تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفتم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰
Volume 7, No. 2, Summer 2011 (IR-WRR)
۲۶-۳۶

بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک

ابوالفضل شمسایی[۱] و علی فرقانی[۲]*

چکیده

یکی از جنبه‌های مدیریت جامع منابع آب، بحث بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی است. در این مقاله موضوع بهره‌برداری تلفیقی در مناطق خشکی که فقط دارای منبع آب سطحی انتقالی بوده و فاقد دیگر منابع آب سطحی میباشند، مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا آب زیرزمینی منطقه توسط مدل Modflow-Pmwin شبیه سازی شده است. از نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی، در تدوین مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده و گزینه‌های مختلف در جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب بررسی می‌شوند. هدف اصلی از مدل بهینه‌سازی، تدوین الگوی ماهانه برداشت از منابع آب سطحی انتقالی و زیرزمینی در راستای تامین نیاز آبی در تمامی ماهها با محوریت کنترل سطح آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، آبخوان شهر یزد است. نتایج مدل بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با انتقال مقادیر آب سطحی فعلی به منطقه (حداکثر ۵۰ میلیون متر مکعب در سال)، تامین آب ۱۰۰٪ در تمامی ماهها، همراه با کاهش افتی در حدود ۲ متر در سطح آب زیرزمینی، در طول ۵ سال میباشد. چنانچه سالیانه ۴۰ درصد به حجم آب سطحی انتقالی افزوده شود، علاوه بر تامین آب در کلیه ماهها، کاهش سالیانه سطح آب در آبخوان منطقه به صفر می‌رسد.

کلمات کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، انتقال بین حوضه‌ای، الگوریتم ژنتیک

تاریخ دریافت مقاله: ۵ آذر ۱۳۸۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۳ اسفند ۱۳۸۹

۱- استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- کارشناس ارشد منابع آب، مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت، تفت، ایران
*- نویسنده مسئول

Conjunctive use of Surface and Ground Water Resources in Arid Regions

*A. Shamsai[1] and A. Forghani[2]**

Abstract

Conjunctive use of surface and ground water resources is one of the aspects of integrated water resources management. In this paper, conjunctive use of water resources has been studied for arid regions in which the only source of surface water is the water transferred into the region. For this purpose, first, the region's groundwater has been simulated using the Modflow-Pmwin model. The results have then been used to develop an optimization model with a genetic algorithm and different alternatives have been investigated toward optimal use of water resources. Obtaining monthly patterns for water withdrawal based on controlling an aquifer's level is the main objective of the optimization model. Yazd's aquifer in central Iran has been selected as the case study.

The results of the optimization model showed that supplying all the demands considering the present condition for the imported surface water (max 50 MCM annually), will cause a 2 meter fall in the aquifer's level in 5 years. An annual increase of 40 percent in the amount of imported surface water should be reached in order to meet all the demands with negligible drop in the aquifer's level .

Keywords: Conjunctive use, Simulation, Optimization, Interbasin transfer, Genetic algorithm

Received: November 26, 2007
Accepted: February 22, 2011

1- Professor, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: Shamsai@sharif.edu
2 M.Sc in Water Resources, Lecturer of Islamic Azad University, Taft branch, Taft, Iran, Email: Ali_forghani@alum.sharif.edu
*- Corresponding Author

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

آب نیاز اولیه و اساسی برای حفظ بقا، توسعه صنایع و رونق اقتصادی می‌باشد. به عبارتی دیگر کلید توسعه در گرو گسترش منابع آب و استفاده بهینه از آن می‌باشد. برای رسیدن به این مهم، مدیریت جامع منابع آب امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از جنبه‌های مدیریت جامع منابع آب، بحث بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. از فواید بهره‌برداری تلفیقی میتوان به جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی در منابع آب سطحی (مثل احداث سد و یا طراحی سیستم انتقال آب با ظرفیت بیش از حد بهینه) و همچنین جلوگیری از فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی اشاره کرد.

