



## Conjunctive Use of Surface Water and Grounwater for Optimal Water Allocation From Reservoir Under Water Shortage (Case Study: Yamchi Reservoir Dam, Ardabil)

A. Kanooni<sup>1\*</sup>, S.M. Hashemi Shahedany<sup>2</sup>  
and S. Anvari<sup>3</sup>

### Abstract

In this research, a deterministic algorithm based on the Genetic Optimization (GA) method was used for optimal water allocation to different uses from surface and underground resources in the operation of Yamchi reservoir dam in Ardabil province. The objective function in the optimized model was to maximize the profit of water allocated to the agricultural sector according to the selected cropping pattern, and the supply of drinking and environmental requirements were considered as a constraint in the optimal model. The rainfall and inflow to the reservoir are discretized due to their non-deterministic property and then for different values of the initial volume of the reservoir at the beginning of the operation period and any logical combination of rainfall and inflow to the reservoir (under the three scenario: minimum, normal and maximum) the optimal model was implemented. The results showed that in the minimal and normal scenario with increasing the initial volume of the reservoir, the profit was increased, but in maximum scenario, the initial volume of the reservoir had no effect on the profit. The smaller the initial volume of the reservoir the lower the relative yield of the products, which was most evident in the minimum scenario. Also, the amount of water allocated from groundwater resources to agricultural sector varies from 3.1 to 7.9 MCM, which corresponds to the potential for extracting water through utilization wells.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Optimal Allocation, Surface and Underground Water, Water Resources Shortage, Yamchi Reservoir Dam.

Received: March 13, 2018

Accepted: October 14, 2018

## استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در تخصیص بهینه آب از سد مخزنی در شرایط کمبود منابع آب (مطالعه موردی: سد مخزنی یامچی، اردبیل)

امین کانونی<sup>۱\*</sup>، سیدمهدی هاشمی شاهدانی<sup>۲</sup> و صدیقه انوری<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش از یک الگوریتم قطعی مبتنی بر روش بهینه‌سازی ژنتیک (GA) به منظور تخصیص بهینه آب از منابع سطحی و زیرزمینی بین مصارف مختلف در بهره‌برداری از سد مخزنی یامچی در استان اردبیل استفاده شده است. تابع هدف در مدل بهینه، حداکثر نمودن سود حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی با توجه به الگوی کشت منتخب می‌باشد به طوری که تأمین نیازهای شرب و زیست‌محیطی به عنوان محدودیت در مدل بهینه در نظر گرفته شد. متغیرهای بارندگی و جریان ورودی به مخزن به دلیل خاصیت غیرقطعی‌شان، گسسته شده و سپس مدل بهینه به ازای مقادیر مختلف حجم ابتدایی مخزن در شروع بهره‌برداری و هر ترکیب منطقی از بارندگی و جریان ورودی به مخزن (تحت سه سناریو حداقل، نرمال و حداکثر) اجرا شد. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی حداقل و نرمال با افزایش حجم ابتدایی مخزن، سود حاصله بیشتر شده ولی در سناریو حداکثر، حجم ابتدایی مخزن تأثیری بر سود ندارد. هر چه حجم ابتدایی مخزن کم باشد عملکرد نسبی محصولات کم بوده که این موضوع در سناریو حداقل بیشتر نمایان است. همچنین حجم آب قابل تخصیص از منابع آب زیرزمینی به بخش کشاورزی بین ۳/۱ تا ۷/۹ میلیون متر مکعب متغیر بوده که با پتانسیل برداشت آب از طریق چاه‌های بهره‌برداری مطابقت دارد.

**کلمات کلیدی:** آب سطحی و زیرزمینی، الگوریتم ژنتیک، تخصیص بهینه، سد مخزنی یامچی، کمبود منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۶/۲۲

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: amin.kanooni@uma.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و

علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

(2000) Paul et al.، (2002) Kipkorir et al. و (2004) Mujumdar et al. اشاره نمود. در ادامه نمونه‌ای از جدیدترین تحقیقات در این زمینه به همراه نتایج آنها ارائه می‌شود.

(2005) Vedula et al. یک مدل برنامه‌ریزی خطی به منظور استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تخصیص آب به محصولات کشاورزی واقع در پایین‌دست سد مخزنی توسعه دادند. حداکثرسازی مجموع عملکرد نسبی تمام گیاهان کشت شده به عنوان تابع هدف مدل مد نظر قرار گرفت و سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی تهیه گردید. (2006) Nagesh Kumar et al. به منظور تخصیص آب به گیاهان مختلف از یک سد مخزنی تک منظوره مطالعه‌ای را انجام دادند. در این مطالعه اطلاعاتی از قبیل جریان ورودی به مخزن، میزان بارندگی در طول فصل، میزان رطوبت موجود در خاک در هر واحد زراعی، خصوصیات خاکشناسی منطقه، ویژگی‌های زراعی گیاهان از جمله ضرایب حساسیت به تنش آب، با هدف حداکثر نمودن عملکرد نسبی گیاهان کل تحت کشت سد مخزنی، وارد مدل‌سازی شده و میزان آب قابل تخصیص به هر گیاه در مراحل رشد آنها بصورت بهینه بدست آمد. (2009) Moghaddasi et al. در مطالعه دیگری بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط خشکسالی را از سد و شبکه آبیاری زاینده‌رود اصفهان مورد مطالعه قرار دادند. مراحل مختلف رشد گیاهان و حساسیت آنها به تنش آبی در مدل‌سازی تخصیص لحاظ گردید و سه زیرمدل جهت تخصیص بهینه آب در مراحل مختلف رشد هر گیاه، بین گیاهان مختلف و بین زیر شبکه‌های آبیاری تهیه شد. نهایتاً نتایج روش بهینه‌سازی با نتایج روش متداول تخصیص آب در منطقه که بر اساس اعمال یکسان کمبود آب استوار بود مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که با اعمال روش بهینه‌سازی ۴۲ درصد درآمد بیشتری عاید کشاورزان می‌گردد. با استفاده از مدل حل اختلاف نش، قاعده بهره‌برداری برای مخازن توسط (2009) Karamuz et al. استخراج شد. برای این منظور مدل بهینه به دو قسمت قطعی و تصادفی تقسیم شد. در ابتدا بهینه‌سازی قطعی انجام و سپس با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان ( $SVM^1$ ) قاعده بهره‌برداری از روی نتایج بهینه‌سازی قطعی بدست آمد. (2009) Ghadami et al. بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعه و مدل بهینه توسعه داده شده را برای یک سیستم دو مخزنی در شمال خراسان رضوی اجرا نمودند. نتایج حاصل از اجرای مدل برای ترکیب متفاوتی از کلاس ابتدایی مخزن، رژیم رودخانه و بارندگی نشان داد که در شرایط خشکسالی تخصیص آب از مخزن به کلاس ابتدایی مخزن وابستگی دارد. همچنین در شرایط خشکسالی عملکرد نسبی محصولات تحت کشت مخزن دوم، کاهش بیشتری داشت. Alimohammadi and

کاهش جریان ورودی به مخازن سدهای ذخیره آب به دلیل خشکسالی و تغییر اقلیم از یک طرف و تغییر در الگوی نیازهای پایین‌دست آنها از طرف دیگر، تناسب بین عرضه و تقاضا را در سامانه‌های منابع آب چند منظوره بهم زده و عملکرد بهره‌برداری سدهای مخزنی را با مشکل مواجه نموده است. در چنین شرایط، مدیریت همزمان عرضه و تقاضا و تبیین سیاست‌های بهره‌برداری بر مبنای کاهش ریسک شکست مخزن، می‌تواند راه حل مناسبی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب باشد. در میان بخش‌های مختلف مصرف، بخش کشاورزی به دلیل حجم بالای آب مورد تقاضا و تغییرات تقاضای آن در زمان و مکان، از اهمیت بالایی برخوردار است. توزیع و تحویل آب به اراضی کشاورزی در پایین‌دست سدهای مخزنی از طریق شبکه‌های آبیاری صورت می‌گیرد که با مجموعه‌ای از کانال‌های اصلی و فرعی و سازه‌های هیدرولیکی وظیفه تنظیم و تحویل آب را برعهده دارند. تقاضا در قسمت‌های مختلف شبکه‌های آبیاری در طول یک دوره مشخص، از یک طرف به دلیل تغییرات شرایط آب و هوایی و ویژگی‌های رشد و نمو محصول و از طرف دیگر به دلیل تغییرات مکانی بافت خاک و نوع محصول متغیر می‌باشد. لذا به منظور بهبود بهره‌وری مصرف آب و مدیریت بهینه آن در شبکه‌های آبیاری، توزیع و تحویل آب چه از لحاظ زمانی و چه از لحاظ مکانی باید متناسب با نیازهای واحدهای مختلف و منابع آب در دسترس باشد. به عبارت دیگر، توزیع و تحویل آب در اراضی زراعی طوری برنامه‌ریزی شود که بین عرضه و تقاضا مطابقت مناسبی برقرار گردد.

در رابطه با بهره‌برداری از سدهای مخزنی و تخصیص آب از آن برای مصارف مختلف شرب، صنعت و کشاورزی در شرایط محدودیت آب و همچنین در خصوص استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف مصرف، مطالعات متعددی انجام شده است. تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه تخصیص و توزیع بهینه آب در بخش کشاورزی انجام شده است به جنبه‌های مختلف آن از جمله تعیین الگوی کشت بهینه، تخصیص بهینه آب بین محصولات مختلف در طول یک فصل زراعی، توزیع آب در طول دوره رشد یک محصول و یا محصولات مختلف، تخصیص بهینه آب با در نظر گرفتن مخزن و سیاست‌های بهره‌برداری آن و غیره پرداخته است که می‌توان به پژوهش‌های اولیه (1971) Dudley et al.، (1973) Stewart et al.، (1974) Dudley and Burt، (1979) Matanga and Marino، (1981) Bras and Cordova، (1982) Yaron and Dinar، (1990) Rao et al.، (1993) Mannocchini and Sunantara and Ramirez، (1994) Mecarelli، (1997) Sunantara and Ramirez

