مدیریت بهره‌برداری تلفیقی تحت شرایط عدم دقت در پارامترهای آبخوان

محمود محمدرضا پور طبری[1] رضا مکنون[2] تقی عبادی[2]

(دریافت ۸۷/۷/۲۵ پذیرش ۸۸/۵/۲۲)

چکیده

با توجه به این که سیاست‌های حاصل از مدیریت بهره‌برداری تلفیقی می‌تواند نقش قابل توجهی در پایداری و استفاده بهینه از منابع ایفا نماید، لذا اعمال شرایط واقعی سیستم منابع آب در مدل‌های مدیریتی منجر به نزدیکی قوانین بهره‌برداری به شرایط طبیعی می‌شود. در این تحقیق از ترکیب منطق فازی و روش بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی برای در نظر گرفتن عدم دقت در پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شد. پارامترهای مؤثر مذکور شامل ضرایب ذخیره ویژه، میزان تغذیه و تخلیه طبیعی آبخوان بود که اغلب در مدل‌های مدیریتی به‌طور جزئی و یا گذرا دیده می‌شود. با استفاده از اطلاعات هیدروژئولوژیکی منطقه و داده‌های پیزومترها، بازه تغییرات هر پارامتر برای تعیین تابع عضویت مشخص گردید. با اعمال برشهای فازی (اعداد بین صفر و یک) بر هر پارامتر تأثیرگذار و تولید بازه‌ای متناسب با آن، مدل بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی به‌منظور یافتن مقادیر حداقل و حداکثر تغییرات تراز، مورد اجرا قرار گرفت. با تکرار مراحل بالا می‌توان مقدار فازی پارامتر خروجی را تعیین نمود. برای مقایسه نتایج حاصل از اعمال عدم دقت در ارائه مقادیر بهینه تخصیص، مدل بهره‌برداری تلفیقی با هدف حداقل نمودن میزان کمبود در تأمین نیازهای آبی با توجه به محدودیتهای منابع آبی موجود، تدوین گردید. در این مدل محدوده مورد مطالعه به مناطقی تقسیم و با توجه به اولویتهای هر منطقه و در نظر گرفتن اهمیت نوع مصرف و نوع منبع، میزان تخصیص‌های بهینه تعیین شد. نتایج مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که هر چه در مدل تلفیقی شرایط واقعی سیستم منابع آبی به نحوه مطلوبی دیده شود، میزان اطمینان‌پذیری سیستم در تأمین نیازهای آبی از قابلیت بیشتری برخوردار خواهد بود. همچنین این نتایج به‌دلیل دخالت دادن نظرات تصمیم‌گیران مؤثر در تخصیص منابع آب از مطلوبیت و قابلیت اجرایی بالاتری برخوردار بود و از حالت ثباتی که در مدل‌سازی‌های معمول وجود دارد خارج شده و به‌صورت دینامیک و متناسب با سیاست‌هایی بود که برای منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، عدم دقت، تئوری مجموعه‌های فازی، مدل‌سازی آب زیرزمینی، اطمینان‌پذیری.

Conjunctive use Management under Uncertainty in Aquifer Parameters

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

(Received Oct. 17, 2008 Accepted: Aug. 13, 2009)

Abstract

Conjunctive use operation policies play a vital role in the sustainability of water resources and their optimal allocation. To be realistic conditions of real water resource system should be considered in simulation and derivation of operating rules of real-world water resource system. In this research, the combined fuzzy logic and direct search optimization technique is used to account for the uncertainty associated with parameters affecting groundwater table level fluctuations. These parameters include specific yields and inflow recharge and outflow discharge from the aquifer, which are typically uncertain. A membership function is determined for each parameter using hydrogeologic and piezometric data. For each membership value (α level cut), the corresponding intervals are determined. These intervals are considered as constraints on the membership value of the groundwater table level fluctuations in the optimization model. The process is repeated for other α level cuts to obtain the fuzzy number. For the uncertainty influencing the water demands, a conjunctive use model with water resources constraints is developed. Using this model, the priorities for the different zones and their optimal allocations are determined. The results show that the better the real conditions are reflected in the conjunctive use model, the better will the system be reliably capable of handling the water demands. The results of the proposed model also indicate that it present reliable allocations compared to the static conventional models and that it performs more desirably and practically in allocating supplies to water demands as it duly includes the opinions of the decision-makers involved.

Keywords: Conjunctive Use, Uncertainty, Fuzzy-Set Theory, Groundwater Modeling, Reliability.

1. Assist. Prof., Dept. of Engineering, Shahrkord University
(Corresponding Author) 09122492615 mrtabari@yahoo.com
2. Assist. Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology, Tehran

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد (نویسنده مسئول)
mrtabari@yahoo.com ۰۹۱۲۲۴۹۲۶۱۵
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

به‌طور کلی انتخاب یک رویکرد مناسب برای مدل‌سازی سیستم کاملاً بستگی به میزان پیچیدگی آن داشته و پیچیدگی نیز ارتباط معکوس با میزان دانش و شناخت از آن سیستم دارد. از این رو در تمامی مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیده که وابسته به استدلال و تصمیم‌گیری می‌باشند، باید قدری انعطاف به‌منظور ایجاد اطمینان در نظر گرفت تا اثر نتیجه‌گیری نادرست و همچنین حضور عوامل مؤثری که اختیار آن از دست بشر خارج است، مد نظر قرار گیرد. منطق فازی در برابر منطق کلاسیک به‌عنوان ابزاری توانمند برای حل این گونه مسائل ارائه شده است. به‌طوری که منطق فازی روابط بین دقت و حقیقت را با توابع ریاضی بیان می‌کند. منطق فازی یک راه حل مناسب برای ارتباط دادن فضای ورودی‌ها به فضای خروجی‌ها می‌باشد. لذا سیستم‌های فازی را می‌توان به خوبی برای مدل‌سازی دو نوع اصلی عدم دقت در پدیده‌های موجود در طبیعت به کار برد. نوع اول، عدم دقت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری در شناخت پیچیدگی‌های یک پدیده می‌باشد. نوع دوم عدم دقت مربوط به عدم صراحت و عدم شفافیت مرتبط با یک پدیده یا ویژگی خاص می‌باشد [۱].

اولین تحقیقات صورت گرفته در زمینه منطق فازی و کاربردهای آن توسط زاده در سال ۱۹۶۵ ارائه گردید. این محقق نشان داد که با استفاده از منطق فازی می‌توان مسائل کمّی را به نحوه مطلوبی مدل‌سازی نموده و به تصمیم‌گیران برای حل مسائلی که دارای عدم صراحت و عدم دقت می‌باشند کمک کرد [۲]. پس از آن، تلاش برای استفاده از تئوری فازی برای در نظر گرفتن تأثیر پارامترهایی که اندازه‌گیری آنها دارای ابهام بوده و از دقت کمی برخوردار می‌باشند، ادامه یافت که به‌عنوان نمونه می‌توان به کارهای محققانی همچون دوو و همکاران[1] [۳]، ریولی[2] و ریدولفی[3] و جووان[4] و آرال[5] اشاره نمود [۳-۵]. نلسون و همکاران[6] در سال ۲۰۰۷ نحوه در نظر گرفتن عدم صراحت در پارامترهای ژئولوژی و هیدروژئولوژی را مورد بررسی قرار دادند [۶]. با استفاده از الگوریتم ژنتیک هوشمند میزان عدم دقت پارامترهای ضریب پخش طولی و عرضی و همچنین ضریب هدایت هیدرولیکی برای تدوین سیستم بهینه احیای آبخوان که در آن هزینه پایش حداقل شود توسط هیلتون[7] و کلور[8] مورد بررسی قرار گرفت [۷].