در مناطق کویری و خشک، استفاده بهینه از منابع آب موجود از اهمیت بالاتری برخوردار است. در این مناطق، به دلیل بارندگی اندک و عدم وجود منابع آب سطحی قابل توجه، استفاده یکجانبه و بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب افت کمی و کیفی آب در آبخوان می‌شود. همچنین از خصوصیات مناطق خشک و بدون منابع آب سطحی قابل توجه این است که تغذیه لایه آبدار فقط از پساب شرب و صنعت و آب برگشتی کشاورزی بوده و تغذیه‌ای از باران و سیلاب و دیگر منابع سطحی وجود ندارد. در این شرایط، طرح انتقال بین حوضه‌ای آب به عنوان راه‌حلی برای کاهش اتکا به منابع آب زیرزمینی مطرح می‌باشد. آب انتقال یافته ورودی می‌تواند به عنوان منبع آب سطحی، جایگزین بخشی از آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی شود.

در سالهای گذشته در مورد مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی مطالعات مختلفی انجام گرفته است. Young and Bredehoft (1972) پیش‌بینی رفتار سیستم آب زیرزمینی را براساس معادلات تفاضل محدود به وسیله مدل‌های تلفیقی انجام دادند. در این سیستم ارتباط هیدرولیکی آبخوان و جریانات سطحی بررسی شد. آنها تغییرات جریان رودخانه، کانال‌های آبیاری و پمپاژ آب زیرزمینی را به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفتند.

Matsukava et al. (1992) مدل مدیریتی استفاده تلفیقی را برای تبیین استراتژیهای راهبری و طراحی یک سیستم رودخانه‌ای بکار بردند. دراین مدل محدودیت‌هایی شامل محدودیت تولید برق، کیفیت آب برای تامین آب شرب شهر و حداقل آبی که باید در رودخانه جریان داشته باشد، وجود داشتند و نتایج نشان دادند که مدیریت تلفیقی، ابزار مناسبی برای رفع مشکلات طراحی منابع آب چند منظوره می‌باشد.

Meybodi (2001) کاربرد شبیه‌سازی و بهینه‌یابی در برنامه‌ریزی استوکستیک را بررسی کرد. ایشان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و درنظر گرفتن آن در برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای استوکستیک با متغیرهای کمکی نشان داد که برای در نظر گرفتن عدم قطعیت اولا عملگر مقدار انتظاری مناسب نمی‌باشد. ثانیاً همگرایی مساله به سوی جواب واقعی با زیاد شدن تعداد نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که تعداد ۱۰ تا ۳۰ نمونه برای اکثر مسایل کفایت می‌کند.

Karamouz et al. (2005) بهره‌برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی را با تاکید برکیفیت آب، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی که تابع هدف آن کیفیت قابل قبول آب مصرفی، کاهش هزینه‌های پمپاژ و کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی بود در قسمت جنوبی شهر تهران به منظور تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی برای اراضی کشاورزی مدل‌سازی کردند. نتایج مدل پیشنهادی اهمیت رویکرد جامع و همه جانبه در تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی را در منطقه طرح نشان می‌دهد.

Narayan Sethi t al. (2006) طرح کشت بهینه و تخصیص منابع آب در حوضه آب زیرزمینی ساحلی Orissa در شرق هندوستان را بررسی کردند. آنها با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و احتمالی با محدودیت‌های خطی (CCLP) تخصیص بهینه آب به سطوح کشت در منطقه مورد مطالعه را مدل نمودند. آنالیز حساسیت مدل با درنظر گرفتن ۳ سناریو شامل ۲۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ انحراف از الگوی کشت موجود در منطقه انجام شده است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که ۴۰٪ انحراف از الگوی کشت موجود در منطقه، بهینه بوده و علاوه بر حفظ تعادل هیدروژئولوژیکی منطقه، حداقل نیازهای غذایی لازم را نیز برآورده می‌کند. Deepak Khare et al. (2006) مدل بهینه-سازی اقتصادی در منطقه کشاورزی Sapon در کشور اندونزی را ارایه کردند و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و با در نظر گرفتن قیود هیدرولوژیکی و مدیریتی در منطقه، برای رسیدن به الگوی کشت بهینه و ماکزیمم سود خالص حاصل از کشاورزی بررسی کردند.

