



Optimization of Multireservoir Water Resources Systems Operation Using Genetic Algorithm

S. M. Ghadami^{1*}, B. Ghahraman²,
M. B. Sharifi³, and H. Rajabi Mashhadi⁴

Abstract

Since the river flow regime is not always in harmony with the downstream water requirements, reservoir systems are constructed to regulate the natural river flow. Because of the spatial distribution of the water requirement sites, the storage system on a river may consist of several reservoirs. Due to the variable rainfall and river regime, the management policies play an important role for operation of the reservoir system. In this study, a deterministic Genetic Algorithm model is developed for optimal operation of the multireservoir water resource system in the north of Khorasan, northeastern Iran. The reservoirs are single purpose and regulate water for an irrigation project. The system is intended to maximize the total farm income. The system is made up of two reservoirs in series on Zangelanloo and Shoorkal rivers. Objective downstream farming fields are cultivated with a pre-determined multiple cropping pattern of wheat (27% and 18% in field 1 and 2, respectively), barley (30% and 26% in field 1 and 2, respectively), and sorghum (43% and 56% in field 1 and 2, respectively). The model developed in this study is used to obtain the optimal pattern of reservoir operation and water allocation among different crops for a definite combinations of state variables (reservoir storage classes at the beginning of the season and rainfall and inflow regimes). Total farm income were maximized. Running the model for 12 combinations of the state variables (4 reservoir storage classes and 3 regimes of dry, wet and average for rainfall and river inflow) showed that the results corresponding to the dry regime were sensitive to the reservoir storage class at the beginning of the season. In other regimes this sensitivity decreased. Also relative crop yield of field 2 decreased more in the dry regime, which may be due to the smaller reservoir in Shoorkal dam.

Keywords: Optimization, Multireservoir Systems Operation, Genetic Algorithm, Water stress, Optimal water allocation.

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سید مجتبی قدمی^{۱*}، بیژن قهرمان^۲، محمد باقر شریفی^۳ و
حبیب رجبی مشهدی^۴

چکیده

به علت مغایرت در رژیم آبدی رودخانه‌ها با نیازهای آبی، احداث سیستم‌های ذخیره‌ای جهت تنظیم جریان‌ات طبیعی رودخانه‌ها و تأمین نیازهای آبی، یکی از بهترین شیوه‌های استفاده از منابع آب می‌باشد. همچنین به لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، گاه سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن و گاهی شامل چندین مخزن متوالی بر روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌گردد. متغیر بودن رژیم‌های بارندگی و جریان رودخانه در سالهای مختلف، اتخاذ یک راهکار مدیریتی مناسب جهت بهره‌برداری از مخزن سدها را ضروری می‌نمایاند. در این تحقیق یک مدل الگوریتم ژنتیک قطعی جهت بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چند مخزنی منابع آب تک منظوره در شمال خراسان به جهت مصارف کشاورزی، تدوین گردیده است. هدف اصلی، حداکثر کردن سود خالص ناشی از کاشت تمامی گیاهان در یک الگوی کاشت انتخابی می‌باشد. سیستم از دو مخزن متوالی بر روی رودخانه‌های زنگلانلو و شورکال تشکیل شده است. مناطق زراعی در پایین‌دست این مخازن با الگوی کاشت مشخص از محصولات گندم (به ترتیب با ۲۷ و ۱۸ درصد تراکم برای مزرعه ۱ و ۲) و جو (به ترتیب با ۳۰ و ۲۶ درصد تراکم برای مزرعه ۱ و ۲) و سورگوم (به ترتیب با ۴۳ و ۵۶ درصد تراکم برای مزرعه ۱ و ۲) قرار دارند. در این مدل، با توجه به مقادیر مشخصی از متغیرهای حالت (حجم آب مخازن در ابتدای فصل زراعی، میزان بارندگی و رژیم رودخانه در طول فصل زراعی)، مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری از مخزن سدها، تخصیص بهینه آن بین گیاهان مختلف و در نهایت سود حاصل از زراعت بدست می‌آید. مزیت مدل برای ۱۲ ترکیب از متغیرهای حالت (۴ کلاس حجم ابتدایی مخازن و ۳ رژیم خشک، تر و میانگین برای بارندگی و جریان رودخانه) اجرا شد. نتایج نشان دادند که این جوابها در رژیم خشک به دسته حجم ابتدایی مخازن وابستگی داشت و با مرطوب شدن رژیم بارندگی و جریان رودخانه، از حساسیت جوابها کاسته شد. همچنین عملکرد نسبی محصولات مزرعه ۲ در رژیم خشک، کاهش بیشتری داشت که ممکن است دلیل حجم کوچکتر مخزن سد شورکال باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم‌های چند مخزنی، الگوریتم ژنتیک،

تنش آبی، تخصیص بهینه آب

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ اسفند ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴ مرداد ۱۳۸۸

1- Former Graduate Student of Water Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Professor of Irrigation, Ferdowsi University of Mashhad, Email: bijangh@ferdowsi.um.ac.ir

3- Assistant Professor of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

4- Associate Professor of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

بهره‌برداری از یک سیستم منابع آب شامل سه مخزن متوالی اترک، از طریق مدل مدیریت بهره‌برداری استوکستیک استخراج گردید. این تحلیل در دو بخش جداگانه، یعنی تولید جریانهای استوکستیک به صورت مصنوعی، با استفاده از نرم‌افزار HEC-4 و مدل بهینه‌سازی قطعی با برنامه‌ریزی پویا انجام گرفته است.

یک مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی توسط Braga et al. (1991) جهت محاسبه ماهانه رهاسازیهای بهینه برای تولید نیروی برق آبی در یک سیستم چند مخزنی در حوزه رودخانه تیت سفلی در برزیل بکار رفته است.

Faye et al. (1991) جهت مدیریت بلند مدت یک سیستم دو مخزنه برای مصارف آبیاری، از یک برنامه‌ریزی بر پایه قواعد فازی استفاده کرده‌اند.

Chnddramouli & Raman (2001) مدل برنامه‌ریزی پویا بر اساس شبکه عصبی DPN را جهت بهره‌برداری بهینه از سیستم سه مخزنی در ایالت تامیل نادو در هندوستان، پیشنهاد دادند.

خوش‌فطرت و همکاران (۱۳۸۳) برای تعیین الگوی انتقال بهینه آب از سد بالادست به سد پایین‌دست در یک سیستم سه مخزنی (شامل دو سیستم دو مخزن متوالی) در حوزه رودخانه زاینده‌رود و موسوی و همکاران (۲۰۰۴) برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری بلند مدت سیستم چند مخزنه کارون - دز شامل ۶ مخزن (۵ مخزن به صورت سری که با مخزن ششم موازی‌اند) با اهداف تأمین آب و تولید نیروی برقابی از روش شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند.

تقریباً تمامی سدهای ساخته شده در ایران در هدف تأمین آب کشاورزی مشترک‌اند. اما با توجه به اینکه آب موجود در مخزن سد در مواقع خشکسالی نیاز آبی گیاهان در اراضی پایین‌دست را به طور کامل رفع نمی‌کند و گیاهان دچار تنش آبی و در نهایت کاهش محصول می‌شوند. در نتیجه این نیاز احساس می‌شود که نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و چگونگی تخصیص آب بین گیاهان مختلف به نحوی بهینه شود که تأثیرات سوء کم‌آبی به حداقل ممکن برسد. درجه حساسیت به آب گیاهان مختلف زراعی در مراحل مختلف رشد مورد بررسی محققین مختلفی بوده است. از طرف دیگر مطالعات اندکی در آگیری بهینه از مخزن سد با توجه به تأثیرات کم آبی بر روی محصول تولیدی گیاهان در اراضی پایاب سد انجام شده است.

امروزه با توجه به رشد روزافزون نیاز به منابع آب، که نتیجه رشد جمعیت، صنعت و کشاورزی است، نمی‌توان تنها با اکتفا به منابع آب متغیر و غیرمطمئن، برنامه‌ریزی نمود. لذا احداث مخازن، جهت رسیدن به اهداف فوق یک امر اجتناب‌ناپذیر و قطعی است. همچنین به علت وجود مغایرت در رژیم آبدی رودخانه‌ها با نیازهای آب شرب شهری، صنایع و نیاز کشاورزی، احداث سیستم‌های ذخیره‌ای جهت تنظیم جریانات طبیعی رودخانه‌ها و تأمین نیازهای آبی، یکی از بهترین شیوه‌های استفاده از منابع آب می‌باشد. به لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، گاه سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن، و گاهی شامل چندین مخزن متوالی بر روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌گردد. با پیشرفت‌های انجام شده در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی، نحوه طرح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی منابع آب امکان‌پذیر گردیده است.