در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بدون اعمال عدم دقت در پارامترهای آبخوان، مطالعات زیادی صورت گرفته که اولین مطالعات در این خصوص مرتبط با بوراس[9] در سال ۱۹۶۳ می‌باشد. در این تحقیق، منابع سطحی (سد) و زیرزمینی به منظور تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی در نظر گرفته شد. در مدل تهیه شده توسط این محقق، تغذیه مصنوعی از سد به آبخوان نیز مد نظر قرار گرفته است. به منظور بهینه نمودن برداشت از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی از مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با گام زمانی سالانه استفاده گردید [۸]. در سالهای اخیر نیز مطالعاتی در این زمینه انجام شده که به‌عنوان نمونه می‌توان به کارهای استاد رحیمی و همکاران در سال ۱۳۸۵، صفوی و همکاران در سال ۱۳۸۶ و محمدرضا پورطبری و همکاران در سال ۱۳۸۸ اشاره نمود [۹-۱۱]. در تمامی این مطالعات، بر پایه داده‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی، مدل بهره‌برداری تلفیقی با توجه به محدودیتهای هر یک از منابع تدوین و سیاست‌های بهره‌برداری در شرایط واقعی برای تأمین نیازها استخراج گردید. بررسی مطالعات صورت گرفته قبلی نشان می‌دهد که مواردی همچون نادیده گرفتن عدم دقت در پارامترهای آبخوان، در نظر گرفتن بخشی از سیستم منابع آب در مدل‌سازی و در اکثر موارد اولویتهای منابع و مصارف در تخصیص‌ها مورد توجه نبوده است. در تحقیق حاضر سعی شد کمبودهای مذکور مرتفع و در فرایند مدل‌سازی لحاظ شود. این تحقیق نیز همانند بسیاری از مطالعات دارای کاستی‌هایی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به توده‌ای در نظر گرفتن آبخوان و تک‌هدفه بودن تابع هدف اشاره نمود که این نواقص توسط مؤلفان در حال مطالعه و برطرف نمودن می‌باشد.

در این تحقیق با توجه به این که شبیه‌سازی نحوه انتقال و حرکت آب در مخازن زیرزمینی نیازمند مشخص بودن اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی می‌باشد و همچنین به‌دلیل اینکه اندازه‌گیری صحیحی از این پارامترها به‌علت پیچیده بودن رفتار حرکت آب در این مخازن و وجود خطا در اندازه‌گیری انسانی و ابزاری به‌طور معمول در اکثر آبخوان‌ها صورت نمی‌گیرد، لذا لازم است این عدم دقتها به نحوه مطلوبی در فرایند شبیه‌سازی که اثرات آن در مدل بهینه‌سازی نیز بروز می‌نماید، دیده شوند. وجود عدم دقت در پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی می‌تواند منجر به ایجاد بازه‌ای از تغییرات در خروجی مدل گردد. همان‌طور که در مطالب بالا اشاره شد، در این موارد به‌طور معمول برای در نظر گرفتن عدم دقتهای موجود در سیستم منابع آب، از تئوری فازی استفاده می‌شود. این تئوری در مواردی که تعداد داده‌های موجود ناکافی

---

1 Dou et al.
2 Rivelli
3 Ridolfi
4 Guan
5 Aral
6 Nilsson et al.
7 Hilton
8 Culver
9 Buras

Archive of SID
www.SID.ir

بوده و یا اطلاعات مبهمی[1] از این داده‌ها در اختیار باشد، قابل استفاده می‌باشد. همچنین زمانی که پارامترهای مورد بررسی دارای توزیع احتمالی نباشند نیز می‌توان از این تئوری بهره گرفت [۵ و ۱۲].

به‌منظور در نظر گرفتن عدم دقت پارامترها از توابع عضویت فازی استفاده می‌گردد. به‌طور معمول توابع عضویت مورد استفاده ذوزنقه‌ایی و مثلثی می‌باشند. نتایج مطالعات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که شکل تابع عضویت تأثیر زیادی در نتایج ندارد، اما بازه تغییرات و یا به‌عبارتی میزان فازی بودن پارامترها تأثیر بسزایی در نتایج شبیه‌سازی دارد [۵]. برای ارائه سیاست بهینه بهره‌برداری تلفیقی با توجه به عدم دقت در پارامترهای آبخوان، در این تحقیق مدل مدیریتی با توجه به محدودیتهای کمّی منابع آب سطحی و زیرزمینی تدوین گردید. برای تعیین میزان تأثیر عدم دقت پارامترهای آبخوان در سیاست‌های بهینه بهره‌برداری، ساختار مدل پیشنهادی در شرایطی که عدم دقت در تابع پاسخ آبخوان دیده شود با حالتی که پارامترهای آبخوان به‌صورت دقیق مورد استفاده قرار گیرند، توسعه داده شد. به‌منظور بهینه نمودن متغیرهای تصمیم مورد نظر از الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم[2] به‌دلیل سرعت اجرای بالا، دقت قابل توجه در دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی[3] و جستجوی تقریباً کامل فضای تصمیم موجه[4] استفاده شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل برای شرایط مختلف حاکم بر آبخوان نشان می‌دهد که در نظر گرفتن واقعیت‌های سیستم آبخوان می‌تواند منجر به ارائه سیاست بهتری در تأمین نیازهای آبی گردد. همچنین این امر به پایداری منابع آب موجود برای بهره‌وری مناسب‌تر از آن در بهبود وضعیت تأمین نیازها کمک می‌نماید.

با توجه به مطالب ارائه شده، هدف مقاله بررسی تأثیر اعمال عدم دقت پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان بر سیاست‌های بهینه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. به‌منظور دستیابی به این هدف از مناسب‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی موجود استفاده شد. به‌عبارت دیگر در این تحقیق سعی شد با توجه به امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری موجود، واقعیتهای سیستم جریان آب زیرزمینی که به‌دلیل خطاهای ابزاری و انسانی داده‌های مرتبط با شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان منجر به ارائه تصویر نادرست و گاهی غیر واقعی از شرایط واقعی آبخوان می‌شوند، در فرایند مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب به نحوه مطلوبی فرموله و لحاظ شوند و به تناسب آن، تأثیر نادیده گرفتن شرایط نامطمئن حاکم بر آبخوان بر برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع آبی موجود مشخص گردد. برای وضوح بیشتر جزئیات ساختار مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با اعمال عدم دقت، توضیحات مرتبط ارائه گردید.

۲- ساختار مدل بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم با اعمال عدم دقت

برای کمّی نمودن مقادیر پارامترهایی که در آنها عدم دقت نقش تعیین‌کننده‌ای در ارائه سیاست‌های بهینه بهره‌برداری دارند لازم است، ابتدا این عوامل مشخص و سپس مناسب‌ترین روش برای تبدیل آنها از حالت بازه‌ای به عددی مشخص به‌کار گرفته شود. در سیستم آبخوان، مهم‌ترین پارامترهای هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی که در آنها به‌دلیل عدم اندازه‌گیری صحیح و یا نبود داده و اطلاعات، لازم است عدم دقت به نحوه مطلوبی در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شود عبارت‌اند از ضریب ذخیره، هدایت هیدرولیکی و میزان تغذیه و تخلیه طبیعی آبخوان که تمامی این عوامل به‌طور مستقیم در تهیه تابع پاسخ[5] آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند. عدم دقتهای موجود در این پارامترها نسبت به پارامترهای مرتبط با منابع آب سطحی بسیار زیاد می‌باشد که در نظر نگرفتن آن می‌تواند منجر به کاهش دقت سیاست‌های بهینه بهره‌برداری گردد.

مهم‌ترین روشهایی که برای در نظر گرفتن عدم دقت پارامترهای مدل مورد توجه می‌باشد عبارت‌اند از: روش محدب[6] و روش اصل گسترش[7] [۱۳]. مقایسه روشهای مختلف در نظر گرفتن عدم دقت پارامترهای آبخوان نشان می‌دهد که استفاده از روشهای مبتنی بر جستجوی تصادفی همچون الگوریتم ژنتیک، جستجوی مستقیم برای تعیین میزان عدم دقت در پارامترهای خروجی آبخوان (همانند میزان تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی) به‌دلیل کاهش زمان اجرای برنامه و بالا بودن میزان دقت این روش در مقایسه با روشهای محدب بسیار مؤثر و در خور توجه می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. با توجه به جدول ۱ مشخص است که چنانچه در مدلی سه پارامتر برای در نظر گرفتن عدم دقت انتخاب شود و یازده برش فازی[8] (برش‌ها بین صفر و یک می‌باشند) مد نظر قرار گیرد، با استفاده از روش مبتنی بر جستجوی تصادفی می‌توان تنها با حدود ۳ و ۳۷ درصد اجرای مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی نسبت به روشهای محدب و اصل گسترش، تابع عضویت مرتبط با عدم دقت

[1] Vague
[2] Direct Search Algorithm
[3] Global Optimum Solution
[4] Feasible Decision Space

[5] Response Function
[6] Vertex Method
[7] Extension Principle
[8] α -Cut

Archive of SID
www.SID.ir

پارامتر خروجی را به‌دست آورد. برای اطلاع از جزئیات روشهای محدب و اصل گسترش می‌توان به مراجع ۱۵ و ۱۶ مراجعه نمود.

