# ارائه ساختاری به‌منظور برنامه‌ریزی بلند مدت بهینه بهره‌برداری تلفیقی

محمود محمدرضاپور طبری[1]  رضا مکنون[2]  تقی عبادی[2]

(دریافت ۸۸/۹/۵  آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۴/۲۹  پذیرش ۹۰/۵/۷)

## چکیده

**کمّیت و کیفیت منابع آبی قابل دسترس به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور محدود کننده توسعه در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند. مدیریت در استفاده تلفیقی از منابع آب، یکی از مهم‌ترین گزینه‌هایی است که می‌تواند به‌منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آبی قابل دسترس، مفید و مؤثر واقع شود. در این تحقیق به‌منظور برنامه‌ریزی بلند مدت بهره‌برداری تلفیقی، مدلی با هدف حداقل نمودن میزان عدم تأمین نیاز سیستم با توجه به منابع آبی موجود تدوین گردید. در این راستا محدودیتهای در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی شامل محدودیت برداشت از منابع، اولویتهای مصرف در مناطق و بخشهای مختلف، طرحهای انتقال آب بین حوضه‌ای و میزان تقاضای سیستم برای یک دوره ۳۰ ساله بودند. به‌منظور همگرایی سریع‌تر مدل تدوین شده از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای استفاده شد. با توجه به نتایج مدل بهینه‌سازی، دستورالعمل‌های بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی به تفکیک برای مصارف شرب و کشاورزی به‌ترتیب به‌صورت سالانه و ماهانه برای سه افق کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت به نحوه مطلوبی تدوین شد و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کارایی بالای سیاست‌های ارائه شده در جهت بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویه آب در نتیجه استفاده نامطلوب از آن در اراضی کشاورزی و افزایش پایداری در سیستم آب زیرزمینی بود.**

***واژه‌های کلیدی:*** بهینه‌سازی، بهره‌برداری تلفیقی، الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای، اطمینان‌پذیری، سیاست‌های بلند مدت

# Development Structure for Optimal Long-Term Planning in Conjunctive Use

*Mahmoud Mohammad Rezapour Tabari [1]*  *Reza Maknoon [2]*  *Taghi Ebadi [2]*

*(Received Nov. 26, 2009  Revised July 20, 2011  Accepted July 29, 2011)*

## Abstract

In the most of arid and semi-arid countries, the quality and quantity of available water resources play a significantly limiting role in development. In these regions, the conjunctive management is a suitable alternative that can lead to the optimal operation of available water resources. In this study, a conjunctive use model is developed in order to maximize water supply demands in 30-year period historical records. Discharge from resources, consumption priority in sectors and zones, inter-basin water conveyance plans and water demands are considered as the optimization model's constraints. The ultimate goal of the study is to present short-term, medium-term and long-term operating policy. The sequential genetic algorithm is used to speed up the convergence to near global solution. The operating rules of surface and groundwater resources are separately developed for agriculture as well as domestic demands in the annual and monthly manner, respectively in the three above-mentioned periods. Finally, these rules are verified based on previously unused historical records. The results showed that the proposed model can effectively improve water resources potential, sustainable groundwater resources and undesirable use in agriculture sector.

***Keywords:*** Optimization, Conjunctive Use, Sequential Genetic Algorithm, Reliability, Long-Term Policy.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد (نویسنده مسئول)
۵۵۳۹۱٤۲۹ (۰۲۱)، mrtabari@eng.sku.ac.ir

۲- استادیار گروه عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

1. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Shahrekord University, Shahrekord (Corresponding Author) (+98 21) 55391429 mrtabari@eng.sku.ac.ir
2. Assist. Prof. of Civil and Environmental Eng., Dept. of Civil Eng., Amir Kabir Univesity of Tech., Tehran



Archive of SID
www.SID.ir

## ۱- مقدمه

کمّیت و کیفیت منابع آبی قابل دسترس به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور محدود کننده توسعه در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند. افزایش نیاز آبی، چالشهای جدیدی را برای برنامه‌ریزی سیستم‌های منابع آب مطرح نموده است. لذا توسعه، اجرا و مدیریت کارا در پروژه‌های منابع آب امری ضروری است و لازمه آن، مطالعات دقیق با در نظر گرفتن مسائل و پیچیدگی‌های موجود و ارائه راهکاری مناسب برای حل آنها است. مدیریت در استفاده تلفیقی از منابع، یکی از گزینه‌هایی است که می‌تواند به‌منظور مدیریت بهتر و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی، مفید و مؤثر واقع شود. مفهوم استفاده تلفیقی به‌طور نسبی یک مفهوم جدید است که در کشوری مانند ایران کمتر و یا در برخی موارد اصلاً به آن توجه نشده است. یکی از اولین مطالعاتی که در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی انجام شده است توسط براس[1] در سال ۱۹۶۳ ارائه گردیده است. در این تحقیق از منابع آب سطحی (سد) و زیرزمینی به‌منظور تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی استفاده شده است. در این مدل، تغذیه مصنوعی از سد به آبخوان نیز مدنظر قرار گرفته است. برای بهینه نمودن برداشت از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی، از مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با گام زمانی سالانه استفاده گردیده است[۱].

مکنون و برجس[2] در سال ۱۹۷۸ مؤلفه‌های مؤثر در سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی را معرفی و راهکارهای لازم به‌منظور مدیریت تلفیقی از منابع آبی موجود را ارائه نموده‌اند. این راهکارها کلی بوده و در مسائل خاص می‌تواند به‌عنوان راهنمایی مناسب مورد استفاده قرار گیرد[۲].

عزیز[3] در سال ۲۰۰۲ مدل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای را به‌منظور بهره‌برداری تلفیقی با توجه به تغذیه مصنوعی ارائه نموده است. در این مدل نیاز آبی به‌صورت تصادفی و هزینه‌های فرصت[4] در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدل، حداقل نمودن هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم است[۳].

کارآموز و همکاران در سال ۲۰۰۴ مدل یکپارچه بهره‌برداری تلفیقی را به‌منظور تأمین نیازهای کشاورزی، حداقل نمودن میزان هزینه پمپاژ و کنترل تراز سطح آب زیرزمینی ارائه کرده‌اند. در این مطالعه تغذیه ناشی از چاههای جذبی در مدل شبیه‌سازی دیده شده است. روابط پاسخ آبخوان در مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پویا به‌منظور بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده تلفیقی می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی به‌منظور تأمین نیازهای کشاورزی مورد توجه قرار گیرد[۴].

پولیدو ولازکیوز و همکاران[5] در سال ۲۰۰۶ مدل مدیریت بهره‌برداری تلفیقی را ارائه نموده‌اند. در این مدل تابع پاسخ آبخوان به‌منظور کاهش زمان همگرایی به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش برنامه‌ریزی مرحله‌ای، مقادیر بهینه تخصیص به نیازهای شرب و کشاورزی تعیین شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ساده‌سازی در بیان رفتار آبخوان‌هایی با تغییرات تراز کم، می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر زمان اجرا گردد[۵].

دال و همکاران[6] در سال ۲۰۰۸ بهره‌برداری تلفیقی از مخزن سد و آب زیرزمینی را تحت سه طرح مدیریتی مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور از یک مدل غیرخطی ماهانه در داخل مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی استفاده گردیده است. در گام اول پارامترهای مدل تحت سیستم ترکیبی مخزن سد و آب زیرزمینی و شرایط بهره‌برداری با استفاده از سری تاریخی کالیبره شده است. سپس مدل به‌منظور تخمین منافع حاصل از مدیریت مخزن آب تحت سناریوهای اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. این سناریوها شامل سناریوی تولید برقابی، سناریوی بهره‌برداری تلفیقی و سناریوی بدون استفاده تلفیقی بوده است[۶].

افشار و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدل ذخیره سیکلی را تدوین نموده‌اند. تأکید این مطالعه بر روی توسعه و اجرای الگوریتم ترکیبی الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای و برنامه‌ریزی خطی به‌منظور بهینه نمودن یک سیستم غیرخطی، غیرمحدب و نیمه‌گسترده بزرگ مقیاس در یک منطقه تحت آبیاری بوده است. این روش نسبت به سایر روشها به‌دلیل زیاد بودن تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی از عملکرد بالایی در دستیابی به جواب موجه عملی، برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی ذخیره سیکلی از انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به مدل غیر سیکلی در کاهش هزینه ساخت و بهره‌برداری برخوردار است[۷].

در تحقیقی که توسط صفوی و علیجانی در سال ۲۰۱۰ ارائه گردیده است، الگوی کشت بهینه و بهره‌برداری تلفیقی برای دشت نجف‌آباد توسعه داده شده است. از سیستم استنتاج فازی به‌منظور در نظر گرفتن نظرات متخصصان و افراد با تجربه اعم از تصمیم‌گیران و کشاورزان استفاده شده است تا بر اساس نیاز آبی هر محصول بتوان برنامه‌ریزی بهینه‌ای را برای آن ارائه داد و آب با قابلیت اطمینان بالا با توجه به شرایط اقلیمی به هر محصول اختصاص داده شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش بر روی بازه وسیعی از شرایط اقلیمی مختلف قابل اجرا است[۸].