عمومی انجام شد. هدف پژوهش حداکثرسازی آب اختصاص داده شده به چهار بخش بوده است. نتایج تحقیق نشان داده است که تفاوت آشکاری بین مقدار تخصیص بدست آمده از مدل و مقدار واقعی تخصیص یافته وجود دارد. تخصیص واقعی آب به حدی بوده که عرضه آب به برخی بخش‌ها کم و به دیگر بخش‌ها بیش از حد نیاز بوده است. (Safavi and Rezaei (2015) از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز (FNN<sup>5</sup>-GA) برای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت نجف‌آباد اصفهان استفاده کردند. در بخش شبیه‌سازی از سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی برای در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و عدم قطعیت داده‌های مربوطه و در بخش بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل مورد استفاده اهمیت اثرات متقابل منابع آب سطحی و زیرزمینی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در نواحی نیمه‌خشک را به خوبی تشریح می‌کند. (Wu et al. (2016) طی مطالعه‌ای در حوضه رودخانه هیبه<sup>6</sup> در چین که بین کشاورزی و اکوسیستم در استفاده از منابع آب رقابت وجود دارد. مدل جامع بهینه مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی را ارائه دادند. بر اساس مدل جامع آب زیرزمینی و سطحی GSFLOW استفاده تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل جایگزین DYCORS انجام شد. بهینه‌سازی بر مبنای مدل جایگزین، یک برنامه زمانی متفاوتی در انحراف آب در مقایسه با وضع موجود ارائه داد که بیانگر نقش بحرانی استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در چرخه آب بوده است. نتایج نشان داد به دلیل اینکه بهبود اکوسیستم در نواحی پایین حوضه، هزینه یکسانی با تخریب اکوسیستم در نواحی میانی حوضه دارد، برنامه‌ریزی جریان آب در حوضه مورد مطالعه ممکن است در شرایط کنونی مناسب نباشد. (Safavi and Falsafioun (2017) از الگوریتم ژنتیک (GA) برای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با دو سناریو کم آبیاری در شبکه آبیاری نکوآباد واقع در حوضه زاینده‌رود در اصفهان استفاده کردند. کاهش مصرف آب، تعیین الگوی کشت بهینه، کاهش افت سالانه سطح آب زیرزمینی و حداکثرسازی سود کشاورزان منطقه از اهداف مطالعه بوده است. سناریو اول بیانگر شرایط نرمال از نظر منابع آب و پارامترهای اقلیمی بوده و سناریو دوم یک برنامه آبیاری پنج ساله‌ای را در منطقه در نظر می‌گرفت. نتایج نشان داد که مصرف آب در سناریو اول حدود ۲۴ میلیون متر مکعب کاهش یافته و سود کشاورزان هم ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. در سناریو دوم کاهش در سود کشاورزان در شرایط نرمال و مرطوب کمتر از شرایط خشکی بوده است. به منظور بهبود مدیریت استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی، الگوریتم جدیدی به نام f-MOPSO توسط (Rezaei et al. (2017) توسعه داده شد. الگوریتم پیشنهادی در بهینه کردن مقادیر تابع هدف برای هر نقطه از فضای تصمیم در هر تکرار، از یک سیستم استنتاج

(Hoseinzadeh (2010) بهره‌برداری تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی حوزه اهر را با هدف به حداقل رساندن افت تراز آبخوان، مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، ابتدا رفتار آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبیه‌ساز MODFLOW در قالب ماتریس‌های پاسخ واحد، مشخص و سپس مقادیر بدست آمده در یک مدل بهینه‌ساز خطی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان افت تراز میانگین در حالت استفاده تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی کمتر از مقدار آن در شرایط استفاده از آب زیرزمینی می‌شود. (Khademi et al. (2011) طی تحقیقی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن را با استفاده از سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP<sup>2</sup>) و الگوریتم بهینه‌سازی بازپخت (SA<sup>3</sup>) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم ترکیبی SOP-SA با توزیع کمبودها در ماههای مختلف، شدت کمبودها در دوره‌های خشکسالی را نسبت به الگوریتم SOP کاهش داده است. (Mohammadrezapour (2011) با هدف بهبود وضعیت دریاچه ارومیه و با توجه به منابع آبی موجود و نحوه تأمین نیازهای شرب و کشاورزی، مدل بهینه‌سازی چند هدفه‌ای به منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص با توجه به محدودیت‌های موجود و با هدف حداکثر نمودن تأمین نیازهای داخل حوضه و افزایش آب انتقالی از حوضه کلاس به حوضه گدار (دریاچه ارومیه) و همچنین کاهش آب خروجی از مرز تدوین نمود. نتایج نشان داد که با اعمال برنامه‌های بهینه بهره‌برداری تدوین شده، می‌توان حجم قابل توجهی از منابع آبی داخل حوضه را به منظور احیای منابع آبی به بیرون از حوضه انتقال داد و از خروج آب توسط رودخانه‌های مرزی به میزان زیادی جلوگیری نمود. (Kanooni and Monem (2013) از یک نگرش مرحله‌ای به منظور بهینه‌سازی تخصیص و توزیع آب در سطح شبکه آبیاری استفاده نمودند. در تحقیق ایشان، سه زیرمدل مختلف با هدف حداکثرسازی سود و بهبود عملکرد بهره‌برداری شبکه آبیاری تهیه گردید و با روشهای بهینه‌سازی کلاسیک و فراکوشی (ژنتیک)، متغیرهای تصمیم مورد نظر تعیین شدند. (Safavi and Esmikhani (2013) بهره‌گیری از یک مدل ماشین پشتیبان بردار (SVMs) به عنوان مدل شبیه‌ساز و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA<sup>4</sup>) برای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه زاینده رود در اصفهان استفاده کردند. مدل تلفیقی تهیه شده برای سه سناریوی مختلف اجرا شد. نتایج نشان داد دقت مدل SVMs به عنوان یک مدل شبیه‌ساز برای استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی خوب بوده و امکان کاهش کمبود آب برای شبکه آبیاری با بکارگیری از مدل پیشنهاد شده SVMs-GA وجود دارد. تخصیص بهینه آب به یک بخش شهری در نیجریه با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی توسط (Ezenwajji et al. (2014) مورد مطالعه قرار گرفت. تحقیق آنها در چهار بخش عمده: مسکونی، تجاری، مؤسسات دولتی و نهادهای

فازی استفاده می‌کند. نتایج اجرای مدل برای دشت نجف‌آباد نشان داد که الگوریتم f-MOPSO عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم معمول MOPSO<sup>7</sup> دارد و تقریباً تقاضای مورد نظر را با حداقل تغییرات ماهانه و سطح آب زیرزمینی تجمعی، تأمین می‌نماید. (Rezaei et al. (2017)

یک الگوریتم چندهدفه بر مبنای سیستم فازی برای حل مسأله واقعی با سه هدف در استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را به کار بردند. اجرای مدل برای یک دوره ده ساله نشان‌دهنده افزایش راندمان آبیاری (کاهش تلفات)، کاهش مصرف آب در واحد سطح و افزایش بهره‌وری آب در مقایسه با شرایط بهره‌برداری واقعی در منطقه مورد مطالعه بوده است. همچنین محصولات گندم و برنج بیشترین پیاز کمترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص داد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی اردبیل در حدود ۲۵ کیلومتری شهر اردبیل و در موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵ دقیقه شمالی و ۳۸ درجه و ۴ دقیقه شمالی واقع شده است. حجم مفید مخزن ۸۰ میلیون متر مکعب و ارتفاع آن از بستر رودخانه ۶۱ متر می‌باشد. بررسی گزارش‌های اولیه نشان می‌دهد، این سد باید علاوه بر تأمین حدود ۲۰ میلیون متر مکعب در سال برای مصارف شرب و حدود ۱/۶ میلیون متر مکعب نیاز زیست‌محیطی، آب مورد نیاز حدود ۱۳ هزار هکتار اراضی کشاورزی منطقه را در قالب سه واحد عمرانی مختلف تحت عنوان شبکه آبیاری یامچی تأمین نماید (بی‌نام، ۱۳۸۳). در حال حاضر به دلیل محدودیت منابع آب و افزایش تقاضای آب شرب به میزان ۳۰ میلیون متر مکعب در سال، بهره‌برداری از شبکه آبیاری تنها در واحد عمرانی اول انجام می‌پذیرد. مساحت تحت پوشش این واحد عمرانی هم اکنون ۸۸۲۰ هکتار (۶۸۰۰ هکتار اراضی توسعه و ۲۰۲۰ هکتار اراضی بهبود) می‌باشد که حدود ۵۲۰۰ هکتار از اراضی توسعه و ۲۰۰۰ هکتار از اراضی بهبود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. علاوه بر تأمین آب اراضی شبکه آبیاری توسط سد، آب مورد نیاز اراضی حبابه‌بر خارج از شبکه آبیاری نیز بر عهده سد بوده که وسعت آن ۵۸۰ هکتار است. الگوی کشت محصولات کشاورزی در شرایط موجود، شامل گندم و جو (به ترتیب با تراکم ۳۰ و ۱۰ درصد) به عنوان کشت پاییزه که به ترتیب در اواخر مهر و اوایل آبان کشت شده و در اواخر خرداد و اوایل تیرماه برداشت می‌شوند، و سیب‌زمینی و لوبیا (به ترتیب با تراکم ۴۰ و ۲۰ درصد) به عنوان کشت بهاره که به ترتیب در اواخر فروردین و اوایل اردیبهشت‌ماه کشت شده و در اواخر شهریور برداشت می‌شوند می‌باشد. خاک اراضی شبکه دارای بافت متوسط با رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب برابر ۰/۳ و ۰/۱۵ حجمی است. شکل ۱ موقعیت سد مخزن یامچی (اردبیل) و شبکه آبیاری تحت پوشش آن را نشان می‌دهد.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی تخصیص آب در بخش‌های مختلف مصرف عمدتاً بصورت توأم با تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن ذخیره آب همراه بوده و هدف اصلی در این نوع مطالعات، دستیابی به حداکثر سود و یا حداقل کردن خسارت با ملاحظه محدودیت‌های موجود در منابع آب و محدودیت‌های فیزیکی مخزن می‌باشد. در مخازن چندهدفه که علاوه بر نیازهای کشاورزی اهداف دیگری همچون تأمین مصارف شرب، صنعت و کنترل سیلاب در بهره‌برداری از مخازن نقش ایفا می‌کنند، اهداف متفاوتی در مدل‌سازی وارد می‌شوند. همچنین در استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخصیص منابع آب با نگرش حداقل‌سازی افت سطح سفره آب زیرزمینی در مدل‌سازی مد نظر قرار می‌گیرد. بنابراین در تخصیص آب از سدهای مخزنی که برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند داشتن اطلاعات کافی از وضعیت فیزیکی و هیدرولوژیکی مخزن، خصوصیات هیدروپنمیک سفره آب زیرزمینی، مقادیر نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی رودخانه، نوع و خصوصیات زراعی گیاهان تحت کشت، شرایط و ویژگی‌های خاک‌شناسی اراضی تحت آبیاری، اطلاعات هواشناسی، نیاز آبی گیاهان و غیره برنامه‌ریزی بهینه تخصیص و توزیع آب در استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را مقدور می‌سازد.