جدول ۱- مقایسه روشهای مختلف در نظر گرفتن عدم دقت آبخوان برای اعمال عدم دقت سه پارامتر و یاده برش فازی (l=۱۱ ، n=۳)

نوع روش	تعداد اجرای مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی	درصد کاهش زمان محاسبه روش پیشنهادی نسبت به سایر روشها
اصل گسترش	l^n=۱۳۳۱	۲/۴۷
روش محدب	$۲^n \times l$=۸۸	۳۷/۵
روش مبتنی بر جستجوی تصادفی	$l \times n$=۳۳	-

در این تحقیق برای در نظر گرفتن عدم دقت از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده شد. با استفاده از توابع عضویت پارامترهای تأثیر در تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی، می‌توان با توجه به مراحل زیر، تابع عضویت تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی را تعیین نمود:

الف- تهیه توابع عضویت پارامترهای ورودی مدل؛

ب- گسسته نمودن توابع عضویت مشخص شده با استفاده از برشهای فازی؛

ج- تعیین بازه متناسب با هر پارامتر ورودی به ازای برشهای فازی متفاوت؛

د- ترکیب بازه‌های تهیه شده و تعیین مقادیر فازی خروجی برای هر برش فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم؛

در این روش برای تعیین مرزهای بالا و پایین مرتبط با تابع عضویت پارامتر خروجی، از مدل بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم استفاده می‌گردد. به‌عبارت دیگر به ازای هر برش فازی مدل بهینه‌سازی زیر حل می‌گردد:

تابع هدف :

$$\text{Min}\ \Delta h_\alpha \quad \text{or} \quad \text{Max}\ \Delta h_\alpha$$

محدودیتها :

$$\Delta h_t = f\left(x_\alpha, Q_t^D\right) \quad : lb_\alpha \le x_\alpha \le ub_\alpha \quad , \quad 0 \le \alpha \le 1$$

$$x = \{inflow_t, Outflow_t, S\}$$

که در این روابط :

Δh_α تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی به ازای برش فازی α، Δh_t تغییرات تراز ماهانه سطح آب زیرزمینی، x_α متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی، Q_t برداشت از آبخوان در ماه t، $Inflow_t$ جریان ورودی زیرزمینی به آبخوان در ماه t، $Outflow_t$ جریان خروجی زیرزمینی از آبخوان در ماه t، S ضریب ذخیره ویژه و lb_α و ub_α به ترتیب حد پایین و بالای متغیرهای مستقل به ازای برش فازی α است.

برای نمایش بهتر مراحل بالا، فلوچارت شکل ۱ ارائه شد. همان‌طور که در این فلوچارت مشخص است نحوه محاسبه تابع هدف به این صورت است که ابتدا متغیرهای تصمیم مسئله که در واقع مقادیر تخصیص از آب سطحی و زیرزمینی می‌باشند با توجه به اولویت منابع و مصارف بین بخشهای مختلف هر منطقه تقسیم شد. با استفاده از ساختار پیشنهادی برای اعمال عدم دقت پارامترهای آبخوان، مقدار تابع عضویت تراز سطح آب زیرزمینی به‌صورت ماهانه استخراج شده و با مقدار مجاز سنجیده شد. همچنین محدودیتهای مرتبط با ظرفیت مخزن سد نیز کنترل شد. در صورت عدم رعایت محدودیتهای ذکر شده، جریمه‌ای به تخصیص‌های صورت گرفته اعمال می‌گردید. در نهایت مقادیر توابع هدف که میزان عدم تأمین نیاز می‌باشند مورد محاسبه قرار گرفت.

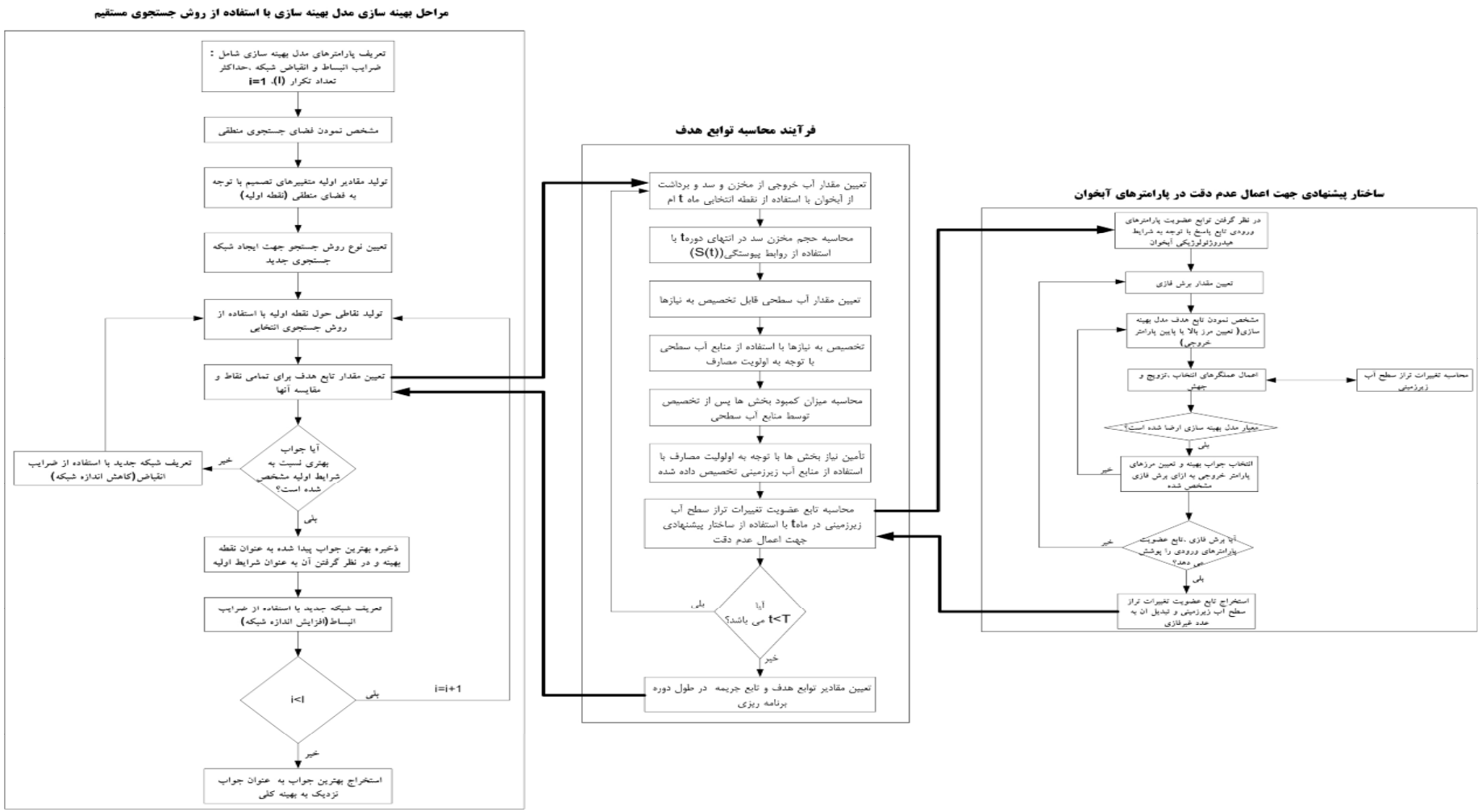
برای تعیین مقدار تابع عضویت تراز سطح آب زیرزمینی ابتدا پارامترهای ورودی دارای عدم دقت، با توجه به برش فازی مشخص در نظر گرفته شد. سپس بازه‌هایی که با توجه به برش فازی برای هر پارامتر مشخص می‌شود به‌عنوان محدودیتهای مدل بهینه‌سازی برای تعیین مرزهای پارامتر خروجی استفاده گردید. این روند تا زمانی که تمامی توابع عضویت در نظر گرفته شده برای هر پارامتر را پوشش دهد، ادامه یافت. در نهایت با توجه به تابع عضویت مشخص شده برای پارامتر خروجی، می‌توان مقدار عددی آن را با فازی‌زدایی تابع عضویت تعیین نمود. این مقدار در مدل بهینه‌سازی به‌عنوان محدودیت برای کنترل میزان تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این تحقیق برای تدوین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری، از الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم استفاده شد. در این روش ابتدا فضای منطقی (موجه) متغیرهای تصمیم، ضرایب انبساط و انقباض و تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی مشخص می‌شود. سپس با توجه به محدودیتهای مدل مدیریتی، جواب اولیه‌ای به‌صورت تصادفی تولید می‌گردد. با توجه به نقطه اولیه و نوع روش جستجو، نقاطی حول جواب اولیه تولید می‌شود.

