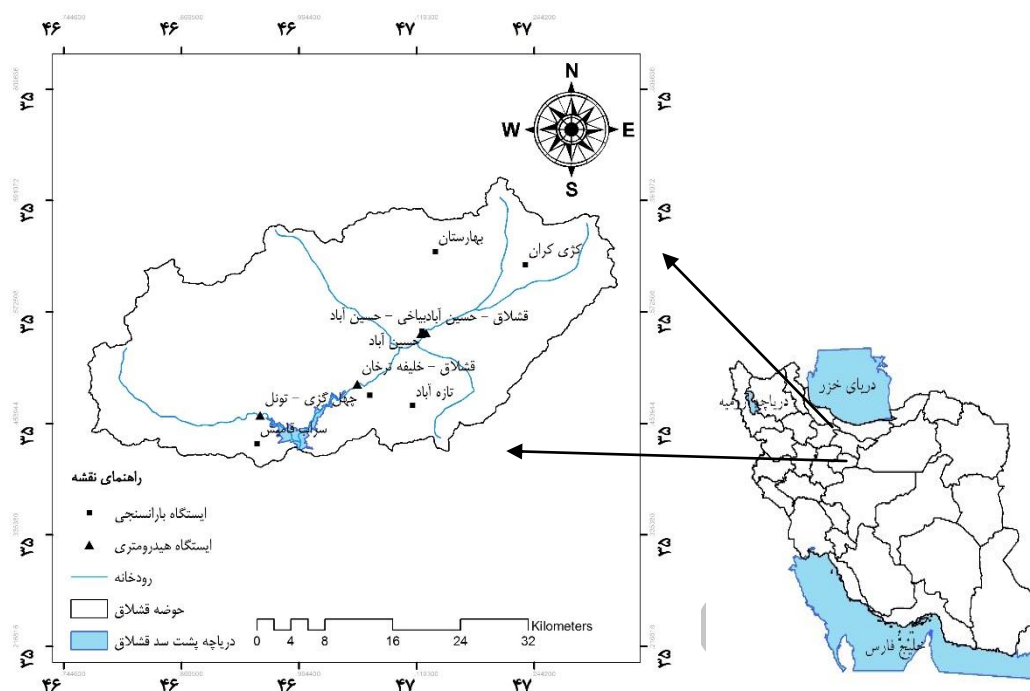
منطقه مطالعه شده

سد قشلاق در ۱۳ کیلومتری شمال شهر سنندج بر رودخانه قشلاق، با مختصات جغرافیایی حدود ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۰۰ دقیقه قرار دارد. مساحت حوضه آبریز قشلاق برابر ۹۵۶۱۷ هکتار و مساحت اراضی پایاب سد حدود ۲۲۲۰ هکتار است. میانگین دبی ورودی سالانه به مخزن ۱۳۶ میلیون مترمکعب است. ظرفیت مخزن سد ۲۱۶ میلیون مترمکعب و با حجم مفید ۱۸۶ میلیون مترمکعب با تراز حداکثر ۱۵۷۰ و تراز نرمال ۱۴۷۶ است. حجم مفید مخزن ۱۸۶ میلیون مترمکعب است [۱۲]. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز قشلاق در ایران و استان کردستان را نشان می‌دهد.

گرفتند و با استفاده از داده‌های ماهانه ثبت‌شده ۳۵ ساله مقادیر واقعی ورودی به مخزن را به‌دست آوردند و رابطه مساحت مخزن را با منحنی فرمان نیاز واقعی، ذخیره مخزن و برداشت را برای هر ماه تعیین کردند. همچنین این محققان کارکرد مدل برای تمام بهره‌بردارهای ممکن، مثل مجذور مجموع انحرافات از ذخیره و برداشت را ارزیابی کردند و سپس روش بهره‌برداری بهینه را به‌وسیله مدل بهینه برنامه‌ریزی خطی احتمالی در نرم‌افزار LINGO به‌دست آوردند که کارکرد بهینه مورد انتظار سیستم را فراهم می‌کند [۶]. احمدیان‌فر و ادیب (۲۰۱۰) بهینه‌سازی برداشت از مخزن سد دز را برای نیاز آبی پایین دست سد بررسی کردند. در این تحقیق از دو روش مطلوب دینامیک احتمالاتی و ژنتیک (SDP، GA) برای به حداقل رسانیدن شکست و به حداکثر رسانیدن توانایی بازگشت از مخزن به شرایط عادی استفاده شد. نتایج نشان می‌داد روش GA برای به‌حداقل رساندن تعداد شکست و حداکثر رساندن توانایی بازگشت مخزن به شرایط نرمال بهتر از روش SDP عمل می‌کند، اما روش SDP برای به‌حداقل رساندن عملکرد آسیب بهتر از GA است [۷]. احمد و همکارانش (۲۰۱۳) به بررسی مدل‌های بهینه‌سازی - شبیه‌سازی برای ارزیابی برداشت از مخزن تک‌منظوره دوکان در عراق پرداختند. آنها بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی را برای دو مدل برداشت کامل و برداشت با قابلیت اطمینان ۷۵ درصد انجام دادند و در نهایت مدل‌ها را با مدل شبیه‌سازی مقایسه کردند [۸].

