

کلمات کلیدی: بهره‌برداری از مخزن، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویای استوکاستیکی، خشکسالی، تخصیص آب، پروژه‌های آبیاری.

مدیریت بهره‌برداری از مخازن سدها

بیژن قهرمان و علیرضا سپاسخواه

Reservoirs Operation Management

B. Ghahraman¹, A.R. Sepaskhah²

Abstract

In this study, a model for optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns were developed. The model is consisted of two modules: (I) the intra-seasonal allocation model (non-linear programming) which is intended to maximize the total farm income. It is used for allocation of water among different crops for a definite combination of state variables (inflow class, rainfall class, reservoir storage classes at the beginning and at the end of the season) for growth season and (II) seasonal allocation model (stochastic-dynamic programming) which is used for the convergent operating policy over seasons for optimal expected farm income over a year. The model was applied to Ardak reservoir dam (North east of Iran) in an arid region and ensuing results were discussed. This methodology is proposed for using in similar reservoirs of Iran to ensure optimal usage of our limited national water resources.

چکیده

متغیر بودن رژیم‌های بارندگی و جریان رودخانه در سال‌های مختلف، در عین حالی که تاییدی بر تکرار پدیده خشکسالی است، اتخاذ یک راه‌کار مناسب را ایجاب می‌کند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی که تلفیقی از برنامه‌ریزی غیر خطی (به عنوان زیر مدل ۱) و برنامه‌ریزی پویای استوکاستیکی (به عنوان زیر مدل ۲) برای یک سد یک منظوره جهت مصارف کشاورزی است، تدوین گردید. در زیر مدل ۱، با توجه به مقادیر مشخصی از متغیرهای حالت (حجم آب مخزن در ابتدا و انتهای فصل زراعی و میزان بارندگی و رژیم رودخانه در طول فصل زراعی)، مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری از مخزن سد و تخصیص بهینه آب بین گیاهان مختلف و در نهایت سود حاصل از زراعت به‌دست می‌آید. زیر مدل ۲ به اطلاعات سودهای حاصل از زراعت در ازای کلیه ترکیبات مختلف از متغیرهای حالت به انضمام ویژگی‌های استوکاستیکی جریان رودخانه و بارندگی نیاز دارد. با اجرای این زیرمدل، می‌توان مناسب‌ترین حالت وضعیت آب در مخزن سد در انتهای فصل رشد، منوط به داشتن بقیه متغیرهای حالت، را به نحوی که عملکرد کل سیستم در طول سال حداکثر گردد، به‌دست آورد. بنابراین با سنجش حجم آب مخزن در ابتدای فصل زراعی و برآورد مناسبی از رژیم رودخانه و بارندگی در طی این فصل، که با تحلیل داده‌های تاریخی می‌تواند به‌دست آید، میزان آب بهینه در مخزن سد در انتهای فصل زراعی را می‌توان برآورد نمود. با مراجعه به نتایج اجرای زیر مدل ۱ مربوط به این حالت، الگوی بهینه بهره‌برداری از مخزن و تخصیص بهینه آب بین گیاهان زراعی موجود برای شرایط واقعی تحت بررسی به‌دست می‌آید. این روش متضمن استفاده بهینه از منابع آبی موجود در کلیه شرایط، خصوصاً در شرایط خشکسالی بوده و به عنوان یک راه‌کار مدیریتی جهت اعمال برای چنین سدهایی پیشنهاد می‌شود. مدل کامپیوتری تهیه شده برای یک سد مخزنی واقع در استان خراسان اجرا گردید و نتایج حاصله مورد بحث قرار گرفت.

1 - Associate Professor of Irrigation, Ferdowsi University of Mashhad, Masshhad, IR of Iran

2 - Professor of Irrigation, Shiraz University, Shiraz, IR of Iran

۱- دانشیار گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

Keywords: Reservoir operation, Nonlinear programming, Drought, Water allocation, Irrigation projects.

۱- مقدمه

بنابر عقیده بسیاری از محققین، خشکی و خشکسالی در ایران یک واقعیت اقلیمی است. بنابراین برای کاهش اثرات سوء آن باید راه کار مناسبی را جستجو کرد. در مناطق خشک و نیمه خشک رژیم بارندگی و رودخانه نوسانات زیادی دارند. به طور کلی برای تنظیم این نامنظمی‌ها از احداث سد کمک گرفته می‌شود. تقریباً تمامی سدهای ساخته شده در ایران در منظور تامین آب کشاورزی مشترک اند. آب موجود در مخزن سد تکافوی نیاز آبی گیاهان در اراضی پائین دست در موقع خشکسالی‌ها را به طور کامل نمی‌کند و لذا گیاهان دچار تنش آبی و در نهایت کاهش محصول خواهند گردید. در نتیجه این نیاز احساس می‌شود که نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و چگونگی تخصیص آب بین گیاهان مختلف به نحوی بهینه شود که تاثیرات سوء کم‌آبی به حداقل ممکن برسد. درجه حساسیت به آب گیاهان مختلف زراعی در مراحل مختلف رشد مورد بررسی محققین مختلفی بوده است (Doorenbos and Kassam, 1979). از طرف دیگر مطالعات اندکی در آگیری بهینه از مخزن سد با توجه به تاثیرات کم آبی بر روی محصول تولیدی گیاهان در اراضی پایاب سد شده است (Darlane and Hughes, 1991). Ghahraman and Sepaskhah, 1999. Vedula and Nagesh Kumar, 1996. Darlane and Hughes (1991) از یک مدل بهینه سازی حداکثر کردن سود خالص اراضی پایاب در بهره‌برداری از یک سد استفاده کردند. نامبردگان ضمن اینکه بیلان آب در خاک را ردیابی نکردند و نسبت تبخیر-تعرق واقعی به تبخیر-تعرق پتانسیل را با نسبت مقدار آب داده شده به آب مورد نیاز تقریب زدند، با این حال در تعریف حجم مسئله در استفاده از نرم‌افزار GAMS محدودیت داشتند و مقادیر بهینه ماهانه را به آگیری هفتگی تعمیم دادند. ساده سازی دیگر مقاله فوق در لحاظ نکردن استوکاستیک بودن باران و رژیم رودخانه می‌باشد.

(Ghahraman and Sepaskhah, 1999) در یک روال شبیه‌سازی، از الگوهای متفاوت کاهش آب برای بهره‌برداری اقتصادی یک مخزن سد استفاده کردند و نسبت محصول تولیدی را حداکثر کردند. کاهش محصول ناشی از عدم تامین آب کافی گیاهان در این مطالعه مد نظر بوده است. در عین حال آنها نیز مشابه تحقیق (Darlane and Hughes, 1991)، تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه نکردند. (Vedula and Nagesh Kumar, 1996) از دو مدل توأم برنامه‌ریزی غیرخطی و پویای استوکاستیک برای بهره‌برداری بهینه

از مخزن سدی در هندوستان استفاده کردند. رطوبت خاک ردیابی شد و تبخیر-تعرق واقعی گیاهان محاسبه گردید. نامبردگان سال را به دو فصل رشد زراعی تابستان و زمستان با طول برابر تقسیم کردند که در هر فصل گیاهان مستقلی رشد می‌کردند. با این حال امکان وجود دو فصل با طول مختلف که در یکی از آنها امکان رشد هیچ محصول زراعی میسر نباشد در نظر گرفته نشده است. همچنین در این مطالعه امکان عدم پر شدن مخزن در فصول مختلف سال بررسی نگردید. آنها نیز بدون در نظر گرفتن تفاوت‌هایی در سطح زیر کشت و هزینه و درآمد محصولات مختلف، از جمع محصول نسبی تولیدی به عنوان تابع هدف استفاده کردند که صحیح نمی‌باشد.