بررسی گزارشات مطالعه و اجرای سد مخزنی و شبکه آبیاری یامچی (منطقه مورد مطالعه) نشان می‌دهد که بهره‌برداری از این سد بر اساس بررسی‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز منتهی به محل احداث سد و آب مورد تقاضای پایین دست آن در زمان احداث، و آمار و اطلاعات سری تاریخی استوار است. تغییر در میزان و الگوی تقاضا و تغییر در جریان ورودی به مخزن در دوره بهره‌برداری (شرایط بعد از احداث سد) بازنگری در دستورالعمل‌های بهره‌برداری سد را ضروری نموده است.

کشاورزی، مبنای مدل‌سازی قرار گرفت و نیاز بخش‌های دیگر به صورت قید در مدل وارد شد. به دلیل اینکه حساسیت گیاهان به تنش آب در دوره‌های مختلف رشد متفاوت است و عملکرد هر گیاه به میزان آب تأمین‌یافته آن بستگی دارد، از مدلی که بتواند حداکثر سود اقتصادی را داشته باشد استفاده شد. در این مدل سود حاصل از تخصیص آب به محصولات مختلف کشاورزی در سه ناحیه آبیاری (اراضی توسعه، بهبود و حقایه‌دار) در طول یک سال پیشینه شده و سیاست رهاسازی آب از سد به تناسب آن و با در نظر گرفتن نیازهای بخش شرب و زیست‌محیطی تعیین گردید. تابع هدف مورد نظر به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\text{MAX: } \sum_{f=1}^{Nf} \sum_{c=1}^{Nc} A_{c,f} [B_c \left( \frac{Y_a}{Y_p} \right)_{c,f} - C_c] - \text{Penalty} \quad (1)$$

داده‌های مربوط به محصولات کشت شده در منطقه از جمله عملکرد حداکثر، تاریخ کاشت و برداشت از گزارشات شرکت بهره‌برداری و نگهداری شبکه آبیاری یامچی و اطلاعات محلی، مقادیر هزینه تولید در واحد سطح با توجه به مجموع هزینه‌های تولید محصول (دفتر آمار و فن‌آوری اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۵) و قیمت واحد فروش محصول نیز بر اساس گزارش مرکز آمار ایران (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵) جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ پارامترهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- روش تحقیق

با توجه به تأمین قطعی نیازهای بخش شرب و زیست محیطی در تخصیص آب از سد مخزنی یامچی، تأمین آب مورد نیاز بخش

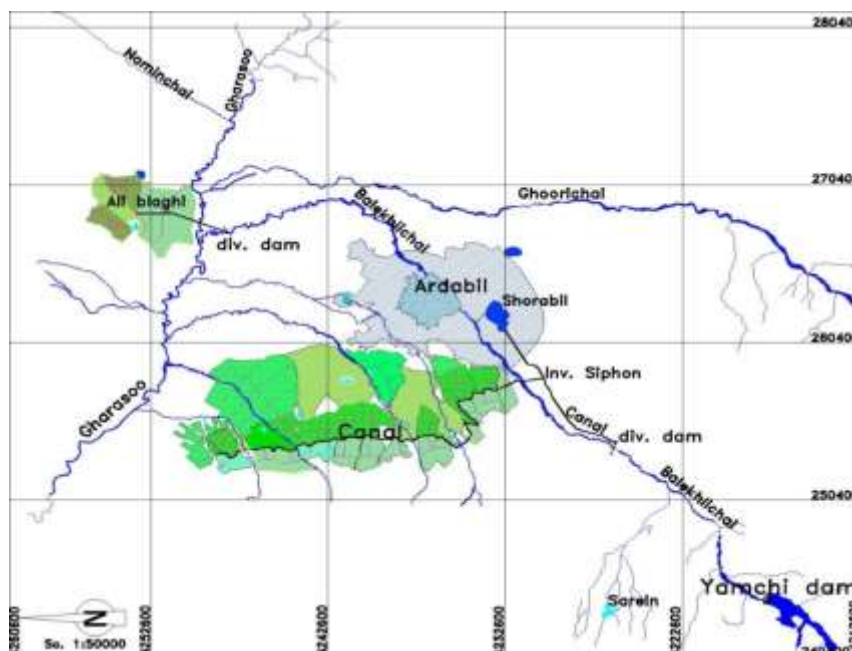


Fig. 1- Yamchi dam and irrigation network map

شکل ۱- نقشه سد و شبکه آبیاری یامچی

Table 1- Growing period (day) and economic parameters of cultivated crops in Yamchi irrigation network  
جدول ۱- دوره رشد (روز) و پارامترهای اقتصادی محصولات کشت شده در شبکه آبیاری یامچی

Crop	Stages(days)				Max Yield (t/ha)	Marketing Price (Rials/kg)
	initial	flowering	yield formation	ripening		
Wheat	30	140	40	30	6.1	12700
Barley	30	120	50	30	4.6	10000
Potato	20	25	55	40	36.0	6500
Bean	20	35	45	20	3.0	4500

متغیرهای حالت و قیدهای مربوط به تخصیص آب به گیاهان مختلف نیز به شرح زیر است:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{s=1}^{N_s} \left[ 1 - Ky_s \left( 1 - \frac{ETa_s}{ETp_s} \right) \right] \quad (2)$$

$$ETa_t = \begin{cases} ETp_t & \text{if } \theta a > (1-p) \times (\theta f - \theta w) \times Z \\ \frac{(\theta_t - \theta w) \times Z_t + RA_t + IR_t}{(1-p) \times (\theta f - \theta w) \times Z_t} \times ETp_t & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta a_t = (\theta_t - \theta w) \times Z_t + RA_t + IR_t \quad (4)$$

$$\theta_{t+1} \times Z_{t+1} = \theta_t \times Z_t + IR_t + RA_t - ETa_t - DP_t + \theta c \times (Z_{t+1} - Z_t) \quad (5)$$

$$DP_t = \begin{cases} (\theta_{t+1} - \theta f) \times Z_t & \theta_{t+1} > \theta f \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$ETp_t = Kc \cdot ETo_t \quad (7)$$

$$\theta_t \geq \theta w \quad (8)$$

$$\frac{ETa_s}{ETp_s} \geq 0.5 \quad (9)$$

سینوسی پیشنهاد شده توسط Borg and Grimes (1986) استفاده به عمل آمد. رطوبت اولیه خاک برابر رطوبت ظرفیت مزرعه و رطوبت لایه‌های زیرین خاک قبل از کاشت نیز برابر رطوبت نقطه پژمردگی دائم گیاه در نظر گرفته شد. به منظور تطابق با دور آبیاری محصولات، گام زمانی (t) به صورت ده روزه در نظر گرفته شد. شرح بیشتر این روابط در مرجع Ghahraman and Sepaskhah (2004) قابل دسترس است.

مجموع جریمه‌های مربوط به تخطی هر کروموزوم از هر یک از محدودیت‌های مسئله به وسیله رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\text{Penalty} = \sum_{i=1}^{ni} K[1 + G_i^2(x)] \quad (10)$$

که  $G_i^2(x)$  مقدار تخطی از قید نام (قیدهای مربوط به رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و حجم آب مخزن) و K ضریب جریمه است که با استفاده از آزمون و خطا محاسبه می‌شود. متغیرهای حالت و قیدهای مربوط به رهاسازی آب از مخزن سد به شرح زیر است:

(۱۱)

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - EVP_t - Dz_t - Dsh_t - Spill_t$$

$$R_t = r \times R1_t + R2_t + R3_t \quad (12)$$

$$S_t \geq S_{min} \quad (13)$$

$$Spill_t = \begin{cases} S_t - S_{max} & \text{if } S_t > S_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

که A مساحت تحت کشت محصول (هکتار)،  $Y_p$  و  $Y_a$  به ترتیب عملکرد واقعی و پتانسیل محصول (کیلوگرم در هکتار)، B و C به ترتیب درآمد و هزینه محصول (ریال در هکتار)، Kc ضریب رشد گیاهی،  $ETo_t$  تبخیرتعرق گیاه مرجع، p جزء رطوبت بحرانی گیاه،  $\theta$  رطوبت خاک (متر در متر)، Z عمق توسعه ریشه گیاه (میلیمتر)، IR مقدار آب آبیاری (میلیمتر)، RA میزان بارندگی در منطقه (میلیمتر)،  $ETa_t$  تبخیرتعرق واقعی (میلیمتر)،  $ETp_t$  تبخیر-تعرق پتانسیل (میلیمتر)، DP نفوذ عمقی (میلیمتر) و  $\theta c$  رطوبت ثابت لایه‌های زیرین قبل از کاشت (متر در متر)،  $\theta f$  رطوبت ظرفیت مزرعه (متر در متر)،  $\theta w$  رطوبت نقطه پژمردگی دائم (متر در متر)،  $\theta a$  رطوبت در دسترس خاک (میلیمتر)،  $ETa_s$  تبخیرتعرق واقعی دوره رشد s (میلیمتر)،  $ETp_s$  تبخیرتعرق پتانسیل دوره رشد s (میلیمتر) Kc ضریب حساسیت به تنش آب، c شمارنده محصول،  $Nc$  تعداد کل محصولات، s بیانگر دوره رشد،  $Ns$  تعداد مراحل رشد، f شمارنده واحد کشاورزی،  $Nf$  تعداد کل واحدهای کشاورزی، t بیانگر گام زمانی و Penalty جریمه مربوط به تخطی از قیدها است.

مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش پنمن-مانتیت-فائو (Allen et al., 1998) و با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اردبیل محاسبه و ضرایب گیاهی و جزء رطوبت بحرانی هر گیاه از نشریه فائو (FAO-56) و ضرائب حساسیت به تنش آب هر گیاه در هر مرحله رشد نیز از نشریه فائو (FAO-33) استخراج شد. برای تعیین عمق توسعه ریشه گیاه در هر گام زمانی از یک مدل

که  $S$  حجم ذخیره مخزن (متر مکعب)،  $Q$  حجم جریان ورودی به مخزن (متر مکعب)،  $P$  حجم بارش بر سطح دریاچه مخزن (متر مکعب)،  $EVP$  حجم آب تبخیر شده از مخزن (متر مکعب)،  $Spill$  حجم آب سرریز شده از مخزن (متر مکعب)،  $R$  حجم آب رها شده از مخزن به بخش کشاورزی (متر مکعب)،  $R1$  حجم آب تخصیص یافته به اراضی توسعه شبکه آبیاری (متر مکعب)،  $R2$  حجم آب تخصیص یافته به اراضی بهبود شبکه آبیاری (متر مکعب)،  $R3$  حجم آب تخصیص یافته به اراضی کشاورزی حق آبه بر (متر مکعب)،  $S_{min}$  حداقل حجم آب مخزن (متر مکعب)،  $S_{max}$  حداکثر حجم آب مخزن (متر مکعب)،  $Dz$  حجم آب مربوط به نیازهای زیست محیطی (متر مکعب)،  $D_{sh}$  حجم آب مربوط به نیاز شرب (متر مکعب)،  $E_c$  راندمان انتقال آب (اعشار) و  $\tau$  نسبتی از نیاز آبیاری اراضی بخش توسعه در شبکه آبیاری است که از طریق سد مخزنی تأمین می‌شود.