آبش‌زاده اصل و همکارانش (۲۰۰۸) بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها برای مصارف کشاورزی را به روش LP برای سد علویان با استفاده از ورودی‌های ماهانه به مخزن انجام دادند. آنها تابع هدف مدل را به‌صورت ماکزیم کردن مقدار برداشت آب با توجه به محدودیت‌های مختلف تعریف کردند و دو حالت برداشت ثابت و برداشت ماهانه در طول دوره بحران خشکی را بررسی کردند و برای هر دو حالت ماکزیم برداشت بهینه محاسبه شد. نتایج نشان داد مقادیر برداشت ماکزیم در هر دو حالت پاسخ‌گوی نیاز ماهانه نیست و حجم فعال اولیه مخزن با توجه به مدیریت بهینه‌سازی به‌طور صحیح انتخاب نشده است، اما در حالت ماکزیم‌سازی برداشت ماهانه وضعیت

1. Stochastic Dynamic Programming
2. Genetic Algorithm



شکل ۱. موقعیت حوضه و ایستگاه‌ها در ایران و استان کردستان

میانگین بارش ماهانه (دبی ماهانه) ماه (i-1)ام و E_{ij} بارش (دبی) مؤثر ماه ام در سال زام هستند.

ج) کمبود ماهانه به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$MD_{ij} = E_{ij} - M_i \quad (4)$$

که در این رابطه E_{ij} و M_i همان تعاریف قبلی را دارند و MD_{ij} کمبود ماهانه بارش در ماه ام و در سال زام است. کمبود ماهانه متوسط (MMD_i) با توجه به MD_{ij} های حاصل شده برای هر ماه سال به دست می‌آید. برای محاسبه MMD_i مقادیر $MD_{ij} > 0$ که کمبود محسوب نمی‌شود صفر در نظر گرفته و در محاسبات وارد می‌شوند.

$$MMD_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N MD_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (E_{ij} - M_i) \quad (5)$$

د) کمبود متوسط سالانه (MAD) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$MAD = \sum_{i=1}^{12} MMD_i \quad (6)$$

و) دوره‌های خشکی نیز براساس مراحل یادشده در مقاله هربست (۱۹۶۶) تعیین شده است و به این ترتیب شدت نسبی خشکسالی، مدت خشکسالی و شاخص خشکی از طریق روابط زیر محاسبه شد:

روش تحقیق

گام نخست: مطالعه دوره‌های خشکی و تعیین دوره بحرانی

در این مطالعه از روش هربست^۱ (۱۹۹۶) برای تعیین دوره بحرانی استفاده شد که مراحل انجام آن به صورت زیر است: الف) وزن تأثیر هر ماه در ماه بعدی محاسبه می‌شود [۱].

$$W_i = 0.1 \left[1 + \frac{M_i}{\frac{1}{12} MAR} \right] \quad (1)$$

$$MAR = \sum_{i=1}^{12} M_i \quad (2)$$

که در این روابط MAR میانگین بارش سالانه، M_i بارش ماهانه و W_i فاکتور انتقال ماه ام هستند.

ب) بارش (یا دبی) مؤثر برای تمام ماه‌های سال از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E_{ij} = (R_{(i-1)j} - M_{(i-1)}) W_i + R_{ij} \quad (3)$$

در این رابطه R_{ij} و $R_{(i-1)j}$ به ترتیب بارش (یا دبی) ماه ام و (i-1) ام سال زام؛ W_i فاکتور انتقال ماه ام؛ $M_{(i-1)}$

1. Herbst

استفاده کردیم؛ بنابراین رابطه ذخیره- مساحت تقریباً معادله خطی زیر در نظر گرفته شده است.

$$a_t = g + h\bar{S}_t \quad (9)$$

پارامترهای g, h ضرایب رگرسیون هستند که مقادیر آن با توجه به معادله نمودار شکل ۲ برای سد مد نظر و \bar{S}_t حجم ذخیره متوسط در ماه t ام است. حجم تبخیر از سطح دریاچه طبق رابطه ۱۰ به صورت زیر خواهد بود:

$$EV_t = e_t \times a_t = e_t (g + h\bar{S}_t) \quad (10)$$

مدل بهینه‌سازی برای مخزن سد مد نظر به صورت زیر تعریف شده است.

$$\text{Max } Z = \quad (11)$$

$$\text{Sb: } \left\{ \begin{array}{l} S_{t+1} = S_t + I_t + R_t - EV_t - q \quad t = 1, 2, \dots, n \\ S_{t+1} \leq C \\ S_n \geq S_0 \\ S_n \geq 0 \\ q, S_t, S_{t+1}, R_t, I_t, EV_t \geq 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

که در معادلات بالا مقادیر به صورت زیر است:
 Z : تابع هدف مدل؛ S_{t+1} : ذخیره سد در ماه $t+1$ ام؛ S_0 :
 ذخیره سد در ماه t ام؛ R_t : بارندگی مستقیم به سطح دریاچه در ماه t ام؛ S_n : حجم در پایان دوره بحرانی در ماه n ام (نباید کمتر از حجم اولیه مخزن S_0 باشد)؛ I_t : دبی ورودی به دریاچه سد در ماه t ام؛ EV_t : تبخیر از سطح دریاچه در ماه t ام؛ q : مقدار برداشت بهینه مطمئن برای مصرف کشاورزی در هر ماه ثابت؛ C : ظرفیت مخزن (ظرفیت مخزن مد نظر ۲۱۶ همگی برحسب میلیون مترمکعب است)؛ S_0 : مقدار ذخیره اولیه.

یافته‌ها

تحليل دوره بحرانی

دوره‌های خشکسالی در طول دوره آماری از داده‌های ورودی به مخزن به روش هرست مشخص شد، اگرچه هرست و همکارانش (۱۹۹۶) روش را برای داده‌های بارش به کار بردند، دوره خشکی بحرانی به دست آمده از این روش با دوره خشکی بحرانی به دست آمده از نمودار رژیم ورودی ماهانه به مخزن سد، همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نیز مشخص است، تفاوتی وجود ندارد. طبق روش هرست کمبود و ذخیره ماهانه به دست آمده و در شکل‌های ۳ و ۴

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^D [(E_i - M_i) - \text{MMD}_i]}{\sum_{i=1}^D \text{MMD}_i} \quad (7)$$

$$I = Y \times D \quad (8)$$

که در این روابط D طول دوره خشکی برحسب ماه، Y میانگین ماهانه شدت نسبی خشکی (بدون بعد) و I شاخص خشکسالی هستند.