بنابراین هدف این بررسی تدوین یک الگوی ریاضی جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن یک سد یک منظوره و چگونگی تخصیص آب بین گیاهان زراعی، به خصوص در شرایط خشکسالی می‌باشد.

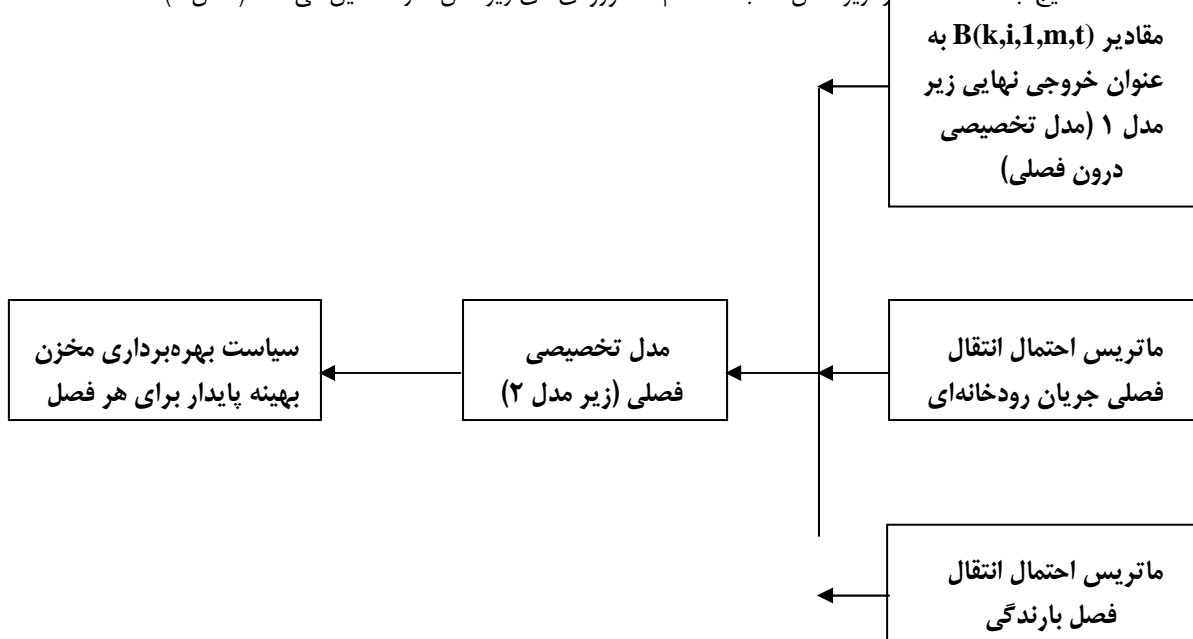
۲- تئوری

با توجه به چگونگی رشد گیاهان، سال به دو فصل نامساوی خواب و بیداری تقسیم می‌شود. در فصل خواب هیچ گیاه تابستانه‌ای در زمین وجود ندارد و کلیه گیاهان زمستانی در خواب اند ولی در فصل بیداری امکان رشد کلیه گیاهان وجود دارد. ساختار مدل ریاضی پیشنهادی از دو زیرمدل تشکیل شده است. زیر مدل ۱، مدلی درون فصلی است که به‌ازای اطلاعات مورد نیاز فصلی، چگونگی تخصیص بهینه در طول فصل زراعی را انجام می‌دهد. زیر مدل ۲ که یک مدل فصلی است، تصمیم‌گیری بهینه را برای کل فصول به نحوی تعیین می‌کند تا کارائی سالانه سیستم حداکثر شود. از برنامه ریزی غیر خطی (NLP) در زیر مدل ۱ و برنامه ریزی پویای استوکاستیکی (SDP) در زیر مدل ۲ به‌عنوان ابزار بهینه سازی استفاده شده است. NLP در محیط نرم‌افزار LINGO و SDP در محیط‌های MATLAB و BASIC اجرا شده‌اند. نمونه‌ای از لیست این برنامه‌ها در Ghahraman (2000) ارائه شده است.

NLP در زیر مدل ۱ برای حداکثر کردن سود خالص ناشی از کاشت تمامی گیاهان و در آزاء هر ترکیب منطقی از متغیرهای حالت (ذخیره آب در مخزن سد در ابتدا و انتهای فصل زراعی، جریان رودخانه و باران فصلی) به کار می‌رود. بیلان آب در مخزن در هر دوره زمانی و بیلان آب در خاک برای هر گیاه و برای هر دوره زمانی از قیود اصلی در این زیر مدل به‌شمار می‌آیند. طول دوره زمانی، که معادلات بیلان در آنها نوشته می‌شود، برای کل مدل ثابت و معادل دوره آبیاری (۱۰ روز در این بررسی) در نظر گرفته می‌شود. از SDP در زیر مدل

ماتریس‌های احتمال انتقال فصلی جریان رودخانه‌ای و بارندگی ورودی‌های زیر مدل ۲ را تشکیل می‌دهند (شکل ۱).

۲ برای به‌دست آوردن سیاست بهره‌برداری پایدار از مخزن سد استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از زیر مدل ۱ به انضمام



شکل ۱- نمودار گردش کار بین زیرمدل‌های ۱ و ۲ برای تعیین استراتژی بهینه آبیاری از مخزن سد (نقل از Ghahraman and Sepaskhah, 2002)

الف. زیر مدل ۱

تابع هدف:

حداکثر کردن سود خالص ناشی از کاشت تمامی گیاهان در یک الگوی کاشت انتخابی، هدف اصلی می‌باشد:

$$MAX : \sum_c A_c [B_c (Y_a / Y_p)_c - C_c] \quad (1)$$

که در آن A مساحت کاشت (هکتار)، B و C به ترتیب در آمد و هزینه در واحد سطح (ریال در هکتار)، Y_p و Y_a به ترتیب محصول واقعی و محصول پتانسیل (کیلوگرم در هکتار)، Y_a / Y_p محصول تولیدی نسبی (تابع تولید محصول از آب- بدون بعد) و C اندیس گیاه است. در رابطه ۱، تنها متغیر Y_a مجهول است و بقیه متغیرها قابل اندازه گیری (A و B و C) و یا قابل محاسبه (Y_p) می‌باشند. در مقابل توابع گوناگون تولید محصول از آب (مثلاً Vaux and Pruitt, 1983)، در این مقاله از تابع پیشنهادی Rao et al. (1988) که خود بسط داده شده Doorenbos and Kassam (1979) استفاده شد:

مدل تخصیصی درون فصلی (زیر مدل ۱) قابلیت در نظر گرفتن شرایط زیر را دارد: الف) گیاهان مختلف که در زمان‌های متفاوتی کاشته شوند، ب) غیر یکنواختی خاک در اراضی پایاب، ج) بیلان آب در خاک برای هر گیاه و در هر خاک، د) رشد ریشه گیاه در دوره‌های زمانی متوالی و برای هر گیاه خاص و ه) سیاست آبیاری خاص برای گیاهان. سیاست آبیاری شامل رسانیدن رطوبت خاک در عمق فعال ریشه هر گیاه و در زمانی که این رطوبت از حد مجاز کاهش رطوبتی کمتر شود، به رطوبت مزرعه‌ای (FC) می‌باشد.

مدل تخصیص فصلی (زیر مدل ۲) ماهیت استوکاستیکی باران و جریان رودخانه‌ای که به مخزن سد می‌ریزد را در نظر می‌گیرد. به دلیل استوکاستیک بودن باران، نیاز آبیاری هر گیاه که از طریق بیلان آبی به‌دست می‌آید نیز ماهیت استوکاستیکی خواهد داشت. تقویم گیاهان و مساحت زیر کاشت این گیاهان در مدل ثابت می‌باشد.