[1] Buras
[2] Burges
[3] Azaiez
[4] Opportunity Costs
[5] Pulido-Velazquez et al.
[6] Dale et al.


Archive of SID
www.SID.ir

علاوه بر مطالعات بالا تحقیقات زیادی دیگری نیز تا کنون انجام شده که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کو[1]، لطیف[2]، اونتا و همکاران[3]، بارلو[4]، ودلا[5]، کارآموز، محمد رضاپور طبری، مهجوری، اسلامی، هاشمی، استاد رحیمی و همکاران و صفوی و همکاران اشاره نمود[۹-۲۳].

از مطالعات صورت گرفته در خصوص بهره‌برداری تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی که از سال ۱۹۶۳ شروع شده و تا کنون ادامه دارد می‌توان دریافت که در تمامی این مطالعات، بخشهایی از یک سیستم منابع آب مورد توجه قرار گرفته است و از مدل‌سازی مسائل و واقعیتهای سیستم منابع آب در بهره‌برداری تلفیقی خودداری شده است. هدف این تحقیق ارائه سیاست‌های بهینه برداشت از منابع آب بر پایه نظرات و سیاست‌های تصمیم‌گیران تأمین آب بود که در نظر گرفتن این پارامتر در مطالعات انجام شده قبلی به چشم نمی‌خورد. لذا در این تحقیق سعی شد با توجه به ابزارهای مدل‌سازی به نحوه مطلوبی، سیاست‌ها و دستورالعمل‌های مدیریتی به‌منظور بهره‌برداری از هر منبع به تفکیک نوع مصرف برای افقهای کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت با اعمال نظرات توزیع‌کنندگان آب تدوین شود.

## ۲- مؤلفه‌ها و اجزای برنامه‌ریزی تلفیقی

برنامه‌ریزی تلفیقی در یک منطقه مورد مطالعه نیازمند اجزایی است که باید به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. این اجزا عبارت‌اند از: وضعیت زهکشی و توزیع آب در منطقه، تغییرات دینامیکی در رژیم جریان آب زیرزمینی و کیفیت آن، میزان آب مورد نیاز، بررسی امکان اجرای سازههای سطحی و زیرزمینی، شرایط اکولوژیکی و محیط زیستی منطقه و تغییراتی که در الگوی اقتصادی و اجتماعی منطقه احتمال وقوع دارد. به‌منظور استفاده بهینه از منابع آبی موجود، استفاده از مدلی که بتواند پاسخ حوضه را به تغییرات طبیعی، میزان تغذیه و پمپاژ و سایر گزینه‌هایی که در سیاست‌های بهره‌برداری مؤثر هستند، شبیه‌سازی نماید امری ضروری است.

بارش یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آبهای سطحی است که میزان آن وابسته به شدت رواناب تولید شده و گستردگی آن در سطح حوضه آبریز است. آبهای سطحی را می‌توان با استفاده از انتقالهای بین حوضه نیز تأمین نمود. شرایط ذخایر زیرزمینی به‌طور کمّی و کیفی برای زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت بوده و تابعی از قابلیت دسترسی به آبخوان، میزان تغذیه سفره و کیفیت آب زیرزمینی دارد. همچنین میزان تغذیه آبخوان توسط چاهها و برداشت بیش از اندازه از آبخوان از جمله عوامل مؤثر در بهره‌برداری از منابع زیرزمینی هستند که باید آنها را در برنامه‌ریزی تلفیقی مدنظر قرار داد. وضعیت و طبیعت نیازهای آبی سیستم مورد بررسی نیز عامل مهم دیگری در برنامه‌ریزی تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی است. به‌طور کلی اجزای سیستم بهره‌برداری تلفیقی شامل رودخانه، مخازن زیرزمینی، چاههای پمپاژ، چاههای تغذیه، سیستم‌های انتقال آب و سیستم انحراف جریان رودخانه به‌منظور تغذیه مصنوعی و مناطق نیاز است.

## ۳- ساختار مدل بهینه‌سازی تدوین شده

با توجه به منابع آبی موجود، نیازهای رو به رشد و برداشت‌های نامتعادل برای تأمین نیازهای آبی سیستم، وضعیت طبیعی سیستم منابع آبی به‌تدریج رو به تخریب رفته و چنانچه مدیریت صحیح بر این امر صورت نپذیرد در آینده‌ای نزدیک بحران منابع آب به‌صورت جدی‌تر مطرح خواهد شد. لذا ارائه دستورالعمل‌های مدیریتی به‌منظور بهبود وضعیت منابع آبی موجود و همچنین تخصیص بهینه از هر منبع سطحی و زیرمینی می‌تواند راهگشای مدیران و مجریان مرتبط با این موضوع باشد.

با توجه به مشکلات و معضلات ارائه شده می‌توان گفت که اهدافی که در تهیه و تدوین مدل بهینه‌سازی دنبال می‌گردد شامل حداقل نمودن هزینه‌های ناشی از عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان و کنترل تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و استفاده بهینه از ذخایر منابع آب سطحی است. مهم‌ترین فرضیاتی که در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شد به‌صورت زیر بود: الف) اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت غیرمستقیم در مدل دیده شد. به این صورت که پساب آب برداشت شده از منابع سطحی به‌عنوان منبعی برای تغذیه آبخوان در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه رودخانه در محدوده آبخوان دارای جریانی نیست لذا ارتباط هیدرولیکی بین این دو منبع در مدل تدوین شده، لحاظ نشد، ب) عدم قطعیت در پارامترهای جریان سطحی ورودی به مخزن سد و ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دیده نشد، ج) با توجه به اینکه در این تحقیق، مدیریت منابع آب در تخصیص به‌منظور ارائه برنامه بهینه بهره‌برداری مورد توجه بود، لذا منافع حاصل از تأمین نیازها در این تحقیق مدنظر قرار نگرفت. لازم به‌ذکر است در تابع هدف مدل پیشنهادی می‌توان اهدافی همچون مسائل اقتصادی در تأمین، مسائل مرتبط با کیفیت آب تخصیص داده شده و غیره را نیز اضافه نمود، د) آبخوان دشت مورد مطالعه به‌صورت توده‌ای به شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی می‌پردازد. به‌منظور افزایش شبیه‌سازی رفتار آبخوان، لازم است سفره به‌صورت گسترده مورد شبیه‌سازی

[1] Coe
[2] Latif
[3] Onta et al.
[4] Barlow
[5] Vedula


Archive of SID
www.SID.ir

تابع هدف

$$\text{Minimize}\left(\sum_{t=1}^{m}\sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns}\left(DM_{tzs}-TAW_{tzs}\right)^2+\text{PenaltyFunction}\right) \quad (۱)$$

محدودیتها

$$E_t = EV_t \times 10^{-3} \times \left(-3\times10^{-5}\times S_t^2 + 0.023\times S_t + 0.4098\right) \quad (۲)$$

$$S_{t+1} = \max\left(\min\left(\left(S_t + I_t - E_t - R_t\right), S_{max}\right), S_{min}\right) \quad (۳)$$

$$TSR_t = R_t + Rtaleghan_t + Rbin_t - DMT_t \quad (۴)$$

$$\text{PenaltyFunction}= \sum_{t=1}^{m}\left(\max\left(\left(1-\frac{S_t+I_t-E_t-R_t}{S_{min}}\right),0\right)\times\gamma+\sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns}\left(\begin{matrix}\left(RS_{tzs}-ARS_{tzs}\right)^2\times\alpha\\+\left(RG_{tzs}-ARG_{tzs}\right)^2\times\beta\end{matrix}\right)\right) \quad (۵)$$

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs} + RG_{tzs} \quad , \ t=1,...,m\times y, \ \ z=1,...,nz, \ \ s=1,2,3 \quad (۶)$$

$$ARS_{tzs} = \begin{cases} DM_{tzs} & \text{if} \ \left(TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs}\right) \geq DM_{tzs} \\ TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۷)$$

$$Z = IZ(1),...,IZ(nz) \quad , \quad S = IS(1),...,IS(ns)$$

$$TDF_{tzs} = DM_{tzs} - ARS_{tzs} \quad (۸)$$

$$Dh_t\left(V_t\right) = \frac{\left(Input_t - Output_t - Eff\times V_t\right)}{A\times S_s} \quad (۹)$$

$$ARG_{tzs} = \begin{cases} TDF_{tzs} & \text{if} \ \ Dh_t\left(\sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} TDF_{tzs}\right) \leq \Delta h_{max} \\ \frac{\left(Input - Output + \Delta h_{max}\times A\times S_s\right)}{Eff} - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} TDF_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$Z = IZ(1),...,IZ(nz) \quad , \quad S = IS(1),...,IS(ns)$$

قرار گیرد. در این بخش ساختار مدل بهینه‌سازی تدوین شده ارائه شد.