از روشهای جستجو در این الگوریتم می‌توان به روش جستجوی الگوی تعمیم یافته[1] و روش جستجوی مستقیم شبکه هیبریدی[2] اشاره نمود. در هر دو روش با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم (N) جوابهایی به‌صورت تصادفی در اطراف جواب اولیه تولید می‌شود. در روش GPS به تعداد 2N و در روش MADS به

[1] Generalized Pattern Search (GPS)
[2] Mesh Adaptive Direct Search (MADS)

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- ساختار مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با توجه به عدم دقت در پارامترهای آبخوان

www.SID.ir

تعداد N+1 جواب تولید می‌گردد. با توجه به جوابهای تولیدی و ضریب انبساط، مقدار تابع هدف برای هر جواب محاسبه می‌شود. چنانچه جوابی بهتر از جواب اولیه در بین مجموعه جوابهای تولید وجود داشت، مسیر حرکت مدل بهینه‌سازی از نقطه اولیه به نقطه‌ایی خواهد بود که از مطلوبیت بیشتری از نظر تابع هدف برخوردار می‌باشد. اما اگر جواب بهتری یافت نشد با استفاده از ضریب انقباض و نوع روش جستجو، تعداد نقاط دیگری که نزدیک‌تر به نقطه اولیه می‌باشند، تولید می‌شود. این روند تولید مجموعه جوابها با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض تا زمانی ادامه می‌یابد که تغییری در جواب بهینه به‌دست آمده، حاصل نشود. برای مطالعه بیشتر در خصوص الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم می‌توان به مراجع ۱۷ تا ۱۹ مراجعه نمود.

۳- ساختار مدل بهره‌برداری تلفیقی مبتنی بر عدم دقت پیشنهادی

با توجه به آخرین مطالعات صورت گرفته در زمینه مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌توان دریافت که به‌طور کلی در تمامی این تحقیقات توابع هدف مورد استفاده بخشی از سیستم منابع آب را مدیریت می‌نمایند. از آنجا که یکپارچه‌نگری در سیستم‌های منابع آب و دخالت دادن مؤلفه‌های مدیریتی تأثیرگذار می‌تواند منجر به ارائه تصمیمات صحیح و اجرایی گردد، لذا در این تحقیق سعی شد تا این مسائل به نحوه مطلوبی در مدل مدیریتی مورد توجه قرار گیرد. در این راستا تابع هدف مدل بهره‌برداری تلفیقی تدوین شده عبارت است از: حداقل نمودن میزان عدم تأمین نیاز به نحوی که آسیب‌پذیری آن را تا حد ممکن کاهش دهد. در این تحقیق با توجه به واقعیتهای موجود در سیستم‌های مدیریتی منابع آب کشور، محدودیتهایی برای تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شده است. همچنین اولویتهای نوع تخصیص نیز به این صورت می‌باشد که ابتدا از منابع آبهای سطحی و سپس از منابع آبهای زیرزمینی برای تأمین نیازها استفاده می‌نماید. علت در نظر گرفتن اولویت در تخصیص از منابع این است که منابع آب سطحی به‌دلیل تبخیر زیاد و عدم نگهداشت مناسب، لازم است در مدت زمان کمتری مصرف شده و یا به‌منظور برنامه‌ریزی بلندمدت به‌صورت تغذیه مصنوعی با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی دشت وارد آبخوان گردند، تا بتوان با اتخاذ چنین سیاستی مدت زمان بهره‌برداری از منابع آبی موجود را افزایش داد. لازم به ذکر است اولویتهای ارائه شده با توجه به شرایط سیاسی، وضعیت هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی محدوده‌های مورد مطالعه می‌تواند متفاوت باشد که در این مطالعه نیز فرمول‌های ارائه شده در این خصوص به صورت متغیر بود تا بتوان با استفاده از آن برای شرایط مختلف، سیاست‌های متناظر حاصل از آن را ارائه نمود. در این بخش از تحقیق تابع هدف و محدودیتهای مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد.

تابع هدف :

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

محدودیت‌ها :

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

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

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

$$RS_{tzs} = \begin{cases} DM_{tzs} & \text{if}\left(TSR_t - \sum_{x=1}^{IZ(z-1)}\sum_{s=1}^{IS(S)} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{IZ(z)}\sum_{s=1}^{IS(s-1)} DM_{tzs}\right) \geq DM_{tzs} \\ TSR_t - \sum_{z=1}^{IZ(z-1)}\sum_{s=1}^{IS(s)} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{IZ(z)}\sum_{s=1}^{IS(s)} DM_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

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

$$TDF_{tzs} = DM_{tzs} - RS_{tzs} \quad (۶)$$

$$RG_{tzs} = \begin{cases} TDF_{tzs} & \text{if}\left(TGR_t - \sum_{z=1}^{IZ(z-1)}\sum_{s=1}^{IS(s)} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{IZ(z)}\sum_{s=1}^{IS(s-1)} TDF_{tzs}\right) \geq TDF_{tzs} \\ TGR_t - \sum_{z=1}^{IZ(z-1)}\sum_{s=1}^{IS(s)} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{IZ(z)}\sum_{s=1}^{IS(s-1)} TDF_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۷)$$

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

Archive of SID
www.SID.ir

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs} + RG_{tzs} \quad , \; t = 1,...,m \times y, \; z = 1,...,nz, \; s = 1,2,3 \tag{۸}$$

$$DV_t \begin{cases} Input_t - Output_t + Eff^S \times RS_{tzs} - Eff^G \times RG_{tzs} & , \quad if \quad t = 1 \\ DV_{t-1} + Input_t - Output_t + Eff^s \times RS_{tzs} - Eff^G \times RG_{tzs} & , \quad otherwise \end{cases} \tag{۹}$$

$$Dh_t(DV_t) = \frac{DV_t}{A \times S_s} \tag{۱۰}$$

$$\text{Penalty Funciton} = \sum_{t=1}^{m} \left(((S_t - S_{min}) \times \gamma)^{10} + ((\min(Dh_t(V_t), DH^{min}) - DH^{min}) \times \alpha)^{10} \right) \tag{۱۱}$$

در شرایطی که عدم دقت در مدل بهینه‌سازی اعمال شود، محدودیت مرتبط با تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی به‌صورت معادلات زیر محاسبه خواهد شد:

$$\overline{DV_t} = \begin{cases} \overline{Input_t} - \overline{Output_t} + Eff^S \times RS_{tzs} - Eff^G \times RG_{tzs} & , \quad if \quad t = 1 \\ \overline{DV_{t-1}} + \overline{Input_t} - \overline{Output_t} + Eff^s \times RS_{tzs} - Eff^G \times RG_{tzs} & , \quad otherwise \end{cases} \tag{۱۲}$$

$$\overline{Dh_t}(\overline{DV_t}) = \frac{\overline{DV_t}}{A \times \overline{S_s}} \tag{۱۳}$$

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

مؤلفه‌های نیاز	شهر تهران	کرج بزرگ	کمالشهر	مشکین‌دشت	گرم‌دره	روستاها	ماهدشت	صنعت	کشاورزی
اولویت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
میزان اهمیت وزنی	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴

متغیرهای ارائه شده در روابط بالا به صورت زیر تعریف می‌شوند (واحد حجم‌ها میلیون مترمکعب است[1]):

Penalty Function: میزان کل جریمه تخصیص داده شده به‌دلیل عدم رعایت محدودیتهای تراز سطح آب زیرزمینی و حجم مخزن سد (بی‌بعد)؛

W_z: میزان اهمیت مناطق نیاز (بی‌بعد و مطابق جدول ۲)؛

DM_{tzs}: نیاز آبی بخش s در دوره t از منطقه z؛

TAW_{tzs}: میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z؛

EV_t: میزان تبخیر از مخزن سد در دوره t (میلی‌متر)؛

S_t: حجم مخزن سد در در دوره t؛

I_t: میزان آورد رودخانه در دوره t؛

R_t: حجم آب خروجی از مخزن سد در دوره t (متغیر تصمیم)

S_{min}, S_{max}: حداکثر ۲۰۶ MCM و حداقل ۳۰ MCM ظرفیت مخزن سد؛

Envir: حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه (برابر با ۳/۵ MCM در نظر گرفته شد)؛

$Rtaleghan_t$: 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؛

TGS_t: میزان کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده در دوره t (متغیر تصمیم)؛

RS_{tzs}: حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده با توجه به اولویت‌های منابع و مصارف به بخش s در دوره t از منطقه z؛

RG_{tzs}: حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده با توجه به اولویت‌های منابع و مصارف به بخش s در دوره t از منطقه z؛

β, α, γ: ضرایب ثابت جهت هم‌بعد نمودن توابع جریمه (در این مطالعه γ, α برابر با ۱۰۰۰۰ و β برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است)؛

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 (متر)؛

$Input_t$: حجم کل آب ورودی به آبخوان به‌صورت زیرزمینی در دوره t؛

$Output_t$: حجم کل آب خروجی از آبخوان به‌صورت زیرزمینی در دوره t؛

Eff^S, Eff^G: درصد استفاده مفید از آب زیرزمینی و سطحی تخصیص داده شده به نیازها (درصد)؛

[1] Million Cubic Meter (MCM)

Archive of SID
www.SID.ir

A: مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)؛
S_s: ضریب ذخیره ویژه آبخوان؛
Δh_{max}: حد مجاز تغییر ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی (متر)
nz: تعداد مناطق نیاز؛
ns: تعداد بخش‌های مصرف‌کننده آب واقع در هر منطقه نیاز
m: تعداد ماه‌های دوره برنامه‌ریزی.