$SM_{c,t}$) در آغاز هر دوره زمانی ارزیابی می‌شوند. بنابراین تمامی پارامترهای ورودی بیلان ($IR_{c,t}$, $Rain_t$) و پارامترهای خروجی از بیلان ($DP_{c,t}$ ، بجز $ETA_{c,t}$) به‌طور آنی در ابتدای دوره زمانی در نظر گرفته می‌شود. لذا این رطوبت اضافه شده به‌اضافه رطوبت قبلی منبعی برای انجام تبخیر- تعرق برای گیاه خواهد بود. این رطوبت، $SM_{c,t}$ ، به‌صورت میانگینی از رطوبت اولیه و رطوبت اضافه شده در نظر گرفته شد. سپس تبخیر- تعرق رطوبت خاک را به $SM_{c,t+1}$ خواهد رسانید. یک قید منطقی، قرار داشتن این رطوبت بین دو حد FC (رطوبت مزرعه‌ای) و PWP (رطوبت نقطه پژمردگی دائمی- واحد هر دو متر در متر) است:

$$PWP_c \leq SM_{c,t+1} \leq FC_c \quad (5)$$

این دو حد رطوبتی از مطالعات خاک‌شناسی ارزیابی می‌شوند. قیود دسته دوم (قیود تبخیر- تعرق واقعی): تا زمانی که رطوبت خاک بیشتر از یک حد بحرانی باشد، $ETA = ETP$ بوده ولی در رطوبت‌های کمتر، ETA علاوه بر ETP به میزان رطوبت باقی‌مانده در خاک نیز بستگی خواهد داشت (Doorenbos and Kassam, 1979). بنابراین بطور کلی خواهیم داشت:

$$ETA_{c,t} \leq [(SM_{c,t} - PWP_c)Root_{c,t} + Rain_t + IR_{c,t} - DP_{c,t}] / [(1 - P_c)(FC_c - PWP_c)Root_{c,t} / ETP_{c,t}] \quad \forall c, t \quad (6)$$

که در آن $(FC - PWP)_c$ کل رطوبت قابل استفاده برای گیاه c و P_c جزء رطوبت بحرانی (بدون بعد) است که مقدار آن تابعی از نوع گیاه و ETP است (Doorenbos and Kassam, 1979). حد بالای ETA معادل ETP است:

$$ETA_{c,t} \leq ETP_{c,t} \quad (7)$$

باید متذکر شد که حسب میزان رطوبت خاک، یکی از قیود ۶ و ۷ بر دیگری غالب خواهد بود. یک مرحله رشد غالباً از چندین دوره زمانی تشکیل می‌شود و بنابراین تبخیر- تعرق در هر مرحله رشد مساوی مجموع ET در این دوره‌های زمانی می‌باشد:

$$ETA_{c,g} = \sum_i (ETA_{c,i})_j \quad j = 1, \dots, n_{c,g} \quad (8)$$

که در آن $n_{c,g}$ تعداد دوره‌های زمانی برای مرحله رشد g از گیاه c است. ضرایب حساسیت (K_y) گزارش شده تنها برای تنش‌های ملایم صادق است، بنابراین:

$$Y_a / Y_p = \prod_{j=1}^{N_c} \left(1 - K_y \left[\frac{ETA_{c,g}}{ETP_{c,g}} \right]_j \right) \quad (2)$$

که در آن $ETA_{c,g}$ و $ETP_{c,g}$ به‌ترتیب تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل (میلی‌متر)، ضریب حساسیت گیاه C به آب در مرحله گام رشد (بدون بعد- قابل استخراج از منابع، مثلاً Doorenbos and Kassam, 1979) و N_c تعداد مراحل رشد گیاه C است.

قیود:

قیود دسته اول (بیلان آب خاک): با صرف نظر کردن از رواناب سطحی، بیلان آب خاک در هر فاصله زمانی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$SM_{c,t+1}Root_{c,t+1} = SM_{c,t}Root_{c,t} + Rain_t + IR_{c,t} - ETA_{c,t} - DP_{c,t} + SM_c(Root_{c,t+1} - Root_{c,t}) \quad \forall c, t \quad (3)$$

که در آن $SM_{c,t}$ و $SM_{c,t+1}$ رطوبت خاک (متر در متر) به‌ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t (روز) و گیاه c $Root_{c,t}$ و $Root_{c,t+1}$ میانگین عمق ریشه گیاه (میلی‌متر) به‌ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t مقدار بارندگی (میلی‌متر) در دوره زمانی t $Rain_t$ آبیاری اختصاص یافته برای گیاه c ، (میلی‌متر) در دوره زمانی t $IR_{c,t}$ آبیاری اختصاص یافته برای گیاه c ، (میلی‌متر) در دوره زمانی t $ETA_{c,t}$ و $DP_{c,t}$ به‌ترتیب تبخیر- تعرق واقعی (میلی‌متر) و نفوذ عمقی گیاه (میلی‌متر) c در دوره زمانی t و SM_c رطوبت ثابت لایه‌های زیرین خاک قبل از کاشت گیاه c (میلی‌متر) است. در رابطه ۳ متغیرهای SM ، IR و DP مجهول می‌باشند، گرچه قیدهایی می‌توانند ارتباطات منطقی بین آن‌ها برقرار کند. از طرف دیگر متغیرهای $Root$ و $Rain$ قابل برآورد از یک مدل ساده (بعدا توضیح داده خواهد شد) هستند. راندمان آبیاری (E_a) کمتر از واحد باعث وقوع نفوذ عمقی خواهد بود و لذا:

$$DP_{c,t} \geq IR_{c,t}(1 - E_a) \quad (4)$$

مقدار عددی E_a از ملاحظات منطقه‌ای و نوع روش آبیاری قابل برآورد است. علامت بزرگتر در رابطه ۴ مربوط به وقوع احتمال بارندگی در دوره زمانی است.

از یک مدل سینوسی برای ردیابی عمق ریشه گیاهان در زمان استفاده شده است (Borg and Grimes, 1986). فرض شده است که رطوبت اولیه خاک در اعماق ثابت باشد (SM'_c در رابطه ۳). بنابراین با توسعه عمق ریشه، مقداری رطوبت از اعماق زیرین در معادله بیلان آب خاک (رابطه ۳) وارد می‌شود. تمامی متغیرها (مثلاً

$$ETa_{c,g}/ETp_{c,g} \geq 0.5 \quad (9)$$

قیود دسته سوم (بیان آب در مخزن): بیان آب در مخزن بر اساس معادله پیوستگی زیر استوار است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - EVP_t - OVF_t + RAIN_t \quad \forall t \quad (10)$$

معلوم است و سایر متغیرها مجهول اند. با این وجود روابط و قیود منطقی بین آن‌ها برقرار می‌باشد. حجم آب مخزن سد در هر دوره زمانی محدود به دو مقدار حجم حداکثر مخزن (S_{max}) و حجم مرده مخزن (S_{dead}) می‌باشد:

$$S_{dead} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall c, t \quad (11)$$