گام دوم: مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برای مخزن قشلاق

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP)

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی به طور گسترده برای اختصاص بهینه مقدار منابع مختلف در زمینه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. مدل‌های LP دو مشخصه اساسی دارند: ۱. تابع هدف که یک تابع خطی از متغیرهای تصمیم هستند. ۲. توابع محدودیت‌ها که باز هم توابعی خطی از متغیرهای تصمیم هستند. فرم ریاضی مدل‌های LP در حالت کلی به ترتیب زیر است [۱۳].

$$\text{max(or min)} \quad X = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad \text{تابع هدف}$$

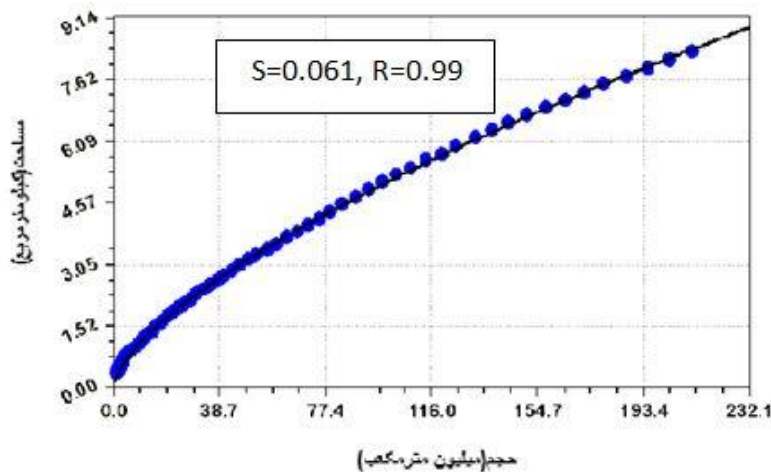
: توابع محدودیت آن

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$X_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

اگر مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برمبنای حداکثر کردن دبی برداشتی (q) برای مخزنی به ظرفیت معین C در نظر گرفته شود، به q برداشت مطمئن اطلاق می‌شود، زیرا قادر به تأمین آب در طول بدترین خشکی ثبت شده خواهد بود و یا دبی پررود بحرانی نیز به آن گفته می‌شود.

در محاسبه بیشترین برداشت مطمئن از مخزن سد یکی از پارامترهای ورودی مقادیر تبخیر است. بنابراین، در این مطالعه ابتدا عمق تبخیر با استفاده از تشتک تبخیر تعیین و سپس حجم تلفات تبخیر از رابطه ۱۰ محاسبه شد که تابعی از مساحت و حجم ذخیره مخزن است. مساحت دریاچه مخزن از طریق نمودار A-H (مساحت-ارتفاع) و S-H (ذخیره-ارتفاع) به ازای هر ذخیره قابل تعیین است. با توجه به اینکه در این مطالعه برای محاسبه بیشترین برداشت مطمئن از مخزن از برنامه‌ریزی خطی



شکل ۲. منحنی حجم-مساحت (A-S) سد قشلاق

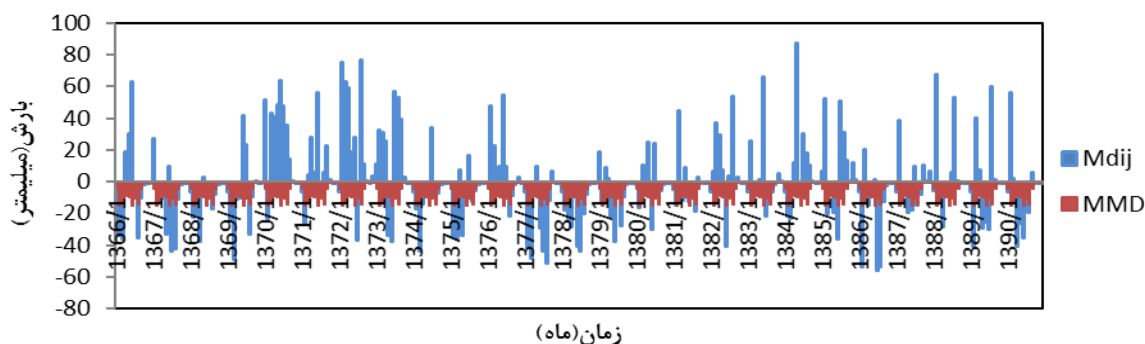
شد. برای بررسی سرعت برگشت‌پذیری و پوشاندن سریع شکست‌ها در دوره‌های بحرانی کوتاه‌مدت، براساس رابطه ۱۳ که توسط هارست (۱۹۵۱) تعریف شده مقدار m برای برداشت 0.75 از میانگین جریان سالانه برابر 0.4 محاسبه شد، بنابراین به دلیل اینکه m کوچک‌تر از یک بوده سیستم ذخیره سد قشلاق باید برون‌سالی باشد.

