

مدل‌های بهینه‌سازی برداشت مطمئن از مخزن سد قشلاق برمبنای شرایط عدم قطعیت هیدرولوژیکی

مه‌ری کاکی^۱، فرخ اسدزاده^۲، احمد فاخری‌فرد^{۳*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

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

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۱/۱۷)

چکیده

برای نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت در بیشتر شهرهای ایران از مخازن سدهای در حال بهره‌برداری استفاده می‌شود که به دلیل فقدان قانون بهره‌برداری مناسب و یا متوازن نبودن میزان تقاضا و حجم مخزن، استفاده مؤثر از آب ذخیره‌شده در مخازن صورت نمی‌گیرد. جریان‌های آب طبیعی از پدیده‌های تصادفی است و تصمیم‌گیری در رابطه با ذخیره و مصرف آن‌ها باید در فرایندهای چندمرحله‌ای و با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر افزایش راندمان مصرف، تحلیل شوند. در این پژوهش میزان ذخیره‌سازی و همچنین بیشینه برداشت مطمئن از سد قشلاق واقع در استان کردستان با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و پویا و برای دوره کوتاه یک‌ساله تعیین شد. این مدل‌ها با هدف بهینه‌سازی عملکرد ماهانه سد قشلاق که تأمین‌کننده آب شرب شهر سنندج است، اجرا شدند. نتایج نشان داد که توزیع لاگ‌نرمال دویپارامتری با کمترین خطا می‌تواند توزیع مقادیر جریان‌های ماهانه ورودی به مخزن را توصیف کند که براساس این مدل مقادیر جریان‌های ورودی به مخزن با احتمال وقوع ۹۵، ۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۵۰ درصد در هر ماه محاسبه شد. دوره‌های خشک‌سالی به‌دست‌آمده از داده‌های بارش و نیز داده‌های جریان ورودی به سد با یکدیگر مطابقت داشت و دوره بحرانی ۵۱ ماهه خشک‌سالی برای مدل‌سازی انتخاب شد. نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی بیشینه برداشت و همچنین ذخیره مخزن نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی در مقایسه با برنامه‌ریزی پویا تطابق بیشتری با واقعیت دارد.

کلیدواژه‌گان: برداشت بهینه، برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا، عملکرد مخزن.

مقدمه

با اینکه منابع آب در سطح جهانی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شوند، به‌دلیل استفاده مداوم و فزاینده از منابع آب شیرین مدیریت دقیق و علمی برای حفظ آنها از چالش‌های اساسی زیست‌بوم‌های طبیعی محسوب می‌شود. در طول دهه‌های اخیر افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای تأمین آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از یک سو و بروز خشک‌سالی‌های با شدت‌های مختلف از سوی دیگر، مدیریت سیستم‌های تأمین آب را تحت تأثیر قرار داده است. بر این اساس در طول سه دهه اخیر بهینه‌سازی استفاده از مخازن سدهای تأمین‌کننده آب با استفاده از مدل‌های ریاضی بسیار مورد توجه بوده است. اساس روش‌های بهینه‌سازی یادشده، تعیین مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم برای به حداکثر و یا به حداقل رساندن موضوع تابع هدف تحت شرایط مجموعه‌ای از محدودیت‌های تعریف‌شده است. حجم مخزن سدها از محدودیت‌های اصلی در برنامه‌ریزی‌های مربوط به استفاده از آنهاست. اگرچه برنامه‌ریزی پویا^۱ (DP) روشی کارآمد و راحت برای اجرای روش‌های بهینه‌سازی محسوب می‌شود، نیاز به توسعه مدل‌های متفاوت برای سیستم‌های مختلف از مهم‌ترین محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. در مقابل، روش برنامه‌ریزی خطی^۲ (LP) به‌عنوان روشی آسان و سریع برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی محسوب می‌شود. با این حال، ذکر این نکته ضروری است که مهم‌ترین مسئله برای استفاده از این روش‌ها شرایط خطی از هر دو تابع هدف و محدودیت و همچنین افزایش تعداد محدودیت در هر مرحله است. به [۱] روش LP را برای تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت و DP را برای تصمیم‌گیری‌های بلندمدت استفاده کرده است. بر مبنای توضیحات ارائه‌شده استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مطلوب و کاربرد آنها در مدیریت مصرف آب مخازن سدها به‌ویژه در مناطق مواجهه با بحران‌های خشک‌سالی امری اجتناب‌ناپذیر است.

پیشینه تحقیق

درباره پدیده خشک‌سالی، هربست و همکارانش [۲] روشی را برای بررسی شدت، مدت و شاخص خشک‌سالی از روی

داده‌های بارش پیشنهاد کردند که این روش بعدها توسط موهان و رانگاچاریا [۳] برای استفاده در مناطق خشک بازمبانی و اصلاح شد. دورفمن [۴] برای نخستین بار برنامه‌ریزی خطی را برای حل مسائل مربوط به بهینه‌سازی مخازن سدها استفاده کرد. بعدها به [۱] روش‌های مختلفی نظیر مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی دینامیکی را برای مسائل مربوط به مخازن سدها اجرا کرد. اما در عمل برنامه‌ریزی خطی به‌دلیل قابلیت فهم آسان کاربرد بیشتری در زمینه مسائل مربوط به بهینه‌سازی مخزن پیدا کرده است. بالیارسینگ و کومار [۵]، برنامه‌ریزی خطی احتمالی^۳ (SLP) را برای پیدا کردن یک روش بهره‌برداری مناسب و بهینه برای مخزن سدی در هندوستان به کار بردند. این پژوهشگران روش بهره‌برداری را به صورت ماهانه در نظر گرفتند و با استفاده از داده‌های ماهانه ثبت‌شده ۳۵ ساله مقادیر واقعی ورودی به مخزن را به دست آوردند و رابطه مساحت مخزن را با منحنی فرمان نیاز واقعی، ذخیره مخزن و برداشت را برای هر ماه تعیین کردند. این محققان همچنین کارکرد مدل، برای تمام بهره‌برداری‌های 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 که کارکرد بهینه مورد انتظار سیستم را فراهم می‌کند، به دست آوردند. کومار و ردی [۶] از الگوریتم کلونی مورچگان^۴ (ACO) برای بهره‌برداری چندمنظوره از سد هیراکود در هندوستان استفاده کردند. آنها مدل را با اهداف چندگانه شامل به حداقل رساندن خطرهای سیل و کمبود آب آبیاری و بیشینه کردن تولید برق با دو روش بهره‌برداری ماهانه کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت با الگوریتم مورچگان توسعه دادند. سپس به منظور بررسی عملکرد مدل الگوریتم مورچگان، از الگوریتم ژنتیک^۵ (GA) استفاده کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که الگوریتم ACO از نظر تولید سالانه برق عملکرد بهتری دارد، ولی در مقابل الگوریتم ژنتیک برای به حداقل رسیدن کمبود آب آبیاری و کنترل سیل نتایج مطلوب‌تر ارائه کرده است. بر این مبنای آنها