حجم آب رها شده از مخزن برای تأمین آب مورد نیاز بخش کشاورزی ( $R$ ) که برابر مقدار تجمعی حاصل ضرب مقدار آب آبیاری ( $IR$ ) و مساحت کشت شده هر محصول ( $A$ ) در هر گام زمانی است به سه بخش مختلف شامل اراضی توسعه، بهبود و حقایبه‌دار توزیع می‌شود. آب مورد نیاز اراضی توسعه و حقایبه‌دار، با شروع بهره‌برداری سد (اول اردیبهشت) تا انتهای شهریور از سد تأمین می‌شود ولی اراضی بهبود تنها در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد آب مورد نیاز خود را از سد دریافت می‌کنند. با توجه به اینکه حجم آب ذخیره شده مخزن محدود است، جهت دستیابی به حداکثر سود ممکن، استفاده از آب زیرزمینی محدود شبکه ضروری بوده و از طرف دیگر برای اجتناب از استفاده نامحدود و بدون کنترل از آب زیرزمینی، سیاست استفاده تلفیقی برای نسبت های از قبل تعیین شده متفاوتی از آب زیرزمینی و سطحی ( $\tau$ )، مد نظر قرار می‌گیرد. این نسبت که توسط برنامه‌ریزان تخصیص منابع آب در ابتدای سال قابل تعیین است تنها برای تأمین آب مورد نیاز اراضی توسعه شبکه آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آب مورد نیاز بخش شرب برابر مقدار ثابت ۳۰ میلیون متر مکعب در سال (طبق برنامه تخصیص آب سد یامچی مصوب وزارت نیرو) در نظر گرفته شد و توزیع زمانی آن نیز از داده‌های مصرف آب شهری در سال‌های گذشته استخراج گردید. حجم آب مورد نیاز بخش زیست محیطی نیز به مقدار ثابت ۵۰ لیتر در ثانیه (گزارش مطالعات سد و شبکه آبیاری یامچی) در نظر گرفته شد. همچنین حجم آب تبخیر شده از مخزن به صورت تابعی از سطح آب مخزن از روابط حجم-سطح-ارتفاع آب مخزن بدست آمد. حداکثر حجم ذخیره مخزن ( $S_{max}$ ) برابر ۸۲ میلیون متر مکعب و حداقل حجم ذخیره مخزن ( $S_{min}$ ) برای

اطمینان از تأمین نیازهای بخش شرب برابر ۱۵ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شد که منطبق بر برنامه بهره‌برداری سد می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه حداکثرسازی سود حاصل از تخصیص آب به محصولات مختلف بخش کشاورزی به عنوان تابع هدف مدل‌سازی در نظر گرفته شد لذا متغیرهای تصمیم در فرآیند بهینه‌سازی، آب اختصاص یافته به تک تک محصولات در گام‌های زمانی مختلف بوده و از این طریق آب رها شده از سد برای مصارف کشاورزی در سه واحد زراعی مختلف، حجم آب خروجی از مخزن، حجم آب ذخیره مخزن، تبخیر و آب سرریز شده از آن در هر گام زمانی قابل محاسبه خواهد بود. همچنین، حجم آب اختصاص یافته به هر گیاه و سود بهینه شبکه به عنوان نتایج تحقیق بوده که در فرآیند مدل‌سازی بدست می‌آید.

با توجه به دوره سه ماهه خواب زمستانی محصولات (آذر، دی و بهمن)، شروع گام زمانی از اول اسفند در نظر گرفته شد و بنابراین کل سال به ۲۷ گام زمانی تقسیم شد. با در نظر گرفتن طول دوره رشد گیاهان، تعداد کل متغیرهای تصمیم مساله ۱۰۸ عدد بدست آمد. با توجه به استفاده از الگوریتم ژنتیک دودویی، از ۵ بیت برای نمایش مقدار کدگذاری شده متغیرهای تصمیم استفاده شد و بدین ترتیب کروموزومی به طول ۵۴۰ بیت بطور تصادفی تشکیل گردید. با تشکیل کروموزوم، تعداد معینی جمعیت اولیه انتخاب و کدنویسی مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک دودویی در محیط MATLAB انجام شد. برای این کار مقادیر تصادفی برای هر بیت از کروموزوم از اعداد صفر و یک انتخاب و سپس با توجه به دامنه قابل قبول متغیرهای تصمیم به مقادیر واقعی تبدیل شدند. برازش تابع هدف بر اساس معادله ۱ انجام گرفت. برای منظور نمودن قیودات از تابع جریمه برای تخطی از هر یک از قیودات استفاده شد. با اعمال پارامترهای الگوریتم ژنتیک بصورت پیش فرض (نرخ جهش، تزویج، بعد جامعه) مدل اجرا شد و سپس با سعی و خطا اقدام به تعیین مقادیر مناسب آن پارامترها گردید. در نهایت نرخ جهش برابر ۰/۶ درصد، احتمال تزویج ۰/۶۵ و تعداد کروموزوم ۳۰ عدد بدست آمد.

با توجه به خاصیت غیر قطعی متغیرهای بارندگی و جریان ورودی به مخزن، اقدام به گسسته‌سازی آنها گردید. بارندگی با استفاده از شاخص خشکسالی SPI به سه رژیم مختلف نرمال، کم‌آبی و پرآبی به ترتیب با ۲۸۷، ۱۸۳ و ۴۴۷ میلی‌متر در سال طبقه‌بندی، و جریان ورودی به مخزن نیز متناسب با جریان حداقل و حداکثر ورودی به مخزن به سه طبقه نرمال، حداقل و حداکثر تقسیم شد. همچنین حجم اولیه مخزن

تخصیص به بخش کشاورزی بسیار اندک بوده و به تبع آن سود نسبی حاصل از تخصیص آب به آن بخش نیز کم خواهد بود. بیشترین مقدار سود نیز در حالتی رخ می‌دهد که حجم اولیه آب مخزن حداکثر باشد. در سناریو حداکثر با بالا رفتن حجم ابتدایی مخزن سود حاصله چندان تغییر نمی‌کند که با توجه به رژیم حداکثر بارندگی و جریان ورودی در این سناریو منطقی به نظر می‌رسد.

عملکرد نسبی محصولات در مقادیر متفاوت حجم‌های اولیه مخزن به ازای تأمین ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد، در سناریوهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. در سناریو حداکثر، عملکرد نسبی محصولات زیاد بوده است ولی در سناریو حداقل و نرمال مقادیر آن کمترین مقدار را داشته است. هر چه حجم ابتدایی مخزن کم باشد عملکرد نسبی محصولات کوچک بوده که این موضوع در سناریو حداقل بیشتر نمایان است. در شرایط کمبود منابع آب (سناریو حداقل و حجم ابتدایی مخزن پایین) کمترین عملکرد نسبی را سیب‌زمینی و لوبیا داشته‌اند.

حجم آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی در همه سناریوها و حالات ابتدایی مخزن (جدول ۳) نشان می‌دهد که کمترین مقدار تخصیص آب از سد به بخش کشاورزی در سناریو حداقل با ۱۸/۷۷۵ میلیون متر مکعب بوده است. این حجم آب تخصیص یافته با توجه به الگو و سطح زیر کشت محصولات کمترین سود را داشته است.

استفاده از آب زیرزمینی محدوده شبکه آبیاری با اعمال درصد مشخصی از کل آب مورد نیاز اراضی کشاورزی وارد مدل بهینه گردید. نتایج اجرای مدل برای حالات مختلف طبق شکل ۲ نشان می‌دهد که در سناریوهای حداقل و نرمال با افزایش مقادیر حجم‌های اولیه مخزن، حجم آب تخصیص یافته از آب زیرزمینی افزایش یافته است.

به طبقات مختلفی با طول بازه ۱۰ میلیون متر مکعب گسسته شد و سپس بهره‌برداری بهینه از مخزن برای تأمین نیازهای مختلف در ازاء ترکیب مختلفی از ذخیره آب در مخزن در ابتدای فصل، جریان رودخانه و بارندگی اجرا گردید.

با توجه به اینکه در طول سالهای بهره‌برداری سد، حداقل آب ذخیره شده در مخزن حدود ۴۳ میلیون متر مکعب بوده است لذا حجم ابتدایی مخزن به پنج بازه با شاخص ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلیون متر مکعب تقسیم شد. درصد تأمین آب نیاز بخش توسعه شبکه آبیاری از سد که به عنوان پارامتر مهم در الگوی تخصیص بوده است با توجه به مقادیر مجاز برداشت آب طبق پروانه بهره‌برداری چاه‌های کشاورزی (حدود ۷ میلیون متر مکعب) حداکثر ۲۰ درصد نیاز آبی در نظر گرفته شد. بنابراین تعداد کل حالات اجرای مدل با توجه به سناریوهای رژیم بارندگی، جریان رودخانه، حجم اولیه مخزن و درصد تأمین نیاز بخش کشاورزی توسط سد (۱۰۰ و ۸۰ درصد) برابر ۳۰ حالت بوده است.