$$m = \frac{(1-D)\bar{x}}{\delta} \quad (13)$$

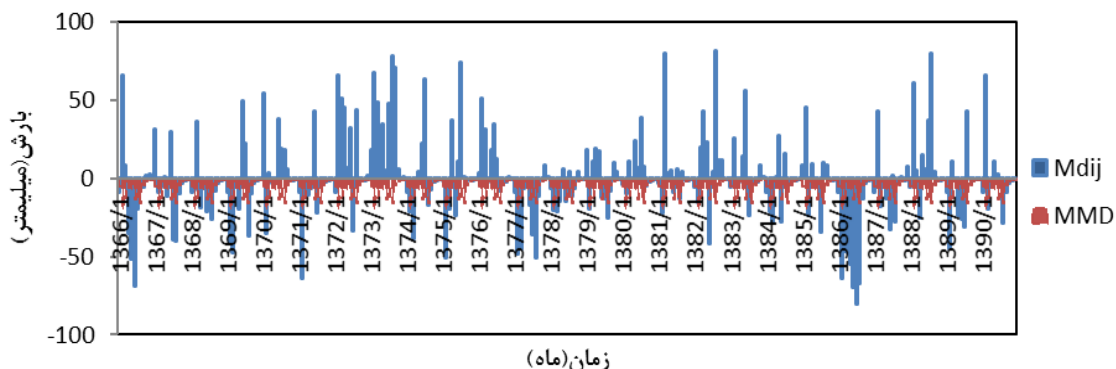
\bar{x} : میانگین جریان سالانه ورودی به مخزن؛ D : دبی برداشتی از مخزن برحسب کسری از میانگین جریان سالانه ورودی به مخزن؛ δ : انحراف معیار جریانات سالانه ورودی به مخزن.

نمایان است؛ همچنین شاخص‌های شدت و مدت خشکی‌ها طبق روابطی که هریست و همکارانش در سال ۱۹۶۶ بیان کردند، محاسبه شد و مقادیر آنها در جدول ۱ آورده شده است. با استفاده از مقادیر کمبود و ذخیره ماهانه استخراج‌شده از روش هریست $34/94$ درصد احتمال ترسالی که بیشترین ترسالی‌ها در دوره ۱۳۶۶-۱۳۶۷ و همچنین دوره ۱۳۷۱-۱۳۷۴، $65/06$ درصد احتمال خشکسالی و بیشترین شدت خشکسالی در دوره‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۱ و ۱۳۸۷-۱۳۹۰ رخ داده‌اند. دوره بحرانی فاصله زمانی‌ای که یک مخزن ذخیره از حالت پر به حالت خالی می‌رسد و بیانگر یک سری جریان‌های بسیار کم در بین داده‌های ثبت‌شده است [۱۴]. با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ بحرانی‌ترین پریود برای این تحقیق ۵۱ ماهه طی سال‌های آماری ۱۳۷۶-۱۳۸۱ در نظر گرفته