3. Stochastic linear programming (SLP)

4. Ant colony optimization algorithms

5. Genetic Algorithm

1. Dynamic programming (DP)

2. Linear programming (LP)

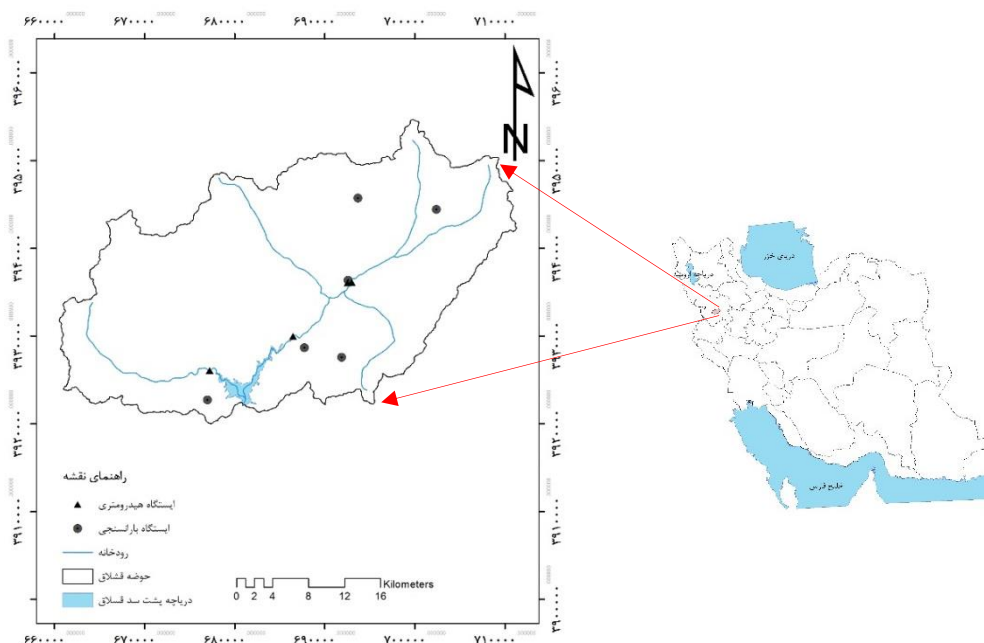
هدف بررسی میزان ذخیره‌سازی و برداشت مطمئن از مخزن سد قشلاق برای جریان‌های ورودی در سطوح احتمال مختلف و دوره بحرانی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مقید به شانس انجام شد و طی آن تلاش شد مقدار بهینه برداشت در شرایط برنامه‌ریزی LP با مقدار برداشت حاصل از برنامه‌ریزی پویا (DP) مقایسه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

سد قشلاق در ۱۳ کیلومتری شمال شهر سنندج روی رودخانه قشلاق احداث شده است و از نظر جغرافیایی در موقعیت $31^{\circ}25'35''$ عرض شمالی و $38^{\circ}56'46''$ طول شرقی قرار دارد. مساحت حوضه مختص به سد حدود ۹۵۷ کیلومترمربع است و اراضی پایاب سد نیز مساحتی بالغ بر ۲۲ کیلومترمربع دارند. میانگین دبی ورودی سالانه به مخزن سد حدود ۱۳۶ میلیون مترمکعب است. ظرفیت مخزن سد ۲۱۶ میلیون مترمکعب و با حجم مفید ۱۸۶ میلیون مترمکعب است که تراز بیشینه آن ۱۵۷۰ و تراز معمول نیز ۱۴۷۶ متر است. در شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز سد قشلاق در استان کردستان نمایش داده شده است.

دریافتند که برای بهره‌برداری طولانی‌مدت، الگوریتم ACO در مقایسه با الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری در پی دارد. برومندنسب و همکارانش [۷] به بررسی برداشت بهینه از مخزن سد جاره برای مصارف کشاورزی پرداختند. در پژوهش آنها مدل‌های ریاضی برای مدیریت و بهینه‌سازی برداشت و ذخیره حجم سد جاره استفاده شد. به‌منظور به حداقل رساندن تفاوت بین خروجی و تقاضا، بهینه‌سازی غیرخطی را با کمک برنامه‌متلب و الگوریتم ژنتیک انجام دادند. همچنین مقدار مصرفی آب برای محصولات کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی منطقه به‌صورت ماهانه و با استفاده از روش پنمن مانیتث محاسبه شد. نتایج این پژوهشگران نشان داد که مقدار برداشت ماهانه از مخزن برای ورودی‌های با احتمال‌های مختلف با مقدار مصرف ماهانه شبکه آبیاری و زهکشی مطابقت ندارد. پات‌توار و همکارانش [۸]، 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 با هدف برداشت مطمئن برای مصرف آبیاری توسعه دادند. نتایج نشان داد که مدل برنامه‌ریزی خطی نسبت به سایر روش‌های دیگر شبیه‌سازی، کارایی و دقت بیشتری دارد. با توجه به اهمیت روش‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی‌های مصرف آب، این پژوهش با



شکل ۱. موقعیت حوضه و مخزن سد قشلاق در استان کردستان

نسبی خشک‌سالی، مدت خشک‌سالی و شاخص خشکی از طریق روابط زیر محاسبه شد:

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

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

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

توزیع جریان ورودی به مخزن

مخزن سد قشلاق استفاده‌های چندمنظوره دارد و جریان ورودی به آن صرف تأمین نیازهای شرب شهر سنندج، آبیاری اراضی پایاب سد و نیروگاه برق‌آبی می‌شود. داده جریان ورودی ماهانه به سیستم برای دوره آماری ۲۶ ساله (۱۳۶۶-۱۳۹۱) در دسترس بود که توزیع‌های مختلف آماری شامل توزیع‌های نرمال، لاگ‌نرمال دو و سه پارامتری، توزیع پیرسون و لاگ‌پیرسون روی داده‌های جریان ماهانه بررسی شده و مناسب‌ترین توزیع برای محاسبه جریان‌های با احتمال وقوع مختلف برگزیده شد.