Mohan and Raipure (1992) جهت بهینه کردن برداشت از یک سیستم ۵ مخزنه درحوضه آبریز رودخانه Chaliar در ایالت Kerala هندوستان و Crawley and Dandy (1993) برای برنامه‌ریزی پمپاژ شبکه آبرسانی شهر Adelaide شامل ۱۰ مخزن در استرالیا از مدل برنامه‌ریزی خطی استفاده کرده‌اند.

مطالعه‌ای توسط ستاری و همکاران (۱۳۸۲) جهت مدیریت و توزیع مناسب آب در یک سیستم ۹ مخزنی بر روی رودخانه کلامرز واقع در حوضه میانه استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی با قیود شانس‌ی صورت گرفته است.

مدل بهره‌برداری کوتاه‌مدت توسط Teegavarapu and Simonovic (2000) جهت بهینه کردن عملکرد تجهیزات هیدرولیکی تولید برق در یک سری مخازن چهارگانه در رودخانه وینیپگ در ایالت مانیتوبا در کانادا، پیشنهاد شده است. این مدل از برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط بعنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده می‌کند.

مدل برنامه‌ریزی پویای قطعی - رگرسیون DPR، در قالب یک الگوی بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی، توسط Karamouz et al. (1992)، برای سیستم‌های چندمخزنی برای تأمین آب شهر بالتیمور توسعه داده شده است. همچنین توسط فرنوش (۱۳۷۶) سیاستهای بهینه

Vedula et al. (2005) مدل بهره‌برداری مشترک را جهت مصارف آبیاری برای ترکیبی از محصولات مختلف در ایالت کارناتاکا هندوستان تدوین کرده‌اند. این مدل برای سیستمی شامل مخزن، کانال و آبخوان بکار رفته است. تابع هدف، حداکثر کردن مجموع تولید نسبی محصولات تحت سه قید شامل توازن جرمی در مخزن، بیلان رطوبتی خاک برای هر محصول و معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی، در نظر گرفته شده است. با اجرای این مدل بهترین الگوی بهره‌برداری از مخزن، پمپاژ آب زیرزمینی و تخصیص آب به محصولات طی دوره‌های مختلف رشدی انتخاب شده است. بنابراین هدف از این تحقیق، تدوین یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب جهت بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چندمخزنی تک منظوره و چگونگی تخصیص آب بین گیاهان زراعی، به خصوص در شرایط کم آبی می‌باشد.

با بررسی انواع مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم‌های چند مخزنی منابع آب و خصوصیات و شرایط حاکم بر هر کدام از این مدل‌ها، الگوریتم ژنتیک بعنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

(1999) Wardlaw and Sharif به ارزیابی الگوریتم ژنتیک GA در بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه پرداخته‌اند. در این مطالعه ابتدا کاربرد GA در مسأله چهار مخزن به صورت معین و با افق محدود ارزیابی شده است. الگوهای کدگذاری گزینه‌ها، انتخاب، جهش و تزیج مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت نیز مسأله پیچیده‌تر ۱۰ مخزن حل شد.

اکبرپور و موسوی (۱۳۸۴) بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه را با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی انجام دادند. در این مطالعه یک روش ترکیبی جهت حل مدل‌های بزرگ مقیاس بهره‌برداری از مخازن برقابی ارائه شده است، تا با استفاده از آن ضمن بهره‌گیری از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک بتوان در مدت زمان کمتری به جواب مناسبی برای مدل دست یافت. در مدل‌های برقابی در صورتیکه متغیر هد آب بر روی توربین‌ها ثابت باشند، آنچه باقی می‌ماند یک برنامه‌ریزی خطی است که در آن مقادیر جریان رهاسازی شده از هر مخزن در هر دوره زمانی جهت مصارف مختلف به عنوان متغیرهای مدل می‌باشند.

کراچیان و کارآموز (۱۳۸۳) بهره‌برداری بهینه کمی و کیفی از مخازن سدها با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک غیرقطعی را برای مخزن سد

(1991) Dariane and Hughes از یک مدل بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن سود خالص اراضی پایاب در بهره‌برداری از یک سد استفاده کردند. آنها ضمن اینکه بیلان آب در خاک را ردیابی نکردند و نسبت تبخیر - تفرق واقعی به تبخیر - تفرق پتانسیل را با نسبت مقدار آب داده شده به آب مورد نیاز تقریب زدند، با این حال در تعریف حجم مسئله در استفاده از نرم افزار GAMS محدودیت داشتند و مقادیر بهینه ماهانه را به آبیگری هفتگی تعمیم دادند. ساده‌سازی دیگر مقاله فوق در لحاظ نکردن استوکستیک بودن باران و رژیم رودخانه می‌باشد.

(1996) Vedula and Nagesh Kumar از دو مدل توأم برنامه‌ریزی غیرخطی و پویای استوکستیک برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سدی در هندوستان استفاده کردند. رطوبت خاک ردیابی شد و تبخیر - تفرق واقعی گیاهان محاسبه گردید. آنها 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 زیرکشت و هزینه و درآمد محصولات مختلف، از جمع محصول نسبی تولیدی به عنوان تابع هدف استفاده کردند که صحیح نمی‌باشد.

(1999) Ghahraman and Sepaskhah 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 تأمین آب کافی گیاهان در این مطالعه مد نظر بوده است. درعین حال آنها نیز مشابه تحقیق (1991) Dariane and Hughes، تبخیر - تفرق واقعی را محاسبه نکردند.

(2004) Ghahraman and Sepaskhah یک مدل بهینه‌سازی تخصیص آب به گیاهان زراعی را با حجم آب محدود تدوین کردند. قهرمان و سپاسخواه (۱۳۸۴) الگوریتم فوق را به یک مخزن یک‌منظوره بسط دادند و الگوی بهینه رهاسازی آب را برای آن تدوین کردند، بطوریکه تلفیق برنامه‌ریزی غیرخطی و SDP مدنظر بود.

کشاورزی واقع شده است و هر یک از مزارع، آب مورد نیاز خود را از مخازن بالادست خود دریافت می‌کنند. 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 خواب‌اند، ولی در فصل بیداری امکان رشد کلیه گیاهان وجود دارد. فصل خواب در منطقه مورد مطالعه بین اول آذر و آخر بهمن می‌باشد. الگوی کاشت پیشنهادی منطقه گندم زمستانه (به ترتیب با ۲۷ و ۱۸ درصد تراکم برای منطقه ۱ و ۲) و جو زمستانه (به ترتیب با ۳۰ و ۲۶ درصد تراکم برای منطقه ۱ و ۲) و سورگوم (به ترتیب با ۴۳ و ۵۶ درصد تراکم برای منطقه ۱ و ۲) می‌باشد. کاشت گندم در این منطقه در نیمه اول آبان ماه صورت می‌گیرد. همچنین جو پاییزه نسبت به گندم حساسیت بیشتری در برابر سرما نشان می‌دهد، به همین دلیل می‌بایست در ۳۰-۱۵ روز قبل از گندم کاشت شود (حدود اوایل مهرماه) و بهترین زمان کاشت سورگوم در منطقه مورد بررسی دهه دوم خرداد ماه می‌باشد. با توجه به تاریخ کاشت سه محصول پیشنهادی گندم، جو و سورگوم می‌توان گفت که علاوه بر رقابت برای آب بین گیاه تابستانه (سورگوم) از یک طرف و گیاهان زمستانه (گندم و جو) از طرف دیگر، هر سه گیاه نیز در حوالی زمان‌های کاشت و برداشتشان برای مصرف آب با هم رقابت کلی دارند. جدول ۱ خصوصیات عمده گیاهان زراعی را نشان می‌دهد.

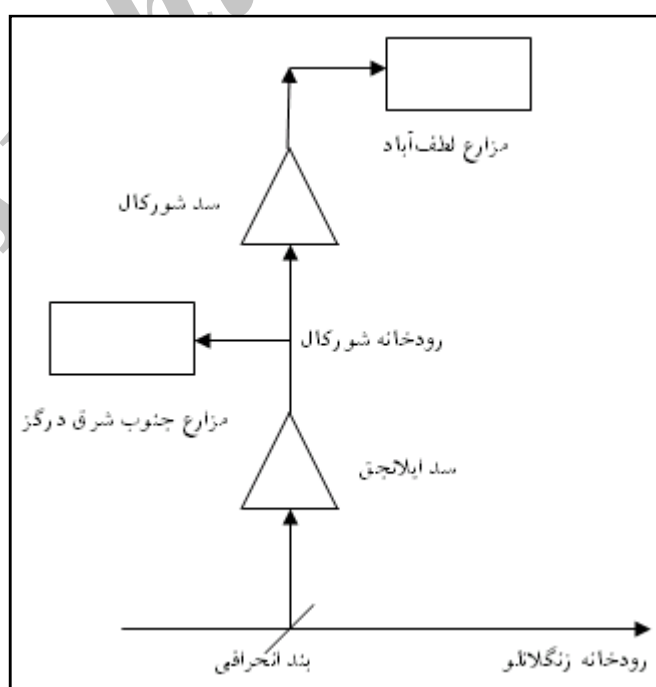
۱۵ خرداد توسعه دادند. مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک غیرقطعی پیشنهادی، به راحتی می‌تواند عدم قطعیت مربوط به جریان ورودی به مخزن را در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری در نظر بگیرد. در این مدل پیشنهادی، فرض شده است که جریان ورودی از فرایند مارکوف مرتبه اول تبعیت می‌نماید. تابع ضربی NASH که برای رفع اختلاف بین تصمیم‌گیرندگان سیستم استفاده می‌شود، به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، امید ریاضی تابع برازش وارد شده بعنوان شاخص مناسب از برازش کروموزوم‌ها برآورد گردید.