راندمان انتقال (Ec), که از خصوصیات محلی کانال‌های انتقال برآورد می‌شود، حجم آب خروجی از مخزن (R_t) را به مجموع آب قابل تخصیص برای گیاهان (IRR_t) تبدیل می‌کند:

$$IRR_t = Ec \cdot R_t \quad (12)$$

قیود دسته چهارم (قیود تخصیص آب به گیاهان): تغییرات کمی ضرایب حساسیت به آب در یک مرحله رشد هر گیاه مشخص نیست. ولی مطالعات فیزیولوژیک گیاهی نشان داده است که گیاه حساسیت بیشتری در زمان‌های اولیه در هر مرحله رشد تا مراحل بعدی آن دارد (مثلاً Stegman, 1983 و Chatuverdi et al, 1981). بنابراین در هر مرحله از رشد قیودی به شکل نامساوی‌های تبخیر-تغرق به مدل اضافه گردید:

$$(ETa/ETp)_g \geq (ETa/ETp)_{g+1} \quad (13)$$

کل آب تخصیص یافته برای گیاهان (IRR_t) در رابطه (۱۲) بایستی به طور کامل بین گیاهان زراعی پائین دست تقسیم شود:

$$\sum_c IR_{c,t} \cdot AREA_c = IRR_t \quad (14)$$

زیرمدل ۱ درازای هر ترکیب منطقی از متغیرهای حالت (ذخیره آب در مخزن سد در ابتدا و انتهای فصل زراعی، جریان رودخانه‌ای و باران فصلی که به دوره‌هایی متناظر دوره زمانی مورد نظر- دور آبیاری- تفکیک شده‌اند) اجرا می‌شود. بهینه کردن تابع هدف (رابطه

که در آن S_t و S_{t+1} حجم ذخیره آب در مخزن (متر مکعب) به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t , Q_t حجم جریان ورودی به مخزن (متر مکعب) در دوره زمانی t , R_t حجم آب خروجی از مخزن برای آبیاری (متر مکعب) در این دوره زمانی، OVF_t حجم آب سرریز شده (متر مکعب) در دوره زمانی t , $RAIN_t$ مقدار بارندگی باریده شده بر سطح مخزن (متر مکعب)، و EVP_t حجم آب تبخیر شده از مخزن (متر مکعب) در دوره زمانی t می‌باشد. در رابطه ۱۰، تنها متغیر Q

۱)، هدف اجرای این زیرمدل است. رطوبت خاک، تبخیر-تغرق واقعی، نفوذ عمقی و آب تخصیص یافته برای هر گیاه و هر دوره زمانی و ذخیره آب، آب رها شده، تبخیر و آب سرریز شده از مخزن در هر دوره زمانی سایر متغیرهای مجهولی هستند که در این میان محاسبه خواهند شد.

ب. زیر مدل ۲

ماهیت استوکاستیکی باران و جریان رودخانه‌ای ایجاب می‌کند که این دو پارامتر در هر دو فصل خواب و بیداری، و همچنین حجم مخزن، به کلاس‌هایی تقسیم شوند. مقدار مشخصه در هر کلاس با میانگین عددی حدود بالا و پائین آن کلاس شناخته می‌شود. در یک الگوریتم برنامه ریزی پویای استوکاستیکی که به طور پسر و استراتژی بهینه را ردیابی می‌کند، کارائی سیستم (سود حاصله) در فصل S در شرایطی که N دوره زمانی به انتهای دوره عملکرد مخزن باقی مانده باشد، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_S^N(k, i, m) = \max_t (B_{k,i,l,m,t} + \sum_n \sum_j PI_{ij}^S \cdot PR_m^S \cdot f_{S+1}^N(l, j, n)) \quad \forall k, i, m; l \text{ feasible} \quad (15)$$

در این حالت کلاس باران و جریان رودخانه‌ای در فصل فعلی S به ترتیب m و i بوده که در فصل بعد ($S+1$), به ترتیب به n و j تبدیل خواهد شد. همچنین کلاس فعلی و بعدی مخزن به ترتیب k و l می‌باشد. PI_{ij}^S احتمال انتقال جریان رودخانه‌ای از کلاس i در فصل حاضر S به j در فصل بعدی، PR_m^S احتمال انتقال بارندگی از کلاس m در فصل حاضر S به n در فصل بعدی ($S+1$), $B_{k,i,l,m,t}$ سود حاصل از تخصیص بهینه آب (ریال) در شرایطی که در فصل S کلاس بارندگی و جریان رودخانه‌ای به ترتیب m و i و کلاس حجم مخزن در ابتدا و انتهای این فصل به ترتیب k و l باشد، تعریف می‌شود. همچنین $f_S^N(k, i, m)$ مقدار مورد انتظار کارایی سیستم در فصل S است که N دوره در پیش رو دارد و کلاس‌های حجم مخزن، جریان ورودی و باران به ترتیب k و i و m می‌باشد. رابطه ۱۵ بر این اساس است که دو پارامتر بارندگی و جریان رودخانه‌ای از یک فرآیند مارکوف مرتبه اول تبعیت نمایند. در رابطه ۱۵، مقادیر B

(خروجی زیرمدل ۱) و ماتریس‌های احتمال انتقال (قابل محاسبه از سری‌های زمانی باران و رودخانه) معلوم می‌باشند.

این شرط همگرایی تنها اگر مقادیر $B_{k,i,l,m,t}$ که خروجی نهایی زیر مدل ۱ است، و احتمالات انتقال PI_i^S و PR_m^S از یک سال به سال دیگر تغییر نکنند، به دست می‌آید (Loucks et al, 1981). از آنجایی که فاصله زمانی و سال آینده‌ای که حل دوره‌ای معادلات از آن شروع می‌شود اختیاری است، تاثیری بر روی همگرایی سیاست بهره‌برداری همگرا شده مخزن ندارد. در شکل ۱ گردش اطلاعات بین زیر مدل ۱ (NLP) و ۲ (SDP) ارایه شده است.

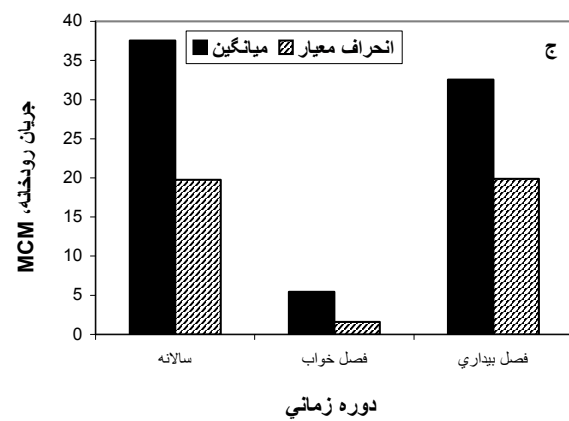
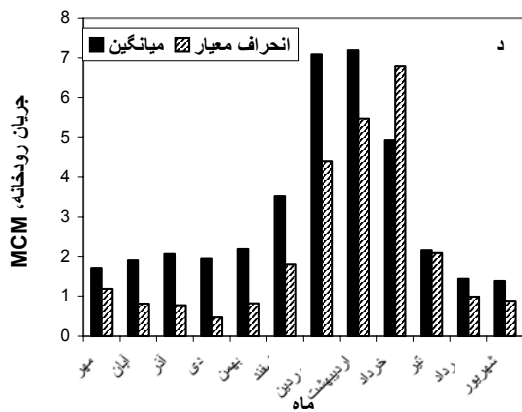
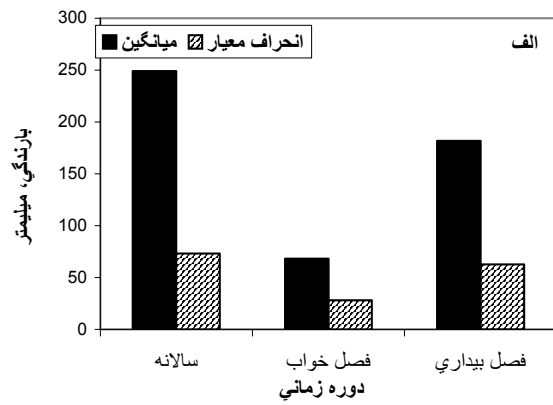
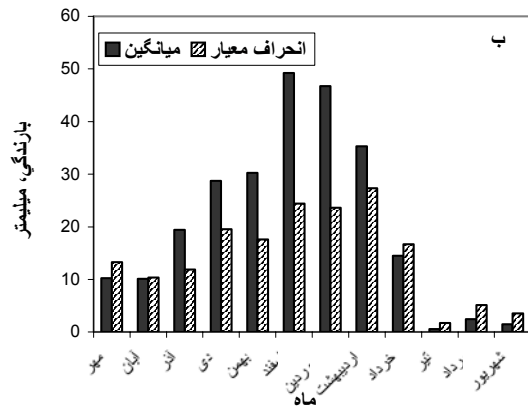
از آنجایی که این معادلات دوره‌ای برای هر فصل S در سال‌های متوالی حل می‌شود (هر سال به دو فصل تقسیم شده است)، سیاست $l(k,i,m,S)$ به دست آمده برای هر فصل مشخص T به سرعت در هر سال بعدی تکرار خواهد شد. در زمان حصول این شرط، و هنگامی که کارایی سالانه مورد انتظار $f_S^{N+2}(k,i,m) - f_S^N(k,i,m)$ برای تمام حالات k, i و تمامی فصول T در یک سال ثابت شد، همگرایی سیاست بهره‌برداری حاصل شده است.