جدول ۲ مقادیر سود نسبی (تابع هدف) در حالات مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش حجم اولیه مخزن سود نسبی افزایش می‌یابد که این مقدار برای سناریو با تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد، بیشتر از سناریوی دیگر بوده است که بیانگر تطابق آب تخصیص یافته با موجودیت آب مخزن است. رژیم بارندگی و جریان ورودی مخزن نیز تأثیر مستقیمی بر سود نسبی داشته ولی در حجم اولیه بالای مخزن تأثیر آن زیاد نبوده است. کمترین سود نسبی مربوط به حالتی بوده است که حجم اولیه مخزن ۴۰ میلیون متر مکعب، رژیم بارندگی و جریان ورودی حداقل و درصد تأمین نیاز بخش کشاورزی توسط سد ۱۰۰ درصد بوده است که با توجه به هزینه‌ها و درآمد حاصل از تخصیص آب به محصولات مختلف، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد زیرا با در نظر گرفتن نیاز بخش شرب و زیست‌محیطی، مقدار آب قابل

Table 2- Benefit of water allocated to agriculture sector (in Rials)

جدول ۲- مقادیر سود (ریال) حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی

Initial volume of reservoir (MCM)	Percentage of agricultural water supply from dam	Scenario		
		Normal	Max	Min
40	100	1.539E+11	6.559E+11	1.393E+11
	80	3.264E+11	6.813E+11	7.064E+10
50	100	4.331E+11	6.892E+11	1.541E+11
	80	5.607E+11	6.925E+11	2.129E+11
60	100	6.104E+11	6.928E+11	3.638E+11
	80	6.898E+11	6.949E+11	5.248E+11
70	100	6.907E+11	6.940E+11	5.702E+11
	80	6.898E+11	6.983E+11	6.819E+11
80	100	6.968E+11	6.983E+11	6.875E+11
	80	6.986E+11	6.983E+11	6.875E+11



**Table 3- Relative yield of agricultural crops in different scenarios**

جدول ۳- عملکرد نسبی محصولات کشاورزی در سناریوهای مختلف

Initial volume of reservoir (MCM)	Percentage of agricultural water supply from dam	Wheat			Barley			Potato			Bean		
		Normal	Max	Min	Normal	Max	Min	Normal	Max	Min	Normal	Max	Min
40	100	0.56	0.92	0.72	0.73	0.65	0.54	0.50	0.96	0.15	0.44	0.95	0.60
	80	0.65	0.96	0.81	0.63	0.82	0.64	0.72	0.96	0.32	0.46	0.99	0.17
50	100	0.73	0.93	0.71	0.61	0.86	0.75	0.79	0.99	0.46	0.64	0.95	0.46
	80	0.89	0.98	0.69	0.73	0.87	0.64	0.89	0.97	0.56	0.75	0.98	0.44
60	100	0.92	0.96	0.73	0.74	0.91	0.70	0.90	0.99	0.73	0.91	0.95	0.49
	80	0.94	0.97	0.88	0.74	0.87	0.62	1.00	0.98	0.86	0.94	0.99	0.69
70	100	0.97	0.95	0.72	0.82	0.85	0.74	0.98	0.99	0.92	0.96	0.95	0.83
	80	0.94	0.98	0.97	0.74	0.90	0.88	1.00	0.99	0.96	0.94	0.95	0.98
80	100	0.97	0.98	0.95	0.87	0.90	0.76	0.99	0.99	1.00	0.96	0.95	0.91
	80	0.95	0.98	0.94	0.88	0.90	0.72	1.00	0.99	0.99	0.95	0.95	0.95

**Table 4- Optimal water allocated to agriculture sector in different scenarios**

جدول ۴- مقدار آب تخصیص یافته بهینه به بخش کشاورزی در سناریوهای مختلف

Initial volume of reservoir (MCM)	Percentage of agricultural water supply from dam	Scenario		
		Normal	Max	Min
40	100	28.599	45.265	18.775
	80	28.591	40.462	17.776
50	100	38.447	47.080	28.663
	80	38.435	40.456	28.639
60	100	48.252	46.384	38.496
	80	44.818	40.495	38.414
70	100	51.453	46.914	48.284
	80	44.275	40.237	47.900
80	100	51.820	46.752	54.210
	80	44.578	40.237	46.648

ازای هر حجم اولیه مخزن در این سناریوها، آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی زیاد شده و بنابراین مدل بهینه، مقدار آب زیادی را به هر یک از محصولات اختصاص می‌دهد. در سناریو حداکثر، حجم اولیه مخزن تأثیری بر آب تخصیص یافته از منابع زیرزمینی نداشته و مقدار تقریباً ثابتی (حدود ۶/۵ میلیون متر مکعب) داشته است. در این سناریو به دلیل کیفیت آب موجود برای تخصیص بین مصارف مختلف، کل نیاز بخش کشاورزی از طریق منابع سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود و لذا در سطوح مختلف حجم اولیه مخزن، حداکثر آب مورد نیاز بخش کشاورزی به تناسب از منابع سطحی و زیرزمینی تأمین شده است. در واقع در سناریوهای حداقل و نرمال، میزان بارندگی و آورد رودخانه کم است که در نتیجه این کمبود بارش باید با آب آبیاری جبران شده و نیاز آبی و در نتیجه رطوبت خاک (رابطه ۵) به میزان مناسبی جهت ارضای قید مربوطه تأمین شود. حال با افزایش مقدار آب آبیاری برای جبران نیاز آبی، هم ۸۰ درصد آن (سهم حجم آب رها شده از مخزن که رابطه تنگاتنگی با حجم اولیه آن دارد، مخصوصاً با توجه به کم بودن آورد رودخانه در این سناریو) و هم ۲۰ درصد آن (سهم تأمین از آب زیرزمینی) باید افزایش یابد. در حالی که در سناریو حداکثر، میزان بارندگی زیاد است و در نتیجه نیاز آبی کم است و بنابراین تقریباً به

با افزایش حجم اولیه مخزن در این سناریوها، آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی زیاد شده و بنابراین مدل بهینه، مقدار آب زیادی را به هر یک از محصولات اختصاص می‌دهد. در سناریو حداکثر، حجم اولیه مخزن تأثیری بر آب تخصیص یافته از منابع زیرزمینی نداشته و مقدار تقریباً ثابتی (حدود ۶/۵ میلیون متر مکعب) داشته است. در این سناریو به دلیل کیفیت آب موجود برای تخصیص بین مصارف مختلف، کل نیاز بخش کشاورزی از طریق منابع سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود و لذا در سطوح مختلف حجم اولیه مخزن، حداکثر آب مورد نیاز بخش کشاورزی به تناسب از منابع سطحی و زیرزمینی تأمین شده است. در واقع در سناریوهای حداقل و نرمال، میزان بارندگی و آورد رودخانه کم است که در نتیجه این کمبود بارش باید با آب آبیاری جبران شده و نیاز آبی و در نتیجه رطوبت خاک (رابطه ۵) به میزان مناسبی جهت ارضای قید مربوطه تأمین شود. حال با افزایش مقدار آب آبیاری برای جبران نیاز آبی، هم ۸۰ درصد آن (سهم حجم آب رها شده از مخزن که رابطه تنگاتنگی با حجم اولیه آن دارد، مخصوصاً با توجه به کم بودن آورد رودخانه در این سناریو) و هم ۲۰ درصد آن (سهم تأمین از آب زیرزمینی) باید افزایش یابد. در حالی که در سناریو حداکثر، میزان بارندگی زیاد است و در نتیجه نیاز آبی کم است و بنابراین تقریباً به

### ۳-۱- بررسی نتایج اجرای مدل برای یکی از حالات مختلف

با توجه به بالا بودن تعداد حالات اجرای مدل، به عنوان نمونه‌ای از نتایج، یکی از حالات مختلف ممکن که در آن رژیم خشک حاکم بوده است (سناریو حداقل با در نظر گرفتن حداقل آبدهی رودخانه و بارندگی و حجم اولیه مخزن برابر ۵۰ میلیون متر مکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد) به منظور نشان دادن اثرات کمبود منابع آب بر تخصیص آب از سد، انتخاب و نتایج پارامترهای مختلف مربوط به آن ارائه می‌شود. شکل ۳ روند همگرایی تابع هدف (حداکثر تابع هدف) را در نسل‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است الگوریتم پس از حدود ۶۵۰ تکرار به جواب بهینه سراسری همگرا شده و از آن به بعد تغییری در جواب بهینه ایجاد نشده است. شکل ۴ نیز روند نزولی حداکثر تابع جریمه را در نسل‌های مختلف به خوبی بیان می‌کند.

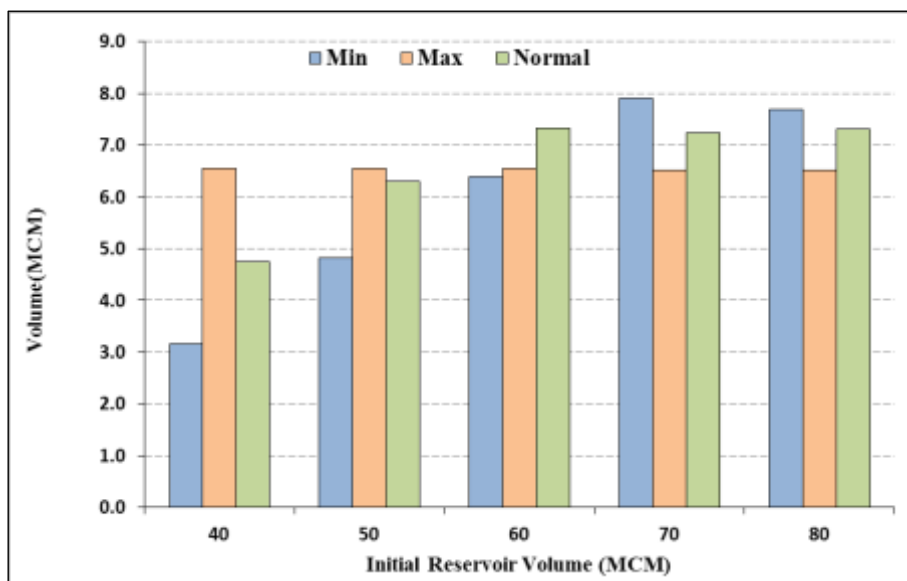


Fig. 2- Allocable volume from groundwater to agriculture sector in different scenarios

شکل ۲- حجم آب قابل تخصیص از منابع آب زیرزمینی به بخش کشاورزی در سناریوهای مختلف

جریمه همه قیدهای مدل بهینه در کروموزوم نسل آخر صفر شده و می‌توان اذعان داشت که مدل به خوبی به جواب بهینه سراسری همگرا شده است. با مقایسه میزان برازندگی کروموزوم‌های نسل آخر، بهترین عضو جمعیت انتخاب و سپس با تبدیل کد دودویی آن به مقادیر واقعی، متغیرهای تصمیم بهینه مدل تعیین گردید.