مقادیر علامت‌دار مرتبط با پارامترهای $Input_t$، $Output_t$ و $Dh_t(V_t)$ نشان‌دهنده مقادیر فازی بوده و میزان عدم‌دقت پارامترها را در مدل مدیریتی در نظر می‌گیرد.

در مدل بهینه‌سازی تدوین شده متغیرهای تصمیم عبارت‌اند از: میزان آب خروجی از مخزن سد و میزان برداشت از آبخوان. تابع هدف مدل تدوین شده عبارت‌اند از اختلاف میزان آب تخصیص داده شده با مقدار نیاز آبی ماهانه بخشهای مختلف می‌باشد که به صورت وزنی (با توجه به اولویتهای در نظر گرفته شده) با هم جمع شده و در قالب رابطه ۱ ارائه می‌شود. با توجه به سطح مخزن سد در هر ماه، میزان تبخیر به‌صورت رابطه ۲ قابل محاسبه می‌باشد. برای تعیین میزان حجم مخزن سد در انتهای هر ماه از رابطه پیوستگی حاکم استفاده شده و با توجه به اینکه امکان تخطّی از محدودیتهای در نظر گرفته شده برای حجم مخزن سد وجود دارد لذا رابطه پیوستگی به صورت رابطه ۳ تدوین گردید تا در صورت عدم رعایت محدودیتها، حجم مخزن سد مقادیر حداقل و حداکثر را به خود گیرد. در این مطالعه کل آب سطحی قابل تخصیص به نیازها از مجموع آب خروجی از مخزن سد کرج، آب انتقالی از سد طالقان و جریان‌های بین‌راهی از مخزن سد کرج تا ایستگاه آبگیری بیلقان به‌دست آمد که به‌صورت رابطه ۴ نشان داده شده است. با توجه به این متغیرهای تصمیم و اولویت منابع و مصارف، مدل در تخصیص به این صورت عمل نمود که ابتدا نیازها با استفاده از آب سطحی خروجی از سد تأمین شود و در صورت کمبود از منابع آب زیرزمینی با توجه به محدودیت ماهانه تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی برداشت گردد (مطابق روابط ۵ و ۷). میزان کل کمبود پس از تخصیص توسط منابع آب سطحی که باید از منابع آب زیرزمینی تأمین شود به‌صورت رابطه ۶ قابل محاسبه است. رابطه ۸ میزان کل آب تخصیص یافته از منابع آب سطحی و زیرزمینی به مصارف را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه چاههای جذبی در نقاط شهری و آب برگشتی از اراضی کشاورزی، حجم قابل توجهی را وارد آبخوان می‌نمایند جهت تعیین میزان تغییرات حجم آب زیرزمینی (رابطه ۹ و ۱۰)، از میزان خالص برداشت از منبع آب زیرزمینی استفاده شد. در صورت عدم رعایت محدودیتهای در نظر گرفته شده، مدل جریمه‌ای را مطابق رابطه ۱۱ در تابع هدف در نظر می‌گیرد. عبارت اول این معادله در واقع محدودیت ظرفیت مخزن را کنترل می‌نماید که با استفاده از ضرایب در نظر گرفته شده با عبارت اول این رابطه هم‌بعد می‌گردد. در عبارت دوم محدودیت تغییرات ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی برای پایداری سیستم آبخوان مورد کنترل قرار می‌گیرد.

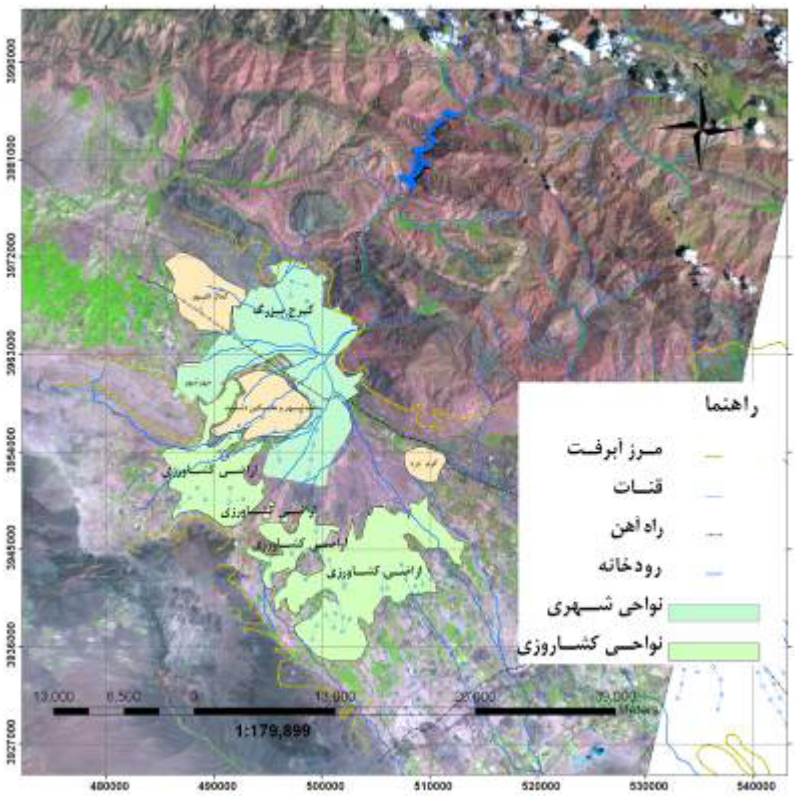
با توجه به اینکه در این تحقیق عدم دقت بر روی پارامترهای آبخوان اعمال شد، لذا لازم است تغییراتی در نحوه محاسبه تغییرات تراز ماهانه سطح آب زیرزمینی اعمال شود. همان‌طور که در روابط ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود پارامترهای جریان ورودی و خروجی از آبخوان و ضریب ذخیره به‌عنوان عواملی که در این مقاله عدم دقت بر روی آنها اعمال شده است به‌صورت فازی در نظر گرفته شد و روابط حاکم جهت محاسبه تغییرات حجم آبخوان و در نتیجه تغییرات تراز اصلاح گردید.

۴- کاربرد مدل

رشد و تمرکز فزاینده جمعیت در استان تهران و به تبع آن افزایش بی‌رویه مصرف آب، منجر به عدم توازن منابع آبی موجود و نیازها شده است. تنوع وسیع اقلیمی، رشد بی‌رویه جمعیت و نیازها و محدودیت منابع آبی موجود، پیچیدگی مسئله را دو چندان ساخته است. شهرستان کرج به‌عنوان بزرگ‌ترین شهرستان در محدوده غرب استان و قربانی کلان‌شهر تهران در این چالش، بسیار آسیب‌پذیر بوده و آینده تأمین آب آن با ابهام همراه است. لذا برای غلبه بر مشکلاتی از قبیل افزایش برداشت از ذخایر زیرزمینی و در نتیجه افت قابل توجه در آبخوان دشت تهران-کرج، لازم است مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع زیرزمینی برای ایجاد پایداری در سیستم آبخوان به نحوه مطلوبی مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه برای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی، محدوده مورد تحقیق به پنج منطقه شهری، یک منطقه روستایی، یک منطقه کشاورزی و یک منطقه صنعتی تقسیم شد (شکل ۲). اولویت و نحوه تأمین این مناطق از منابع به تفکیک در جدولهای ۲ و ۳ مشخص شده است. در این محدوده، تراز سطح آب زیرزمینی با توجه به اطلاعات تاریخی ثبت شده در طول یک دوره ۱۴ ساله (۸۴-۱۳۷۰) به میزان ۱۱/۳۸ متر افت داشته و مخزن زیرزمینی این دشت در طول این مدت با کسری معادل ۶۸۲/۸ میلیون متر مکعب مواجه شده است. مؤلفه‌های برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از رودخانه کرج و چالوس (منبع آب سطحی)، سد کرج و طالقان (مخزن سطحی)، چاههای برداشت (منبع زیرزمینی)، مناطق نیازها (مشتمل بر شهرها، روستاها، مناطق کشاورزی و صنعتی واقع در محدوده مورد مطالعه).