که در این روابط

واحد حجم‌ها میلیون مترمکعب است[1]، Penalty Function میزان کل جریمه تخصیص داده شده به‌دلیل عدم رعایت اولویتها، برداشت، مصرف و احیای منابع آبی موجود (بی‌بعد)، $DM_{tzs}$ نیاز آبی بخش s در دوره t از منطقه z، $DMT_t$ میزان نیاز آبی شهر تهران از منابع آب سطحی در ماه t، $TAW_{tzs}$ میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z، $EV_t$ میزان تبخیر واحد از مخزن سد در دوره t (میلی‌متر)، $E_t$ تبخیر از مخزن سد در دوره t، $S_t$ حجم مخزن سد در دوره t، $I_t$ میزان آورد رودخانه در دوره t، $R_t$ حجم آب خروجی از مخزن سد در دوره t، $S_{max}$ حداکثر و $S_{min}$ حداقل ظرفیت مخزن سد، $Rtaleghan_t$ میزان حجم آب انتقالی از مخزن سد طالقان در دوره t، $Rbin_t$ حجم آورد بین‌راهی در دوره t، $TRS_t$ میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده در دوره t، $RS_{tzs}$ حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z، $RG_{tzs}$ حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش s در

[1] Million Cubic Meter (MCM)

Archive of SID



www.SID.ir

دوره t از منطقه z، $ARS_{tzs}$ حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویتهای منابع و مصارف)، $ARG_{tzs}$ حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویتهای منابع و مصارف)، $\beta,\alpha,\gamma$ ضرایب ثابت به‌منظور هم بعد نمودن توابع جریمه مرتبط با برداشت از منابع آب سطحی، زیرزمینی و ظرفیت مخزن که در این مطالعه $\beta,\alpha$ برابر با ۱۰ و $\gamma$ برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد، IS(s) میزان اولویت بخش s، IZ(z) میزان اولویت منطقه z، $TDF_{tsz}$ حجم کل کمبود آب بخش s در دوره t از منطقه z، $Dh_t(V_t)$ میزان تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان در نتیجه برداشت به میزان V در دوره t، $Input_t$ حجم کل آب ورودی به آبخوان به‌صورت زیرزمینی، $Output_t$ حجم کل آب خروجی از آبخوان به‌صورت زیرزمینی، Eff درصد استفاده مفید از آب تخصیص داده شده، A مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)، $S_s$ ضریب ذخیره ویژه آبخوان، $\Delta h_{max}$ حد مجاز تغییر ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی (متر)، nz تعداد مناطق نیاز و ns تعداد بخشهای مصرف‌کننده آب واقع در هر منطقه نیاز است.

در این مدل بهینه‌سازی، متغیرهای تصمیم (ژن‌های هر کروموزم) شامل میزان تخصیص از منابع آب زیرزمینی به‌منظور تأمین نیازهای ۵ شهر کرج بزرگ، کمالشهر، محمدشهر و مشکین‌دشت، ماهدشت، گرمدره و روستاهای شهرستان کرج و همچنین نیازهای کشاورزی و صنعت بود. همچنین متغیرهای تصمیمی به‌منظور تخصیص از منابع آب سطحی برای مصارف شهرهای کرج بزرگ، کمالشهر و اراضی کشاورزی نیز در نظر گرفته شد (جدول ۱). میزان آب خروجی از سد کرج نیز به‌عنوان آخرین متغیر تصمیم در هر ماه مدنظر قرار گرفت. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم برای هر ماه از افق برنامه‌ریزی برابر با ۱۲ بود که برای یک دوره ۳۰ ساله تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۴۳۲۰=۳۰×۱۲×۱۲ خواهد بود. به‌منظور تدوین سیاست‌های بهره‌برداری دراز مدت از منابع آب سطحی و زیرزمینی سه افق ۱۳۹۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ در نظر گرفته شد و سیاست‌ها به تفکیک برای این سه دوره تعیین گردید.

هدف مدل تدوین شده، تأمین نیاز بخشهای مختلف با توجه به اولویتهایی بود که برای آنها در نظر گرفته شد (جدول ۲). بنابراین به‌منظور دستیابی به این هدف لازم است مدل، تخصیص‌ها را به نحوی ارائه دهد که حتی‌المکان با توجه به منابع آبی موجود، نیازها تأمین شوند (بخش اول تابع هدف). همچنین از آنجا که الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده قادر به تشخیص اولویتها در تخصیص نیست، لذا باید ترم دیگری را نیز به تابع هدف اضافه نمود تا تخصیص صورت گرفته مطابق اولویتهای مدنظر باشد و از آن تخطّی ننماید. در صورت عدم ارائه این ترم، ممکن است تأمین نیاز صورت گیرد اما بخشهایی که دارای اولویت بالا در تأمین هستند از قابلیت اطمینان پایینی برخوردار شود که مطلوب این تحقیق نیست.

بر اساس رابطه سطح- حجم مخزن سد کرج و میزان ارتفاع تبخیر ماهانه می‌توان میزان کل تبخیر از سطح دریاچه سد را مطابق رابطه ۲ به‌دست آورد. میزان حجم مخزن سد در انتهای هر گام زمانی با استفاده از رابطه ۳ مورد محاسبه قرار گرفت. با توجه به اینکه شهر تهران در اولویت اول تخصیص از سد کرج قرار دارد، لذا مطابق رابطه ۴ ابتدا مجموع آب حاصل از کانال انتقال سد طالقان، میزان آب خروجی از سد کرج و جریانات بین‌راهی که پس از سد کرج وارد ایستگاه بیلقان می‌شود، به شهر تهران تخصیص می‌یابد و مازاد آن به‌منظور تخصیص به نیازهای کرج در نظر گرفته می‌شود.

در محدوده مورد مطالعه، برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی به میزان نیاز صورت می‌گیرد و برداشت مازادی در این زمینه انجام نمی‌شود تا برنامه‌ریزی بر روی آن صورت گیرد. در روابط ارائه شده، دو مقدار برای تخصیص از هر منبع ذکر شد. این دو مقدار عبارت‌اند از: تخصیص بر اساس متغیرهای تصمیم ($RS_{tzs}$ و $RG_{tzs}$) و بر اساس اولویتهای منابع و مصارف ($ARS_{tsz}$ و $ARG_{tsz}$). تفاوت این مقادیر در اولویتهای منابع و مصارف است. به این صورت که به‌منظور تخصیص، ابتدا بر اساس اولویت منابع، تخصیص به نیازها صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه منابع آب سطحی در اولویت اول برداشت قرار دارند، تأمین نیازها با توجه به اولویت مناطق و بخشها بر اساس این منبع انجام شده و در صورت کمبود و با رعایت محدودیتهای برداشت از آبخوان (با توجه به شرایط پایداری آبخوان که تخصیص باید به میزان ورودی منهای خروجی و در نظر گرفتن محدودیت تغییرات تراز ماهانه نیازها باشد)، کمبود نیازها جبران می‌گردد (رابطه ۸).

**جدول ۱**- نحوه تأمین مصارف از منابع آب سطحی و زیرزمینی

| مصارف | شهر تهران | کرج بزرگ | کمالشهر | مشکین‌دشت | ماهدشت | گرم‌دره | روستاها | صنعت | کشاورزی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| منابع آب سطحی | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ |
| منابع آب زیرزمینی | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |


Archive of SID
www.SID.ir

**جدول ۲**- میزان اولویت مصارف در تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی

| مصارف | شهر تهران | کرج بزرگ | کمالشهر | مشکین‌دشت | ماهدشت | گرم‌دره | روستاها | صنعت | کشاورزی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| اولویت | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |

به‌عبارت دیگر مقادیر تخصیص داده شده به مصارف مطابق روابط ۷ و ۱۰ بر اساس اولویت منابع و مصارف بوده و در صورت وجود آب، تنها به میزان نیاز آب تخصیص می‌یابد و متغیرهای تصمیم نیز در طی فرایند بهینه‌سازی خود را به این مقادیر نزدیک می‌نمایند که در صورت اختلاف مقادیر تخصیصی بر مبنای اولویت ($ARS_{tsz}$ و $ARG_{tsz}$) و مقادیر متغیر تصمیم ($RS_{tzs}$ و $RG_{tzs}$)، تابع جریمه‌ای مطابق ترم دوم رابطه ۵ به مقدار تابع هدف اضافه می‌شود تا جواب مشخص شده توسط مدل مورد بازنگری قرار گیرد. ترم اول این رابطه در واقع محدودیت ظرفیت مخازن را کنترل می‌نماید که با استفاده از ضریب $\gamma$ (که برابر با ۱۰۰۰ است) با ترم اول این رابطه هم بعد می‌گردد. ضرایب $\beta,\alpha$ که برابر با ۱۰ هستند، به‌منظور هم بعد نمودن مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به‌ذکر است که این ضرایب با سعی و خطا تعیین شده‌اند. همچنین محدودیت در نظر گرفته شده برای تخصیص بهینه به مصارف از منابع آب زیرزمینی به این صورت است که برداشت به گونه‌ای صورت گیرد که تغییرات ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی از ۳ سانتی‌متر تجاوز ننماید. با توجه به اینکه چاههای جذبی در نقاط شهری و آب برگشتی از اراضی کشاورزی، حجم قابل توجهی را وارد آبخوان می‌نمایند، به‌منظور تعیین میزان تغییرات حجم آب زیرزمینی، از میزان خالص برداشت از منبع آب زیرزمینی استفاده شد (رابطه ۹).