مقادیر بالای جریمه در نسل‌های اولیه نشان از عدم ارضای قیدهای مدل بوده ولی با تکرار الگوریتم در نسل‌های بعد تابع جریمه کم شده است. به منظور بیان کارایی مدل در رسیدن به بهینه سراسری، مقادیر تابع جریمه در کروموزوم‌های نسل اول در شکل ۵ ارائه شده است. همه کروموزوم‌ها (به جز کروموزوم شماره ۸) دارای جریمه بوده که عدم ارضای قیدهای مسئله را نشان می‌دهد. با تکرار الگوریتم مقدار

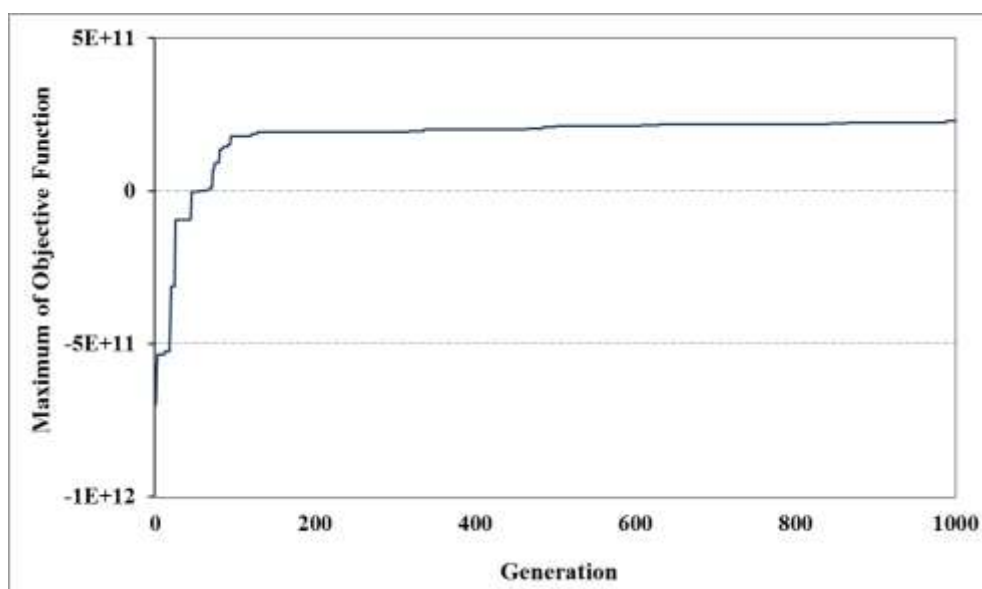


Fig. 3- The maximum objective function in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۳- حداکثر تابع هدف در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

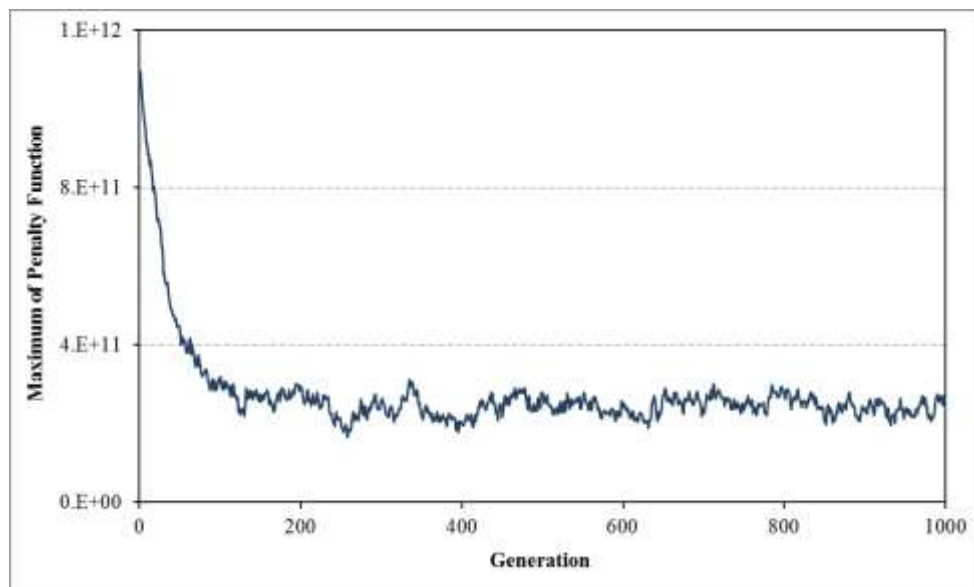


Fig. 4- The maximum of penalty function in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۴- مقادیر حداکثر جریمه در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

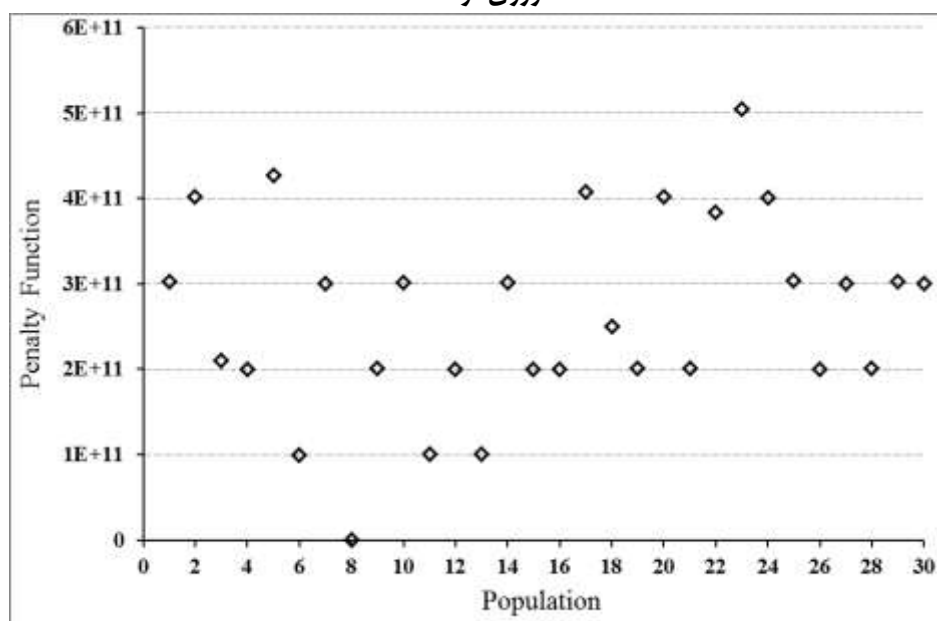


Fig. 5- Penalty value of objective function in the first generation population in minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۵- مقادیر جریمه تابع هدف در جمعیت نسل اول در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

کشاورزی در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل دیده می شود از دهه شماره ۷ تا ۲۱ که بازه بهره برداری سد برای مصارف کشاورزی است آب خروجی از سد شامل مصارف مختلف شرب، زیست محیطی و کشاورزی می باشد که در دهه شماره ۱۶ (دهه اول مرداد) به حداکثر خروجی با ۴/۷۶ میلیون متر مکعب می رسد. از دهه

پس از حصول اطمینان از عملکرد مدل و توانایی آن در رسیدن به جواب بهینه سراسری، نتایج اجرای مدل برای سناریو مورد نظر استخراج گردید. شکل ۶ آب خروجی از سد در دوره های مختلف در طول سال را نشان می دهد. در این شکل دهه اول اردیبهشت (دهه شماره ۷) به عنوان شروع دوره بهره برداری از سد برای بخش

مخزن در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. حجم حداقل ۱۵ میلیون متر مکعب، در انتهای دوره حفظ شده و قابل استفاده برای دوره‌های دیگر است. در شکل ۸ نیز مقادیر تبخیر اتفاق افتاده در طول دوره یک ساله از مخزن سد ارائه شده است. بیشترین حجم تبخیر در دهه شماره ۱۰ (دهه اول خرداد) با ۰/۱۴ میلیون متر مکعب می‌باشد که همخوانی درستی با حجم آب مخزن در این دهه دارد. کل حجم آب تبخیر شده از مخزن در طول یک سال در این سناریو برابر ۱/۷۰۵ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود.

۲۲ (دهه اول مهرماه) به بعد خروجی سد صرفاً برای تأمین نیازهای شرب و زیست‌محیطی خواهد بود. شکل ۷ حجم آب موجود در مخزن سد در دوره‌های مختلف در طول یک سال را برای سناریو حداقل بارندگی و جریان ورودی رودخانه با فرض حجم اولیه مخزن برابر ۵۰ میلیون متر مکعب و تأمین ۸۰ درصدی نیاز کشاورزی توسط سد را نشان می‌دهد. بهره‌برداری از سد برای مصارف کشاورزی در ابتدای اردیبهشت ماه با فرض اولیه آب موجود ۵۰ میلیون متر مکعب شروع می‌شود. نکته قابل توجه در این شکل عدم تخطی قید مربوط به حجم

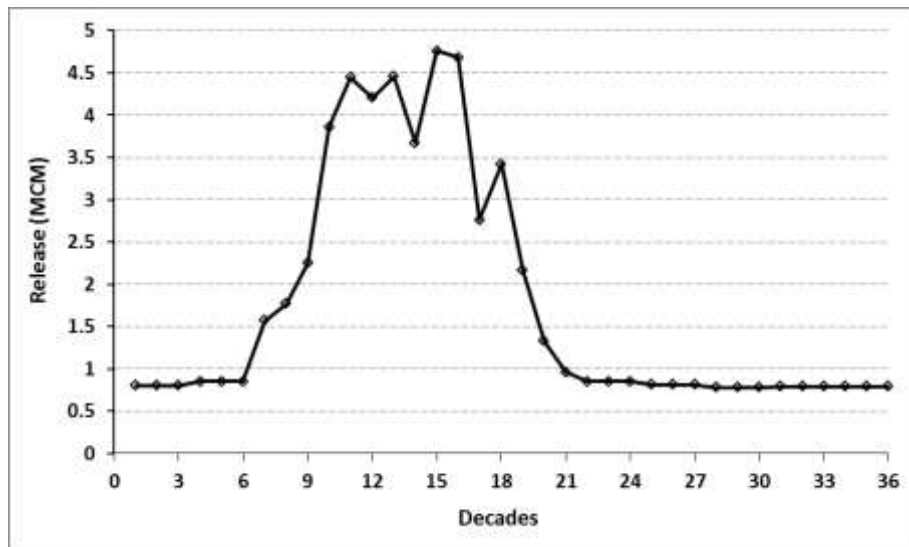


Fig. 6- Water release from the dam in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۶- آب خروجی از سد در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون متر مکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