Safavi et al.(2009) مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بهره‌برداری توامان از منابع آب سطحی و زیرزمینی را در دشت نجف‌آباد توسعه دادند. در این مدل از شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی اندرکنش آبهای سطحی و زیرزمینی و از الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه‌سازی استفاده گردیده است. هدف اصلی در مدل توسعه داده شده، به حداقل رساندن کمبودها در برآوردن نیازهای آبیاری منطقه،

www.SID.ir
Archive of SID

با درنظرگرفتن افت تجمعی سطح آب زیرزمینی به عنوان قید مساله می‌باشد. نتایج، اهمیت درنظرگرفتن بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را در مناطق نیمه خشک نشان می‌دهد.

همچنین Safavi and Bahreini (2009) مدل شبیه‌سازی اندرکنش بین آبهای سطحی و زیرزمینی در دشت نجف آباد را با درنظرگرفتن عدم قطعیت در وضعیت زمین‌شناسی ارایه کردند. در این مدل جریان آب زیرزمینی و اندرکنش بین آب زیرزمینی و سطحی در شرایط جریان پایدار و ناپایدار توسط مدل Modflow شبیه‌سازی شده است. همچنین از روش مونت کارلو در آنالیز عدم قطعیت استفاده گردیده است. نتایج مدل نشان می‌دهند که جریان برگشتی از زمینهای کشاورزی و نشت از رودخانه زاینده‌رود سهم قابل توجهی را در موازنه آبی منطقه شامل می‌شوند.

در این تحقیق برای بررسی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، ابتدا آبخوان منطقه توسط مدل شبیه‌سازی Modflow-Pmwin شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل انجام گردیده است. با استفاده از مدل شبیه‌سازی کالیبره شده، به سهولت می‌توان با اعمال تغییرات در محل، مقدار و زمان تغذیه و یا تخلیه از آبخوان، اثرات این تغییرات را بر آبخوان محدوده مطالعاتی بررسی کرد و سپس بوسیله یک مدل بهینه‌سازی، گزینه‌های مختلف بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این تحقیق هدف اصلی از مدل بهینه‌سازی، تدوین الگوی ماهانه برداشت از منابع آب سطحی انتقالی و زیرزمینی در راستای تامین نیاز آبی در تمامی ماهها با محوریت کنترل سطح آب زیرزمینی می‌باشد. در این مطالعه برای حل مساله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. دلیل انتخاب الگوریتم ژنتیک، توانایی‌های این مدل در حل مسائل پیچیده غیرخطی، با متغیرهای تصمیم‌گیری زیاد می‌باشد.

مدل ارائه شده در بررسی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده شهر یزد استفاده می‌شود. منطقه مورد مطالعه به دلیل قرارگیری در ناحیه خشک با بارندگی بسیار اندک، دارای هیچگونه منبع آب سطحی طبیعی قابل توجهی نمی‌باشد. در سال ۱۳۷۸ پس از بهره‌برداری از طرح انتقال آب از زاینده‌رود به یزد برای مصارف شرب و صنعت، برداشت آب از بسیاری از چاههای شرب منطقه متوقف شده است. این آب سطحی انتقالی دارای خصوصیاتی متفاوت می‌باشد. از جمله بین این آب سطحی و آب زیرزمینی منطقه اندرکنش مستقیم وجود ندارد و فقط پساب حاصل از مصرف آب انتقالی است که میتواند با نفوذ، در وضعیت آبخوان موثر باشد. همچنین این آب سطحی قابلیت ذخیره ندارد و کل آن بایستی با رسیدن به مقصد مصرف گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

همانطور که اشاره گردید در این مطالعه برای حل مساله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. معمولاً احتمال تزویج در الگوریتم ژنتیک بین ۶۰ تا ۹۵ درصد می‌باشد درحالیکه احتمال جهش بسیار کمتر و در حدود ۰/۵ تا ۱ درصد است. بر اساس مقایسه روشهای مختلف انتخاب کروموزوم‌ها با یکدیگر و با توجه به عملکرد موفق روش تورنمنت (Tournament) در مسایلی چون پایش آبهای زیرزمینی، مدیریت کیفی رودخانه و بهره‌برداری چند هدفه از مخازن، مشخص گردید که این روش نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارد (Yang and Soh, 1997).

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، آبخوان شهر یزد انتخاب شده است. این منطقه بخشی از دشت یزد- اردکان در استان یزد می‌باشد. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که شهر یزد تقریباً در مرکز آن قراردارد.