مدل برنامه‌ریزی خطی مقید به شانس

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP) به‌طور گسترده برای اختصاص مقادیر بهینه منابع مختلف در زمینه‌های بسیار متنوعی از علوم مهندسی به‌کار گرفته شده‌اند. مدل‌های LP دو مشخصه اساسی دارند: ۱. تابع هدف که یک تابع خطی از متغیرهای تصمیم است. ۲. توابع محدودیت‌ها که باز هم توابعی خطی از متغیرهای تصمیم هستند. شکل ریاضی مدل‌های LP در حالت کلی به‌ترتیب زیر است [۴] که در آن هدف (معادله ۹) و محدودیت‌ها (معادلات ۱۰ و ۱۱) توابعی خطی از متغیرهای تصمیم‌گیری (X_j) هستند [۹].

$$\text{Max (or Min)} X = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$X_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

اگر مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برمبنای بیشینه‌کردن دبی برداشتی برای مخزنی به‌ظرفیت معین استفاده شود،

مطالعه دوره‌های خشکی و تعیین دوره بحرانی

در این مطالعه از روش هرست [۲] برای تعیین دوره بحرانی استفاده شد که مراحل انجام آن به‌صورت زیر است: الف) وزن تأثیر هر ماه در ماه بعدی محاسبه می‌شود.

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

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

که در این روابط MAR میانگین بارش سالانه، M_i بارش ماهانه و W_i فاکتور انتقال ماه نام 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 $R_{(i-1)j}$ به‌ترتیب بارش (یا دبی) ماه i و $(i-1)$ ام سال زام؛ W_i فاکتور انتقال ماه نام؛ $M_{(i-1)}$ میانگین بارش ماهانه (دبی ماهانه) ماه $(i-1)$ ام و E_{ij} بارش (دبی) مؤثر ماه نام در سال زام هستند. ج) کمبود ماهانه به‌ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

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

که در این رابطه M_i و E_{ij} همان تعاریف قبلی را دارد و MD_{ij} کمبود ماهانه بارش در ماه نام و در سال زام است. کمبود ماهانه متوسط (MMD_i) با توجه به MD های به‌دست‌آمده برای هر ماه سال به‌دست 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 به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

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

و) دوره‌های خشکی نیز براساس مراحل یادشده در مقاله هرست (۱۹۶۶) تعیین شد و به این ترتیب شدت

می‌تواند بر اساس اختلاف بین مقدار هدف (T) و مقدار هاشده آب (R_t) بیان شود.

$$D_t = T - R_t, R_t \leq T \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

بنابراین، احتمال تجاوز نکردن از کمبود برای درصد مشخصی ($0 \leq f_t \leq 1$) از هدف می‌تواند به شکل قید شانس زیر نوشته شود.

$$P[D_t \leq f_t T] \geq p \quad (18)$$

با تعریف مقدار کمبود (معادله ۱۷) به‌عنوان تابعی از قوانین تصمیم‌گیری (معادله ۱۶) و جایگزینی آن در تابع قید شانس (معادله ۱۸)، رابطه بین مقدار تابع هدف (T) و مقدار جریان ورودی (Q_t) به شکل زیر خواهد بود.

$$P\left[(1-f_t)T + e_t - \left(1 - \frac{e_t}{\gamma}\right)b_{j-1} - \left(1 + \frac{e_t}{\gamma}\right)b_j \leq Q_t\right] \geq p \quad (19)$$

احتمال تجاوز جریان از مقدار مشخصی (Q_t^p) بسته به تابع احتمال آن می‌تواند به شکل رابطه زیر بیان شود:

$$P[Q_t \geq Q_t^p] = p \quad (20)$$

با ادغام دو رابطه ۱۹ و ۲۰، تابع قید شانس به شکل قطعی^۱ قابل دستیابی خواهد بود.

$$(1-f_t)T + e_t - \left(1 - \frac{e_t}{\gamma}\right)b_{j-1} - \left(1 + \frac{e_t}{\gamma}\right)b_j \leq Q_t^p \quad (21)$$

$$(t = 1, 2, \dots, N), (j = 1, 2, \dots, 12)$$

بنابراین، بر اساس مدل برنامه‌ریزی خطی، تصمیم‌های منجر به افزایش تابع هدف می‌توانند بر اساس محدودیت‌ها تعریف شوند.

$$\text{Max } T_d, T_d = (1-f_t)T \quad (22)$$

$$T_d + e_t - \left(1 - \frac{e_t}{\gamma}\right)b_{j-1} + \left(1 + \frac{e_t}{\gamma}\right)b_j \leq Q_t^p \quad (23)$$

$$S_{\min} \leq b_j \leq C \quad (t = 1, 2, \dots, N), (j = 1, 2, \dots, 12) \quad (24)$$

که در این روابط S_{\min} و C به ترتیب حداقل مقدار قابل ذخیره در مخزن و ظرفیت مخزن هستند. با توجه به اینکه در این پژوهش برای محاسبه بیشینه برداشت مطمئن از برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است، بنابراین رابطه بین

برداشت محاسبه شده اصطلاحاً با عنوان برداشت مطمئن نامیده می‌شود زیرا با این برداشت سیستم همچنان قادر به تأمین آب در طول بدترین دوره خشکی ثبت شده خواهد بود. در صورتی که پارامترهایی نظیر Q_t ، e_t و R_t به ترتیب به‌عنوان مقدار ذخیره اولیه مخزن، جریان ورودی، تبخیر و برداشت در مرحله t معرفی شوند. قوانین برنامه‌ریزی خطی برای طول مدت دوره برابر با N می‌تواند به شکل زیر در نظر گرفته شود.

$$R_t = S_t + Q_t - E_t - b_j \quad (t = 1, 2, \dots, N), (j = 1, 2, \dots, 12) \quad (12)$$

که در این رابطه b_j متغیر تصمیم‌گیری و j نشان‌دهنده ماه‌های سال است. در صورتی که معادله ۱۲ بر مبنای معادله پیوستگی جریان بازنویسی شود، خواهیم داشت.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