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی غیرکلاسیک است که بر مبنای مکانیزم طبیعی انتخاب و تولیدمثل کار می‌کند. آن طوری که نتایج بررسی فوق نشان می‌دهد، مدل GA بسیار قوی است و کاربرد آن برای مسائل غیرخطی و سیستم‌های پیچیده آسان می‌باشد. همچنین GA پتانسیل لازم جهت حل مشکلات برنامه‌ریزی پویای استوکستیک را داراست و می‌تواند در بهره‌برداری‌های آبی با جریان‌های ورودی احتمالی به کار رود. به علاوه امکان تلفیق این مدل با دیگر روش‌های عمده برنامه‌ریزی وجود دارد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- طرح مسأله

شکل شماتیکی مسأله بهینه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم شامل دو مخزن متوالی است. در پایین دست هر سد، مزارع



شکل ۱- شکل شماتیکی مسأله بهینه‌سازی دو سد پشت سر هم در شمال خراسان رضوی

جدول ۱- برخی از خصوصیات گیاهان تحت مطالعه در شمال خراسان رضوی (Ghahramam, 2002)

محصول			پارامتر	مرحله رشدی
سورگوم	جو	گندم		
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	Ky	استقرار
۳۰	۲۰	۲۰	d ^a	
۰/۲	۰/۲ و ۰/۲	۰/۲ ^c و ۰/۲ ^b	Ky	سبزینه
۴۰	۵۰ و ۴۰	۶۰ و ۳۰	d	
۰/۵۵	۰/۶	۰/۶	Ky	گل دهی
۲۰	۲۰	۲۰	d	
۰/۴۵	۰/۵	۰/۵	Ky	تشکیل میوه
۵۰	۴۰	۴۰	d	
۰/۲	۰/۰۱	۰/۰۱	Ky	رسیدن
۲۰	۱۰	۲۰	d	
۱۲۰	۱۱۰	۱۱۰	حداکثر عمق ریشه(سانتی متر)	

a. مرحله رشد، روز، b و c. به ترتیب اول و آخر سبزینه‌ای

که در آن f تعداد مزارع در منطقه، A_c مساحت کاشت محصول c در هر مزرعه، k (هکتار)، B_c و C_c به ترتیب درآمد و هزینه محصول c در واحد سطح (ریال در هکتار)، Y_a و Y_p به ترتیب محصول واقعی و محصول پتانسیل (کیلوگرم در هکتار) و Y_a/Y_p محصول تولیدی نسبتی (تابع تولید محصول از آب - بدون بعد) می‌باشد.

در رابطه (۱) تنها متغیر Y_a مجهول است و بقیه متغیرها قابل اندازه‌گیری (A_c، B_c و C_c) و یا قابل محاسبه (Y_p) می‌باشند.

در مقابل توابع گوناگون تولید محصول از آب (مثلاً (Vaux and Pruitt (1983)، در این تحقیق از تابع پیشنهادی Rao et al. (1988) که خود بسط داده شده (Doorenbos and Kassam (1979) استفاده شد:

$$Y_a/Y_p = \prod_{j=1}^{N_c} \left(1 - K y_c \left[1 - E T a_{c,g} / E T p_{c,g} \right] \right)_j \quad (2)$$

که در آن E T a_{c,g} و E T p_{c,g} به ترتیب تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل (میلی‌متر)، K y_c ضریب حساسیت گیاه c به آب در مرحله رشد gام رشد (بدون بعد - قابل استخراج از منابع، مثلاً (Doorenbos and Kassam (1979)، N_c تعداد مراحل رشد گیاه c است.

خاک اراضی پایاب دارای بافت متوسط (ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۱۵ حسب واحد حجمی) است. طول دوره‌های زمانی، که محاسبات برای آنها انجام می‌شود، برای کل مدل ثابت و معادل دوره آبیاری (۱۰ روز در این بررسی) در نظر گرفته می‌شود. همچنین حجم ابتدایی مخازن در چهار دسته ۱/۴، ۲/۴، ۳/۴ و ۴/۴م حجم مفید مخازن (حجم کل مخزن ۱، ۶۰ میلیون مترمکعب و حجم مرده آن، ۲۰ میلیون مترمکعب و حجم کل مخزن ۲، ۳۵ میلیون مترمکعب و حجم مرده آن، ۱۵ میلیون مترمکعب)، قرار گرفت. باران فصلی در سه حالت خشکسالی (بارندگی سالانه ۱۲۱/۵ میلی‌متر)، ترسالی (بارندگی سالانه ۲۷۷/۵ میلی‌متر) و میانگین (بارندگی سالانه ۲۰۷ میلی‌متر) و جریان رودخانه‌ای نیز در سه رژیم حداقل، حداکثر و میانگین به دوره‌هایی متناظر با دوره‌های آبیاری تفکیک شده‌اند.

۲-۲- ساختار مدل پیشنهادی

۲-۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Max} \sum_{k=1}^f \sum_c A_c [B_c (Y_a/Y_p) - C_c] \quad (1)$$

زیرین در معادله بیلان آب موجود در خاک (رابطه ۳) وارد می‌شود. رطوبت $SM_{c,t}$ به صورت میانگینی از رطوبت اولیه و رطوبت اضافه شده در نظر گرفته شده و سپس تبخیر - تعرق، رطوبت خاک را به $SM_{c,t+1}$ خواهد رساند.

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

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

قیود دسته دوم (تبخیر - تعرق واقعی): تا زمانی که رطوبت خاک بیشتر از حد بحرانی باشد، $ETa=ETp$ بوده ولی در رطوبت‌های کمتر، ETa علاوه بر ETp به میزان رطوبت باقیمانده در خاک نیز بستگی خواهد داشت:

$$ETa_{c,t} \leq \left[(SM_{c,t} - PWP_c)Root_{c,t} + Rain_t + IR_{c,t} - DP_{c,t} \right] / \left[(1 - p_c)(FC_c - PWP_c)Root_{c,t} \right] ETp_{c,t} \quad \forall c,t \quad (7)$$

که در آن $(FC_c - PWP_c)$ 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 می‌باشد (Doorenbos and Kassam, 1979). حد بالایی ETa معادل ETp است:

$$ETa_{c,t} \leq ETp_{c,t} \quad (8)$$

باید متذکر شد که حسب میزان رطوبت خاک، یکی از قیود (۷) و (۸) 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 ETa در این دوره‌های زمانی می‌باشد:

$$ETa_{c,g} = \sum_i (ETa_{c,i})_j \quad j = 1, \dots, n_{c,g} \quad (9)$$

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

$$ETa_{c,g} / ETp_{c,g} \geq 0.5 \quad (10)$$

قیود دسته سوم (بیلان آب در مخزن): بیلان آب در مخزن براساس معادله پیوستگی زیر استوار است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - EVP_t + OVF_t + Rain_t \quad \forall t \quad (11)$$

که در آن S_t و S_{t+1} حجم ذخیره آب در مخزن (مترمکعب) به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t ، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن (مترمکعب) در دوره زمانی t ، R_t حجم آب خروجی از مخزن برای آبیاری (مترمکعب) در دوره زمانی t ، EVP_t حجم آب تبخیر شده از مخزن (مترمکعب) در دوره زمانی t ، OVF_t حجم آب سرریز

که در آن $SM_{c,t}$ و $SM_{c,t+1}$ رطوبت خاک (متر در متر) به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t (روز) و گیاه c ، $Root_{c,t}$ و $Root_{c,t+1}$ میانگین عمق ریشه گیاه (میلی‌متر) به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی t ، $Rain_t$ مقدار بارندگی (میلی‌متر) در دوره زمانی t ، $IR_{c,t}$ آبیاری اختصاص یافته به گیاه c در دوره زمانی t (میلی‌متر)، $ETa_{c,t}$ و $DP_{c,t}$ به ترتیب تبخیر-تعرق واقعی (میلی‌متر) و نفوذ عمقی (میلی‌متر) گیاه c در دوره زمانی t ، و SM_c رطوبت ثابت لایه‌های زیرین خاک قبل از کاشت گیاه c (میلی‌متر) می‌باشد.