در این مطالعه با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و در نتیجه زمان‌بر بودن اجرای مدل بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای به‌منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص استفاده گردید. این الگوریتم نسخه مناسب‌تری از الگوریتم ژنتیک معمولی برای تسریع در دستیابی به جواب بهینه است. از آنجا که در اغلب مدل‌های مدیریتی تعداد متغیرهای تصمیم زیاد است و همچنین فرایند محاسبه تابع هدف از پیچیدگی بالایی برخوردار است، لذا باید از روشهای فراکاوشی به‌منظور تعیین مقادیر بهینه استفاده شود. استفاده از این الگوریتم برای حل مسائل چند دوره‌ای توسط کراچیان و کارآموز توصیه و توسعه داده شده است[۲۴]. در این مدل‌ها میزان تخصیص در هر ماه تابعی از ماههای قبل و بعد از آن است. به‌عبارت دیگر این الگوریتم‌ها به‌صورت دینامیکی عمل کرده و تخصیص در هر زمان را به‌طور مستقل از سایر زمان‌ها در نظر نمی‌گیرند. این نحوه برخورد منجر به اتخاذ سیاست‌های واقعی‌تری خواهد شد که در بسیاری از مسائل مدیریت منابع آب امروز مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که این الگوریتم توسط زهرایی و همکاران در سال ۲۰۰۸ مورد بازنگری و اصلاح قرار گرفته است[۲۵].

ساختار مدل بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است. در این روش حل، ابتدا مدل بهینه‌سازی برای یک دوره یک‌ساله اجرا و مقادیر بهینه آن تعیین شد. سپس از نتایج بهینه‌سازی مرتبط با سال اول به‌عنوان مقادیر اولیه به‌جای تولید مقادیر تصادفی برای هر ژن، برای بهینه‌سازی سال دوم مورد استفاده قرار گرفت. این روند تا تکمیل دوره برنامه‌ریزی مورد نظر ادامه یافت.

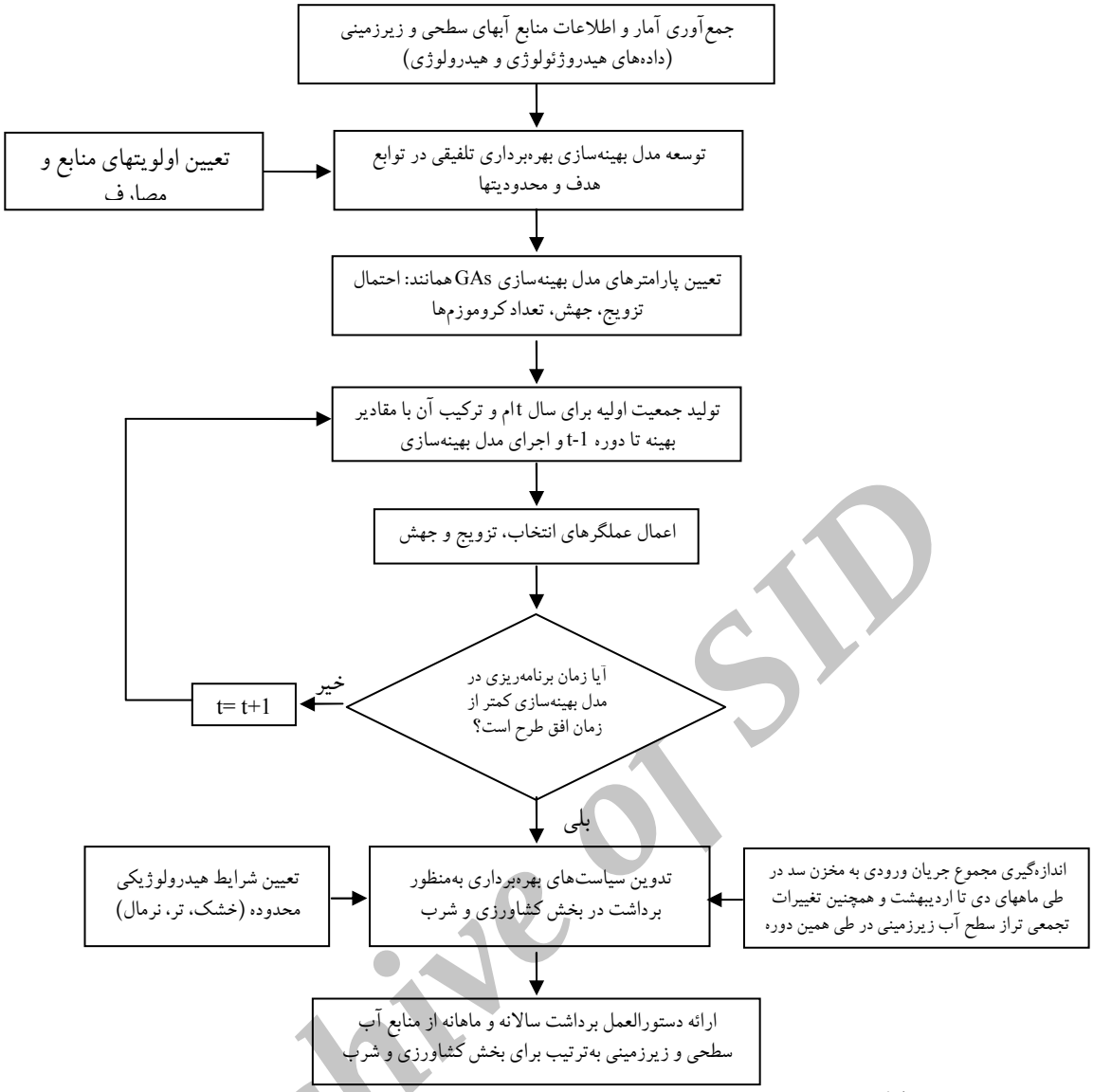
در این تحقیق اولویت منابع، مصارف و مناطق مورد بررسی در مدل بهینه‌سازی به این صورت دیده شد که ابتدا با توجه به حجم آورد رودخانه، تخصیص از منابع آب سطحی در اولویت اول نسبت به منابع آب زیرزمینی قرار گرفت. در خصوص مصارف نیز ابتدا بخش شرب سپس صنعت و در نهایت اراضی کشاورزی، تأمین نیاز شد. در خصوص اولویت‌بندی مناطق نیز به این صورت عمل گردید که ابتدا مناطق شهری بزرگ و سپس مناطق حاوی اراضی کشاورزی و صنعتی از منابع آبی موجود بهره‌مند شدند.

## ۴- کاربرد مدل

با توجه به اهمیت مطالعه مناطق بحرانی و دارای حساسیت خاص سیاسی، اجتماعی و منطقه‌ای، محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، شهرستان کرج انتخاب گردید. این محدوده به‌دلیل نزدیکی به مرکز کشور، تراکم جمعیتی زیادی را در سالهای اخیر متحمل شده است. این امر منجر به افزایش برداشت از ذخایر زیرزمینی و در نتیجه افت قابل توجه در آبخوان دشت تهران-کرج شده است.

در این مطالعه به‌منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص و تدوین سیاست‌های دراز مدت، محدوده مورد تحقیق به پنج منطقه شهری، یک منطقه روستایی و دو منطقه کشاورزی و صنعتی تقسیم‌بندی شد و نیازهای آبی در طول سه دوره کوتاه مدت (۱۳۹۰)، میان مدت (۱۴۰۰) و بلند مدت (۱۴۱۰) به‌صورت ثابت فرض شد. همچنین فرض شد که راندمان آبیاری از ۴۰ درصد در شرایط فعلی به ۶۰ درصد در افق طرح (۱۴۱۰) خواهد رسید. با توجه به اینکه اکثر مناطق مورد بررسی، شهرهای کوچک بوده و آبخوان دشت به‌تنهایی قابلیت تأمین نیازهای آبی آنها را دارد لذا از بین مناطق شهری تنها شهرهای کرج بزرگ و کمالشهر قادر به تأمین نیازهای آبی خود از هر دو منبع سطحی و زیرزمینی هستند.


Archive of SID
www.SID.ir




**شکل ۱**- ساختار مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی به‌منظور ارائه دستورالعمل بهره‌برداری بهینه

مؤلفه‌های برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت بودند از: رودخانه کرج و چالوس، سد کرج و طالقان (مخزن سطحی)، چاههای برداشت (منبع زیرزمینی) و مناطق نیازها که شامل شهرها، روستاها، مناطق کشاورزی و صنعتی می‌شود (شکل ۲).

در این مطالعه با توجه به کمبود منابع آبی درون حوضه‌ای از منابع آبی برون حوضه‌ای مانند رودخانه چالوس نیز استفاده شد. همچنین از آنجا که برای تأمین نیاز آبی شرب، لازم است از خط انتقال طالقان نیز برای این امر استفاده گردد، میزان آب انتقالی توسط این خط در برنامه‌ریزی توسعه منابع آب مورد توجه قرار گرفت. به‌منظور شبیه‌سازی سیستم منابع آب سطحی محدوده، از داده‌های تاریخی ۳۰ سال گذشته که بیانگر دوره‌های خشک، تر و نرمال است، استفاده گردید.