الف) ایستگاه خلیفه‌ترخان



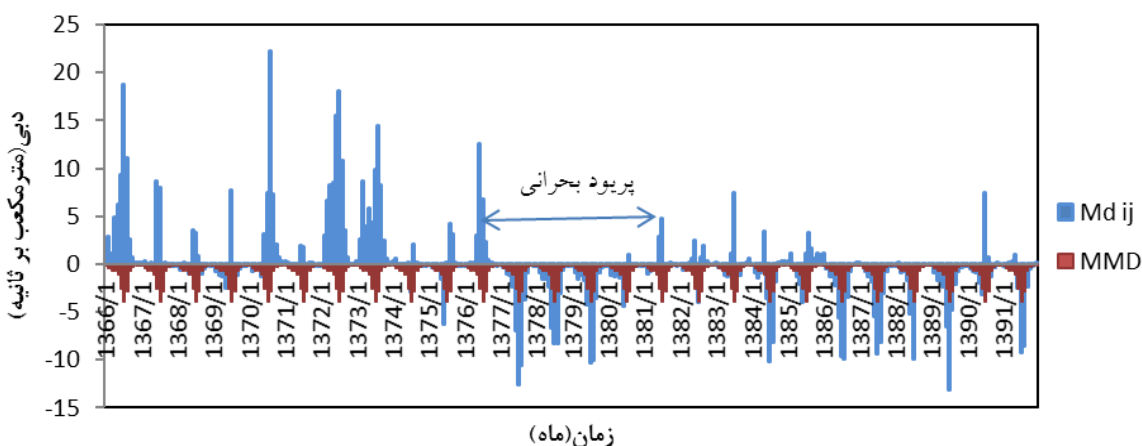
(ب) ايستگاه سراب قاميش



شکل ۳. شکل های الف و ب کمبود بارش ماهانه طی دوره آماری ۱۳۶۶-۱۳۹۱ به روش هریست

جدول ۱. مقادير پارامترهای خشکی طی دوره آماری ۱۳۶۶-۱۳۹۱ به روش هریست

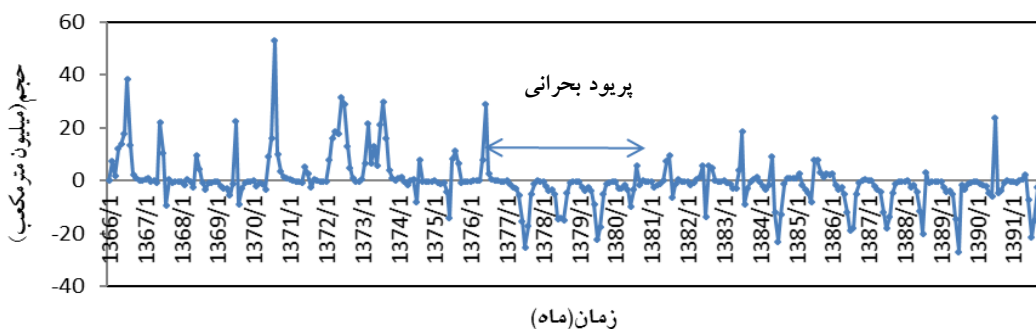
ايستگاه خليفه ترخان			
تاریخ رویداد	شدت خشکی (Y) بی بعد	طول دوره خشکی (D) ماه	شاخص خشکی (I) بی بعد
۱۳۶۷/۷ - ۱۳۷۰/۱	۰/۰۹	۳۱	۲/۷۱
۱۳۷۶/۱۲ - ۱۳۸۱/۲	۰/۲۹	۵۱	۱۴/۶۵
۱۳۸۵/۳ - ۱۳۸۵/۶	۰/۷	۴	۲/۸۱
۱۳۸۶/۴ - ۱۳۸۷/۹	۰/۰۸	۱۷	۱/۳۳
۱۳۸۹/۵ - ۱۳۸۹/۷	۱/۳۵	۳	۴/۰۵
۱۳۹۰/۴ - ۱۳۹۰/۹	۰/۹۵	۶	۵/۶۹
۱۳۷۳/۵ - ۱۳۷۳/۶	۱/۸۷	۲	۳/۷۴
ايستگاه سراب قاميش			
۱۳۶۶/۴ - ۱۳۶۹/۱۲	۰/۱۲	۴۵	۵/۲۱
۱۳۷۶/۱۲ - ۱۳۷۹/۲	۰/۳۲	۲۷	۸/۶۲
۱۳۸۵/۱۰ - ۱۳۸۷/۹	۱/۵۶	۲۴	۳۷/۴۴



شکل ۴. نمودار کمبود و ذخیره دبی ماهانه ورودی به مخزن به روش هریست

جدول ۲. مقادیر پارامترهای خشکی به روش هر بست برای دبی ورودی

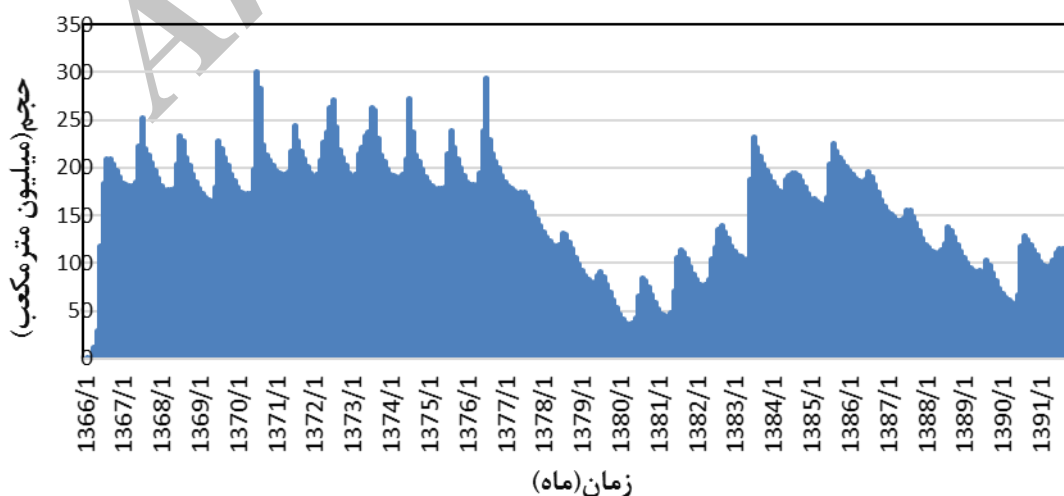
دوره آماری (سال)	دوره خشکی (ماه)	شدت خشکی (Y)	شاخص خشکی (II)
۱۳۸۱/۵ - ۱۳۷۶/۱۱	۵۵	۱/۱۸	۶۴/۸۳
۱۳۸۴/۹ - ۱۳۸۴/۶	۴	۰/۵۹	۲/۳۶
۱۳۹۰/۶ - ۱۳۸۶/۲	۵۳	۱/۱۹	۶۲/۹
۱۳۹۱/۱۱ - ۱۳۹۱/۶	۶	۱/۲۳	۷/۴