در رابطه (۳) متغیرهای SM ، IR و DP مجهول می‌باشند، گرچه قیودهایی می‌توانند ارتباطات منطقی بین آنها برقرار کنند. از طرف دیگر متغیرهای $Root$ و $Rain$ قابل برآورد هستند. فرض شده است که:

$$IR_{c,t} = (ETa_{c,t} - Rain_t) / Ea \quad (4)$$

مقدار عددی Ea (راندمان آبیاری) از ملاحظات منطقه‌ای و نوع روش آبیاری قابل برآورد است. یک قید منطقی، قرار داشتن رطوبت خاک SM بین دو حد FC (رطوبت مزرعه‌ای) و PWP (رطوبت نقطه پژمردگی دایم - 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. بر این اساس افزایش رطوبت خاک از حد FC باعث وقوع نفوذ عمقی خواهد شد:

$$DP_{c,t} = \begin{cases} SM_{c,t+1}Root_{c,t+1} - SM_{c,FC}Root_{c,t+1} & \text{if } SM_{c,t+1} > FC \\ 0 & \text{if } SM_{c,t+1} = FC \end{cases} \quad (6)$$

از یک مدل خطی برای ردیابی عمق ریشه گیاهان در زمان استفاده شده است. فرض شده است که رطوبت اولیه خاک (SM_c) در اعماق ثابت باشد. بنابراین با توسعه عمق ریشه، مقداری رطوبت از اعماق

شده (مترمکعب) در دوره زمانی t و مقدار بارندگی باریده شده بر سطح مخزن (مترمکعب) می‌باشد.

حجم آب تبخیر شده از مخزن تابعی از سطح آب مخزن است و سایر متغیرها مجهول‌اند. 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:

$$S_{dead} \leq S_t \leq S_{max} \quad (12)$$

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

$$IRR_t = Ec.R_t \quad (13)$$

قیود دسته چهارم (تخصیص آب به گیاهان): کل آب تخصیص یافته برای گیاهان (IRR_t) بایستی به طور کامل بین گیاهان زراعی پایین دست تقسیم شود:

$$\sum_c IRR_{c,t} . A_c = IRR_t \quad (14)$$

۳-۲- توابع جریمه

تابع جریمه مربوط به رطوبت خاک SM: با توجه به قیود دسته اول رطوبت خاک $SM_{c,t}$ نباید از PWP (رطوبت نقطه پژمردگی دائم) کمتر باشد. حال چنانچه در انتخاب جواب‌های اولیه این شرط برقرار نشود، تابع جریمه‌ای به صورت زیر بر تابع هدف اعمال می‌شود:

$$P_{sm} = \sum_{i=1}^t \left(I + k . [SM_{c,t} - PWP]^2 \right) \quad (15)$$

که در آن P_{sm} تابع جریمه مربوط به رطوبت خاک می‌باشد.

تابع جریمه مربوط به تبخیر - تعرق واقعی: در قیود دسته دوم بیان شد که $ETa_{c,t} \leq ETp_{c,t}$ یا $ETa_{c,t} \leq K . ETp_{c,t}$ (K میزان رطوبت باقیمانده در خاک در رابطه γ) است. در صورتیکه این قید رعایت نشود، تابع جریمه‌ای به صورت زیر خواهیم داشت:

$$P_{Eta} = \sum_{i=1}^t \left(I + k . [ETa_{c,t} - ETp_{c,t}]^2 \right) \quad (16)$$

و یا

$$P_{Eta} = \sum_{i=1}^t \left(I + k . [ETa_{c,t} - K . ETp_{c,t}]^2 \right) \quad (17)$$

که در روابط فوق، P_{Eta} تابع جریمه مربوط به تبخیر - تعرق واقعی است.

تابع جریمه مربوط به نسبت $ETA_{c,g}/ETp_{c,g}$: چنانچه بیان شد، ضرایب حساسیت (Ky) گزارش شده تنها برای تنش‌های ملایم صادق است، بنابراین اگر نسبت $ETA_{c,g}/ETp_{c,g}$ کوچکتر از 0.5 بود، تابع هدف به صورت زیر جریمه می‌شود:

$$P_{Eta} = \sum_{i=1}^t \left(I + k . [ETA_{c,g} / ETp_{c,g} - 0.5]^2 \right) \quad (18)$$

که در این رابطه، P_{Eta} تابع جریمه مربوط به نسبت $ETA_{c,g}/ETp_{c,g}$ است.

تابع جریمه مربوط به حجم آب مخزن سد S_t : با توجه به قیود دسته سوم، حجم آب مخزن سد نباید از حجم مرده مخزن (S_{dead}) کمتر باشد. در صورتیکه این قید ارضا نشود تابع جریمه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_S = \sum_{i=1}^t \left(I + k . [S_t - S_{dead}]^2 \right) \quad (19)$$

که در آن P_S تابع جریمه مربوط به حجم آب مخزن سد می‌باشد. با توجه به مسئله تعریف شده فوق، با حذف فصل خواب، محاسبات برای ۲۷ دوره ۱۰ روزه صورت می‌پذیرد. متغیرهای تصمیم مسأله، تبخیر و تعرق واقعی گیاه c در دوره زمانی t ($ETA_{c,t}$) می‌باشد. با توجه به اینکه در کدگذاری دو-دویی به هر متغیر تصمیم، ۵ ژن (بر اساس دقت موردنیاز برای متغیر تصمیم) اختصاص داده شده است، همچنین ۳ محصول در ۲ مزرعه و در ۲۷ دوره زمانی داریم، بنابراین تعداد ژنهای هر کروموزوم در این مسأله بهینه‌سازی برابر با ۸۱۰ خواهد بود. تعداد کروموزوم‌های در نظر گرفته شده برای این مطالعه برابر با ۳۰ می‌باشد. با بدست آوردن مقادیر توابع هدف میزان برازش برای هر کروموزوم بدست خواهد آمد. این روند برای تمامی کروموزوم‌های هر نسل تکرار می‌گردد. جهت انتخاب کروموزوم‌های والد نسل بعد، از روش مسابقه استفاده شده است. در این روش ابتدا به صورت تصادفی بخشی از کروموزوم‌های نسل جاری انتخاب شده (مثلاً یک دسته ۵ کروموزومی) و سپس بهترین کروموزوم این دسته به عنوان کروموزوم والد نسل بعد انتخاب می‌گردد و این روند تا تولید ۳۰ کروموزوم والد تکرار می‌گردد. گام بعدی جهت تولید نسل بعد، فرایند پیوند می‌باشد. فرایند پیوند با توجه به میزان احتمال پیوند صورت می‌گیرد. در این مطالعه احتمال پیوند با سعی و خطا برابر با

$P_{crossover}=0/7$ در نظر گرفته شده است. به این صورت که برای هر کروموزوم عدد تصادفی بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. اگر این عدد تصادفی از احتمال پیوند کوچکتر باشد، برای هر کروموزوم تعدادی ژن به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌گردد و با ژن‌های کروموزومی که در مجاورت آن قرار دارد، تعویض می‌شود. آخرین گام در تولید نسل جدید، جهش در کروموزوم‌هاست. فرایند جهش با توجه به میزان احتمال جهش انجام می‌گیرد. لذا برای هر ژن احتمالی در نظر گرفته می‌شود. احتمال جهش در این مطالعه با سعی و خطا برابر با $P_{mutation}=0/06$ انتخاب شده است. اگر این احتمال از یک عدد تصادفی (بین صفر و یک) که برای هر ژن تولید می‌شود، بزرگتر باشد مقدار عددی ژن مذکور از صفر به یک و از یک به صفر تغییر داده می‌شود. پس از انجام این مراحل نسل جدیدی تولید می‌شود که برای تولید نسل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مراحل تا زمانی تکرار می‌شود که بهترین جواب‌های هر نسل به مقدار ثابتی همگرا شوند. شرط همگرایی با در نظر گرفتن تغییرات برازندگی بهترین فرد جامعه در چند نسل متوالی صورت می‌پذیرد. همچنین تنها یک فرد (بrazنده‌ترین کروموزوم) در انتخاب نخبه‌گرا، از نسل قبل به نسل بعد منتقل می‌گردد.