## ۵- ارائه نتایج

با توجه به مدل بهینه‌سازی تدوین شده و استفاده از الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای، مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای افقهای برنامه‌ریزی مورد نظر مشخص گردید. با توجه به این مقادیر بهینه، سیاست‌ها و دستورالعمل‌های بهره‌برداری برای هر بخش در هر افق تدوین شد. به‌منظور ارائه سیاست‌های بهره‌برداری در بخش کشاورزی به این صورت عمل شد که با توجه به آمار مصرف سالانه کشاورزی می‌توان دریافت که میزان آب تخصیص یافته در فصلهای کشت سال جاری، متأثر از میزان آورد رودخانه و تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی در طی یک دوره ۵ ماهه است. لذا میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌منظور تخصیص به بخش کشاورزی را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۱ تعریف نمود

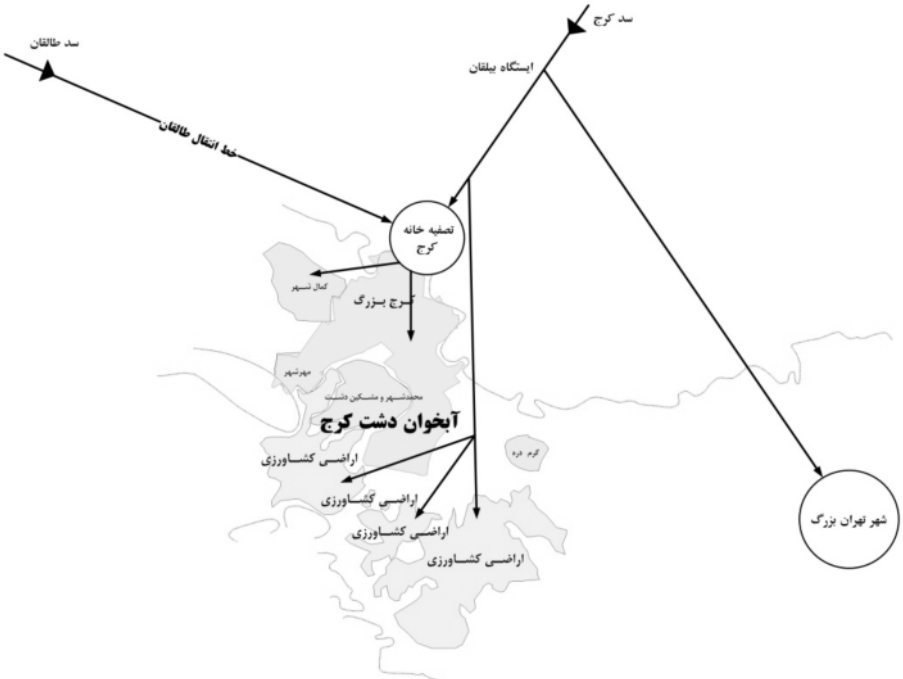
Archive of SID


www.SID.ir

$$Q = f\left( \sum_{m=Day}^{Ordi} I_m , \sum_{m=Day}^{Ordi} \Delta h_m \right) \qquad (۱۱)$$

با توجه به ارتباط خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته ارائه شده در رابطه ۱۱، برای تدوین سیاست بهره‌برداری از رگرسیون خطی بین مقادیر بهینه تخصیص و سری تاریخی آورد رودخانه کرج و تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شد (جدول ۳). مطابق این جدول، زمانی که میزان آورد رودخانه و تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره ۵ ماهه یعنی دی تا اردیبهشت زیاد باشد، دستورالعمل تدوین شده برداشت بیشتر از منابع آب سطحی را توصیه خواهد نمود که امری کاملاً منطقی و مطابق سیستم طبیعی رودخانه است.

در صورتی که میزان تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان کم باشد و آورد رودخانه نیز در حد نیاز آبی نباشد، سیاست تدوین شده، استحصال از منابع آب زیرزمینی را توصیه می‌نماید. به‌منظور صحت‌سنجی سیاست‌های تدوین شده، از داده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی تاریخی که قبلاً در مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته بود، استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی بیانگر مطلوب بودن دستورالعمل‌های بهره‌برداری تدوین شده برای افق کوتاه مدت مختلف برنامه‌ریزی است (شکلهای ۳ و ۴). همچنین به‌منظور ارزیابی میزان خطای سیاست‌های تدوین شده از شاخصهای ارائه شده در جدول ۴ استفاده شد. مطابق این جدول، شاخصهای خطا در دوره صحت‌سنجی از مقادیر مطلوبی برخودار بوده و این نشان‌دهنده کارایی بالای دستورالعمل‌های ارائه شده در بخش کشاورزی به‌منظور برداشت



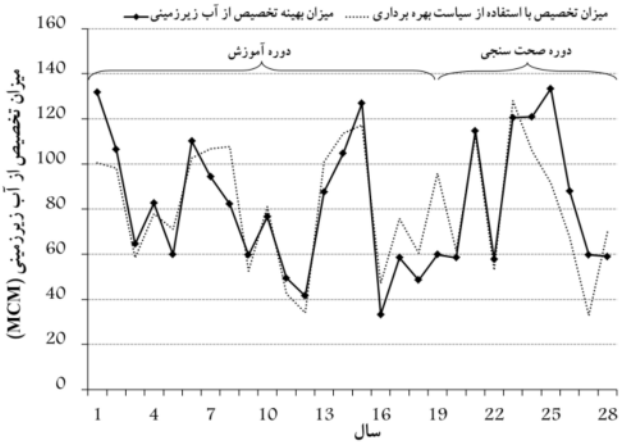

**شکل ۲**- شماتیک محدوده مورد مطالعه با توجه به مؤلفه‌های برنامه‌ریزی منابع آب

**جدول ۳**- سیاست‌های بهره‌برداری به‌منظور تخصیص به بخش کشاورزی برای یک دوره ۲۵ ساله

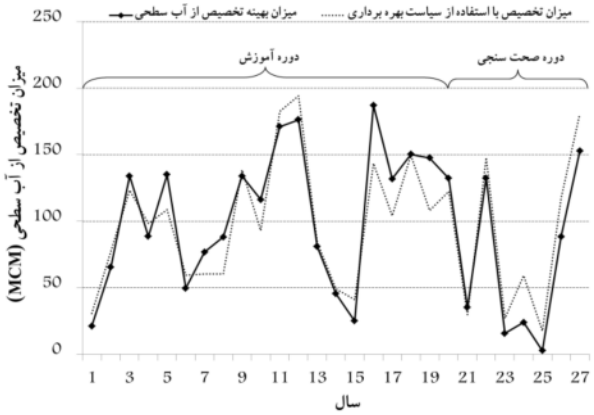
| افق | سیاست بهره‌برداری | |
|---|---|---|
| | منابع آب سطحی | منابع آب زیرزمینی |
| ۱۳۹۰ | $0.96\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - 260\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $-0.67\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + 547\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |
| ۱۴۰۰ | $0.94\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - 348\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $-0.6\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + 599\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |
| ۱۴۱۰ | $0.92\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - 487\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $-0.67\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + 764\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |


www.SID.ir

بهینه از منابع برای برنامه‌ریزی در یک افق ۲۵ ساله است. شاخصهای خطای به‌کار رفته شامل شاخص توافق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی[1]، شاخص متوسط قدرمطلق خطاها[2]، شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها[3] و شاخص کارایی[4] بود. مقایسه سیاست‌های ارائه شده برای بخش کشاورزی در افقهای میان مدت و بلند مدت نیز صورت گرفت که به‌دلیل دارا بودن وضعیت مشابه افق ۱۳۹۰، از ارائه آن در این بخش خودداری شد. با توجه به اینکه روابط ارائه شده برای دستورالعمل‌های بهره‌برداری دارای مقداری خطا هستند، لذا نمی‌توان به‌طور صریح مقدار تخصیص‌ها را با استفاده از این سیاست‌ها تعیین نمود. لذا بازه اطمینان ۸۰ درصد ضرایب روابط ارائه شده در جدول ۳ به‌صورت جدول ۵ بیان می‌گردد.




**شکل ۳**- مقایسه مقادیر تخصیص از آب زیرزمینی به بخش کشاورزی با استفاده از سیاست بهره‌برداری و مقادیر بهینه در افق ۱۳۹۰




**شکل ۴**- مقایسه مقادیر تخصیص از آب سطحی به بخش کشاورزی با استفاده از سیاست بهره‌برداری و مقادیر بهینه در افق ۱۳۹۰

**جدول ۴**- مقایسه مقادیر شاخصهای خطای سیاست‌های بهره‌برداری در بخش کشاورزی در افق ۱۳۹۰

| شاخص خطا | دوره آموزش | دوره صحت‌سنجی |
|---|---|---|
| RMSE | ۱۹/۸ | ۲۰/۸۴ |
| MAE | ۶/۴ | ۱۶/۵ |
| IOA | ۰/۹۵ | ۰/۹۷ |
| Efficiency | ۰/۸۴ | ۱ |

مقادیر شاخصها از طریق روابط زیر محاسبه می‌گردد

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - x_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{n}(|x_{mi} - \overline{x}_m| + |x_{ci} - \overline{x}_m|)^2} \quad (۱۲)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_{mi} - x_{ci}|}{n} \quad (۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - x_{ci})^2}{n}} \quad (۱۴)$$

$$EFF = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{ci} - \overline{x}_m)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - \overline{x}_m)^2}}\right)^2 \quad (۱۵)$$

که در این روابط $X_{mi}$ مقدار اندازه‌گیری شده، $X_{ci}$ مقدار پیش‌بینی شده و $\overline{X}_m$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج مدل بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در مناطقی که تنها منبع تأمین آنها از آب زیرزمینی است، در بخش شرب به‌دلیل نیاز آبی کم، آبخوان دشت قادر به تأمین نیازهای آنها در طول دوره ۲۵ ساله خواهد بود.