در این تحقیق، با توجه به کمبود قابل توجه منابع آبهای سطحی و زیرزمینی در داخل محدوده مطالعاتی و عدم پاسخ‌گویی این منابع

Archive of SID
www.SID.ir



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

جدول ۳- 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	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

به نیازهای بلندمدت، انتقال بین حوضه‌ای و توسعه منابع آب از حوضه‌های مجاور (رودخانه چالوس) به‌عنوان منبع جدید در مدل مدیریت بهره‌برداری تلفیقی مورد توجه قرار گرفت. همچنین از آنجا که برای تأمین نیازهای 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.

متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی عبارت‌اند از میزان آب تخصیصی از منابع آب زیرزمینی و میزان آب خروجی از سد کرج. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم برای هر ماه از افق برنامه‌ریزی برابر با دو می‌باشد که برای یک دوره سه ساله تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۲×۱۲×۳=۷۲ خواهد بود. در این محدوده شش شهر مورد مطالعه قرار می‌گیرد که دو شهر آن قابلیت استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را دارا می‌باشد. همچنین بخش صنعت برای تأمین نیازهای خود تنها از منابع آب زیرزمینی می‌تواند استفاده نماید. با توجه به اینکه در این تحقیق، آبخوان به صورت توده‌ای شبیه‌سازی شد، لذا پارامترهایی که در آنها، عدم دقت مورد توجه بود عبارت بودند از ضریب ذخیره ویژه، میزان جریان زیرزمینی ورودی و خروجی.

برای در نظر گرفتن عدم دقت پارامترهای ذکر شده با توجه به روش پیشنهادی، لازم است تابع عضویت هر پارامتر با استفاده از داده‌های هیدروژئولوژیکی منطقه مشخص شود. به‌منظور تعیین بازه تغییرات ضریب ذخیره ویژه، از آزمایش‌های پمپاژ صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه استفاده شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که این ضریب، دارای بازه تغییراتی بین ۴ تا ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به بیلان آب زیرزمینی، داده‌های بلندمدت پیزومترهای برداشت شده و استفاده از معادله دارسی می‌توان مقادیر جریان زیرزمینی ورودی و خروجی را به‌صورت ماهانه محاسبه نمود. در این تحقیق با توجه به مقادیر ماهانه جریان محاسبه شده برای پارامترهای ورودی و خروجی زیرزمینی، بازه تغییرات هر

www.SID.ir

پارامتر به تفکیک هر ماه مشخص شد و با استفاده از آن، تابع عضویت ماهانه هر پارامتر به‌دست آمد (جدولهای ۴ و ۵).

در این تحقیق با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و در نتیجه زمان‌بر بودن اجرای مدل بهینه‌سازی، از روش بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم استفاده شد. در این روش، مدل برای تعیین مقادیر بهینه، فضای تصمیم را با توجه به ضرایب انبساط و انقباض به شبکه‌های با ابعاد مشخص تقسیم‌بندی نمود. ضرایب انبساط و انقباض در نظر گرفته شده در این تحقیق به ترتیب برابر با ۲ و ۰/۵ بود که مقادیر متداول در روش مذکور می‌باشد. با توجه به اینکه در این روش تقریباً تمامی فضای موجه برای یافتن مقدار بهینه جستجو می‌شود، می‌توان اطمینان حاصل نمود که جواب نهایی ارائه شده تا حد قابل توجهی به جواب بهینه کلی نزدیک می‌باشد. برای مقایسه میزان اهمیت تأثیر در نظر گرفتن عدم دقت در مقادیر بهینه تخصیص، از سه مدل مدیریت استفاده شد. مدل اول از سیاست بهره‌برداری در شرایط استاندارد[1] برای تعیین مقادیر ماهانه تخصیص استفاده می‌نماید و این سیاست نزدیک‌بین[2] به اغلب سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب کشور شباهت دارد. در مدل دوم توابع هدف و محدودیت ارائه شده در مدل مدیریت بهره‌برداری تلفیقی بدون در نظر گرفتن عدم دقت پارامترهای آبخوان مورد اجرا قرار می‌گیرد. اعمال عدم دقت در مدل دوم، شرایط ایجاد مدل سوم را آماده می‌نماید. با استفاده از مقایسه نتایج تخصیص حاصل از اعمال سیاست مدل‌های بالا می‌توان قوانین مناسبت‌تری را برای بهره‌برداری در شرایط واقعی ارائه داد.

[1] Standard Operation Policy (SOP)
[2] Myopic

۵- نتایج و بحث

با توجه به مدل بهینه‌سازی تدوین شده و اجرای آن توسط الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم، می‌توان مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به نیازها را تعیین نمود. برای ارائه برتری و صحت کارکرد مدل مدیریت بهره‌برداری تلفیقی پیشنهادی، ابتدا تخصیص‌ها با استفاده از سیاست بهره‌برداری در شرایط استاندارد (مدل ۱) تعیین گردید. سپس با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی و نادیده گرفتن عدم دقت در پارامترهای آبخوان (مدل۲) مقادیر بهینه تخصیص به نیازها مشخص شد و با حالتی که عدم دقت در فرایند بهینه‌سازی مورد توجه قرار گیرد (مدل ۳)، مقایسه گردید. در تابع هدف ساختار پیشنهادی، حداقل نمودن میزان عدم تأمین نیاز مورد توجه بوده و مناسب‌ترین شاخصی که بیانگر آب تخصیص داده شده در مقایسه با نیاز آبی می‌باشد، شاخص اطمینان‌پذیری یا قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان (α) یعنی احتمال این که شکستی در بهره‌برداری از سیستم در مدت زمانی مشخص، رخ ندهد و به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \Pr ob[X_t \in S] \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه:

X_t، وضعیت سیستم در دوره زمانی t می‌باشد. همچنین پارامتر S، مجموعه همه خروجی‌های مطلوب می‌باشد. بر مبنای این تعریف، قابلیت اطمینان نقطه مقابل، مفهوم ریسک می‌باشد که احتمال شکست سیستم در یک مدت زمان مشخص است. این

جدول ۴- بازه تغییرات جریان ورودی زیرزمینی دشت کرج، درصد (متغیر $Input_t$ در حالت عدم دقت)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
درصد جریان ورودی	۲/۵	۲/۶	۲/۷	۲/۹	۳/۳	۳/۷	۴/۱	۴/۲	۴/۵	۴/۷	۲/۵	۲/۴
احتمال کمتر از متوسط	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰
احتمال بیشتر از متوسط	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۴۰
درصد حد پایین تابع عضویت	۱/۵	۱/۵۶	۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۳۲	۱/۴۸	۱/۶۴	۱/۶۸	۱/۸	۱/۸۸	۱/۵	۱/۴۴
درصد حد بالای تابع عضویت	۱	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۶	۱/۹۸	۲/۲۲	۲/۴۶	۲/۵۲	۲/۷	۲/۸۲	۱	۰/۹۶

جدول ۵- بازه تغییرات جریان خروجی زیرزمینی دشت کرج، درصد (متغیر $Output_t$ در حالت عدم دقت)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
درصد جریان ورودی	۲/۵	۲/۶	۲/۷	۲/۹	۳/۳	۳/۷	۴/۱	۴/۲	۴/۵	۴/۷	۲/۵	۲/۴
احتمال کمتر از متوسط	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۴۰
احتمال بیشتر از متوسط	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰
درصد حد پایین تابع عضویت	۱	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۶	۱/۹۸	۲/۲۲	۲/۴۶	۲/۵۲	۲/۷	۲/۸۲	۱	۰/۹۶
درصد حد بالای تابع عضویت	۱/۵	۱/۵۶	۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۳۲	۱/۴۸	۱/۶۴	۱/۶۸	۱/۸	۱/۸۸	۱/۵	۱/۴۴

Archive of SID
www.SID.ir

شاخص نشان‌دهنده میزان تأمین اهداف سیستم است و یکی از مهم‌ترین شاخصها برای بررسی کارایی سیاست‌های بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب در شرایط عادی می‌باشد. در سیستم‌های مختلف، قابلیت اطمینان می‌تواند به اشکال مختلفی تعریف گردد. به عنوان مثال در صورتی که هدف از مخزن، تأمین نیازهای آبی باشد، قابلیت اطمینان می‌تواند به‌صورت احتمال تأمین درصد معینی از نیازها در یک دوره زمانی مشخص تعریف گردد [۲۰].