این مدل در ازای هر ترکیب منطقی از متغیرهای حالت (ذخیره آب در مخزن سد در ابتدای فصل زراعی، جریان رودخانه‌ای و باران فصلی که به دوره‌هایی متناظر دوره زمانی مورد نظر - دوره آبیاری - تفکیک شده‌اند) اجرا می‌شود. بهینه کردن تابع هدف (رابطه ۱) حاصل اجرای این مدل است. رطوبت خاک، تبخیر تعرق واقعی، نفوذ عمقی و آب تخصیص یافته برای هر گیاه در 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.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- عملکرد مدل

با توجه به متغیرهای حالت می‌توان ۱۲ ترکیب را مطابق جدول ۲ جهت اجرای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفت. نتایج اجرای مدل در حالات ۱۲ گانه نیز در جدول ۲ آورده شده است. همچنین نمودار سود نسبی هر حالت، در سه رژیم تر، خشک و میانگین برای ۴ کلاس حجم ابتدایی مخازن در شکل ۲ رسم شده است.

نتایج جدول ۲، تأثیر رژیم خشک را بیشتر در عملکرد نسبی محصولات مزرعه ۲ نشان می‌دهد. چرا که اولاً، مخزن ۲ حجم مفید کمتری دارد، ثانیاً، آبدهی رودخانه مربوط به مخزن ۲ از اطمینان خوبی برخوردار نیست. ثالثاً، مساحت کشت مزرعه ۲ (۳۷۸۰ هکتار) نسبت به مزرعه ۱ (۱۷۷۰ هکتار) بیشتر است. با توجه به سود نسبی طرح در جدول ۲، قاعداً کمترین درآمد مربوط به حالت ۱ یعنی کلاس ۱/۴ مخزن، رژیم خشک بارندگی و رژیم حداقل جریان رودخانه‌ای با سود نسبی $0/6374$ و بیشترین درآمد مربوط به حالت ۱۲ یعنی کلاس ۱ مخزن، رژیم تر بارندگی و رژیم حداکثر جریان رودخانه‌ای با سود نسبی $0/9415$ می‌باشد. همچنین در یک دسته‌بندی میتوان گفت که حالات ۱، ۴، ۷ و ۱۰ در دسته حداقل سود، حالات ۹ و ۱۲ در کلاس حداکثر سود و حالات ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۱۱ در کلاس میانگین می‌باشند. با توجه به نمودار سود نسبی، می‌توان گفت که در رژیم خشک، حجم ابتدایی مخازن اهمیت داشته و در رژیم‌های میانگین و تر، حجم ابتدایی مخازن تأثیر آنچنانی در سود نسبی طرح ندارد.

۳-۲- بررسی پارامترهای مختلف طرح در یک حالت انتخابی

با توجه به مطالب فوق یکی از حالات (حالت ۴ یعنی کلاس ۲/۴ مخزن، رژیم خشک بارندگی و رژیم حداقل جریان رودخانه‌ای) که شرایط کم‌آبی و کاهش عملکرد محصول را بهتر نشان می‌دهد، بعنوان نمونه برای بررسی پارامترهای مختلف طرح، انتخاب می‌شود. شکل ۳ و ۴ نحوه همگرایی این حالت را به سمت جواب بهینه کلی در ۱۰۰۰ مرتبه تکرار مدل الگوریتم ژنتیک، نشان می‌دهد.

شکل ۳ مربوط به حداکثر تابع هدف در هر تکرار می‌باشد که طبق آن تقریباً از نسل ۸۰۰ به بعد، نمودار حالت پایداری به خود گرفته و بهینه کلی معادل ۵۷ میلیارد ریال را به ما خواهد داد. شکل ۴ مربوط به میانگین تابع هدف در هر تکرار است که در عین نوسانات، روند صعودی خوبی را نشان می‌دهد.

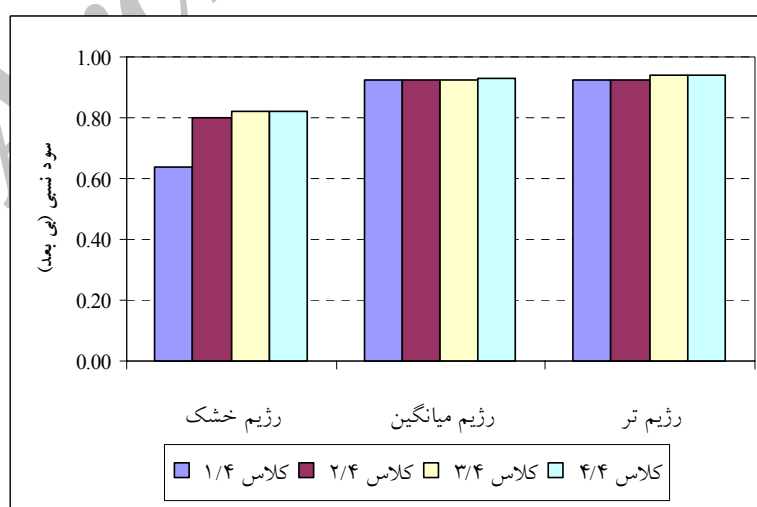
وضعیت توابع جریمه در ۱۰۰۰ مرتبه تکرار مدل الگوریتم ژنتیک، در شکل ۵ و ۶ آورده شده است. شکل ۵ حداکثر مجموع توابع جریمه و شکل ۶ میانگین مجموع توابع جریمه را نشان می‌دهد که هر دو بعنوان شاخصی، سیر نزولی توابع جریمه را تایید می‌کنند.

با توجه به شکل‌های ۳ تا ۶ در نسل‌های اولیه، تابع هدف با جریمه‌های بالایی توأم است که نشان‌دهنده ارضا نشدن قیود می‌باشد. در حالیکه

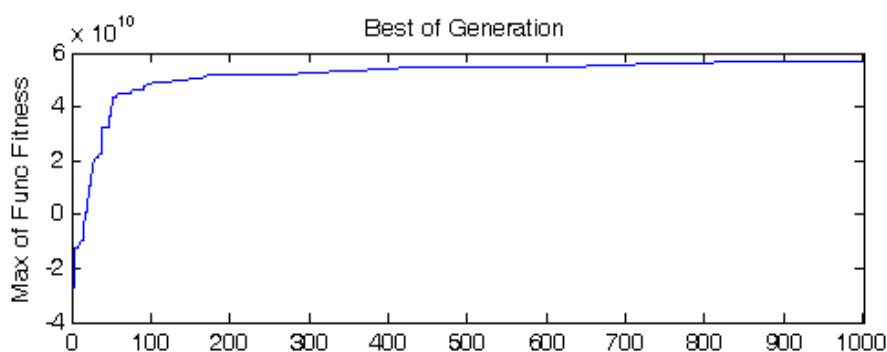
بعد از رسیدن به جواب بهینه، توابع جریمه صفر می‌شوند. در جدول ۳ مقادیر توابع جریمه و تابع هدف برای ۳۰ کروموزوم نسل آخر نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، تنها تابع جریمه مربوط به نسبت $ETa_{c,g}/ETp_{c,g}$ یعنی P_{Etag} دارای مقدار است و برای جواب بهینه (کروموزوم ۲۱)، کلیه توابع جریمه صفر و تمام قیود ارضا شده‌اند.

جدول ۲- مقادیر عملکرد نسبی محصولات و سود نسبی در حالات ۱۲ گانه در اراضی پایاب سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی

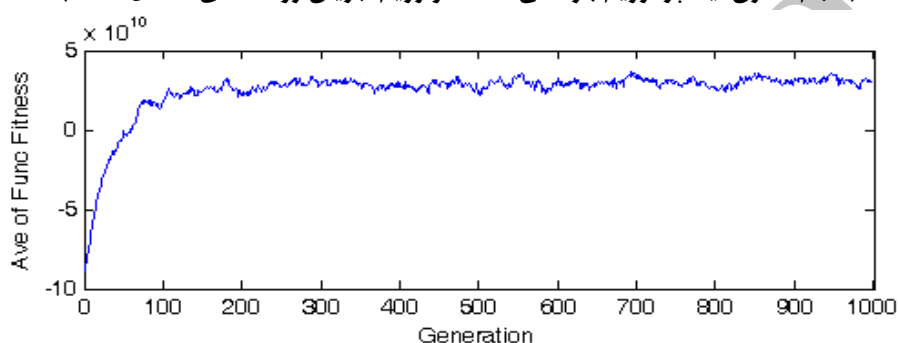
سود نسبی طرح	مزرعه ۲			مزرعه ۱			رژیم آبدهی رودخانه	رژیم بارندگی	دسته حجم ابتدایی مخزن	حالت
	عملکرد نسبی سورگوم	عملکرد نسبی جو	عملکرد نسبی گندم	عملکرد نسبی سورگوم	عملکرد نسبی جو	عملکرد نسبی گندم				
۰/۶۳۷۴	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۹۴	حداقل	خشک	1/4	1
۰/۹۲۶۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۹۲	میانگین	میانگین	1/4	2
۰/۹۲۴۳	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۲	حداکثر	تر	1/4	3
۰/۸۰۰۷	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۹۲	حداقل	خشک	2/4	4
۰/۹۲۴۹	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۳	میانگین	میانگین	2/4	5
۰/۹۲۶۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۹۲	حداکثر	تر	2/4	6
۰/۸۱۹۱	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۳	حداقل	خشک	3/4	7
۰/۹۲۶۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۹۲	میانگین	میانگین	3/4	8
۰/۹۴۰۰	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۶	حداکثر	تر	3/4	9
۰/۸۱۹۷	۰/۷۹	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۲	حداقل	خشک	4/4	10
۰/۹۲۹۸	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۴	میانگین	میانگین	4/4	11
۰/۹۴۱۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۹۶	حداکثر	تر	4/4	12