Loucks et al. (1981) و Vedula and Nagesh Kumar (1996) به ترتیب یک سیستم با یک و دو متغیر استوکاستیکی را توضیح داده‌اند.

۳- موقعیت محل و گیاهان مورد استفاده

مدل پیشنهادی در محل ارداک بکار برده شد. ارداک در ۴۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان مشهد واقع در استان خراسان با طول جغرافیایی $59^{\circ}23'E$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ}44'N$ و ارتفاع ۱۳۱۰ متر واقع است. مساحت حوزه آبریز ارداک در محل سد پیشنهادی ۵۱۹/۷۵ کیلومتر مربع است. اطلاعات بارندگی و جریان رودخانه‌ای در مقیاس روزانه برای مدت ۲۶ سال موجود است. شکل ۲ خصوصیات کلی این اطلاعات را نشان می‌دهد. ذخیره مفید حجم سد مخزنی ارداک بین حداکثر ۳۰ میلیون متر مکعب و حداقل ۵ میلیون متر مکعب (حجم مرده) می‌باشد.

خاک اراضی پایاب دارای بافت متوسط با $FC=0.3$ و $PWP=0.15$ (واحد حجمی) است. الگوی کاشت پیشنهادی منطقه گندم و جوی زمستانه (به ترتیب با ۴۰/۷ و ۲۸/۹ درصد تراکم) و چغندر قند و ذرت (به ترتیب با ۱۷/۸ و ۱۲/۶ درصد تراکم) می‌باشد. به دلیل خصوصیات دمایی منطقه، ذرت و چغندر قند به ترتیب در حوالی ۸ اردیبهشت و ۳۰ فروردین کاشته و به ترتیب در ۱۱ مهر و اول آبان برداشت می‌شوند. تاریخ کاشت گندم و جو به ترتیب در ۱۱ و ۱ مهر و تاریخ برداشت آن‌ها به ترتیب ۳۱ و ۲۱ خرداد است. فصل خواب در منطقه ارداک بین اول آذر و ۲۰ بهمن می‌باشد. این تاریخ‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر رقابت برای آب بین دو گیاه تابستانه از یک طرف و دو گیاه زمستانه از طرف دیگر، هر چهار گیاه نیز در حوالی زمان‌های کاشت و برداشتشان با هم رقابت کلی دارند. جدول ۱ خصوصیات عمده گیاهان زراعی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - خلاصه‌ای از خصوصیات آماری بارندگی (الف- فصلی، ب- ماهانه) و جریان رودخانه‌ای (ج- فصلی، د- ماهانه) در ارداک

(Ghahraman, 2000)

/	/	b /	/	Ky		
				d ^a		
/	/	d /	c /	Ky		
				d		
/	/			Ky		
				d		
/	/			Ky		
				d		
/	/			Ky		
				d		
/	/					
/	/					
/	/					

a. مرحله رشد، روز

b. به نقل از Hill et al. (1984). فرض کنید که برای چغندر قند نیز صادق باشد. هر دو گیاه سیب‌زمینی و چغندر قند غده‌ای هستند.

c و d. به ترتیب اول و آخر سبزینه‌ای

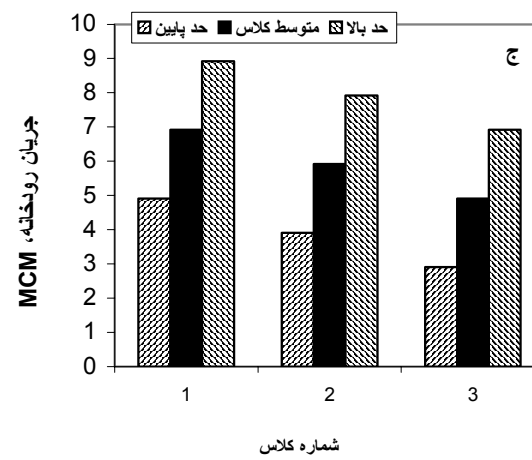
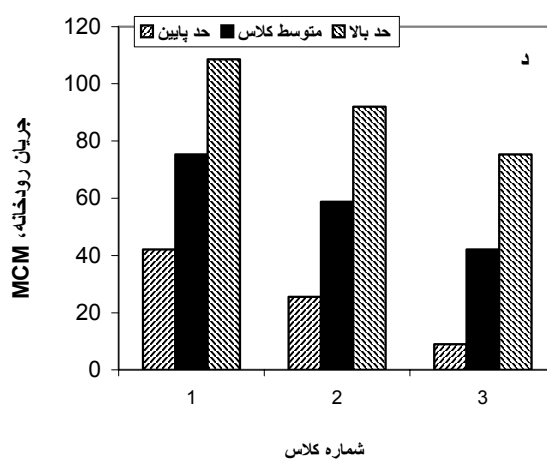
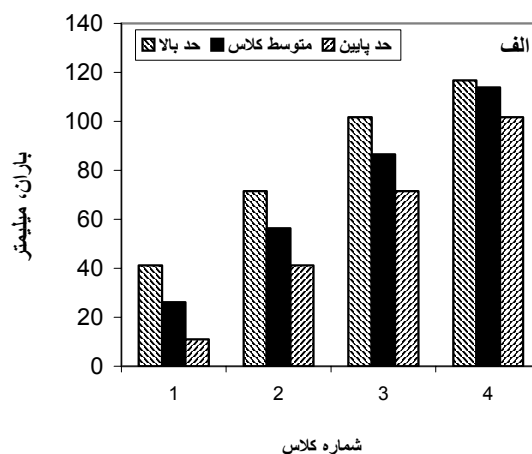
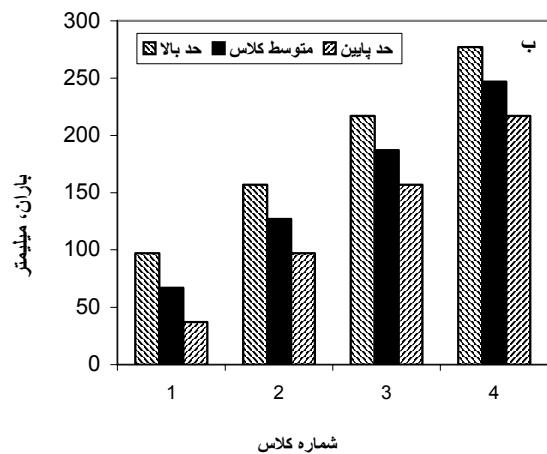
۴- نتایج و بحث