که در این رابطه S_{t+1} ذخیره پایانی است و برای متغیر تصمیم‌گیری b_j رابطه برابری زیر قابل دستیابی خواهد بود.

$$b_j = S_{t+1} \quad (14)$$

تبخیر خالص (E_t) نیز طبق رابطه زیر تابعی خطی از متوسط ذخیره مخزن خواهد بود.

$$E_t = e_t + e_t \frac{S_t + S_{t+1}}{\gamma} \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

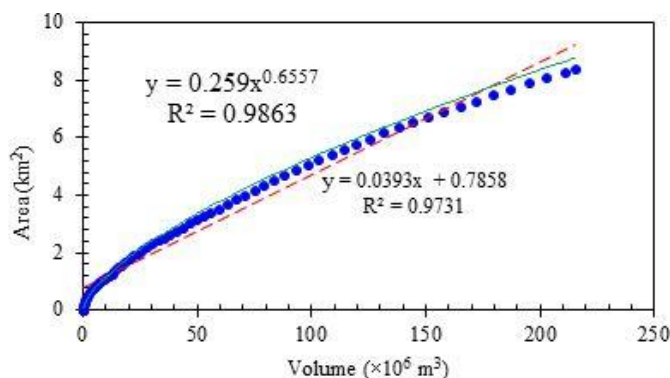
که در این رابطه e_t و e_t به ترتیب تلفات تبخیر به‌ازای حجم ذخیره و تلفات ثابت‌اند. در صورتی که روابط ۱۴ و ۱۵ در معادله ۱۳ جایگزین شوند قانون تصمیم‌گیری به صورت خطی و به‌عنوان تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری به شکل زیر قابل ارائه خواهد بود.

$$R_t = Q_t - e_t + \left(1 - \frac{e_t}{\gamma}\right)b_{j-1} - \left(1 + \frac{e_t}{\gamma}\right)b_j \quad (t = 1, 2, \dots, N), (j = 1, 2, \dots, 12) \quad (16)$$

به دلیل اینکه متغیر تصمیم (b_j) به‌عنوان تابعی از جریان ورودی (Q_t) تعیین می‌شوند، بنابراین باید ماهیت تصادفی و متغیر جریان ورودی به مخزن مد نظر قرار گیرد. در هر مرحله‌ای، مقدار کمبود مخزن ($0 \leq D_t \leq T$)

$$E_t = 10^{-2} \varepsilon_t A = 10^{-2} \varepsilon_t (bS + a) = e_t + \varepsilon_t S \quad (25)$$

که در این رابطه ε_t مقدار تبخیر خالص (E-P) را نشان می‌دهد و a و b نیز به ترتیب نشان‌دهنده عرض از مبدأ و شیب رابطه خطی حجم مخزن سد است. مقدار ε_t به تفکیک ماه‌های سال در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. منحنی حجم-مساحت (A-S) سد قشلاق

جدول ۱. میانگین بارش و تبخیر (سانتی‌متر) از سد قشلاق به تفکیک ماه‌های سال

پارامتر	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
بارش	۱۱/۵۸	۱۱/۰۸	۸/۳۲	۷/۹۶	۹/۲۷	۱۱/۱۰	۱۱/۵۳	۸/۸۹	۱/۰۹	۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۰
تبخیر	۱۹/۲۵	۸/۶۵	۳/۷۲	۰/۲۸	۰/۲۹	۱/۰۴	۱۱/۹۳	۱۸/۸۱	۲۹/۳۶	۳۷/۶۵	۳۸/۳۲	۳۰/۸۶
ε_t	۱۷/۶۷	-۲/۴۲	-۴/۶۰	-۷/۶۸	-۸/۹۸	-۱۰/۰۶	۰/۴۰	۹/۹۲	۲۸/۲۷	۳۷/۳۶	۳۸/۰۹	۳۰/۷۶

وجود نخواهد داشت.

برنامه‌ریزی دینامیکی (DP)

تومین و تودی [۱۰] و بورکر [۱۱] روش‌های مختلف استفاده‌شده در مسائل مدیریت مخازن را بررسی کردند که از بین روش‌های بررسی‌شده، برنامه‌ریزی پویا را مناسب‌تر تشخیص داده‌اند. کلمن و همکارانش [۱۲] از برنامه‌ریزی پویای تصادفی، با توجه به نبود اطمینان ناشی از میزان ورودی‌های مخزن استفاده کردند. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده روش LP، بهینه‌سازی سیستم با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا (DP) نیز انجام شد. این مدل هم مانند برنامه‌ریزی خطی، تابع هدف و توابع محدودیت‌ها خطی و فقط معادله انتقال پیشرو برای هر مرحله طبق معادله ۲۹ است.

$$f_t^*(S_t) = \text{Max} [\text{Min} V_f(S_t + 1), f_{t-1} \times (S_t)] \quad (29)$$

$$t = 1, 2, \dots, N$$

مقدار ذخیره مخزن و مساحت به شکل خطی و مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

در جدول ۱ میانگین بارش (P) و تبخیر ماهانه (E) برای حوضه سد قشلاق ارائه شده است. بر این اساس حجم تبخیر می‌تواند با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

در این پژوهش طول دوره برای تعیین سیاست بهره‌برداری از مخزن سد قشلاق یک سال در نظر گرفته شد و در نتیجه مقدار N برابر با ۱۲ بود. بنابراین، تابع هدف به شکل $\text{Max } T_d$ قابل تعریف بود و برای تحقق آن شروط و محدودیت‌های سه‌گانه زیر (معادلات ۲۶ تا ۲۸) در نظر گرفته شد.

$$T_d - e_t - \left(1 - \frac{e_t}{2}\right) b_{j-1} + \left(1 + \frac{e_t}{2}\right) b_j \leq Q_t^p - e_t \quad (26)$$

$$t, j = 1, 2, \dots, 12$$

$$b_j \leq 216 \times 10^6 \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (27)$$

$$b_j \geq 30 \times 10^6 \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (28)$$

که در آن متغیر تصمیم (b_j) ذخیره پایان هر ماه در مخزن هستند. با توجه به اینکه دوره در نظر گرفته شده یک‌ساله است و $N=12$ بین t و z از نظر کمی تفاوتی

یافته‌ها

مقادیر جریان‌های محاسبه‌شده برای هر ماه و در هر سطح احتمالی برای سد قشلاق در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. خطای توزیع ریاضی داده‌های جریان ماهانه