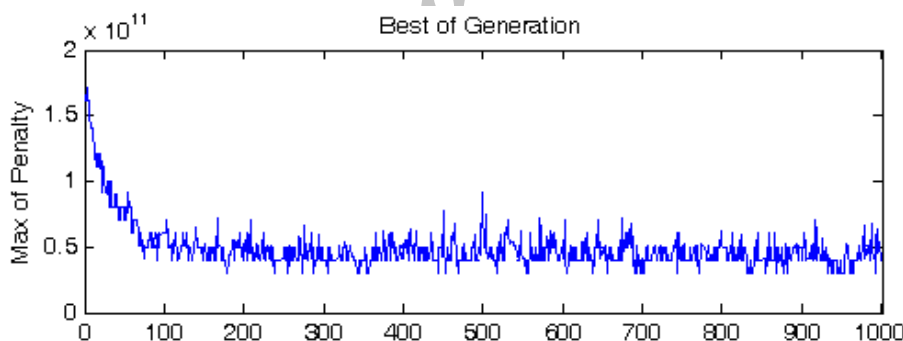
شکل ۲- نمودار سود نسبی حالات ۱۲ گانه در اراضی پایاب سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی



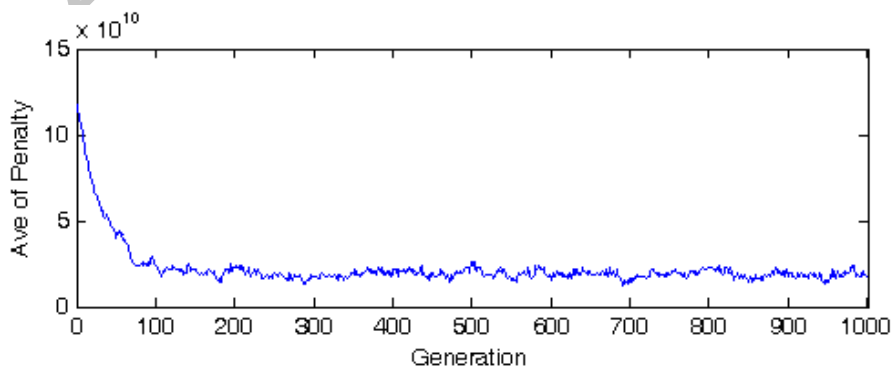
شکل ۳- حداکثر جواب بهینه در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی (حجم مخزن نیمه پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.)



شکل ۴- متوسط جواب بهینه در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی (حجم مخزن نیمه پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.)

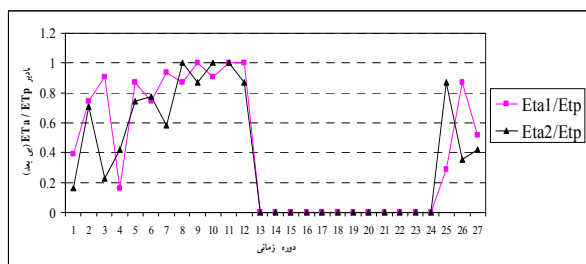


شکل ۵- حداکثر مجموع توابع جریمه در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی (حجم مخزن نیمه پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.)

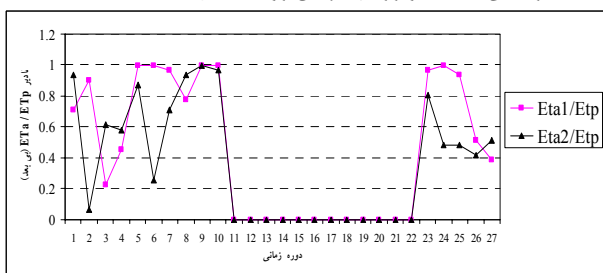


شکل ۶- متوسط مجموع توابع جریمه در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی (حجم مخزن نیمه پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.)

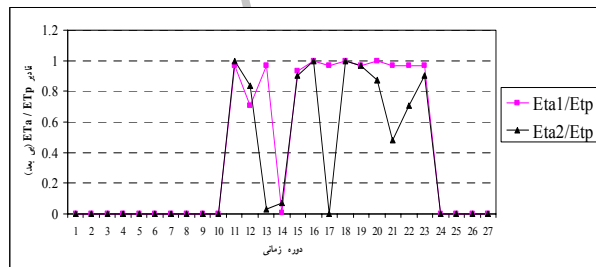
با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ می‌توان گفت که در تمام حالات، همانطور که در ساختار مدل بحث شد، $ETA_{c,t} \leq ETP_{c,t}$ می‌باشد، چرا که نسبت ETA/ETp همواره کمتر از یک است. البته نسبت ETA/ETp در محصول گندم بیشتر از دو محصول دیگر است. همچنین نسبت ETA/ETp برای هر محصول در مزرعه ۲ از مزرعه ۱ کمتر است و این موضوع، کاهش بیشتر عملکرد نسبی محصولات در مزرعه ۲ را نسبت به مزرعه ۱ تأیید می‌کند. مدل تنها برای سورگوم آن هم در مزرعه ۲ و در دوره هفدهم مقدار ETA را صفر تخمین زده است که نامعقول به نظر می‌رسد.



شکل ۷- تغییرات ETA/ETp محصول گندم در مزرعه ۱ و ۲ در ۲۷ دوره زمانی در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.



شکل ۸- تغییرات ETA/ETp محصول جو در مزرعه ۱ و ۲ در ۲۷ دوره زمانی در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.



شکل ۹- تغییرات ETA/ETp محصول سورگوم در مزرعه ۱ و ۲ در ۲۷ دوره زمانی در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

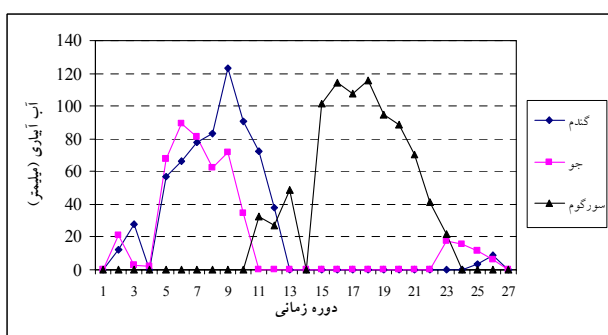
جدول ۳- مقادیر توابع جریمه برای ۳۰ کروموزوم نسل آخر در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است. تمامی مقادیر $P_{Etag} \times 10^{10}$ و $Fit.Fun. \times 10^{10}$ صفر هستند.

کروموزوم	$P_{Etag} \times 10^{10}$	$Fit.Fun. \times 10^{10}$
۱	۳/۰۱	۱/۹۰
۲	۲	۲/۳۷
۳	۲/۰۱	۲/۵۳
۴	۳	۲/۰۹
۵	۰	۵/۵۵
۶	۰	۴/۹۹
۷	۲/۰۲	۳/۱۹
۸	۱	۴/۱۳
۹	۳/۰۱	۱/۷۲
۱۰	۲/۰۲	۲/۹۷
۱۱	۴/۰۱	۰/۹۵
۱۲	۱	۳/۳۵
۱۳	۱	۳/۲۶
۱۴	۰	۵/۱۹
۱۵	۰	۳/۶۵
۱۶	۲	۳/۲۴
۱۷	۱	۴/۳۷
۱۸	۲/۰۲	۳/۰۳
۱۹	۲	۲/۶۳
۲۰	۰	۵/۶۰
۲۱	۰	۵/۷۰
۲۲	۱	۳/۵۹
۲۳	۲/۰۱	۳/۲۷
۲۴	۰	۰/۹۱
۲۵	۳/۰۱	۱/۴۲
۲۶	۲	۲/۵۳
۲۷	۱/۰۱	۳/۸۱
۲۸	۱	۳/۹۷
۲۹	۳/۰۱	۱/۴۳
۳۰	۴/۰۲	۰/۹۴

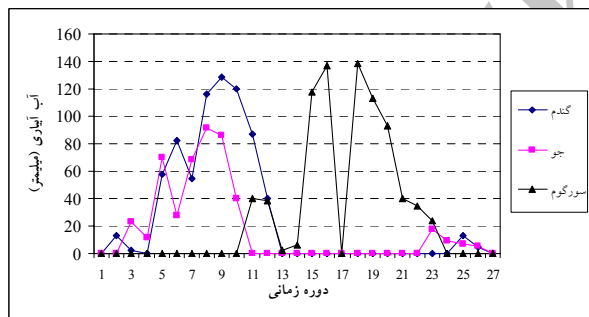
چنانچه تغییرات ETp و ETA را در یک نمودار برای هر محصول در مزرعه ۱ و ۲ در ۲۷ دوره زمانی (از ابتدا تا انتهای فصل بیداری) رسم شود، شکل‌های ۷ تا ۹ حاصل خواهد شد.