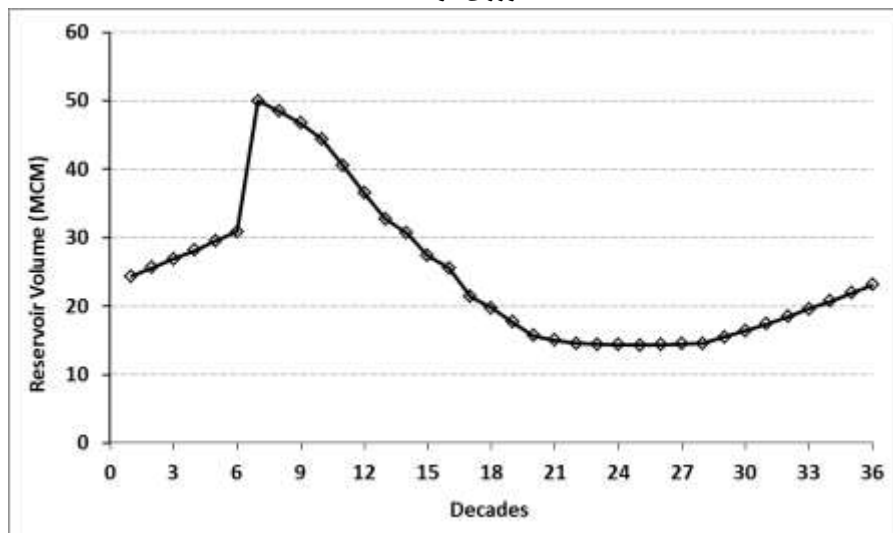
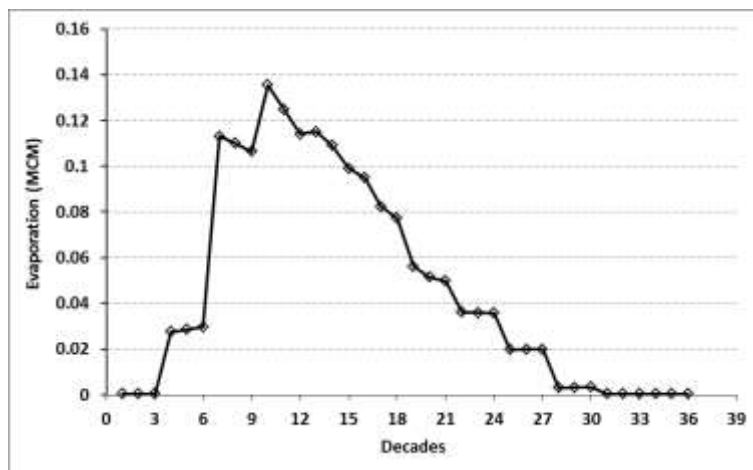


Fig. 7- Volume of water in the reservoir in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۷- حجم آب موجود در مخزن در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون متر مکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز کشاورزی توسط سد



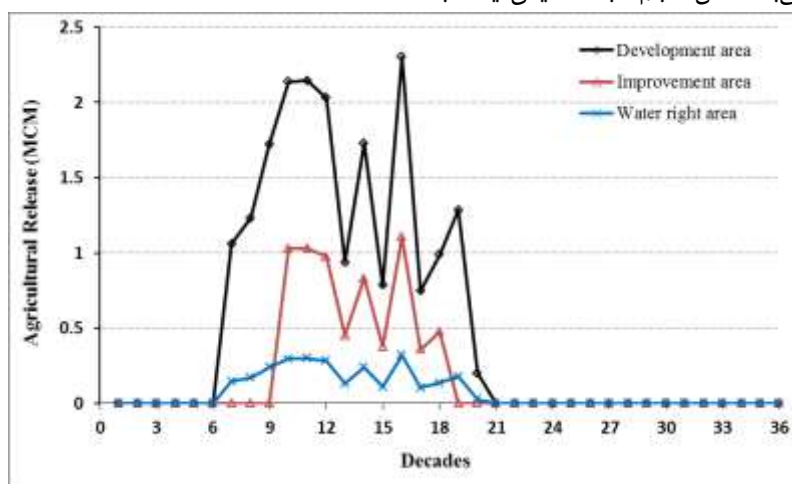
**Fig. 8- Evaporated water from the reservoir in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam**

شکل ۸- آب تبخیر شده از مخزن در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز کشاورزی توسط سد

بخش کشاورزی در این سناریو ۲۸/۶۴ میلیون متر مکعب می‌باشد که از آن مقدار سهم اراضی توسعه، بهبود و حقایه‌دار به ترتیب برابر ۱۹/۳۱، ۶/۶۴ و ۲/۶۹ میلیون متر مکعب می‌باشد.

همان‌طور که در مدل‌سازی تخصیص آب برای مصارف مختلف اشاره شد متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی در این تحقیق، مقدار آب قابل تخصیص به محصولات مختلف زیر کشت بخش کشاورزی در اراضی نواحی مختلف (توسعه، بهبود و حقایه‌دار) بوده است که در شکل ۱۰ مقدار آب تخصیص یافته به چهار محصول عمده مورد نظر (گندم، جو، سیب‌زمینی و لوبیا) ارائه شده است.

به منظور تفکیک مقدار آب تخصیص یافته به سه ناحیه کشاورزی که شامل اراضی توسعه و بهبود شبکه آبیاری یامچی و همچنین اراضی حقایه‌دار پایین‌دست می‌باشد خروجی سد برای آنها در شکل ۹ ارائه شده است. متناسب با نیاز آبی محصولات مختلف کشت شده در اراضی شبکه آبیاری و اراضی حقایه‌دار و با توجه به موجودیت آب مخزن و شرایط اقلیمی (رژیم بارندگی و جریان رودخانه حداقل) آب خروجی در هر دوره ده روزه مشخص می‌باشد. اراضی بهبود در طول تنها سه ماه از مخزن سد، آب دریافت می‌کنند که در شکل نشان داده شده است. بیشترین حجم آب خروجی از سد در این سناریو مربوط به دهه شماره ۱۶ (دهه اول مردادماه) با ۲/۳ میلیون متر مکعب برای ناحیه کشاورزی مربوط به اراضی توسعه می‌باشد. کل حجم آب تخصیص یافته به



**Fig. 9- Water released for agricultural areas from the reservoir in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam**

شکل ۹- آب خروجی برای نواحی کشاورزی از مخزن در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب و

تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸

Volume 15, No. 1, Spring 2019 (IR-WRR)

کند. حد بالای این نسبت برابر ۱ و حد پایین آن ۰/۵ می‌باشد که در شکل به وضوح دیده می‌شود. مقادیر بزرگتر این نسبت برای سیب زمینی نسبت به لوبیا بیانگر تخصیص آب کافی به سیب‌زمینی بوده است که در راستای تابع هدف مدل (حداکثرسازی سود کل) است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی مناسب در بهره‌برداری بهینه از سدهای مخزنی و استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد که در این تحقیق نیز در حل مسائل مربوط به توابع غیر خطی با قیودات پیچیده، مورد استفاده قرار گرفت. سیر نزولی تابع جریمه در نسل‌های مختلف و ارضا همه قیدهای مسأله نشان می‌دهد که الگوریتم تهیه شده در همه حالات اجرای مدل به جواب‌های بهینه سراسری همگرا شده است. در مدل بهینه تهیه شده، سود حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی به عنوان معیاری برای ارزیابی شایستگی بردار طراحی بوده و از این طریق متغیرهای تصمیم که همان آب قابل تخصیص به گیاهان مختلف کشت شده است برآورد گردید. نتایج نشان داد هر چه حجم آب اولیه موجود در مخزن در شروع بهره‌برداری زیاد باشد سود حاصله نیز زیاد خواهد بود که دلیل آن تخصیص آب بیشتر به بخش کشاورزی است. Ghadami et al. (2009) نیز در مطالعات خود افزایش سود حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی را مرتبط با حجم اولیه مخزن عنوان کرده بودند.

در این شکل‌ها محور افقی از دهه اول اسفندماه شروع می‌شود و تا پایان آبان‌ماه سال بعد به طول می‌انجامد. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است آب تخصیص یافته متناسب با دوره رشد هر محصول و نیاز آبی آنها و در نظر گرفتن موجودیت آب در مخزن سد و شرایط اقلیمی آن سال بوده است. بنابراین آب تخصیص یافته از مخزن سد متناسب با شرایط بهره‌برداری از ابتدای اردیبهشت ماه (دهه شماره ۷) شروع و تا پایان شهریور (دهه شماره ۲۱) ادامه می‌یابد. محصولاتی که در فصل بهار کشت می‌شوند (سیب‌زمینی و لوبیا) به دلیل قرار گرفتن دوره رشد آنها در محدوده زمانی بهره‌برداری سد برای بخش کشاورزی، تمام آب قابل تخصیص خود را از سد دریافت می‌کنند.

شکل ۱۱ تغییرات رطوبت نسبی خاک در طول دوره رشد محصولات مختلف (کشت پاییزه و بهاره) را نشان می‌دهد که بیانگر عدم تخطی قیودات مربوط به رطوبت خاک می‌باشد که در الگوریتم مدل بهینه در نظر گرفته شده است. یعنی رطوبت خاک بین حداقل و حداکثر آن قرار گرفته است. در طول دوره بهره‌برداری سد برای بخش کشاورزی، مقادیر رطوبت خاک برای محصولات پاییزی کمترین مقدار را داشته است ولی برای محصولات کشت بهاره حداکثر مقدار بوده است. همچنین شکل ۱۲ تغییرات زمانی نسبت تبخیر تعرق واقعی به پتانسیل را در دوره‌های رشد هر محصول نشان می‌دهد. ارضای قید مربوط به معادله شماره ۱۰ به وضوح در شکل‌ها مشخص است و مدل توانسته به خوبی محدودیت مورد نظر را برای هر یک از محصولات اعمال