میزان خطا (میلیون مترمکعب)	توزیع
۹/۰۱	نرمال
۳/۸	لاگ‌نرمال دوپارامتری
۵/۴	لاگ‌نرمال سه‌پارامتری
۶/۱۲	پیرسون
۴/۱۱	لاگ‌پیرسون

برای یافتن بهترین توزیع ریاضی برای داده‌های جریان ماهانه، توزیع‌های نرمال، لاگ‌نرمال دو و سه پارامتری، توزیع پیرسون و لاگ‌پیرسون آزمایش و براساس نتایج مشخص شد توزیع لاگ‌نرمال دوپارامتری در مقایسه با سایر توزیع‌ها، با کمترین مقدار خطا قابلیت توصیف داده‌های جریان ماهانه را دارد (جدول ۲). بر این اساس توزیع لاگ‌نرمال دوپارامتری برای محاسبه جریان‌های با احتمال وقوع ۹۵، ۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۵۰ درصد استفاده شد و

جدول ۳. جریان رودخانه قشلاق به سد قشلاق در احتمالات مختلف (میلیون مترمکعب)

دوره بحرانی	سطوح احتمال					ماه
	%۵۰	%۷۰	%۸۰	%۹۰	%۹۵	
۰/۰۹	۱/۷۷	۱/۰۹	۰/۶۹	۰/۴۵	۰/۲۹	مهر
۰/۹۸	۸/۸۰	۵/۸۳	۳/۹۶	۲/۷۷	۱/۹۰	آبان
۲/۴۹	۱۶/۰۲	۱۰/۲۹	۶/۸۰	۴/۶۲	۳/۰۷	آذر
۳/۷۵	۱۶/۰۵	۱۱/۱۸	۷/۹۶	۵/۸۰	۴/۱۶	دی
۷/۱۹	۲۲/۸۶	۱۶/۶۷	۱۲/۴۰	۹/۴۱	۷/۰۴	بهمن
۳/۰۷	۳۵/۳۹	۱۹/۰۸	۱۰/۶۸	۶/۲۳	۳/۵۳	اسفند
۳۱/۶۷	۹۴/۳۳	۷۰/۱۷	۵۳/۱۷	۴۱/۰۵	۳۱/۲۸	فروردین
۱۱/۷۰	۵۳/۶۴	۳۸/۵۵	۲۸/۲۸	۲۱/۱۸	۱۵/۶۴	اردیبهشت
۲/۵۹	۱۶/۰۸	۱۱/۱۲	۷/۸۶	۵/۷۰	۴/۰۶	خرداد
۰/۸۳	۴/۰۸	۲/۷۷	۱/۹۳	۱/۳۸	۰/۹۶	تیر
۰/۲۲	۱/۹۹	۱/۲۲	۰/۷۷	۰/۵۰	۰/۳۲	مرداد
۰/۰۲	۱/۹۹	۱/۲۲	۰/۷۷	۰/۵۰	۰/۳۲	شهریور

تحلیل دوره بحرانی

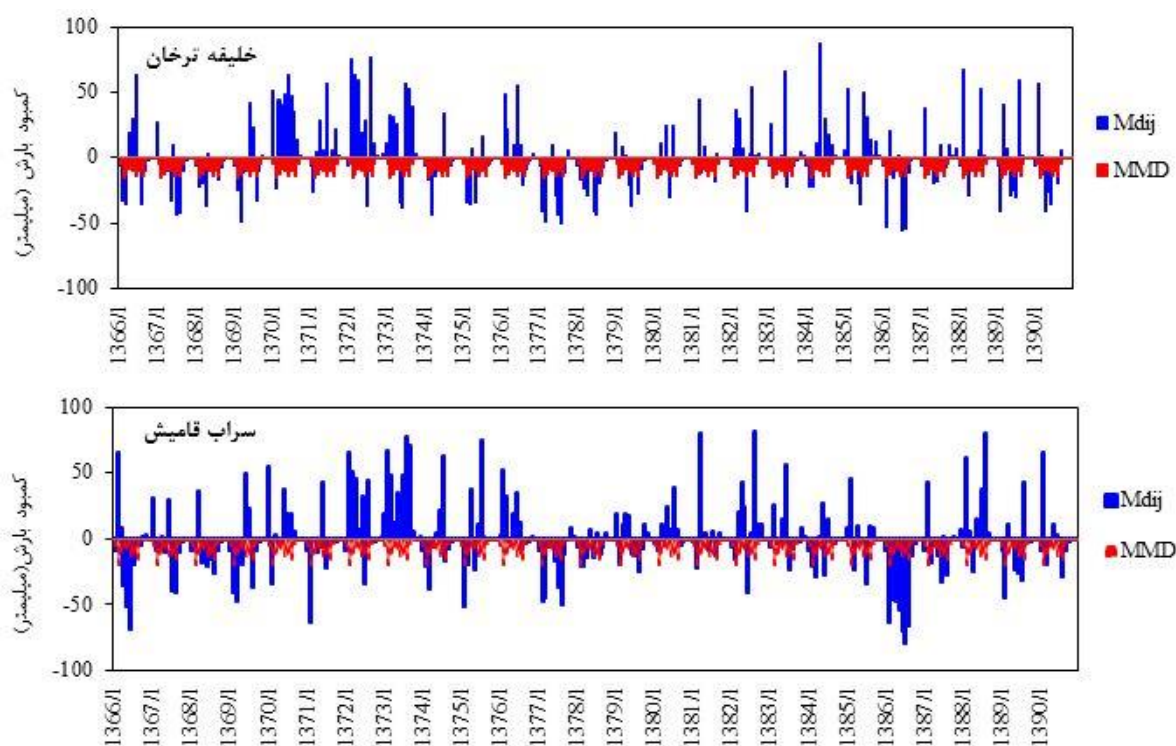
است. همچنین با توجه به جدول ۴ بحرانی‌ترین دوره برای این پژوهش ۵۱ ماهه است و در فاصله سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۱ در نظر گرفته شد. اگرچه هربست و همکارانش [۲] روش اشاره‌شده را برای داده‌های بارندگی به‌کار برده‌اند، نتایج این پژوهش (شکل ۴) به‌روشنی نشان داد که دوره‌های خشک‌سالی به‌دست‌آمده از داده‌های ورودی مخزن تفاوت چندانی با دوره‌های به‌دست‌آمده از طریق داده‌های بارندگی (شکل ۳) ندارد که این امر در مقایسه نتایج مربوط به جدول‌های ۴ و ۵ نیز به‌روشنی قابل مشاهده است. این ارتباط نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین جریان ورودی به مخزن با میزان بارش‌های به‌وقوع‌پیوسته در حوضه است. این امر در بررسی رژیم جریان ماهانه (تفاوت مقادیر دبی ماهانه و میانگین) نیز حاصل شد