جدول ۴- نمایه‌هایی از نفوذ عمقی در مزارع ۱ و ۲ بر حسب میلی‌متر در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

محصول	مزرعه ۱		مزرعه ۲	
	متوسط	حداکثر	متوسط	حداکثر
گندم	7/93	43/47	11/3	58/57
جو	4/56	29/47	5/94	39/53
سورگوم	9/19	38/66	10/92	61/13



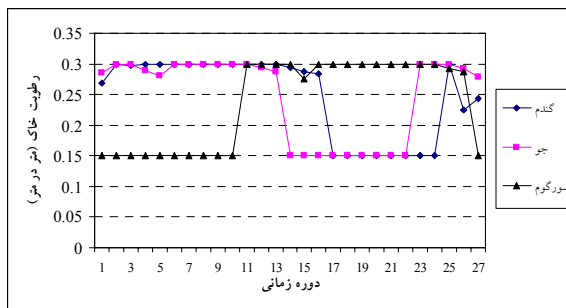
شکل ۱۲- تغییرات آب آبیاری IR سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در مزرعه ۱ در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.



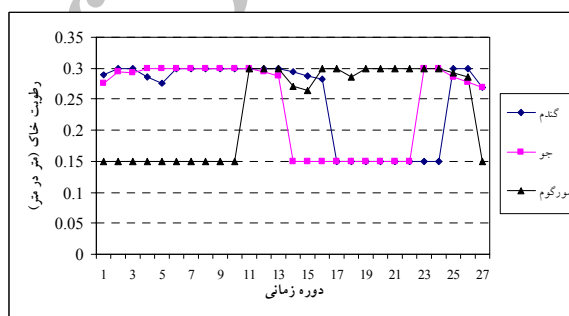
شکل ۱۳- تغییرات آب آبیاری IR سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در مزرعه ۲ در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

طبق ساختار مدل، زمانی که بارندگی نیاز آبی گیاهان را تامین کند نیاز به آبیاری نیست، بنابراین با مشاهده نمودارهای فوق می‌توان گفت که نیازهای آبی مزرعه ۲ بیشتر از مزرعه ۱ از طریق بارندگی تامین شده است. آب آبیاری نیز بدلیل تخمین صفر ET_a برای سورگوم در مزرعه ۲ و در دوره هفدهم در همین حالت، صفر محاسبه شده است.

تغییرات رطوبت خاک SM مزرعه ۱ و ۲ برای سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است.



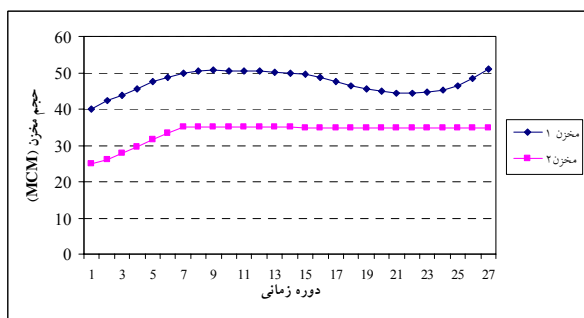
شکل ۱۰- تغییرات رطوبت خاک SM مزرعه ۱ برای سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.



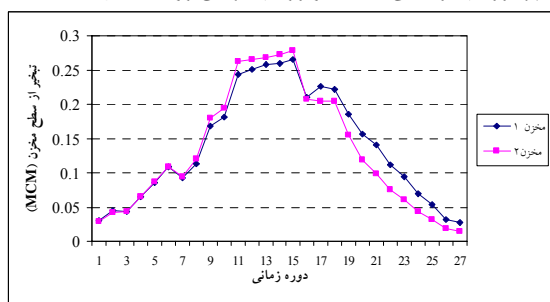
شکل ۱۱- تغییرات رطوبت خاک SM مزرعه ۲ برای سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که طبق ساختار مدل، رطوبت خاک SM هر دو مزرعه، بین دو حد FC و PWP تغییر می‌کند. همچنین گرچه رطوبت خاک در ابتدای بسیاری از دوره‌های زمانی و برای گیاهان مختلف، در حد رطوبت مزرعه‌ای FC است، ولی این رطوبت برآورد نیاز آبی گیاهان را به طور کامل نمی‌کند، به طوری که محصول نسبی کلیه گیاهان کمتر از واحد است.

جدول ۴ نمایه‌هایی از نفوذ عمقی را در مزارع ۱ و ۲ نشان می‌دهد. با توجه به آن می‌توان گفت که تلفات نفوذ عمقی مزرعه ۲ از مزرعه ۱ بیشتر است. تغییرات آب آبیاری IR سه محصول در ۲۷ دوره زمانی در هر مزرعه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است.

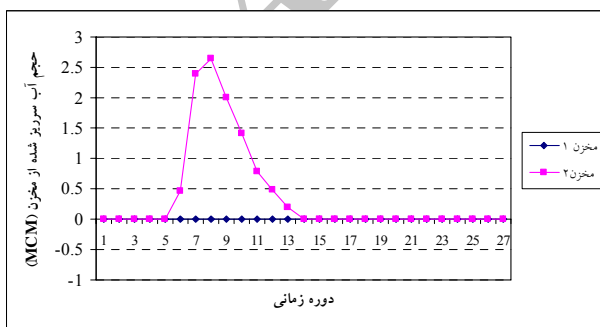


شکل ۱۵- تغییرات حجم مخازن S در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.



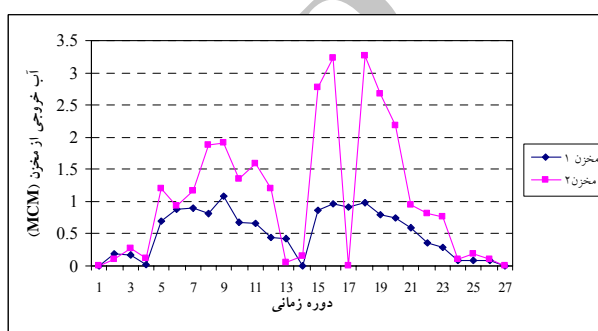
شکل ۱۶- تأخیر از سطح مخازن E در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

همچنین شکل ۱۷ نشان می‌دهد که به خاطر کوچک بودن حجم مفید مخزن ۲ با وجود نیاز داشتن به آب، حتی تا ۳ میلیون مترمکعب سرریز از مخزن ۲ داریم. با کنترل جوابها مشاهده شد، در دوره هجدهم که بیشترین سرریز از مخزن ۲ وجود دارد، بارندگی و آبدهی رودخانه حداکثر و تأخیر از سطح، ناچیز می‌باشد. از مخزن ۱ در هیچ دوره زمانی آب سرریز نشده است. اما در صورت سرریز از مخزن ۱ نیز، آب اضافی کنترل و به مخزن ۲ منتقل می‌شود.



شکل ۱۷- آب سرریز شده از هر مخزن O در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

نحوه آبیاری از مخازن R جهت آبیاری مزارع در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حجم آب خروجی از مخزن ۲ بیشتر از مخزن ۱ می‌باشد. دلیل این مسأله سطح وسیع مزارع پایین دست مخزن ۲ و در نتیجه نیاز آبی بیشتر در این منطقه است. مطابق شکل ۱۳ آب آبیاری در مزرعه ۲ و در دوره هفدهم برای تمام محصولات صفر محاسبه شده است چرا که نیاز آبی گندم و جو از طریق بارندگی تأمین شده است و وضعیت سورگوم نیز در بالا توضیح داده شد. بنابراین آبیاری از مخزن نیز در این حالت، صفر شده است.



شکل ۱۴- نحوه آبیاری از مخازن R جهت آبیاری مزارع در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سدهای پشت سر هم در شمال خراسان رضوی. حجم مخزن نیمه‌پر، رژیم بارندگی خشک و رژیم جریان رودخانه‌ای حداقل است.