اما در خصوص شهرهای کرج بزرگ و کمالشهر به‌دلیل استفاده همزمان از منابع آب، سیاست‌های برداشت برای هر دوره برنامه‌ریزی با توجه به شرایط هیدرولوژیکی منطقه متفاوت است (جدولهای ۶ و ۷). به‌منظور تعیین شرایط هیدرولوژیکی ماهانه لازم است در ماههای مهر تا اسفند از تراز سطح آب اندازه‌گیری شده سد کرج در ابتدای ماه مهر (با توجه به اینکه میزان آورد در این ماه تا حدود زیادی شرایط هیدرولوژیکی ۶ ماهه دوم سال را تعیین می‌نماید) و جدول ۸ که به‌عنوان نمونه نحوه تعیین شرایط هیدرولوژیکی را برای افق ۱۳۹۰ نشان می‌دهد، استفاده نمود. همچنین برای ماههای فروردین تا خرداد از تراز سطح آب قرائت شده ابتدای ماه اسفند و برای سایر ماههای تیر، مرداد و شهریور از تراز سطح آب اندازه‌گیری ابتدای همان ماه می‌توان استفاده نمود.

[1] Index of Agreement (IOA)
[2] Mean Absolute Error (MAE)
[3] Root Mean Square Error (RMSE)
[4] Efficiency


Archive
www.SID.ir

در این بخش، دستورالعمل‌های تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی شهر کرج بزرگ با توجه به شرایط هیدرولوژیکی دارای عدم دقت هستند که میزان عدم دقت[1] درصدهای ماهانه برای افقهای مختلف برنامه‌ریزی به‌صورت جدول ۹ است. با توجه به این جدول مشخص می‌شود که سیاست‌های تدوین شده برای بخش شرب از دقت قابل قبولی برای برنامه‌ریزی در افق درازمدت برخوردار هستند.

[1] Imprecise

**جدول ۵**- بازه اطمینان ۸۰ درصد ضرایب روابط جدول ۳

| افق | سیاست بهره‌برداری | |
|---|---|---|
| | منابع آب سطحی | منابع آب زیرزمینی |
| ۱۳۹۰ | $[0.84,1.1]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - [198,322]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $[-0.57,-0.77]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + [496,599]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |
| ۱۴۰۰ | $[0.83,1]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - [273,423]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $[-0.51,-0.69]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + [540,658]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |
| ۱۴۱۰ | $[0.79,1]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m - [381,593]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ | $[-0.55,-0.8]\times\sum_{m=Day}^{Ordi} I_m + [655,873]\times\sum_{m=Day}^{Ordi}\Delta h_m$ |

**جدول ۶**- سیاست‌های تخصیص از منابع آب برای تأمین آب شرب شهر کرج در افق ۱۳۹۰ (درصد)

| ماه | دوره تر | | دوره نرمال | | دوره خشک | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی |
| مهر | ۹۹/۴۶ | ۰/۵۴ | ۷۲/۴۲ | ۲۷/۵۸ | ۶۷/۷۴ | ۳۲/۲۶ |
| آبان | ۳۵ | ۶۵ | ۳۴/۲۱ | ۶۵/۷۹ | ۳۴/۷۶ | ۶۵/۲۴ |
| آذر | ۳۸/۲۵ | ۶۱/۷۵ | ۲۹/۳۵ | ۷۰/۶۵ | ۲۹/۹۴ | ۷۰/۰۶ |
| دی | ۲۶/۳ | ۷۳/۷ | ۲۶/۷۳ | ۴۳/۲۷ | ۲۷/۸۵ | ۷۲/۱۵ |
| بهمن | ۳۱ | ۶۹ | ۳۱/۷۲ | ۶۸/۲۸ | ۳۱/۷۴ | ۶۸/۲۶ |
| اسفند | ۲۷/۲۳ | ۷۲/۷۷ | ۲۹/۸۳ | ۷۰/۱۷ | ۲۷ | ۷۳ |
| فروردین | ۹۹/۶۵ | ۰/۳۵ | ۹۹/۳۴ | ۰/۶۶ | ۹۹/۸۸ | ۰/۱۲ |
| اردیبهشت | ۹۹/۷۹ | ۰/۲۱ | ۹۹/۸۵ | ۰/۱۵ | ۹۹/۵۵ | ۰/۴۵ |
| خرداد | ۹۹/۸۳ | ۰/۱۷ | ۹۹/۷ | ۰/۳ | ۹۹/۷۳ | ۰/۲۷ |
| تیر | ۹۹/۷۹ | ۰/۲۱ | ۹۹/۶ | ۰/۴ | ۹۸/۷۱ | ۱/۲۹ |
| مرداد | ۹۹/۸۶ | ۰/۱۴ | ۹۹/۵۹ | ۰/۴۱ | ۳۸ | ۶۲ |
| شهریور | ۹۹/۹۲ | ۰/۰۸ | ۹۹/۹۲ | ۰/۰۸ | ۳۲/۲۶ | ۶۷/۷۴ |

**جدول ۷**- سیاست‌های تخصیص از منابع آب برای تأمین آب شرب شهر کمالشهر در افق ۱۳۹۰ (درصد)

| ماه | دوره تر | | دوره نرمال | | دوره خشک | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی |
| مهر | ۹۸/۱۵ | ۱/۸۴ | ۲/۳۶ | ۹۷/۶۳ | ۰/۸۴ | ۹۹/۱۶ |
| آبان | ۳ | ۹۷ | ۰/۵۴ | ۹۹/۴۶ | ۱ | ۹۹ |
| آذر | ۳/۱۱ | ۹۶/۸۸ | ۱/۵۶ | ۹۸/۴۳ | ۱/۵ | ۹۸/۵ |
| دی | ۱/۷۵ | ۹۸/۲۵ | ۰/۰۳ | ۹۹/۹۷ | ۰/۸۲ | ۹۹/۱۸ |
| بهمن | ۱/۳۶ | ۹۸/۶۴ | ۱/۴۵ | ۹۸/۵۵ | ۰/۴۹ | ۹۹/۵۱ |
| اسفند | ۱/۷۹ | ۹۸/۲۱ | ۰/۹۷ | ۹۹/۰۳ | ۱/۱۹ | ۹۸/۸ |
| فروردین | ۹۷/۸ | ۲/۲ | ۹۹/۰۸ | ۰/۹۲ | ۹۹/۵۷ | ۰/۴۳ |
| اردیبهشت | ۹۸/۰۵ | ۱/۹۵ | ۹۷/۹ | ۲/۱ | ۹۷/۸ | ۲/۲ |
| خرداد | ۹۸/۵۷ | ۱/۴۳ | ۹۷/۱۳ | ۲/۸۷ | ۹۸/۸ | ۱/۲ |
| تیر | ۹۸/۵۱ | ۱/۴۹ | ۹۸/۶ | ۴/۴ | ۹۸/۵۹ | ۱/۴۱ |
| مرداد | ۹۸/۵۶ | ۱/۴۳ | ۹۸/۹ | ۱/۱ | ۱/۱۷ | ۹۸/۸۳ |
| شهریور | ۹۹/۳ | ۰/۶۹ | ۹۹/۵۳ | ۰/۴۷ | ۲/۴ | ۹۷/۵۹ |