با توجه به مدل‌های ۱، ۲ و ۳ تدوین شده و شاخص قابلیت اطمینان، ابتدا مقایسه‌ای بین این مدل‌ها با توجه به تابع هدف و شاخص تعریف شده صورت گرفته و مدل پیشنهادی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. برای ارائه میزان تأثیر اعمال عدم دقت در پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان، بررسی‌های ماهانه شاخصهای قابلیت اطمینان، تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و مقادیر بهینه تخصیص از مخزن سد در مدل‌های تدوین شده صورت گرفت.

با اجرای مدل‌های تدوین شده می‌توان میزان کل عدم تأمین در طول دوره برنامه‌ریزی را مطابق جدول ۶ به‌دست آورد. با توجه به شاخص قابلیت اطمینان و مقدار بهینه آب تخصیص داده شده ماهانه، میزان اطمینان‌پذیری ماهانه تعیین می‌گردد. نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که میزان عدم تأمین نیاز در شرایطی که واقعیت‌های سیستم آبخوان در شبیه‌سازی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی دیده شود، از مطلوبیت بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های بهره‌برداری می‌باشد، به این معنی که مدل ۳ در تأمین نیاز به میزان ۷۲ درصد نسبت به مدل ۱ بهبود حاصل کرده است. این امر به‌دلیل در نظر گرفتن شرایط مختلف هیدروژئولوژیکی است که در طول دوره برنامه‌ریزی اتفاق می‌افتد و در ساختار پیشنهادی مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه میزان حداقل اطمینان‌پذیری در تأمین نیازها، نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قابلیت بالایی در کاهش بیشترین آسیب‌هایی که در نتیجه عدم تأمین ممکن است در سیستم رخ دهد، دارا می‌باشد؛ یعنی مدل ۳ در مقایسه با مدل ۱، ۵۶ درصد افزایش در حداقل اطمینان‌پذیری سیستم داشته است.

تأمین نیاز پایدار در سیستم‌های منابع آب، از مهم‌ترین اهداف مورد توجه مدیران تأمین‌کننده آب می‌باشد. در این راستا ارائه سیاستی که منجر به این هدف شود، مطلوب و در مدیریت بهره‌برداری امری در خور توجه می‌باشد. نتایج مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که با استفاده از ساختار در نظر گرفته شده برای تأمین نیازها یعنی مدل ۳، با توجه به اولویت منابع و مصارف و همچنین اعمال عدم دقت در پارامترهای آبخوان می‌توان در ایجاد پایداری در تأمین نیازها و منابع آبی موجود، سیاست متناسبی را ارائه نمود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، میزان تأمین نیازها در مدل ۳، به‌دلیل یکنواختی زمانی در تأمین و همچنین کنترل مؤثر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی از مطلوبیت بیشتری برخوردار می‌باشد. تغییرات حاصل از اجرای سیاست‌های بهره‌برداری مدل ۳ در تراز سطح آب زیرزمینی، یکنواختی بیشتری دارد و با نرخ افزایشی منظمی منجر به بالا آمدن تراز آبخوان و احیای آن می‌شود (شکل ۴). نتایج مدل‌های تدوین شده بیانگر این مطلب است که مجموع آب خروجی از سد در طول دوره برنامه‌ریزی برای هر سه مدل مورد بررسی تقریباً یکسان بود، یعنی بین ۱۰۸۹-۱۰۸۷ میلیون متر مکعب در سال. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم یکسان بودن این میزان، در مدل پیشنهادی به دلیل در نظر گرفتن شرایط آینده در تأمین نیازها، توزیع درون‌سالی منابع آب سطحی طوری تنظیم می‌گردد که منجر به کمبود کمتری شود (شکل ۵).

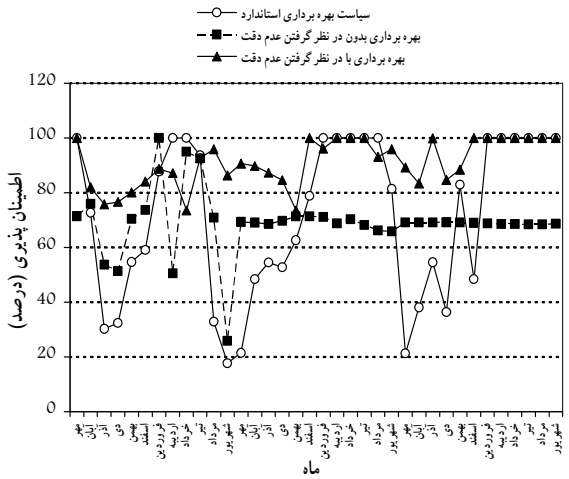
مقایسه مقادیر تخصیص بهینه توسط مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در طول دوره برنامه‌ریزی به‌دلیل دارا بودن بازه تغییرات ماهانه در مؤلفه‌های تأثیرگذار بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی، برای تخصیص به نیازها، بیشتر از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌نماید تا منابع آب سطحی. علی‌رغم این روند برداشت از ذخایر آب زیرزمینی، آبخوان به‌دلیل مدیریت زمانی صحیح در برداشت، احیا شده و روند صعودی را نشان می‌دهد (شکل ۴).

با توجه به مقادیر بهینه تخصیص استخراج شده از مدل پیشنهادی یعنی مدل ۳، می‌توان سیاست بهینه بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی را تعیین نمود. برای تدوین برنامه بهینه برداشت از منابع در این تحقیق ابتدا مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به تفکیک ماهانه و برای طول دوره برنامه‌ریزی مشخص شد و بر پایه آن متوسط فصلی تخصیص مطابق جدول ۷ مشخص گردید. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، قوانین تدوین شده توسط مدل بهینه‌سازی بر پایه عدم دقت با توجه به منابع آب موجود و در نظر گرفتن شرایط

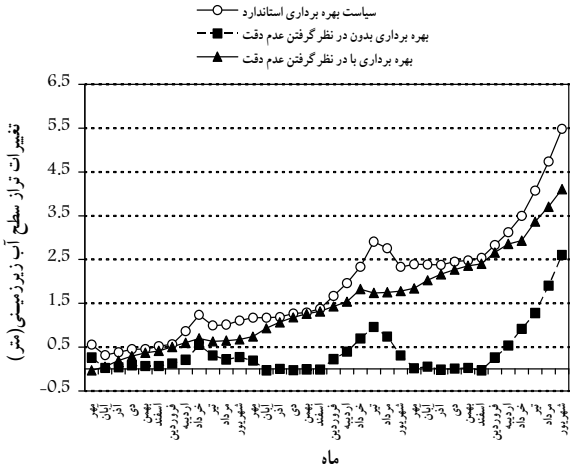
جدول ۶- میزان عدم تأمین در طول دوره برنامه‌ریزی در مدل‌های مدیریت بهره‌برداری تلفیقی

شماره مدل	مدل	میزان عدم تأمین (MCM)	حداقل اطمینان‌پذیری (درصد)
۱	بهره‌برداری در شرایط استاندارد	۶۸۸	۱۷/۸
۲	بهره‌برداری بدون اعمال عدم دقت	۵۰۶	۲۵/۹
۳	بهره‌برداری با اعمال عدم دقت	۱۹۲	۷۳/۵

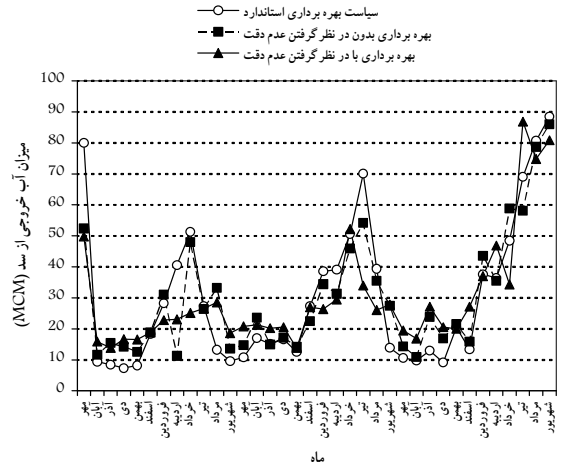
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳- مقایسه میزان اطمینان‌پذیری سیستم تأمین آب در مدل‌های مختلف بهره‌برداری تلفیقی



شکل ۴- تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در مدل‌های مختلف و در طول دوره برنامه‌ریزی



شکل ۵- میزان بهینه آب خروجی از سد در مدل‌های مختلف و در طول دوره برنامه‌ریزی

پایداری آن می‌باشد. به‌عنوان نمونه، مدل پیشنهادی در تخصیص از منابع آب زیرزمینی به این صورت عمل می‌نماید که در فصولی که آبخوان در حال تغذیه و افزایش پتانسیل خود می‌باشد، یعنی فصول زمستان و بهار، میزان کمتری را پیشنهاد می‌نماید که این امر منجر به افزایش پایداری سیستم آبخوان برای بهره‌برداری در درازمدت می‌گردد و در خصوص منابع آب سطحی نیز در فصول پرآب برای استفاده مطلوب و جلوگیری از هدررفت آب، تخصیص بیشتری را در تأمین نیازها مورد توجه قرار می‌دهد.