خصوصیات کلی

جدول ۲ به ترتیب خصوصیات کلاس‌بندی و ماتریس‌های احتمالی انتقال فصلی را برای این دو متغیر نشان می‌دهند. الگوی توزیع زمانی بارندگی و جریان رودخانه‌ای در هر کلاس انتخابی در جدول ۳ ارائه شده است. حجم مخزن ۳۰ میلیون متر مکعبی ارداک نیز به ۶ کلاس با فواصل ۵ میلیون متر مکعبی تقسیم گردید. رابطه متقابل سطح (A حسب هکتار) و حجم مخزن سد (V حسب میلیون متر مکعب)، قابل محاسبه توسط نقشه‌برداری مخزن سد، به صورت زیر بدست آمد:

$$A=20.682 V^{0.614} \quad (R^2=0.997, SSE=0.719, p=0.0) \quad (۱۶)$$

بررسی‌های انجام شده مشخص ساخت که هر دو سری بارندگی و جریان رودخانه‌ای، در عین حالی که از هم مستقل‌اند، از یک فرآیند مارکوف مرتبه اول تبعیت می‌کنند (Ghahraman, 2000). در کلاس‌بندی متغیرهای حالت بارندگی و جریان رودخانه‌ای بایستی توجه شود که از یک طرف تعداد کلاس‌های بالا دقت محاسبات را افزایش می‌دهد ولی از طرف دیگر احتمال به‌دست آوردن ماتریس احتمال انتقالی که داده‌های صفر بیشتری داشته باشد را افزایش می‌دهد. در نظر گرفتن این دو تقابل، به تعداد کلاس‌های ۴ و ۳ به ترتیب برای بارندگی و جریان رودخانه‌ای منجر گردید. شکل ۳ و



شکل ۳ - مشخصات کلاسهای بارندگی (الف- فصل خواب، ب- فصل بیداری) و جریان رودخانه ای (ج- فصل خواب، د- فصل بیداری)

/	/	/	/	/	/	/	*	
/	/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/	/	/	/		

= = *

عملکرد مدل

الف) زیر مدل ۱: تعداد ترکیبات منطقی متغیرهای حالت که در آنها ۳ و ۴ کلاس به ترتیب برای بارندگی و جریان رودخانه و ۶ کلاس برای حجم آب در مخزن (چه برای ابتدا و چه برای انتهای فصل زراعی) است، $4 \times 3 \times 6 \times 6 = 432$ خواهد بود. زیر مدل ۱ باید برای هر ترکیب از ۴۳۲ حالت حل شود تا الگوی بهینه بهره‌برداری از سد و تخصیص بهینه آب بین گیاهان تحت بررسی برای آن حالت مشخص بدست آید. در اینجا برای نشان دادن چگونگی عملکرد مدل، یک ترکیب از میان بقیه مورد بحث قرار می‌گیرد. به این منظور کلاس بارندگی و جریان رودخانه، ۱ (خشک‌ترین کلاس) و کلاس حجم مخزن در ابتدا و انتهای فصل، ۴ (معادل ۲۰ میلیون متر مکعب) در نظر گرفته شد. شکل‌های ۴ الی ۷ خروجی این زیرمدل را نشان می‌دهد. در تفسیر این شکل‌ها بایستی توجه شود که شماره‌های دوره زمانی بطور پیوسته از ابتدای فصل بیداری می‌باشد، به طوری که پس از آخرین دوره زمانی (۲۸) فصل بیداری به پایان می‌رسد. شکل ۷ مشخص می‌سازد که از آب مخزن به نحو مناسبی استفاده شده است به طوری که در هیچ دوره زمانی آب بصورت سرریز تلف نشده است. نفوذهای عمقی متعدد به دلیل راندمان آبیاری (۰/۶) و قید تحمیلی (معادله ۴) می‌باشد. گرچه رطوبت خاک در ابتدای بسیاری از دوره‌های زمانی و برای گیاهان مختلف در حد رطوبت مزرعه‌ای است (شکل ۴)، ولی این رطوبت تکافوی نیاز آبی گیاهان را به‌طور کامل نمی‌کند، به طوری که محصول نسبی کلیه گیاهان کمتر از واحد است (برای ذرت، چغندر قند، گندم و جو به ترتیب ۰/۸۰۶، ۰/۷۷۳، ۰/۸۰۳ و ۰/۶۸۳). از این رو حداکثر سود برای این ترکیب تنها ۰/۶۶۷۱ برابر حالتی که نیازهای آبی گیاهان می‌توانست به‌طور کامل برآورده شود، به دست آمد.

جدول‌های ۴ و ۵ سود نسبی برای کلیه ترکیبات ۴۳۲ گانه را نشان می‌دهد. نکات متعددی از این جدول‌ها قابل حصول است:

- در خشک‌ترین کلاس جریان رودخانه (کلاس ۱)، سود نسبی با افزایش کلاس مخزن در ابتدای فصل زراعی (یعنی آب بیشتر برای مصرف) افزایش می‌یابد.
- برای خشک‌ترین کلاس جریان رودخانه، سود نسبی با افزایش کلاس مخزن در انتهای فصل زراعی (یعنی آب محدودتر برای مصرف) کاهش می‌یابد.
- برای خشک‌ترین کلاس جریان رودخانه، افزایش ناچیزی در سود نسبی در ازای افزایش میزان بارندگی (تغییر کلاس بارندگی از ۱ به ۲ و ۳) به دست می‌آید.

- در کلاس‌های جریان رودخانه‌ای ۲ و ۳، سود نسبی به تغییرات کلاس حجم مخزن در ابتدای فصل حساسیتی نشان نمی‌دهد.
- در کلاس‌های جریان رودخانه ۲ و ۳، سود نسبی واحد در ازای کلاس‌های ۱ تا ۵ حجم مخزن در انتهای فصل می‌باشد. کلاس ۶ حجم مخزن در این حالت منجر به سود نسبی ۰/۹ تا ۰/۹۷ می‌شود که تنها به میزان اندکی از حداکثر سود فاصله دارد.
- کلاس بارندگی در حالتی که کلاس جریان رودخانه‌ای ۲ یا ۳ باشد تاثیر ناچیزی بر روی سود نسبی دارد.

مشخص است که این نتایج تابعی از شرایط محلی است به طوری که با تغییر هر کدام از آنها (مثلاً الگوی کاشت، شرایط هیدرولوژیکی، شکل مخزن) ممکن است تغییر نماید.