دوره بحرانی (CP) تعیین‌کننده عملکرد برداشت مطمئن از مخزن است. دوره بحرانی عبارت است از فاصله زمانی که یک مخزن ذخیره از حالت پر به حالت خالی می‌رسد [۱۳]، [۱۴]. بنابراین، با در نظر گرفتن داده‌های بارش و دبی ماهانه طی دوره آماری ۲۴ سال (۱۳۶۶-۱۳۹۱) و با استفاده از روش هربست و بر مبنای مقادیر کمبود و ذخیره (شکل‌های ۳ و ۴)، مقادیر شاخص‌های شدت و دوره‌های خشکی تعیین شد. نتایج نشان داد که بیشترین ترسالی داده‌های بارش ماهانه در فاصله سال‌های ۱۳۶۶-۱۳۶۷ و ۱۳۷۱-۱۳۷۴ با احتمال ۳۴/۹۴ درصد است و بیشترین شدت و احتمال خشک‌سالی (۶۵/۰۶ درصد) در دوره‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۱ و همچنین ۱۳۸۷-۱۳۹۰ به‌وقوع پیوسته

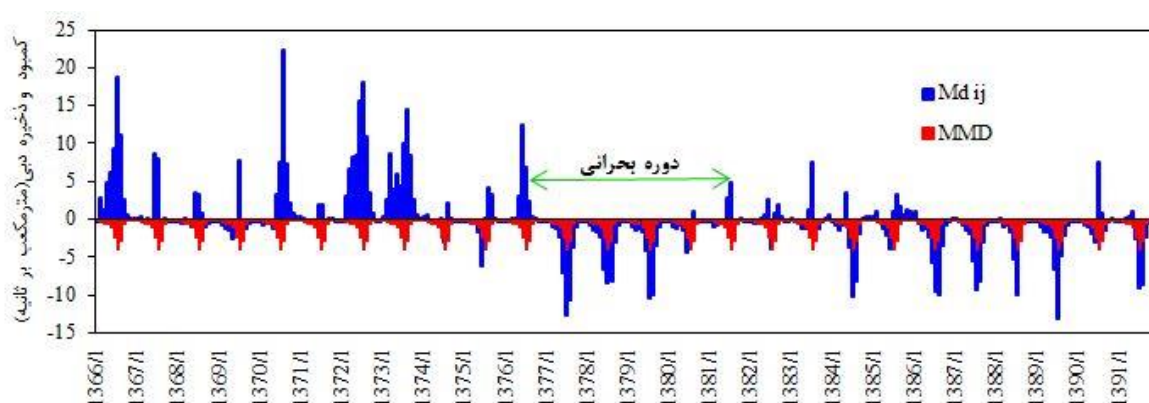
ورودی به مخزن هستند [۱۵]، برابر با ۰/۴ و در نتیجه کوچک‌تر از یک است، بنابراین مخزن سد قشلاق برون‌سالی عمل می‌کند.

$$m = \frac{(1-D)\bar{x}}{\sigma} \quad (30)$$

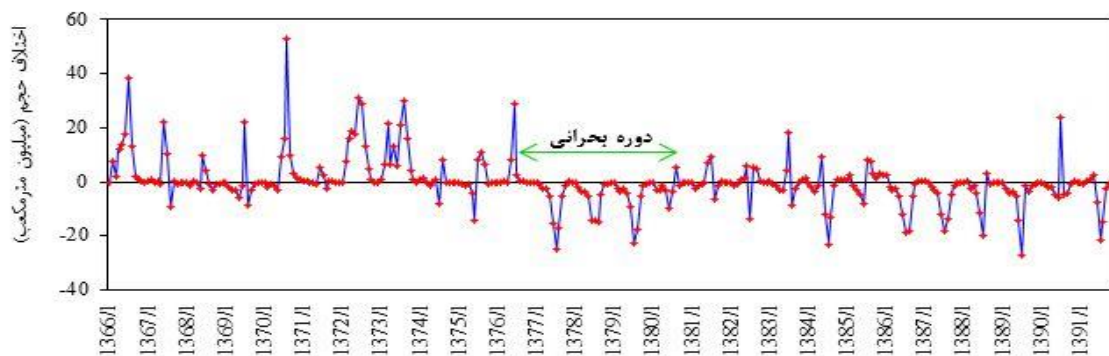
(شکل ۵). این نتایج مؤید برون‌سالی عمل کردن مخزن سد قشلاق است. به این ترتیب که دوره بحرانی باید بیشتر از ۱۲ ماه باشد. بنابراین، چون مقدار m طبق رابطه ۲۹ که در آن میانگین جریان سالانه ورودی به مخزن؛ D دبی برداشتی از مخزن برحسب کسری از میانگین جریان سالانه ورودی به مخزن؛ و σ انحراف معیار جریانات سالانه



شکل ۳. کمبود بارش ماهانه در ایستگاه‌های خلیفه ترخان و سراب قامیش طی دوره آماری (۱۳۶۶-۱۳۹۱) به روش هرست



شکل ۴. نمودار کمبود و ذخیره دبی ماهانه به مخزن با روش هرست



شکل ۵. نمودار رژیم جریان ورودی به مخزن مطالعه‌شده

جدول ۴. مقادیر پارامترهای خشکی طی دوره آماری (۱۳۶۶-۱۳۹۱) به روش هرست برای داده‌های بارش