با توجه به نقشه هم تراز سطح آب زیرزمینی منطقه در شکل ۲، جهت حرکت آب زیرزمینی در این آبخوان از جنوب شرقی به شمال غربی می‌باشد. مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان مورد نظر در جدول ۱ آمده است.

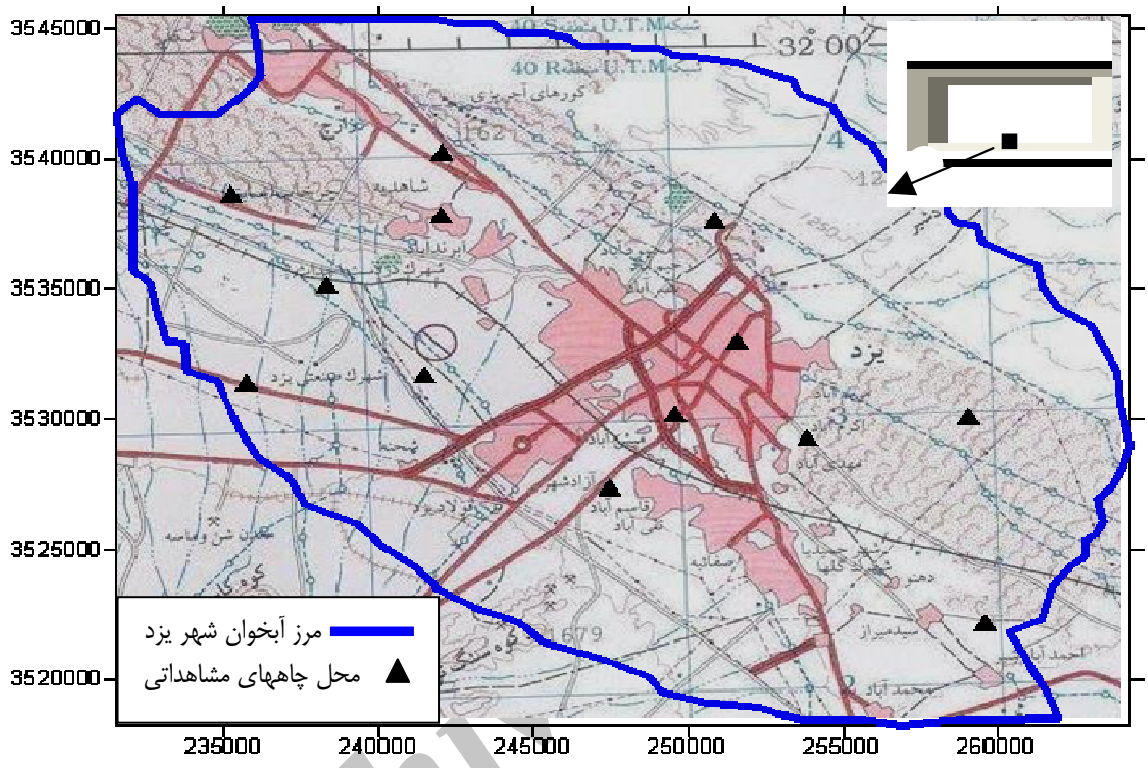
برداشت آب از آبخوان شهر یزد عموماً از طریق چاه صورت می‌گیرد (آبخوان ۱۳۸۰). بدلیل قرارگیری شهر یزد در ناحیه خشک و با میزان بارندگی بسیار اندک، هیچ رودخانه دائمی و یا فصلی در منطقه به چشم نمی‌خورد و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث افت کمی و کیفی این منابع شده است. برای مقابله با این مشکل، طرح انتقال آب از زاینده‌رود به یزد برای مصارف شرب و صنعت در سال ۱۳۷۸ به بهره‌برداری رسید. در نتیجه انتقال بین حوضه‌ای صورت گرفته، آب سطحی انتقالی به منطقه، جایگزین بخشی از برداشت از منابع آب زیرزمینی شد. همچنین آب انتقالی از کیفیت بسیار مطلوبی برخوردار است.[به طور نمونه سختی این آب حدود ۱۳۵ میلی‌گرم در لیتر برحسب کربنات کلسیم می‌باشد. مقایسه سختی این آب با آب تهران (سد کرج) با سختی حدود ۱۳۰ و آب قبلی یزد با سختی حدود ۴۵۰، گویای کیفیت مناسب آب انتقالی به یزد می‌باشد. (سازمان آب منطقه‌ای یزد)]