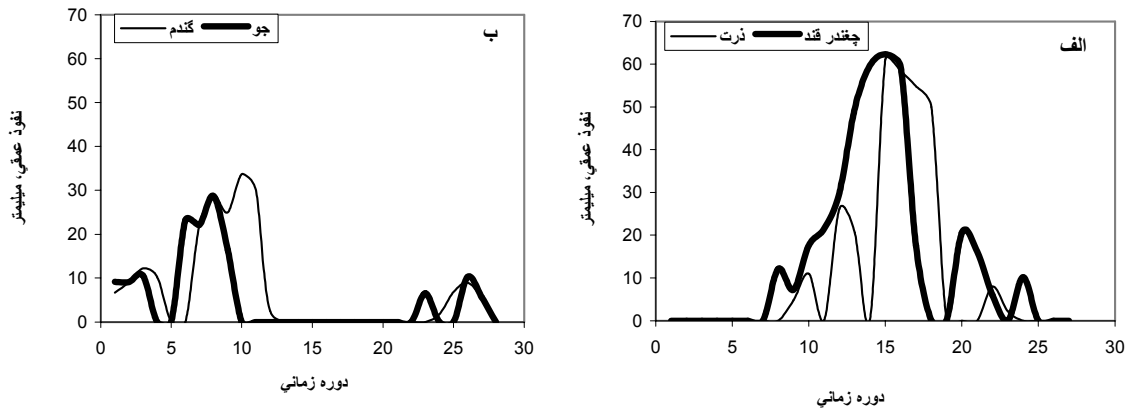
ب) زیر مدل ۲: کلیه ۴۳۲ مقادیر سود حداکثر شده ناشی از کاشت محصولات زراعی در فصل بیداری و ۴۳۲ مقادیر نظیر در فصل خواب (که به‌طور منطقی صفر هستند، زیرا در فصل خواب هیچ محصولی تولید نمی‌شود) به انضمام ماتریس‌های احتمال بارندگی و جریان رودخانه (جدول ۲) ورودی‌های این زیرمدل را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). جدول ۶ مقادیر بهینه کلاس حجم مخزن در انتهای هر فصل را در ازای سایر مقادیر متغیرهای حالت و برای دو فصل خواب و بیداری نشان می‌دهد. گرچه مقادیر نظیر برای فصل خواب برای استفاده کننده نقشی ندارند ولی مقادیر متناظر برای فصل بیداری می‌توانند مورد استفاده بهره‌بردار سد واقع شود. مشاهده می‌شود که بجز برای خشک‌ترین موقعیت‌ها، به بهره‌بردار اجازه داده نشده است که در فصل بیداری مخزن سد را کاملاً خالی کند. در نگاه اول به نظر می‌رسد که از آنجائی که فصل خواب نیاز به آب ندارد، منطقاً باید تمامی آب مخزن در فصل بیداری به مصرف تولید بیشتر برسد. ولی اطلاعات محلی نشان داد که جریان تغذیه کننده مخزن سد در فصل خواب به حدی نیست که بتواند یک مخزن خالی شده را در این مدت پر کند و بنابراین استراتژی خالی کردن مخزن در فصل بیداری منجر به این می‌گردد که در کلیه سال‌های بهره‌برداری آینده، حجم آب مخزن همیشه بین مخزن خالی و نیمه پر نوسان کند. وجود اعداد یکسان در ازای کلاس‌های مختلف بارندگی به دلیل تاثیر ناچیز بارندگی (خصوصاً در کلاس‌های ۲ و ۳ جریان رودخانه، همچنین جدول ۵ را ببینید) می‌باشد. بالاتر بودن کلاس انتهائی مخزن در ازای کلاس ۲ جریان رودخانه در مقایسه با کلاس ۳ آن، می‌تواند به عدم حساسیت بین این دو کلاس بر روی

محصول تولیدی (جدول ۵) و یا تفاوت در توزیع زمانی جریان
رودخانه (جدول ۳) مربوط باشد.

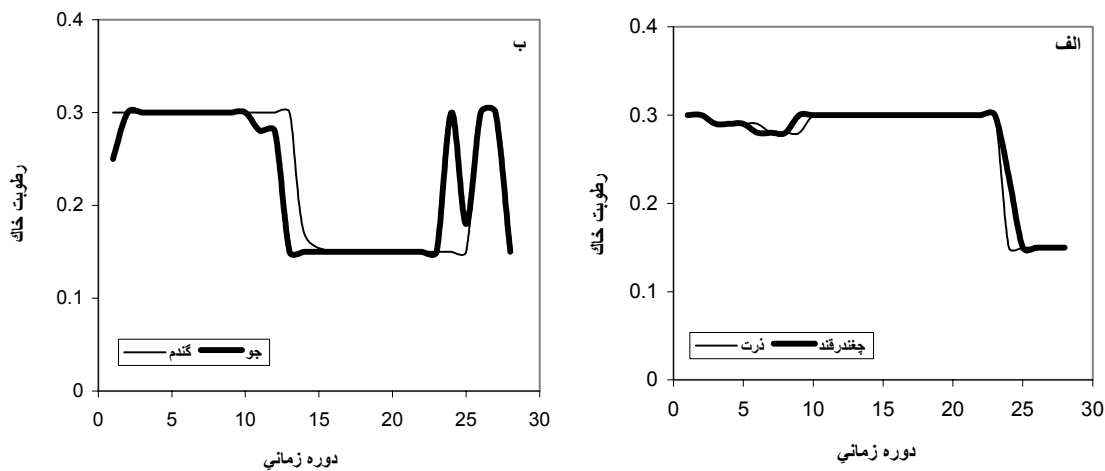
ارزیابی طولانی مدت استراتژی بهینه

به دست آمده را نشان می‌دهد. از این جدول کاملاً مشخص است که پس از از بین رفتن تاثیر حدس اولیه برای حجم مخزن (۹ فصل یا ۴/۵ سال)، مدل به‌طور مناسبی قادر به تعیین الگوی بهینه بهره‌برداری می‌باشد.

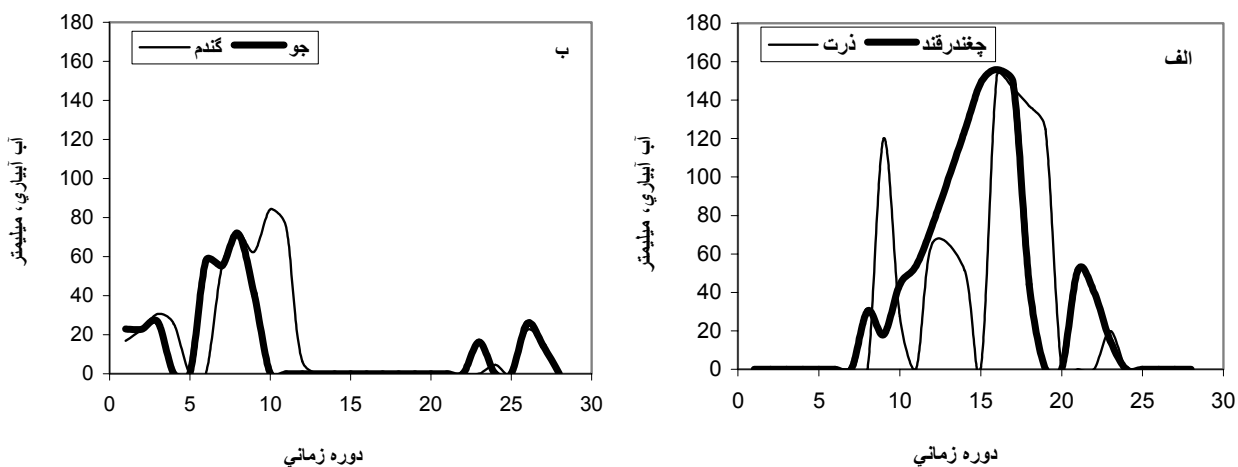
از روی سری تاریخی بارندگی و جریان رودخانه، عملکرد طولانی مدت استراتژی بهینه پیشنهادی از طریق شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. به دلیل نامشخص بودن حجم مخزن در ابتدای این دوره، کلیه مقادیر ممکن (۱ تا ۶) مد نظر قرار گرفت. جدول ۷ نتایج