Archive of SID



www.SID.ir

**جدول ۸**- نحوه تعیین شرایط هیدرولوژیکی با استفاده از اطلاعات تراز ماهانه سد کرج (افق ۱۳۹۰)

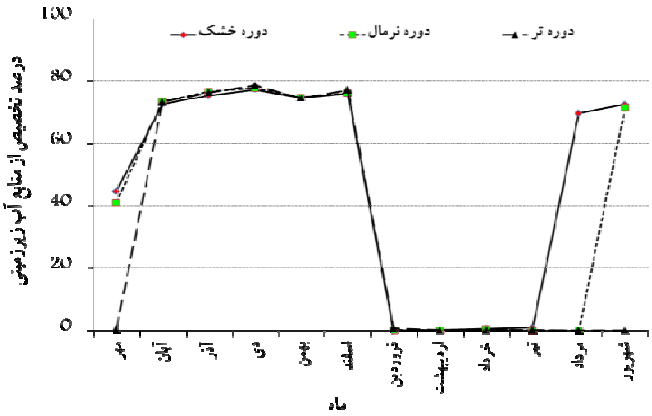
| ماه | شرایط هیدرولوژیکی | | |
|---|---|---|---|
| | خشک | نرمال | تر |
| مهر | ۱۶۹۰/۴۵H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۷۰۴/۸۹H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۴۵ | ۱۷۳۶/۴H ≤ ≤ ۱۷۰۴/۸۹ |
| آبان | ۱۶۹۰/۲۶H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۵H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۲۶ | ۱۷۱۰/۸۵H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۵ |
| آذر | ۱۶۹۰/۲H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۵H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۲ | ۱۶۹۵/۹H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۵ |
| دی | ۱۶۹۰/۱H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۵H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۱ | ۱۶۹۹/۹H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۵ |
| بهمن | ۱۶۹۰/۱H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۴H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۱ | ۱۶۹۵/۸H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۴ |
| اسفند | ۱۶۹۰/۱H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۴H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۱ | ۱۶۹۴/۸۸H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۴ |
| فروردین | ۱۶۹۰/۱۲H ≤ ۱۶۹۰ | ۱۶۹۰/۴۳H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۱۲ | ۱۷۱۶/۷H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۴۲ |
| اردیبهشت | ۱۷۰۱/۴H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۳ | ۱۷۱۴/۴H ≤ ≤ ۱۷۱۰/۴ | ۱۷۳۵/۲H ≤ ≤ ۱۷۱۴/۴ |
| خرداد | ۱۷۲۴/۱H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۳ | ۱۷۴۶H ≤ ≤ ۱۷۲۴/۱ | ۱۷۶۳/۴H ≤ ≤ ۱۷۴۶ |
| تیر | ۱۷۳۰/۷H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۴۲ | ۱۷۵۷/۳H ≤ ≤ ۱۷۳۰/۷ | ۱۷۶۳/۴H ≤ ≤ ۱۷۵۷/۳ |
| مرداد | ۱۷۰۳/۶H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۲ | ۱۷۵۲/۴H ≤ ≤ ۱۷۰۳/۶ | ۱۷۶۳/۴H ≤ ≤ ۱۷۲۵/۴ |
| شهریور | ۱۷۰۱/۱H ≤ ≤ ۱۶۹۰/۱۷ | ۱۷۴۱/۱H ≤ ≤ ۱۷۰۱/۱ | ۱۷۵۵/۲H ≤ ≤ ۱۷۴۱/۱ |

**جدول ۹**- میزان عدم دقت سیاست‌های تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی شهر کرج بزرگ

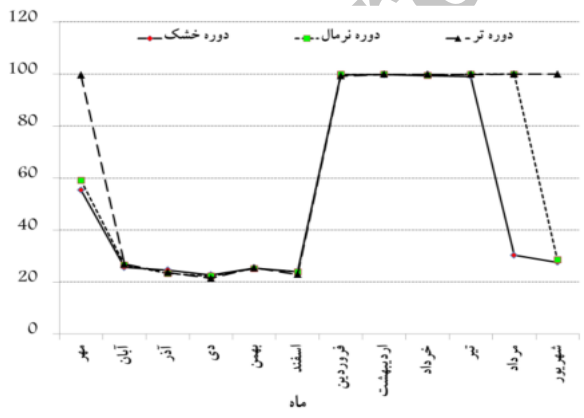
| افق/ماه | | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| میزان | ۱۳۹۰ | ۱/۹۲ | ۱/۹۱ | ۱/۷۴ | ۱/۴ | ۲/۵ | ۱/۰۶ | ۰/۶۲ | ۰/۴۳ | ۰/۴۷ | ۱/۱۳ | ۰/۹۳ | ۰/۶۳ |
| عدم | ۱۴۰۰ | ۱/۹۵ | ۱/۹۵ | ۱/۶۷ | ۱/۷۷ | ۱/۹۶ | ۲/۵۲ | ۰/۴۶ | ۰/۳۸ | ۱/۱۴ | ۰/۷۲ | ۰/۹۸ | ۱/۶۸ |
| دقت (درصد) | ۱۴۱۰ | ۱/۵۷ | ۱/۵۳ | ۲/۰۸ | ۱/۳۹ | ۱/۶۴ | ۲/۴۶ | ۱/۱۸ | ۰/۴۷ | ۰/۴۶ | ۰/۳۱ | ۰/۸۴ | ۱/۶۸ |

با توجه به شکلهای ۵ و ۶ می‌توان دریافت که دستورالعمل تدوین شده به‌خوبی می‌تواند با توجه به شرایط هیدرولوژیکی منطقه، مناسب‌ترین تصمیم را برای برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی اتخاذ نماید.

به‌طور کلی دستورالعمل‌های تدوین شده به‌گونه‌ای است که برداشت از منابع آب سطحی بیشتر در فصلهای گرم به‌دلیل پرآب بودن رودخانه و برداشت از منابع آب زیرزمینی در فصلهای سرد صورت گیرد زیرا تغذیه اصلی آبخوان دشت در ۶ ماهه اول سال است و چنانچه در این فصلها، برداشتی بیش از ظرفیت آبخوان انجام شود منجر به افزایش تصاعدی افت آبخوان در سایر فصلها خواهد شد. با توجه به منتفع شدن شهر کمالشهر از هر دو منبع برای تأمین نیازها، سیاست‌های برداشت برای سه افق برنامه‌ریزی برای این شهر همانند شهر کرج تدوین شد که به‌عنوان نمونه تنها دستورالعمل‌های بهره‌برداری مرتبط با افق ۱۴۱۰ در جدول ۱۰ ارائه شده است. همچنین میزان عدم دقت سیاست‌های ارائه شده برای این شهر نیز در جدول ۱۱ نشان داده شده است.




**شکل ۵**- درصد تخصیص از منابع آب زیرزمینی به‌منظور مصارف شرب شهر کرج بزرگ با توجه به شرایط هیدرولوژیکی در افق ۱۴۰۰




**شکل ۶**- درصد تخصیص از منابع آب سطحی به‌منظور مصارف شرب شهر کرج بزرگ با توجه به شرایط هیدرولوژیکی در افق ۱۴۰۰


www.SID.ir
Archive of SID

**جدول ۱۰**- سیاست‌های تخصیص از منابع آب برای تأمین آب شرب شهر کمالشهر در افق ۱۴۱۰ (درصد)

| ماه | دوره تر | | دوره نرمال | | دوره خشک | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی | سطحی | زیرزمینی |
| مهر | ۹۷/۸ | ۲/۲ | ۱/۹ | ۹۸/۱ | ۰ | ۱۰۰ |
| آبان | ۲/۱ | ۹۷/۹ | ۰/۱ | ۹۹/۶ | ۱ | ۹۹ |
| آذر | ۱ | ۹۹ | ۰/۱ | ۹۹/۹ | ۰/۸ | ۹۹/۲ |
| دی | ۱/۸ | ۹۸/۲ | ۰/۴ | ۹۹/۶ | ۰ | ۱۰۰ |
| بهمن | ۱/۷ | ۹۸/۳ | ۰/۱ | ۹۹/۹ | ۰/۱ | ۹۹/۹ |
| اسفند | ۰/۹ | ۹۹/۱ | ۰/۴ | ۹۹/۶ | ۰ | ۱۰۰ |
| فروردین | ۹۹/۸۸ | ۰/۱۲ | ۹۸/۵ | ۱/۵ | ۹۹/۷ | ۰/۳ |
| اردیبهشت | ۹۹/۸۸ | ۰/۱۲ | ۹۹/۱۳ | ۰/۸۷ | ۹۸/۷ | ۱/۳ |
| خرداد | ۹۹/۷۵ | ۰/۲۵ | ۹۸/۷ | ۱/۳ | ۹۹/۲ | ۰/۸ |
| تیر | ۹۹/۸۶ | ۰/۱۴ | ۹۹/۸۳ | ۰/۱۷ | ۹۹/۷۴ | ۰/۲۶ |
| مرداد | ۹۹/۷۶ | ۰/۲۴ | ۹۸/۱۷ | ۱/۸۳ | ۰/۰۵ | ۹۹/۹۵ |
| شهریور | ۹۸/۳ | ۱/۷ | ۹۹/۵ | ۰/۵ | ۰/۲۲ | ۹۹/۷۸ |

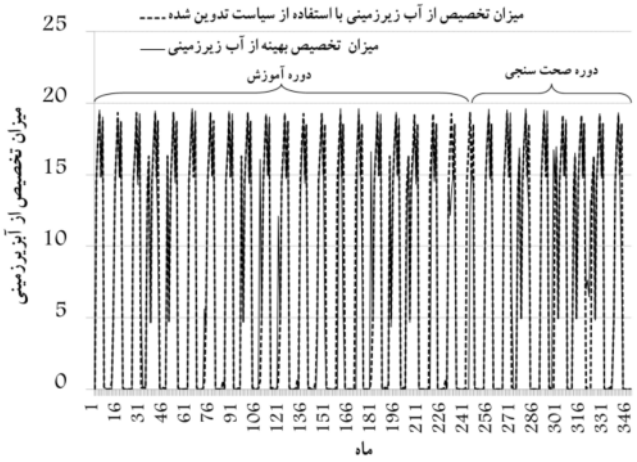
**جدول ۱۱**- میزان عدم دقت سیاست‌های تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی شهر کمالشهر

| | افق/ماه | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| میزان عدم | ۱۳۹۰ | ۲/۷۲ | ۱/۸۸ | ۲/۸۱ | ۱/۳۴ | ۱/۸۹ | ۲/۳۳ | ۱/۶۲ | ۳/۳۶ | ۲/۷۹ | ۲/۲۳ | ۲/۰۹ | ۱/۷۶ |
| دقت | ۱۴۰۰ | ۱/۴۷ | ۱/۷۲ | ۱/۹۳ | ۱/۱۷ | ۱/۱۱ | ۱/۴۳ | ۱/۹۱ | ۱/۴۴ | ۲/۲۹ | ۲/۴۳ | ۱/۴ | ۲/۷۹ |
| (درصد) | ۱۴۱۰ | ۲/۱۳ | ۲/۳۵ | ۱/۲ | ۱/۳۸ | ۰/۷۵ | ۰/۹۲ | ۱/۴۵ | ۱/۷۸ | ۱/۵۴ | ۰/۴۷ | ۱/۲۷ | ۱/۴۶ |