www.SID.ir
Archive of SID

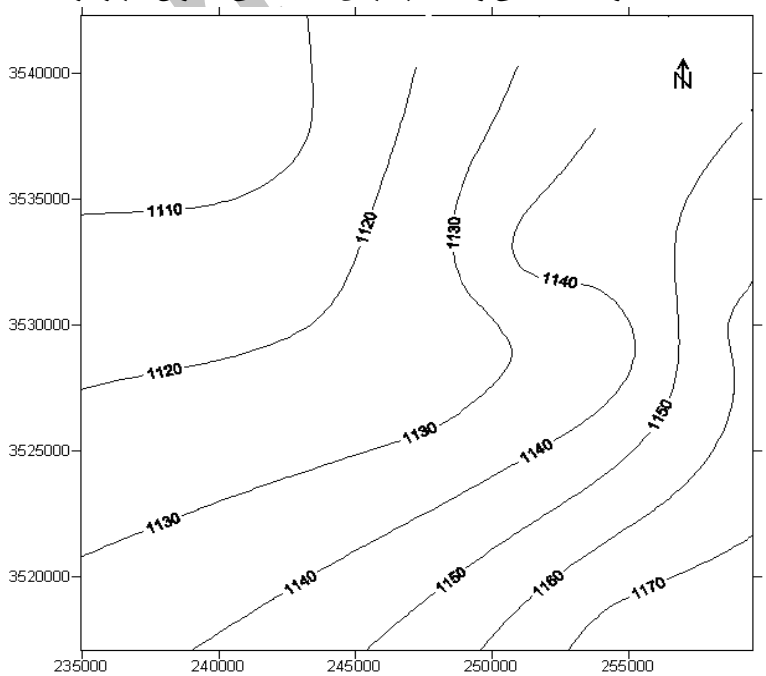
۲-۳- بررسی اثرات انتقال آب به یزد

در شکل‌های ۳ و ۴، تراز متوسط سطح آب منطقه در سالهای قبل از انتقال آب (۷۸-۷۰) و برای سالهای پس از انتقال آب (۸۴-۷۸)، با استفاده از آمار تراز سطح آب در چاههای مشاهده‌ای منطقه، آمده است.

با توجه به شکل۳، در سالهای قبل از انتقال آب، خط برازش داده شده بر تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان، دارای شیب منفی ۰.۰۸۲۸ بوده که معادل با متوسط افت سالیانه‌ای برابر با ۹۹ سانتیمتر می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت مکانی و محل چاههای مشاهداتی آبخوان شهر یزد

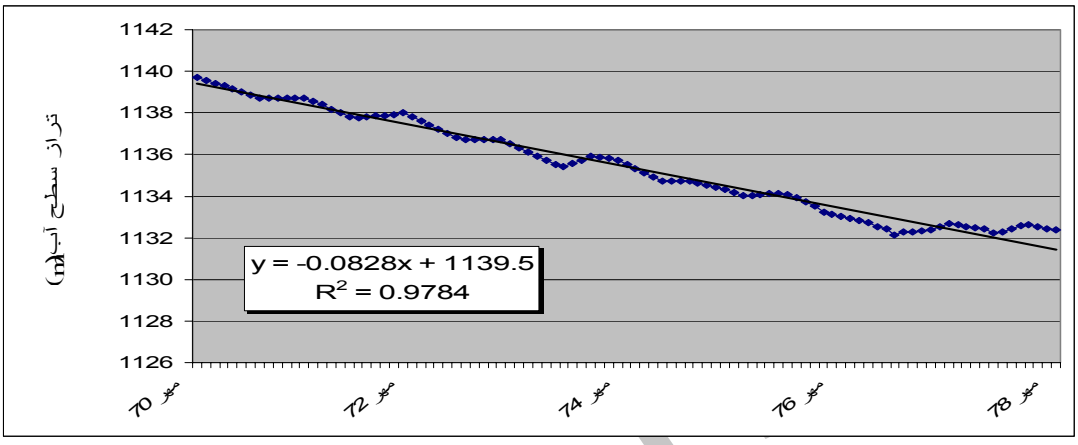


شکل ۲- ترازسطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه (متر)