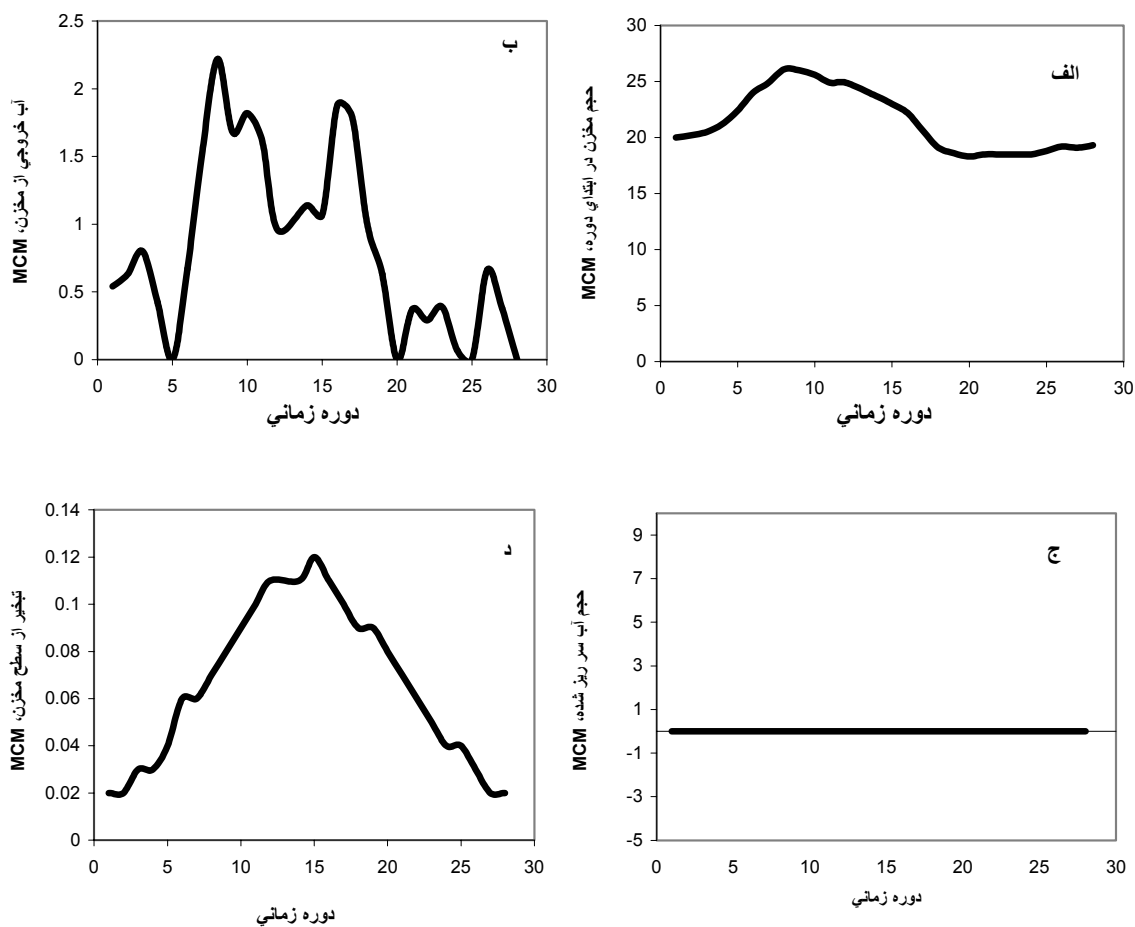
شکل ۴ - یک نمونه از خروجی زیرمدل ۱ برای مقادیر نفوذ عمقی: الف- گیاهان تابستانه، ب- گیاهان زمستانه (کلاس باران=۱)، کلاس دبی رودخانه=۱، کلاس حجم اولیه مخزن=۴ و کلاس حجم اولیه مخزن=۴، سود نسبی=۶۶۷۱/۰+



شکل ۵ - یک نمونه از خروجی زیرمدل ۱ برای رطوبت خاک در ابتدای دوره (متر در متر): الف- گیاهان تابستانه، ب- گیاهان زمستانه (کلاس باران=۱)، کلاس دبی رودخانه=۱، کلاس حجم اولیه مخزن=۴ و کلاس حجم اولیه مخزن=۴، سود نسبی=۶۶۷۱/۰+



شکل ۶ - یک نمونه از خروجی زیرمدل ۱ برای تخصیص آب به گیاهان (میلی متر). الف- گیاهان تابستانه، ب- گیاهان زمستانه (کلاس باران=۱، کلاس دبی رودخانه=۱، کلاس حجم اولیه مخزن=۴ و کلاس حجم اولیه مخزن=۴، سود نسبی=۶۶۷۱/۰+)



شکل ۷ - یک نمونه از خروجی زیرمدل ۱ برای خصوصیات آب مخزن (کلاس باران=۱، کلاس دبی رودخانه=۱، کلاس حجم اولیه مخزن=۴ و کلاس حجم اولیه مخزن=۴، سود نسبی=۰/۶۶۷۱)

/	/	/	/	/	/		
/	/	/	/		/	/	
/	/	/	/	/	/	/	
/	/	/	/	/	/	/	
/	/	/	/	/			
/	/	/	/	/		/	
/	/	/	/		/		
/	/	/	/	/	/	/	
/	/	/	/	/			
/	/	/	/				
/	/	/					
/	/	/					
/	/	/					
/	/	/	/				
/	/	/		/			
/	/	/					
/	/	/					
/	/	/	/				
/	/	/		/		/	
/	/	/				/	
/	/	/		/		/	
/	/	/	/		/		
/	/	/	/				
/	/	/	/		/	/	

(=)

				/	/		
			/	/	/		
		/	/	/	/		
	/	/	/	/			
	/	/	/				
	/	/	/				
				/	/		
			/	/	/		
		/	/	/	/		
	/	/	/				
	/	/	/				
	/	/	/				
			/	/	/		
		/	/	/	/		
	/	/	/	/			
	/	/	/				
	/	/					
	/	/					
			/	/	/		
		/	/	/			
/	/	/					
/	/	/					
/	/	/					

(=)

=		=			
/		/			
/		/			
/		/			
/		/			
/		/			

Darlane, A.B., and T.C. Hughes, (1991). "Application of crop yield functions in reservoir operation", *Water Resour. Bull.*, 27(4):649-656.

Doorenbos, J., and A.H. Kassam, (1979). "Yield response to water", FAO Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Ghahraman, B. (2000). Optimal allocation of irrigation water for multiple crops through deterministic-stochastic programming from a single purpose reservoir. Ph.D. Dissertation, Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran, 333p.

Ghahraman, B., and A.R. Sepaskhah, (1999). Use of different irrigation water deficit scheme for economic operation of a reservoir. *Iran. J. Sci. Tech.*, 23(1B), pp. 83-90.

Ghahraman, B. and A.R. Sepaskhah, (2002). Optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns. *Irrig. Sci.*, 21, pp. 27-137.

Loucks, D.P., J.R. Stedinger, and D.A. Haith, (1981), *Water resources planning and analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J. 559p.

Rao, N.H., P.B.S. Sarma, and S. Chander, (1988), "A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture", *Agric. Water Manage.*, 13, pp.25-32.

Stegman, E.C. (1983), "Irrigation scheduling applied timing criteria", D. Hillel (ed.), *Advances in Irrigation*, 2. Academic Press, New York, pp. 1-30.

Vaux, H.J., and W.O. Pruitt, (1983), "Crop water production functions", D. Hillel (ed.), *Advances in Irrigation*, 2. Academic Press, New York, pp. 61-97.

Vedula, S., and D. Nagesh Kumar, (1996), "An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops", *Water Resour. Res.*, 32(4), pp. 1101-1108.

جدول ۷- کلاس بهینه شبیه سازی شده حجم مخزن در آخر فصل به عنوان تابعی از کلاس حجم مخزن در ابتدای فصل

							*

*

گرچه این مدل برای سد ارداک به نمایش گذاشته شده است ولی به راحتی می توان آن را به هر سد مخزنی دیگر با شرایط مشابه اعمال کرد. در حال حاضر این مدل برای یک سد یک منظوره و برای مصارف کشاورزی تدوین شده است. اعمال تغییراتی در مدل لازم است تا بتوان از آن در یک سد چند منظوره (استفاده توام برای مصارف تولید برق آبی، آب شرب و کشاورزی) نیز استفاده کرد.

- مراجع

Borg, H., and W. Grimes, (1986). "Depth development of roots with times: An empirical description", *Transactions of the ASAE*, 29(1), pp. 194-197.

Chatuverdi, G.S., P.K. Aggarwal, A.K., Singh, M.G. Joshi, and S.K. Sinha, (1981). "Effect of irrigation on tillering in wheat, triticale and barley in a water limited environment". *Irrig. Sci.*, 2, pp.225-235.

تاریخ دریافت مقاله: ۳۱ تیر ۱۳۸۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۷ بهمن ۱۳۸۳