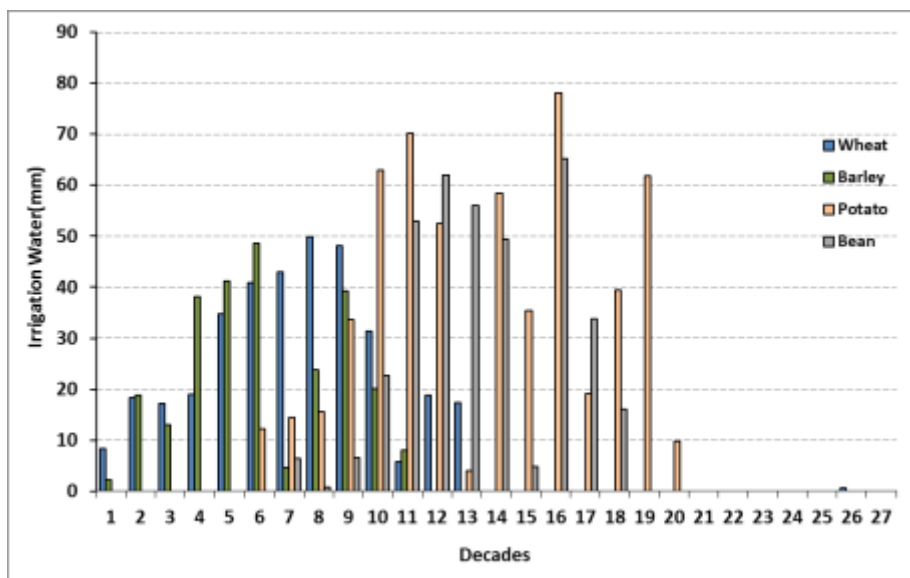
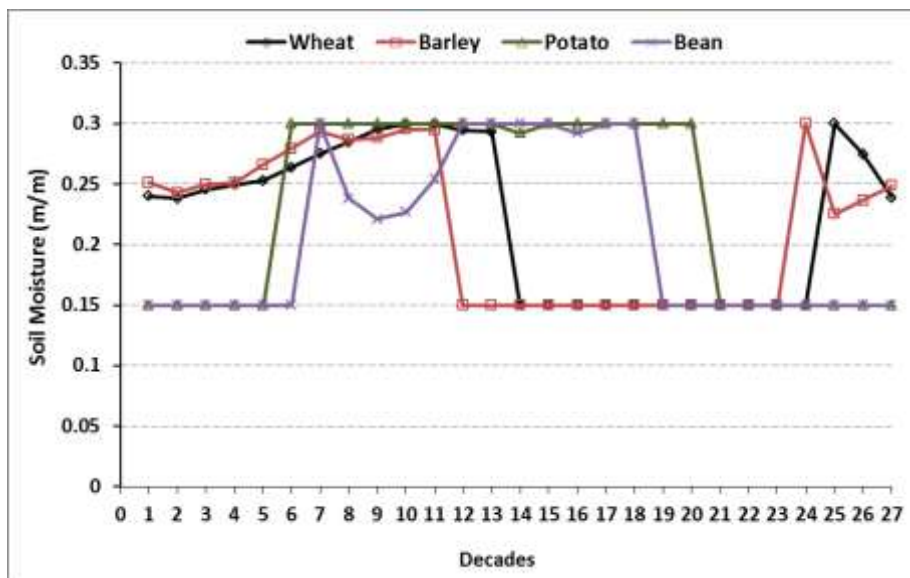
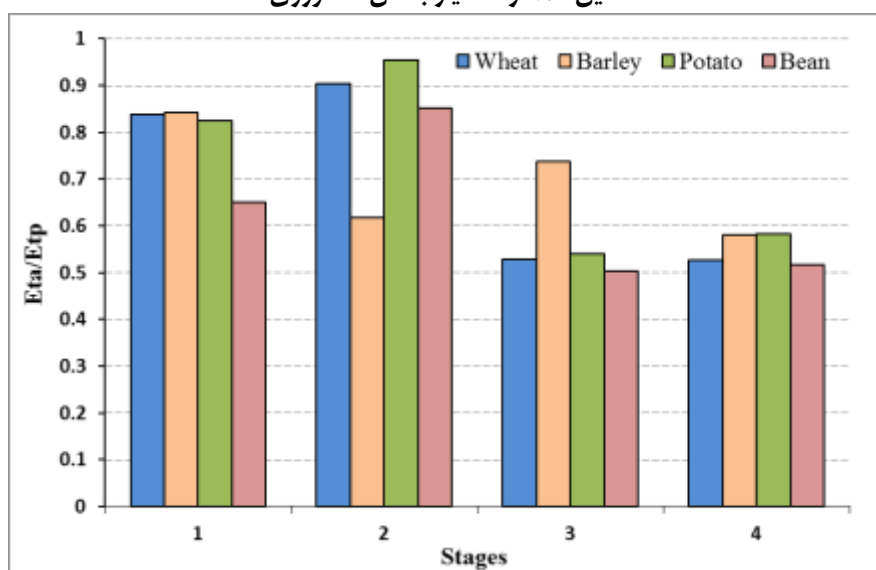


Fig. 10- Optimal water allocated to crops in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam

شکل ۱۰- آب بهینه تخصیص یافته به محصولات در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن ۵۰ میلیون مترمکعب و تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد



**Fig. 11- Relative soil moisture during growing period of the crops in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam**  
 شکل ۱۱- رطوبت نسبی خاک در دوره رشد محصولات در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب با تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی



**Fig. 12- Actual to potential evapotranspiration ratio during growing period of the crops in the minimal scenario with initial reservoir volume of 50 MCM and supplying 80% of agricultural sector requirement from the dam**

شکل ۱۲- نسبت تبخیر تعرق واقعی به پتانسیل در دوره‌های رشد محصولات در سناریو حداقل با حجم ابتدایی مخزن برابر ۵۰ میلیون مترمکعب با تأمین ۸۰ درصد نیاز بخش کشاورزی توسط سد

در رژیم خشک (سناریو حداقل) که بارندگی و جریان ورودی به مخزن کمترین مقدار بوده است حداقل سود در حجم اولیه مخزن برابر با ۴۰ میلیون متر مکعب بدست آمد که با طبیعت مسأله همخوانی دارد. در رژیم تر (سناریو حداکثر) حجم اولیه مخزن تأثیر چندانی بر سود حاصله نداشته است زیرا در این شرایط آب کافی برای تخصیص آب به محصولات وجود دارد.

در صورتی که بتوان از آب زیرزمینی در راستای تأمین بخشی از نیاز آبی اراضی کشاورزی استفاده نمود و این کار با اعمال درصدی از کل آب مورد نیاز محصولات مختلف کشت شده در اراضی کشاورزی توسط

Dudley N J, Burt O R (1973) Stochastic reservoir management and system design for irrigation. *Water Resources Research* 9(3):507-522

Ezenwaji E E, Anyadike R N C, Igu N I (2014) Optimal allocation of public water supply to the urban sectors of Enugu, Nigeria: a linear programming approach. *Applied Water Science* 4:73-78

Ghadami S M, Ghahraman B, Sharifi M B, Rajabi Mashhadi H (2009) Optimization of multireservoir water resources systems operation using genetic algorithm. *Iran-water Resources Research* 5(2):1-15 (In Persian)

Ghahraman B, Sepaskhah A R (2004) Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Irrigation and Drainage* 53:39-54

Kanooni A, Monem M J (2013) Integrated stepwise approach for optimal water allocation in irrigation canals. *Irrigation and Drainage* 51:155-166

Karamouz M, Ahmadi A, Moridi A (2009) Probabilistic reservoir operation using Bayesian stochastic model and support vector machine. *Advances in Water Resourances* 32(11):1588-1600

Khademi M, Emadi A R, Mohseni Movahed S A (2011) Reservoir operation optimization using simulated annealing algorithm and application of asymptote method in its validation. *Journal of Watershed Management Research* 2(3):80-94 (In Persian)

Kipkorir E C, Sahli A, Raes D (2002) MIOS: A decision tool for determination of optimal irrigated cropping pattern of a multicrop system under water scarcity constraints. *Irrigation and Drainage* 51:155-166

Matanga G B, Marino M A (1979) Irrigation planning, 1: cropping pattern; and 2: water allocation for leaching and irrigation purposes. *Water Resources Research* 15(3):6272-683

Mannocchini F, Mecarelli P (1994) Optimization analysis of deficit irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(3):1484-1503

Moghaddasi M, Morid S, Araghinejad S, Agha Alikhani M (2009) Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: The 1999 drought in the Zayandeh Rud irrigation system (IRAN). *Irrigation and Drainage* 59(4):377-387

Mohammad Rezapour Tabari M (2011) Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: Case study Piranshahr Plain. *Journal of Water and Wastewater* 4:103-113 (In Persian)

برنامه‌ریزان منابع آب مشخص شود استفاده تلفیقی از آب زیرزمینی و سطحی به عنوان راهکاری برای مقابله با محدودیت منابع آب و مدیریت آبخوان آب زیرزمینی خواهد بود. در این تحقیق با منظور نمودن درصد استفاده از آب زیرزمینی که مطابق با پتانسیل برداشت از آبخوان آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بوده است ضمن دستیابی به سود بالا، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نیز به صورت کنترل شده انجام گرفت. (Vedula et al. (2005) نیز ضمن مشخص نمودن درصد استفاده از آب زیرزمینی در استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی، بر برداشت کنترل شده از آب زیرزمینی تأکید داشته‌اند.

## ۵- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی شرکت آب منطقه‌ای اردبیل در قالب طرح پژوهشی به شماره ۹۵/۲/۶۵۶۶/۹۰۰ انجام گرفته است که جا دارد از حمایت‌های شرکت و نظرات ارزشمند کارشناسان آن تشکر و قدردانی شود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Support Vector Machines
- 2- Standard Operating Policy
- 3- Simulated Annealing
- 4- Genetic Algorithm
- 5- Fuzzy Neural Network
- 6- Heihe
- 7- Multiobjective Particle Swarm Optimization

## ۶- مراجع

Alimohammadi S, Hosseinzadeh H (2010) Conjunctive use of surface water and groundwater resources in Abhar River Basin. *Journal of Water and Wastewater* 3:75-87 (In Persian)

Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 56, Rome, Italy

Bras R L, Cordova J R (1981) Intra-seasonal water allocation in deficit irrigation. *Water Resources Research* 17(4):866-874

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

Dudley N J, Howell D T, Musgrave W F (1971) Optimal intra-seasonal irrigation water allocation. *Water Resources Research* 7(4):770-788



- algorithms. *Water Resources Management* 27:2623-2644
- Safavi H R, Rezaei F (2015) Conjunctive use of surface and groundwater using fuzzy neural network and genetic algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 39(C2):365-377
- Stewart J I, Hagan R M, Pruitt W O (1974) Functions to predict optimal irrigation programs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 100(2):179-199
- Sunantara J D, Ramirez J A (1993) Stochastic dynamic programming for optimization of multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water: Linearized solution. *Hydrography Days Publication* 13:351-362
- Sunantara J D, Ramirez J A (1997) Optimal stochastic multicrop seasonal and intraseasonal irrigation control. *Journal of Water Resources Planning and Management* 123(1):39-48
- Vedula S, Mujumdar P P, Chandra Sekhar G (2005) Conjunctive use modeling for multicrop irrigation. *Agricultural Water Management* 73:193-221
- Wu X, Zheng Y, Wu B, Tian Y, Han F, Zheng C (2016) Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-nature water conflicts: A surrogate modeling approach. *Agricultural Water Management* 163:380-392
- Yaron D, Dinar A (1982) Optimal allocation of water on a farm during peak season. *American Journal of Agricultural Economics* 64:681-689
- Mujumdar P P, Vedula S, Karmakar S, Manavalan P, Nageshwara Rao P P (2004) Irrigation water allocation in canal command areas. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 10(1):33-47
- Nagesh Kumar D, Srinivasa Raju K, Ashok B (2006) Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132(2):123-129
- Paul S, Sudhindra N P, Nagesh Kumar D (2000) Optimal irrigation allocation: A multilevel approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126(3):149-156
- Rao N H, Sarma P B, Chander S (1990) Optimal multicrop allocation of seasonal and intra-seasonal irrigation water. *Water Resources Research* 26(4):551-559
- Rezaei F, Safavi H R, Mirchi A, Madani K (2017) f-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Journal of Hydro-Environment Research* 14:1-18
- Rezaei F, Safavi H R, Zekri M (2017) A hybrid fuzzy-based multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning. *Water Resources Management* 31(4):1139-1155
- Safavi H R, Falsafioun M (2017) Conjunctive use of surface water and ground water resources under deficit irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143(2):050160121-050160129
- Safavi H R, Esmikhani M (2013) Conjunctive use of surface water and groundwater: Application of support vector machines (SVMs) and genetic