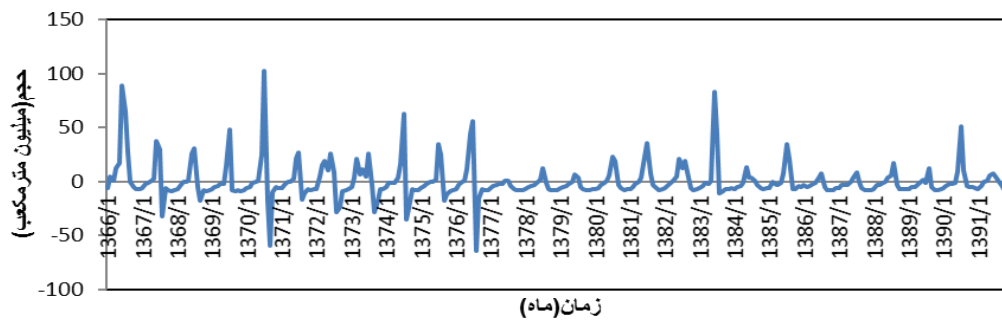


شکل ۵. نمودار رژیم جریان ورودی به مخزن مطالعه شده

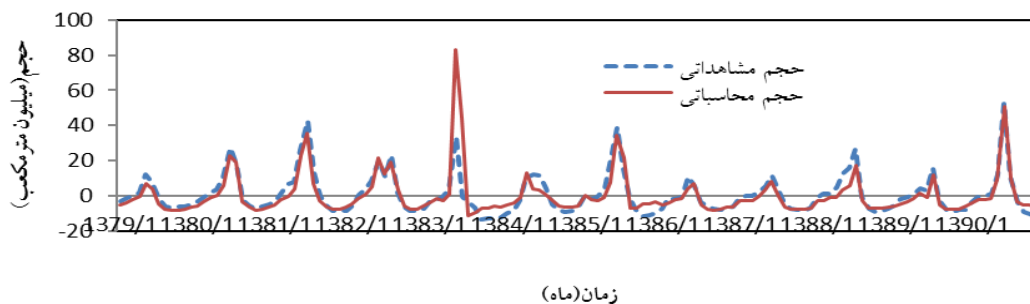
بهینه‌سازی سد قشلاق از نظر اطمینان برای پاسخ‌گویی به مقدار کمبود، این پریود به‌عنوان پریود بحرانی و مطالعه‌شده بهینه‌سازی انتخاب شد. شکل‌های ۷ و ۸ اسپل‌های کمبود و ذخیره مخزن را نشان می‌دهد و مقادیری که منفی است کمبودها و مقادیر مثبت مقادیر ذخیره را نشان می‌دهند که بیشترین کمبود بین سال‌های آماری ۱۳۷۶ و ۱۳۷۷ رخ داده و مقدار اسپل‌های ذخیره از سال ۱۳۷۷ کاهش یافته است. همچنین با مقایسه‌ای که بین دو حجم ذخیره‌شده از بهینه‌سازی و حجم ذخیره موجود آنها با ضریب همبستگی ۰/۸۴ مطابقت داشته‌اند.

مقایسه برداشت بهینه با مصرف پتانسیل پایین دست سد با استفاده از رابطه ۱۱ و داده‌های ثبت‌شده، با برداشت ثابت، حجم ذخیره مخزن سد در هر ماه محاسبه شد. در شکل ۶ مقدار حجم ذخیره (S_{t+1}) آورده شده است. فرض اینکه حجم کل مخزن ۲۱۶ میلیون مترمکعب است و بیش از این مقدار به صورت سرریز از سد خارج می‌شود، مقادیر ذخیره سد محاسبه شده است. داخل پریود آماری تحت مطالعه (کل پریود آماری ۳۱۲ ماه است)، پریود خشکی ۵۱ ماهه با کمبودی معادل ۲۳۷۱۰۵۴۹۷ مترمکعب مشاهده شد که مقدار شایان توجهی است. پس برای

شکل ۶. حجم ذخیره مخزن سد (S_{t+1}) در ماه‌های مختلف سال (میلیون مترمکعب)



شکل ۷. نمودار اسپل‌های کمبود و ذخیره ماهانه مخزن مطالعه‌شده



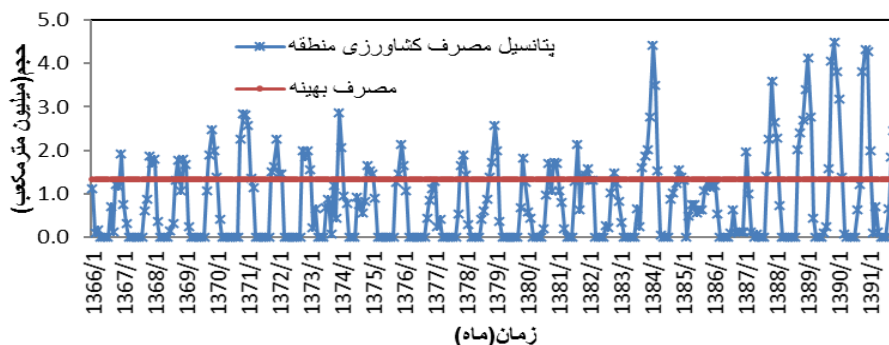
شکل ۸. مقایسه اسپل‌های کمبود و ذخیره حجم‌های مشاهداتی و محاسباتی از بهینه

حجمی بیشتر از کد ارتفاع سرریز که به سرریز از سد منجر شده بودند با مقادیر رخ داده مقایسه شدند. با توجه به نمودار احتمال رخ داده‌های سرریز در شکل ۱۰ ماهی که بیشترین احتمال وقوع سرریز وجود دارد، اردیبهشت‌ماه است. با برآزش توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال دوپارامتری، لوگ نرمال سه‌پارامتری، پیرسون، لوگ پیرسون سه‌پارامتری و گامبل، بهترین توزیع برآزش داده‌شده روی داده‌های سرریز با کمترین خطای بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی توزیع لوگ نرمال (III) به‌دست آمده که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

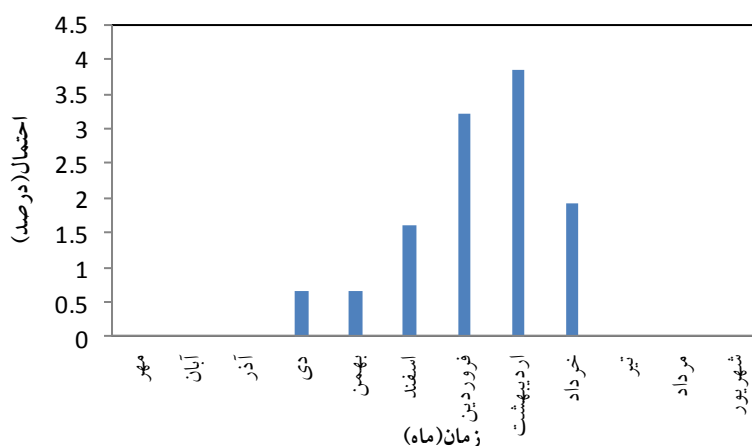
شکل ۹ نتیجه بهینه‌سازی برای کل دوره بحرانی را نشان می‌دهد که مقدار بیشترین برداشت ثابت بهینه ۱/۳۳۴ میلیون مترمکعب در هر ماه است. بنابراین، با توجه به شکل ۹ و مقایسه مقدار تقاضای موجود در سال‌های بحرانی و مقدار بیشترین برداشت ثابت بهینه در همه ماه‌ها مشخص شد. در این حالت که مدل به‌صورت کلی بهینه‌سازی را انجام می‌دهد، مقدار آب تقاضاشده، در ماه‌های بحرانی (تیر، مرداد و شهریور) تأمین نشده است و فقط قادر است ۶۰ درصد نیاز تقاضاشده را تأمین کند.