تغییرات حجم مخازن S، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق شکل، حجم مخزن ۱ ابتدا افزایش یافته و به حجم حداکثر نزدیک می‌شود. اما با توجه به نیاز گیاه تابستانه (سورگوم) بار دیگر کاهش می‌یابد و در نهایت نیز به حجم حداکثر می‌رسد. در مورد تغییرات حجم مخزن ۲ می‌توان گفت که با افزایش حجم آب مخزن و رسیدن به حد نهایی، ثابت باقی می‌ماند. دلیل این امر احتمالاً کوچک بودن حجم مفید مخزن ۲ می‌باشد.

تلفات از مخازن شامل تأخیر از سطح مخازن E و آب سرریز شده از هر مخزن O می‌باشد. تغییرات تأخیر و سرریز از مخازن بترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶ همانطور که انتظار می‌رود، تأخیر از سطح مخازن در فصول گرم نسبت به بقیه سال زیادتر است. علاوه بر آن در همین زمان تأخیر از سطح مخزن ۲ از مخزن ۱ بیشتر است که نشان دهنده این مطلب است که با توجه به رابطه سطح - حجم مخازن، سطح مخزن ۲ از مخزن ۱ بیشتر می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده مشخص می‌کند که این مدل قابلیت‌های متعددی را برای در بر گرفتن شرایط محلی از قبیل خصوصیات خاک، الگوی زراعی، راندمان آبیاری، و الگوی توسعه ریشه دارا می‌باشد. از طرف دیگر فرایندهای خروجی آن در برگیرنده روابط متقابل آب - خاک - گیاه شامل تغییرات رطوبت خاک، نفوذ عمقی، و تبخیر - ترقق واقعی و ویژگی‌های مخزن سدها، مانند خروجی از مخازن، حجم آب داخل مخازن و تلفات از مخازن (تبخیر و سرریز) می‌باشد. همچنین با توجه به روابط آبی - خاکی پیچیده حاکم بر مسأله شامل تابع هدف غیرخطی، قیود و توابع جریمه، مدل الگوریتم ژنتیک با ارائه جوابهای قابل قبول، روشی مناسب برای طرح و بهره‌برداری از سیستم مخازن تشخیص داده می‌شود.

در رژیم خشک، سود کلی طرح با افزایش دسته مخزن در ابتدای فصل زراعی (یعنی آب بیشتر برای مصرف) افزایش می‌یابد و در رژیم‌های میانگین و تر، سود کلی طرح به تغییرات کلاس حجم مخزن در ابتدای فصل حساسیتی نشان نمی‌دهد. 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. نتایج، تأثیر رژیم خشک (کم‌آبی) را بیشتر بر عملکرد نسبی محصولات مزرعه ۲ نشان می‌دهد. چرا که اولاً مخزن ۲ حجم مفید کمتری دارد، ثانیاً آبدهی رودخانه مربوط به مخزن ۲ از اطمینان خوبی برخوردار نیست. ثالثاً مساحت کشت مزرعه ۲ نسبت به مزرعه ۱ بیشتر است و از طرف دیگر تلفات تبخیر و سرریز مخزن ۲ از ۱ بیشتر است.

۵- مراجع

اکبرپور، م. ج. و موسوی، س. ج. (۱۳۸۴)، "بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، جلد اول، صفحه ۳۲۶-۳۱۹.

خوش‌فطرت، ع.، اصغری، ک. و صفوی، ح. (۱۳۸۳)، "مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم دو سدی متوالی"، چکیده مقالات اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، صفحه ۶.

ستاری، م. ت.، اسلامیان، س. س. و ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۲)، "بهینه‌سازی مصرف آب در یک سیستم رودخانه‌ای ۹ مخزنه"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، ICCE 2003، دانشگاه صنعتی اصفهان، هیدرولیک و منابع آب، صفحه ۵۹۷-۶۰۴.

فرنوش، ح. (۱۳۷۶)، "بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

قدمی، س. م. (۱۳۸۴)، "بررسی انواع مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم‌های چند مخزنی منابع آب"، سمینار منتشر نشده کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

قدمی، س. م. (۱۳۸۵)، "بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سدهای ایلانجق و شورکال شمال خراسان)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

قهرمان، ب. و سپاسخواه، ع. (۱۳۸۴)، "مدیریت بهره‌برداری از مخازن سدها"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال اول، شماره ۲، صفحه ۱۵-۱.

کارآموز، م. و کراچیان، ر. (۱۳۸۲)، "برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.

کارآموز، م. و کراچیان، ر. (۱۳۸۳)، "بهره‌برداری بهینه کمی و کیفی از مخازن سدها با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک غیرقطعی"، چکیده مقالات اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، صفحه ۲.

محمدرضاپورطبری، محمود، (۱۳۸۲)، "الگوریتم بهینه بهره‌برداری از منابع سطحی و زیرزمینی جنوب تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مسافر، م. (۱۳۸۱)، "تسگردهای عددی در پاسخ‌یابی پرسشهای مهندسی با برنامه‌ریزی متلب"، انتشارات متفکران، چاپ اول، تهران.

- determined multiple cropping patterns”, *Irrigation Science*, 21, pp.27-137.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A.R. (2004), “Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply”, *Irrigation and Drainage*, 53, pp.39-54.
- Karamouz, M., Houck, M.H. and Delleur, J.W. (1992), “Optimization and simulation of multiple reservoir system”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 118(1), pp. 71-81.
- Mohan, S. and Rapure, D.M. (1992), “Multiobjective analysis of multireservoir system”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 118(4), pp. 356-370.
- Mousavi, S.J., Zanoosi, A.G. and Afshar A. (2004), “Optimization and simulation of a multiple reservoir system operatui”, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 53, pp. 409-424.
- Rao, N.H., Sarma, P.B.S. and Chander, S. (1988), “A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture”, *Agricultural Water Management*, 113, pp.25-32.
- Teegavarapu, R.S.V. and Simonovic, S.P. (2000), “Short-term operation model for coupled hydropower reservoirs”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(2), pp. 98-106.
- Vaux, H.J. and Pruitt, W.O. (1983), “Crop water production function”, In: D. Hillel (ed.), *Advances in irrigation*, No. 3, Academic Press, New York, pp.61-97.
- Vedula, S. and Nagesh Kumar, D. (1996), “An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops”, *Water Resources Research*, 32(4), pp.1101-1108.
- Vedula, S., Mujumdar, P.P. and Sekhar, G. C. (2005), “Conjunctive use modeling for multicrop irrigation”, *Agricultural Water Management*, 73, pp. 193-221.
- Wardlaw, R. and Sharif, M. (1999), “Evaluation of Genetic Algorithms for optimal reservoir system operation”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(1), pp. 25-33.
- مهندسين مشاور آب پوی، (۱۳۸۴). “گزارش کشاورزی و اقتصاد کشاورزی طرح بهره‌برداری از منابع آب و خاک رودخانه‌های مرزی زنگلانلو و شورکال”، جلد نهم.
- مهندسين مشاور آب پوی، (۱۳۸۴). “گزارش هواشناسی طرح بهره‌برداری از منابع آب و خاک رودخانه‌های مرزی زنگلانلو و شورکال”، جلد اول.
- مهندسين مشاور آب پوی، (۱۳۸۴). “گزارش هیدرولوژی طرح بهره‌برداری از منابع آب و خاک رودخانه‌های مرزی زنگلانلو و شورکال”، جلد دوم.
- Braga, B.P.F., Yeh, W.W-G, Becker, L. and Barros, M.T.L. (1991), “Stochastic optimization of multiple-reservoir-system operation”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 117(4), pp. 471-481.
- Chandramouli, V. and Raman H. (2001), “Moltireservoir modeling with dynamic programming and neural networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(2), pp. 89-98.
- Crawley, P.D. and Dandy, G.C. (1993), “Optimal operation of multiple-reservoir system”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 119(1), pp. 1-17.
- Dariane, A.B. and Hughes T.C. (1991), “Application of crop yield function in reservoir operation”, *Water Resources Bulletin*, 27(4), pp.649-656.
- Doorenbos, J. and Kassm, A.H. (1979), “Yield response to water”, *Irrigation and Drainage Paper*, 33, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.
- Faye, R.M., Sawadogo, S., Lishou, C. and Mora-Camino, F. (2003), “Long-term fuzzy management of water resource systems”, *Applied Mathematics and Computation*, 137, pp. 459-475.
- Ghahraman, B. and Sepaskha,h A.R. (1999), “Use of different irrigation water deficit scheme for economic operation of a reservoir”, *Iranian Journal of Science and Technology*, 23(B4), pp.83-90.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A.R. (2002), “Optimal allocation of water irrigation a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-