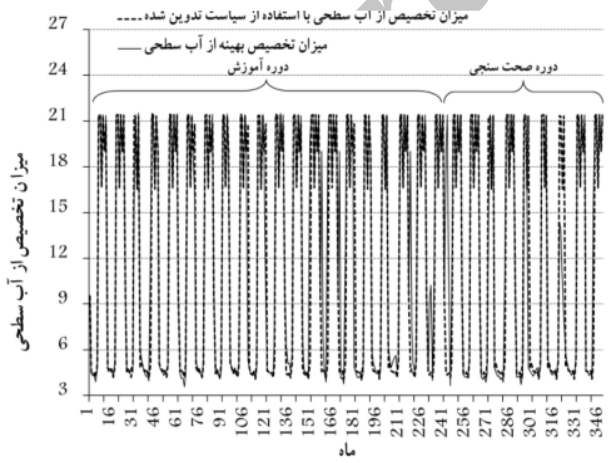
به‌منظور تعیین میزان خطای سیاست‌ها در بخش شرب، از شاخصهای خطای ارائه شده در بخش کشاورزی استفاده و مقادیر خطای ناشی از دستورالعمل‌های بهره‌برداری با مقادیر حاصل از مدل بهینه برای افقهای مختلف محاسبه گردید (جدول ۱۲). شکلهای ۷ و ۸ نیز نتایج حاصل از سیاست‌های تدوین شده را با مقادیر بهینه تخصیص در افق ۱۴۰۰ نشان می‌دهند.

**جدول ۱۲**- مقایسه مقادیر شاخصهای خطای سیاست‌های بهره‌برداری به‌منظور تخصیص به بخش شرب

| شاخص خطا | دوره آموزش | | | دوره صحت‌سنجی | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱۳۹۰ | ۱۴۰۰ | ۱۴۱۰ | ۱۳۹۰ | ۱۴۰۰ | ۱۴۱۰ |
| RMSE | ۱/۸ | ۳/۳ | ۳/۲ | ۲/۴ | ۳/۲۷ | ۳/۶ |
| MAE | ۰/۳ | ۱ | ۰/۴۴ | ۰/۲۶ | ۰/۷ | ۰/۲۷ |
| IOA | ۰/۹۶ | ۰/۹۴ | ۰/۹۶ | ۰/۹۴ | ۰/۹۴ | ۰/۹۵ |
| Efficiency | ۱/۰۶ | ۱/۰۹ | ۱/۰۶ | ۱/۰۸ | ۱/۱ | ۱/۰۷ |




**شکل ۷**- مقایسه میزان تخصیص از آب زیرزمینی با استفاده از مقادیر بهینه و نتایج سیاست تدوین شده در افق ۱۴۰۰ (کرج بزرگ)




**شکل ۸**- مقایسه میزان تخصیص از آب سطحی با استفاده از مقادیر بهینه و نتایج سیاست تدوین شده در افق ۱۴۰۰ (کرج بزرگ)

Archive of SID



www.SID.ir

## ۶- نتیجه‌گیری

دستاوردهای حاصل از این تحقیق شامل موارد زیر است:

۱- تعیین مقادیر بهینه تخصیص از هر منبع برای مناطق مورد بررسی با توجه به اولویتهای در نظر گرفته شده و برای سه افق برنامه‌ریزی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت؛

۲- تهیه دستورالعمل بهره‌برداری از منابع برای هر بخش در سه افق مشخص شده با توجه به تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی، میزان آورد رودخانه و شرایط هیدرولوژیکی منطقه؛

۳- صحت‌سنجی سیاست‌های تدوین شده؛

۴- تعیین میزان عدم دقت دستوالعمل‌های ارائه شده به‌منظور تصمیم‌گیری صحیح در بهره‌برداری.

## ۷- مراجع


1- Buras, N. (1963). "Conjunctive operation of dams and aquifers." *J. of the Hydraulics Division*, 89(6), 111-132.

2- Maknoon, R., and Burges, S.J. (1978). "Conjunctive use of ground and surface water." *J. of American Water Works Association*, 70, 419-424.

3- Azaiez, M.N. (2002). "A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs." *European J. of Operational Research*, 143, 611-624.

4- Karamouz, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2004). "Monthly water resources and irrigation planning: case study of conjunctive use of surface and groundwater resources." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 391-402.

5- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., and Sahuquillo, A. (2006). "Economic optimization of conjunctive use of surface water and groundwater at the basin scale." *J. of Water Resources Planning and Management*, 132(6), 454-467.

6- Dale Larry, L., Vicuna, S., and Dracup, J.A. (2008). "The conjunctive use of reservoirs and aquifers: Tradeoffs in electricity generation and water supply." *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, Honolulu, Hawaii.

7- Afshar, A., Zahraei, A., and Mariño, M.A. (2010). "Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: decomposition algorithm." *J. of Water Resources Planning. and Management*, 136(1), 59-71.

8- Safavi, H.R., and Alijanian, M.A. (2010). "Optimal crop planning and conjunctive use of surface water and groundwater resources using fuzzy dynamic programming." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(6), 383-397.

9- Coe Jack, J. (1990). "Conjunctive use-advantages, constraints, and examples." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(3), 427-443.

10- Latif, M. (1991). "Conjunctive water use to control waterlogging and salinization." *J. of Water Resources Planning and Management*, 117(6), 611-628.

11- Onta, P.R., Gupta, A.D., and Harboe, R. (1991). "Multistep planning model for conjunctive use of surface- and groundwater resources." *J. of Water Resources Planning and Management*, 117(6), 662-678.

12- Barlow, P.M., Ahlfeld, D.P., and Dickerman, D.C. (2003). "Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 129(1), 35-48.

13- Vedula, S., Mujumdar, P.P., and Chandra Sekhar, G. (2005). "Conjunctive use modeling for multicrop irrigation." *J. of Agricultural Water Management*, 73, 193-221.

14- Karamouz, M., Mohammad Rezapour Tabari, M., and Kerachian, R. (2007). "Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources." *J. of Water International*, 32(1), 163-176.


Archive of SID



www.SID.ir

15- Karamouz, M., Mohammad Rezapour Tabari, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2005). "Conjunctive use of surface and groundwater resources with emphasis on water quality." *World Water and Environmental Resources Congress*, Raymond Walton, Anchorage, Alaska, USA.

16- Karamouz, M. (2002). *Conjunctive use of surface and groundwater resources in south of Tehran*, Water and Environmental Center, Tehran. (In Persian)

17- Mohammad Rezapour Tabari, M., Maknoon, R., and Ebadi, E. (2009), "Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models." *J. of Water and Wastewater*, 69, 2-12. (In Persian)

18- Mohammad Rezapour Tabari, M., Maknoon, R., and Ebadi, E. (2010). "Conjunctive use management under yncertainty in aquifer parameters." *J. of Water and Wastewater*, 72, 2-15. (In Persian)

19- Mohammad Rezapour Tabari, M. (2003). "Optimal groundwater operation algorithm." M.Sc. Thesis, Amir Kabir University of Tech., Tehran. (In Persian)

20- Mahjouri, N. (2004). "Quality and quantity groundwater equilibrium model in Kashan plan." M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran. (In Persian)

21- Eslami, A. (2005). "Optimal crop pattern and agriculture water allocation conjunctive use model." M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran. (In Persian)

22- Ostadrahimi, I., Ardeshir, A., and Afshar, A. (2007). "Optimum design and operation of cyclic storage systems; lumped approach." *J. of Water and Wastewater*, 60, 41-54. (In Persian)

23- Safavi, H., Afshar, A., Ghaheri, A., Abrishamchi, A., and Tajrishi, M. (2007). "A quality-quantity simulation model for stream-aquifer interaction." *J. of Water and Wastewater*, 61, 2-14. (In Persian)

24- Kerachian, R., and Karamouz, M. (2006). "Optimal reservoir operation considering the water quality issues: A stochastic conflict resolution approach." *J. of Water Resources Research*, 42, 1-17.

25- Zahraie, B., Kerachian, R., and Malekmohammadi, B. (2008). "Reservoir operation optimization using adaptive varying chromosome length genetic algorithm." *J. of Water International*, 33(3), 1-12.

Archive of SID



www.SID.ir