تحلیل مقادیر سرریز و حجم‌های ماندگار

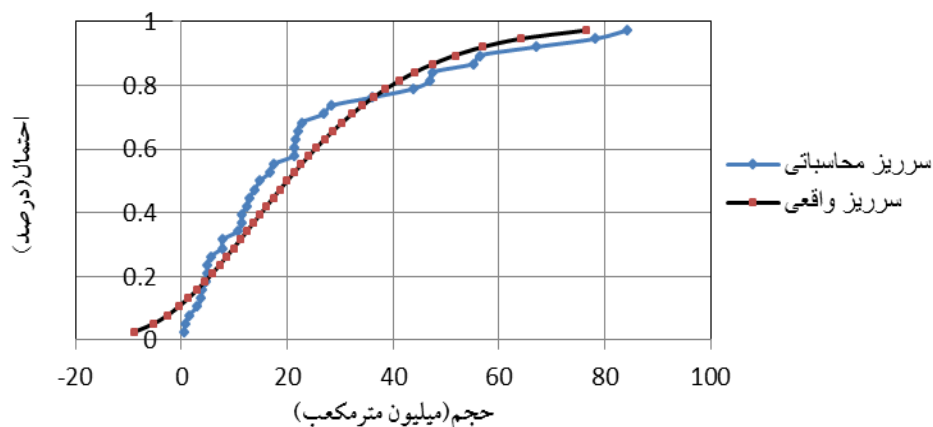
همان طور که از نمودار شکل ۶ مشخص است، مقادیر



شکل ۹. مقایسه برداشت بهینه و میزان تقاضا برای مصرف کشاورزی منطقه



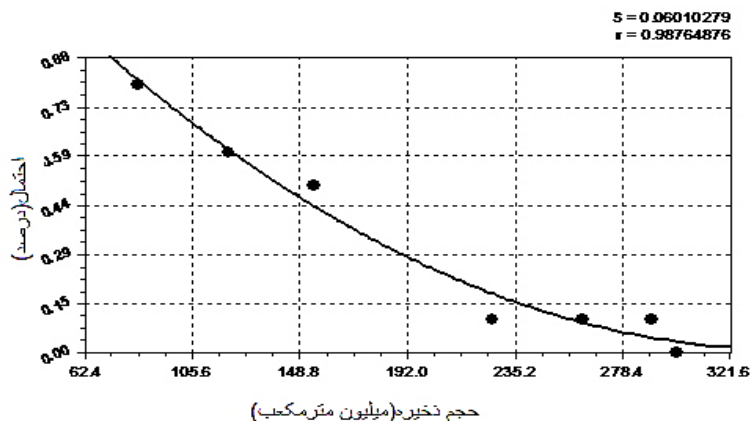
شکل ۱۰. هیستوگرام احتمال سرریزهای رخ داده از برداشت ثابت طی دوره آماری (۱۳۶۶-۱۳۹۱)



شکل ۱۱. نمودار توزیع گامبل برازش داده شده روی داده های سرریز

ضریب همبستگی داده ها؛ s خطای استاندارد داده ها؛ و a و b و c ضرایب ثابت مختص به رابطه است. احتمال اینکه حجم مخزن کمتر از ۳۰ میلیون مترمکعب نباشد ۱۰۰ درصد است یعنی در همه ماه ها این حجم تأمین است، احتمال $1/2$ حجم مخزن ۶۳ درصد، $3/4$ حجم مخزن ۵۳ درصد و احتمال ماندگاری برای حالت پر بودن مخزن $0/3$ درصد است یعنی ۱۰ ماه این حجم تأمین و همچنین احتمال سرریز شدن مخزن $0/1$ درصد است.

به دلیل اینکه حجم های ذخیره در هر ماه برای ماه بعد که به عنوان حجم های ماندگار شناخته شده اند و اساسی برای برنامه ریزی مصرف هستند، در این مطالعه احتمال زمان ماندگاری حجم ذخیره محاسبه و با استفاده از نرم افزار Curve expert منحنی احتمال حجم های ماندگار مخزن ذخیره قشلاق فرموله شد که با مدل ریاضی فرمول Quadratic همبستگی زیادی داشت و جدول ۳ رابطه و نیز شکل ۱۱ تابع برازش داده شده را نشان می دهند که y حجم های ذخیره ماندگار (میلیون مترمکعب)؛ x احتمال، r



شکل ۱۲. مدل برازش داده شده روی حجم‌های ذخیره ماندگار و مقادیر احتمال

جدول ۳. رابطه منحنی حجم‌های ماندگار و مقدار احتمال آنها

مقدار S	مقدار r^2	مقدار c	مقدار b	مقدار a	رابطه
۰/۰۶	۰/۹۸	۰/۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۸۱۷۴۴۰۱۷	۱/۴۱۸۱۴۲۴	$y=a+bx+cx^2$

نتیجه‌گیری

زراعی دیم و کاهش سطح زیر کشت مصرف پتانسیل را با مقدار بیشترین برداشت ثابت ماهانه مطابقت داد. - با توجه به اینکه در مدل با فرض تأمین ۱۰۰ درصد برداشت شرب و به صورت ثابت برای همه ماه‌ها در نظر گرفته شده است، برای ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند که مصرف کشاورزی در منطقه وجود ندارد و مصرف شرب در این ماه‌ها ۳ میلیون مترمکعب و کمتر است می‌توان برای مصرف صنعت از آن استفاده کرد. - چون ۵۰ درصد از ماه‌ها در حجم ذخیره با توجه به برداشت بهینه بین ۱۳۸-۱۷۲ میلیون مترمکعب قرار دارد، می‌توان میزان مصارف کلی برای شرب، کشاورزی و صنعت با مقدار برداشت به دست آمده از بهینه‌سازی مخزن ذخیره قشلاق که مقدار ۵/۳۳۴ میلیون مترمکعب به دست آمد مطابقت داده تا مخزن برای دوره‌های خشکی طولانی مدت جواب‌گو باشد.