جدول ۷- سیاست بهینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی

فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
درصد تخصیص از آب سطحی	۷۹	۵۷	۴۳	۶۲
درصد تخصیص از آب زیرزمینی	۲۱	۴۳	۵۷	۳۸

۶- نتیجه‌گیری

از آنجا که در نظر گرفتن پیچیدگی‌های سیستم منابع آب در مدل‌های مدیریتی می‌تواند نقش بسزایی را در تدوین سیاست‌های صحیح بهره‌برداری از منابع ایفا نماید، در این تحقیق مدل بهره‌برداری تلفیقی با توجه به عدم دقت پارامترهای آبخوان توسعه داده شد. برای در نظر گرفتن عدم دقت از ترکیب منطق فازی با الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی استفاده گردید. در این روش ابتدا تابع عضویت پارامترهای دارای عدم دقت با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مشخص شد و سپس برای تعیین تابع عضویت پارامتر خروجی که در این تحقیق تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی بود، از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی به ازای هر برش فازی استفاده گردید. با استفاده از نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی و مقایسه آن با مدل‌های بهره‌برداری رایج یعنی بهره‌برداری در شرایط استاندارد و مدل‌هایی که در آنها تأثیر خطاهای اندازه‌گیری انسانی و ابزاری در پارامترهای آبخوان نادیده گرفته می‌شوند، قوانین بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی تدوین گردید. مقادیر بهینه تخصیص ارائه شده توسط مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که اعمال عدم دقت در فرایند بهینه‌سازی می‌تواند باعث بهبود عملکرد تأمین نیازها و پایداری سیستم منابع آب موجود برای برنامه‌ریزی بلندمدت گردد. همچنین میزان حداقل اطمینان‌پذیری در تأمین نیازهای آبی در مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق، افزایش ۵۶ درصد را نشان می‌دهد. این به معنی آن است که کمبودها تا حد قابل توجهی مرتفع شده که این امر نشان‌دهنده توزیع زمانی مناسب در تخصیص از منابع به نیازها می‌باشد. در نظر گرفتن شرایط زمانی سیستم منابع و

Archive of SID
www.SID.ir

مصارف در تخصیص بهینه، از دیگر نتایجی است که می‌توان در سیاست‌های استخراج شده از مدل پیشنهادی ملاحظه نمود. با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان با در نظر گرفتن مؤلفه‌های منابع و مصارف، اندرکنش‌های آن با هم، محدودیتهای هر منبع و همچنین در نظر گرفتن خطاهای سیستم مدیریت بهره‌برداری درقالب عدم دقت، قوانین بهره‌برداری مناسب‌تری را برای برنامه‌ریزی بلندمدت از منابع ارائه نمود.

با توجه به نتایج ارائه شده در این تحقیق می‌توان موارد زیر را به‌عنوان مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق مورد توجه قرار داد:

۱- توجه به خطاهای انسانی و ابزاری در پارامترهای هیدروژئولوژیکی برای مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی امری ضروری است که نادیده گرفتن آن در طی دوره برنامه‌ریزی می‌تواند منجر به کاهش تأمین نیاز و در نتیجه کمبود گردد.

۲- مدیریت صحیح زمانی در برداشت از آبخوان و در نتیجه احیای آبخوان‌های بحرانی یکی دیگر از مزایای اعمال عدم دقت مرتبط با پارامترهای آبخوان در مدل‌سازی منابع آب می‌باشد.

۳- نتایج مقادیر بهینه برداشت از آبخوان، نشان‌دهنده توجه ساختار مدل پیشنهادی به شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان از لحاظ تخلیه و تغذیه در تخصیص از آبخوان به مصارف می‌باشد.

۴- در نظر گرفتن اولویت‌های منابع و مصارف در تخصیص‌ها می‌تواند منجر به پایداری منابع آبی موجود و بهبود وضعیت تأمین نیاز در طول دوره برنامه‌ریزی شود.

۵- استفاده از تئوری فازی برای در نظر گرفتن پارامترهای دارای عدم دقت علاوه بر کاهش زمان محاسبه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای استفاده در مدل‌های بهینه‌سازی به‌کار گرفته شود.

۷- مراجع

۱- کوره‌پزان، ا. (۱۳۸۴) *اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب*، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

2- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." *Inf. Control*, 8, 338-353.

3- Dou, C., Woldt, W., Dahab, M., and Bogardi, I. (1997b). "Transient groundwater flow simulation using fuzzy set approach." *Groundwater*, 35, (2), 205-215.

4- Revelli, R., and Ridolfi, L. (2002). "Fuzzy approach for analysis of pipe networks." *J. of Hydraulic Engineering*, 128 (1), 93-101.

5- Guan, J., and Aral, M.M. (2005). "Remediation system design with multiple uncertain parameters using fuzzy sets and genetic algorithm." *J. Hydrol. Eng.*, 10 (5), 386-394.

6- Nilsson, B., Højberg, A.L., Refsgaard, J.C., and Troldborg, L. (2007). "Uncertainty in geological and hydrogeological data." *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1551-1561.

7- Chan Hilton, A.B., and Culver, T.B. (2005). "Groundwater remediation design under uncertainty using genetic algorithms." *J. of Water Resources Planning and Management*, 131 (1), 25-34.

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

۹- استاد رحیمی، ل.، اردشیر، ع.، و افشار، ع. (۱۳۸۵)، "طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره سیکلی توده‌ای." *مجله آب و فاضلاب*، ۶۰، ۴۱-۵۴.

۱۰- صفوی، ح.، افشار، ع.، قاهری، ع.، ابریشم‌چی، ا.، و تجریشی، م. (۱۳۸۶)، "مدل شبیه‌سازی کمّی-کیفی اندرکنش آبراهه با سفره آب زیرزمینی." *مجله آب و فاضلاب*، ۶۱، ۲-۱۴.

۱۱- محمد رضاپور طبری، م.، مکنون، ر.، و عبادی، ت. (۱۳۸۸)."" مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت مدیریت بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از مدل‌های SGAs و NSGA-II." *مجله آب و فاضلاب*، ۶۹، ۲-۱۲.

12- Karimi, S. M, Mousavi, S.J., Kaveh, A., and Afshar, A. (2007). "Fuzzy optimization model for earthwork allocations with imprecise parameters." *J. of Construction Engineering and Management*, 133(2), 181-190.

Archive of SID

www.SID.ir

13- Guan, J., and Aral, M. M. (2004) "Optimal design of groundwater remediation systems using fuzzy set theory." *Water Resour*. Res., 40, (1), 1-20.
14- Kailash Prasad, R., and Mathur, S. (2007). "Groundwater flow and contaminant transport simulation with imprecise parameters." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, (1), 61-70.
15- Dong, W., and Shah, H.C. (1987). "Vertex methods for computing functions of fuzzy variables." *Fuzzy Sets Syst*., 24, 65-78.
16- Dou, C., Woldt, W., Bogardi, I., and Dahab, M. (1995). "Steady state groundwater flow simulation with imprecise parameters." *Water Resour. Res*., 31 (11), 2709-2719.
17- Raphael, B., and Smith, I.F.C. (2003). "A direct stochastic algorithm for global search." *Applied Mathematics and Computation*, 146, 729-758.
18- Audet, C., and Dennis Jr., J.E. (2003). "Analysis of generalized pattern searches." *SIAM Journal on Optimization*, 13 (3), 889-903.
19-Lewis, R.M., and Torczon, V. (2002). "A globally convergent augmented lagrangian pattern search algorithm for optimization with general constraints and simple bounds." *SIAM Journal on Optimization*, 12 (4), 1075-1089.
۲۰- کارآموز، م.، و کراچیان، ر. (۱۳۸۲). *برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

Archive of SID

www.SID.ir