تاریخ رویداد	شدت خشکی بی‌بعد (Y)	طول دوره خشکی به ماه (D)	شاخص خشکی بی‌بعد (I)	ایستگاه
۶۷/۷-۷۰/۱	۰/۰۹	۳۱	۲/۷۱	خلیفه ترخان
۷۶/۱۲-۸۱/۲	۰/۲۹	۵۱	۱۴/۶۵	
۸۵/۳-۸۵/۶	۰/۷	۴	۲/۸۱	
۸۷/۹-۸۶/۴	۰/۰۸	۱۷	۱/۳۳	
۸۹/۷-۸۹/۵	۱/۳۵	۳	۴/۰۵	
۹۰/۹-۹۰/۴	۰/۹۵	۶	۵/۶۹	
۷۳/۶-۷۳/۵	۱/۸۷	۲	۳/۷۴	
۶۹/۱۲-۶۶/۴	۰/۱۲	۴۵	۵/۲۱	سراب قامیش
۷۹/۲-۷۶/۱۲	۰/۳۲	۲۷	۸/۶۲	
۸۷/۹-۸۵/۱۰	۱/۵۶	۲۴	۳۷/۴۴	

جدول ۵. مقادیر پارامترهای خشکی به روش هرست برای دبی ورودی

دوره آماری (سال)	دوره خشکی (ماه)	شدت خشکی (Y)	شاخص خشکی (I)
۷۶/۱۱-۸۱/۰۵	۵۵	۱/۱۸	۶۴/۸۳
۸۴/۰۶-۸۴/۰۹	۴	۰/۵۹	۲/۳۶
۸۶/۰۲-۹۰/۰۶	۵۳	۱/۱۹	۶۲/۹
۹۱/۰۶-۹۱/۱۱	۶	۱/۲۳	۷/۴

تحلیل برداشت مطمئن از مخزن

مسئله مهم در تعیین برداشت مطمئن، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری فازی از مخزن ذخیره‌سازی است. بر این اساس در مطالعه حاضر مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و دینامیکی طبق تابع هدف تعریف‌شده و تحلیل ذخیره و میزان برداشت مطمئن ماهانه از مخزن در پنج حالت از جریان ورودی به مخزن و همچنین سری جریان ورودی در دوره بحرانی انجام شد. مدل‌های تعریف‌شده در محیط متلب

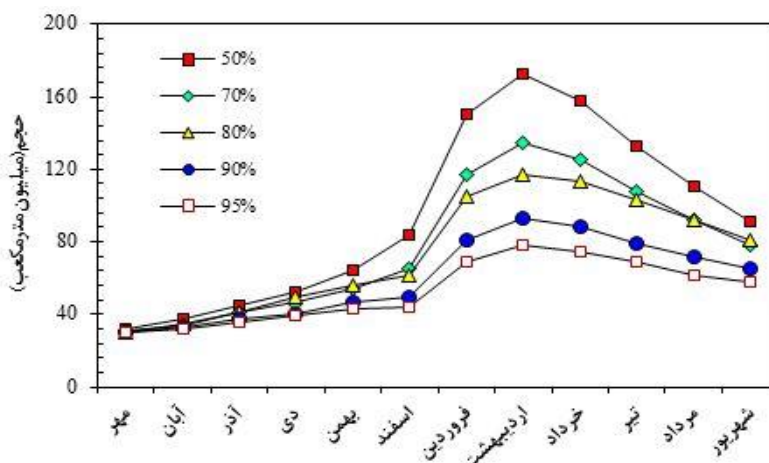
کدنویسی شدند. مطابق نتایج جدول ۶ مشخص شد که مقدار برداشت بهینه در حالت بحرانی در هر دو روش یکسان و مقادیر برداشت در روش‌های برنامه‌ریزی خطی و دینامیکی در جریان‌ات با احتمال وقوع ۹۰ و ۷۰ درصد نزدیک به هم بوده‌اند. همچنین براساس نتایج بیشترین برداشت مطمئن از مخزن برای جریان‌های با احتمال وقوع ۵۰ درصد به دست آمد که به ترتیب برای مدل‌های LP و DP برابر با ۳۰/۶۰ و ۲۲/۵۲ میلیون مترمکعب بود.

جدول ۶. مقادیر Td از مدل های LP و DP برای جریان های مختلف (میلیون مترمکعب)

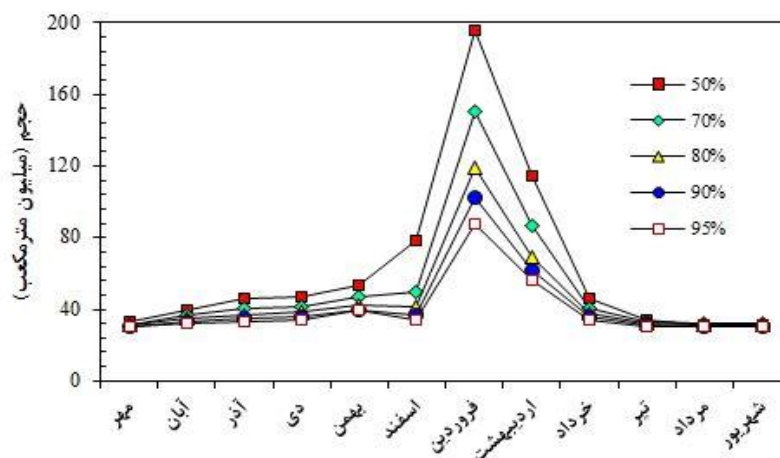
مدل	دوره بحرانی	%۹۵	%۹۰	%۸۰	%۷۰	%۵۰
LP	۲/۹۹	۶/۲۸	۹/۲۸	۱۵/۳۲	۲۰/۵۶	۳۰/۶۰
DP	۲/۹۹	۵/۰۰	۱۰/۰۰	۱۷/۵۲	۲۰/۰۰	۲۲/۵۲

طبق مدل های تعریف شده به ازای بیشترین برداشت های مطمئن ماهانه به دست آمده از تابع هدف، میزان حجم ذخیره در مخزن نیز در پایان هر ماه برای هر دو مدل LP و DP برآورد شده که نتایج آن برای مدل های LP و DP به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ ارائه شده است. همچنین حجم ذخیره برای برداشت در دوره بحرانی به تفکیک ماه های سال برای هر دو روش LP و DP در شکل ۸ ارائه شده است. حجم ذخیره شده در مخزن در روش برنامه ریزی خطی در پایان سال در پنج حالت جریان