منابع

- [1]. Herbst P H Bredencamp D B and Baker HMG. A technique for the evaluation of drought from rainfall data. Journal of Hydrology. 1966; 4: 264-272.
- [2]. Mohan S, Rangacharya NC. A modified method for drought identification. Hydrological Sciences Journal. 1991; 36(1):11-21.

مخزن سد قشلاق با توجه به حجم موجود و حجم به دست آمده از بهینه‌سازی جواب‌گوی کامل ارزیابی پایاب با سیستم آبیاری فعلی نیست. بنابراین، لازم است در مصارف پایین دست تغییراتی برای سازگاری با حجم موجود به‌زای برداشت بهینه داده شود. چنین کاری در خصوص سدهای دیگر کشور که بیشتر برمبنای مصارف پایین دست طراحی شده‌اند، ولی به مرور زمان شبکه پایین دست بدون توجه به ظرفیت سد گسترش یافته، و حالت بهینه مصرف یا حجم بهینه را از دست داده می‌توان انجام پذیرد تا اعداد بهینه بتوانند جایگاه خود را در تصمیم‌های مدیریتی پیدا کنند. ترسیم منحنی فرمان ماهانه روی سدها که معمولاً انجام نمی‌پذیرد از نظر مدیریت مصرف بسیار مهم است؛ زیرا این منحنی مبنای برنامه‌ریزی از نظر مصرف به‌زای حجم‌های ماندگاری طولانی مدت سد است. ریسک‌پذیری مصرف به‌زای زمان‌های ماند کوتاه کاملاً به‌شکلی در منحنی مستتر است. بنابراین، با توجه به مطالب گفته شده می‌توان پیشنهاد کرد:

- برای تأمین نیازهای کشاورزی در اراضی پایاب سد با توجه به سیستم سنتی آنها می‌توان از سیستم‌های آبیاری نوین قطره‌ای، بارانی و... استفاده کرد که به افزایش راندمان آبیاری و کاهش میزان مصرف آب در باغ‌ها منجر شود و نیز با توجه به الگوی کشت منطقه که بیشتر محصولات زراعی آن آبی است، می‌توان از محصولات

- [3]. Nishikawa T. Water resource optimization model for Santa Barbara, California. *Journal Water Resources Planning and Management*. 1998; 124(5): 252-263.
- [4]. Duranyildiz I, Onoz B, Bayazit M. A Chance-Constrained LP Model for Short Term Reservoir Operation Optimization, *Journal Engineering Environment*. 1999; 24(2000):247-254.
- [5]. Nagash kumar D, Prasad D S V, Srinivasa Raju k. Optimal Reservoir Operation Using Fuzzy Approach, *Fuzzy Sets and Systems*. 2002; 105:365-372.
- [6]. Baliarsingh F, Kumar DN. Stochastic Linear Programming for Optimal Reservoir Operation: A Case Study. In *Proc. of International Conference on Large Scale Water Resources Development in Developing Countries: New Dimensions of Prospects and Problems*, Kathmandu, Nepal; 1997.
- [7]. Ahmadianfar E, Adib, A. Optimization of reservoir using probabilistic Dynamic programming and Genetic algorithm, 2th Conference on integrated water resources management, 2010; 9 and 10 February, Kerman[Persian].
- [8]. Ahmad, Ghassan L, Srivastava D.K, Rani D. Optimization- simulation models for yield assessment of a single reservoir system, *Journal of Water Resources Society*. 2013; 33(4): 9-16.
- [9]. Abshzadeh asl M, Fakherifard A, Hosainzadeh dalir H, Mirnia M.K, Farsadizadeh D. Optimizing the operation of dams and reservoirs for agricultural purposes (Case Study: Dam Alawi). *mjlh Agricultural Research*. 2008; 8(1): 193-183[Persian].
- [10]. Pattewar, Deepak v, Sharma, Kalpeshkumar M., Dahe, P.D. Yield Estimation for a Single Purpose Multi-Reservoir System Using LP Based Yield Model, *Journal of Water Resources and Protection*. 2013; 5: 28-34.
- [11]. Najafi M.R, Hashempoor J, Khayatkholfi M. Optimal operation of reservoirs using linear programming model and its application in Voshmgir dam. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 2005; 12(5): 27-35 [In Persian].
- [12]. Ministry of Energy West Regional Water Authority. A summary of the technical specifications for winter storage dam and related facilities, the second Seminar of the Regional Water Authority CEO and November; 1983[Persian].
- [13]. Dorfman R. *Mathematical models: The Multistrukture approach*. Harvard University, Cambridge; 1962.
- [14]. Loucks D, Jery R, Stedinger H, Haith D.A. *Water resource system planning and analysis*, Prentice-Hall, Inc, England Englewood cliffs, W.J; 1981.
- [15]. Hurst H E. Long-term storage capacities of reservoirs *Trans. AM Engineering*. 1951; 116:770-799.