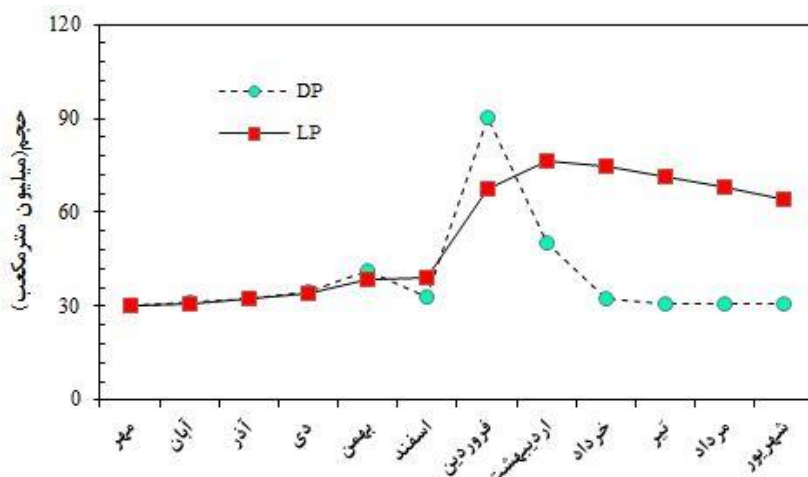
ورودی به مخزن بیشتر از حداقل حجم مخزن یعنی ۳۰ میلیون مترمکعب است و اما در روش برنامه ریزی دینامیکی حجم ذخیره در پایان سال کمتر از مقدار حداقل حجم مخزن حاصل شد. همچنین شکل ۸ نشان می دهد که حجم ذخیره مخزن در پایان سال در ماه های تیر، مرداد و شهریور معادل با ۴۰ درصد حجم مفید مخزن یعنی ۱۸۰ میلیون مترمکعب است. این نتایج نشان دهنده برتری مدل برنامه ریزی خطی برای مدیریت برداشت بهینه از سد قشلاق در مقایسه با مدل برنامه ریزی پویاست.



شکل ۶. حجم ذخیره در پایان هر ماه برای جریانات مختلف به روش LP



شکل ۷. حجم ذخیره در پایان هر ماه برای جریانات مختلف به روش DP



شکل ۸. حجم ذخیره در پایان هر ماه در سری دوره بحرانی به روش‌های LP و DP

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت مصرف آب در تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب مطلوب است و در نهایت می‌تواند به افزایش راندامان مصارف گوناگون آب منجر شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان آب منطقه‌ای استان کردستان به دلیل در اختیار قراردادن اطلاعات کمی حوضه آبخیز سد قشلاق تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- [1]. Yeh WW. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water resources research*. 1985; 21(12):1797-818.
- [2]. Herbst PH, Bredenkamp DB, Barker HM. A technique for the evaluation of drought from rainfall data. *Journal of hydrology*. 1966; 31(4):264-72.
- [3]. Mohan S, Rangacharya NC. A modified method for drought identification. *Hydrological Sciences Journal*. 1991; 36(1):11-21.
- [4]. Dorfman R. *Mathematical models: The multistructure approach*. Harvard University, Cambridge; 1962.
- [5]. 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.

بحث و نتیجه‌گیری

سیستم‌های مخازن ذخیره نقش اساسی در کنترل آب‌های سطحی و تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، شرب، تولید برق و سایر نیازها دارند. از این رو، مطالعه دقیق رفتار این سیستم‌ها به منظور تأمین آب تقاضاشده ضروری است. همچنین با توجه به اینکه مدیریت عملیات بهره‌برداری از یک سد بسیار پیچیده و با متغیرهای مختلف و از نوع احتمالی مواجه است. بنابراین، نوع و میزان اطلاعات و آمار موجود در مدیریت بهره‌برداری مخازن و انتخاب مدل تحلیلی مؤثرند. در این پژوهش از اطلاعاتی از قبیل نیازهای آبی، داده‌های هیدرولیکی، مشخصات مخزن، مصارف انرژی و رابطه حجم-سطح مخزن سد قشلاق استفاده شد و مدلی با تابع هدف بیشترین برداشت مطمئن برای تأمین نیازهای آبی کشاورزی با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی دینامیک توسعه داده شد. مخزن سد قشلاق با توجه به حجم مفید موجود (۱۸۰ میلیون مترمکعب) بوده و نتایج بهینه‌سازی با مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی پویا نشان داد که برای جریان ورودی به مخزن با احتمال وقوع ۵۰٪ مخزن عملکرد بهتری را در ماه‌های گرم سال از خود نشان می‌دهد به طوری که در فروردین ماه حجم مخزن کاملاً پر است و عملکرد مخزن بهتر می‌شود. بنابراین، با توجه به مطالب بیان شده مدل‌های ریاضی بهینه‌سازی می‌توانند در بررسی عملکرد مخازن و ترسیم منحنی‌های فرمان ماهانه روی سدها مفید باشند. با توجه به اینکه روند بهینه‌سازی حجم مخزن در اغلب پروژه‌ها صورت نمی‌گیرد،

- [6]. Kumar DN, Reddy MJ. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. *Water Resources Management*. 2006; 20(6):879-98.
- [7]. Boroomand-Nasab S, Veysi S, Veysi M. Optimization of Release from Dam Reservoirs to the Agriculture Demands (Case study: Jarreh dam to Ramhormoz Irrigation and drainage network, Khuzistan). *Report and Opinion*. 2012; 4(6): 53-58.
- [8]. Pattewar DV, Sharma KM, Dahe PD. Yield Estimation for a Single Purpose Multi-Reservoir System Using LP Based Yield Model. *Journal of Water Resources and Protection*. 2013; 5: 28-34.
- [9]. Duranyildiz İ, Önoz B, Beyazit M. A chance-constrained LP model for short term reservoir operation optimization. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 1999; 23(3):181-6.
- [10]. Tuominen P, Tweedie RL. Subgeometric rates of convergence of f-ergodic Markov chains. *Advances in Applied Probability*. 1994; 1:775-98.
- [11]. Borkar VS. Dynamic programming for ergodic control with partial observations. *Stochastic Process*. 2003; 103:293–310.
- [12]. Kelman J, Stedinger JR, Cooper LA, Hsu, E, Yuan SQ. Sampling Stochastic Dynamic Programming Applied to Reservoir Operation. *Water Resources Research*. 1990; 26(3):447-54.
- [13]. Deloye AJ, Montaseri M. Predicting critical period to characterize over-year and within-year reservoir systems, *Water Resources Management*, 1999; 13:383-407.
- [14]. Loucks DP, Van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JP, Villars MT. *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. Paris: Unesco; 2005.
- [15]. Hurst HE. Long-term storage capacities of reservoirs. *Trans. AM Engineering*, 1951; 116: 770-799.