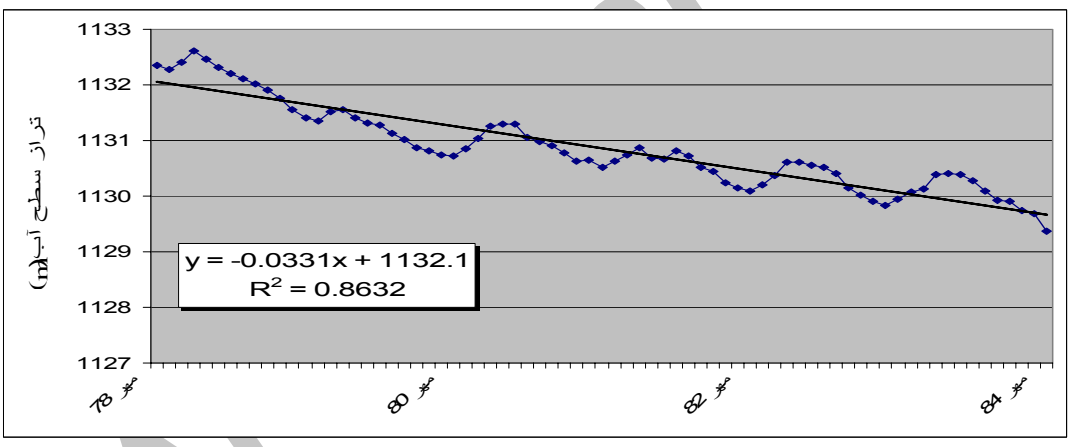
www.SID.ir

جدول ۱- مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان شهر یزد

مشخصات هیدرودینامیکی	توضیحات
نوع آبخوان	آزاد
آبدهی ویژه(S)	در کل آبخوان ۰.۰۷ برآورد می‌شود.
ضریب قابلیت انتقال(T)	در مناطق مختلف آبخوان بین ۵۰۰ تا ۳۵۰۰ مترمربع در روز متغیر است.
ضریب هدایت هیدرولیکی(K)	دارای میانگینی برابر با ۱۵ متر بر روز در کل آبخوان است.



شکل ۳- تغییرات سطح آب آبخوان شهر یزد از سال ۷۰ تا ۷۸ (قبل از انتقال آب به یزد)



شکل ۴- تغییرات سطح آب آبخوان شهر یزد از سال ۷۸ تا ۸۴ (بعد از انتقال آب به یزد)

در حالی‌که مطابق با شکل ۴، در سالهای پس از انتقال آب، خط برازش داده شده بر تغییرات سطح آب زیرزمینی، دارای شیب منفی ۰.۰۳۳۱ می‌باشد که معادل با متوسط افت سالیانه‌ای برابر با ۴۰ سانتیمتر است.

۲-۴- شبیه‌سازی آبخوان منطقه طرح

در این تحقیق، در شرایط رژیم جریان ناپایدار به شبیه‌سازی آبخوان اقدام شده است. برای شبیه‌سازی، از مدل Pmwin که نسخه تحت ویندوز مدل Modflow است، استفاده شده است. Modflow از معتبرترین و پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی کمی آبهای زیرزمینی است که بر اساس روش تفاضلات محدود، جریان آبهای زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌نماید. با توجه به کامل بودن اطلاعات آماری سال ۱۳۸۰ به بعد در منطقه طرح، و همچنین با عنایت به اینکه شروع انتقال آب در سال ۱۳۷۸ که در اثر آن رفتار آبخوان شهر یزد دچار تغییر اساسی شد، مهرماه ۱۳۸۰ به عنوان زمان شروع مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مدل‌سازی برای ۴ سال با تعریف ۱۶ پریود ۳ ماهه (طول پریودها ۹۰ روز درنظر گرفته می‌شود) با ۳ گام زمانی بصورت ماهانه انجام گرفته است.

در مورد مرزهای آبخوان یزد با توجه به اینکه این سفره بخشی از آبخوان یزد- اردکان است، مرز غیر قابل نفوذ در اطراف محدوده

www.SID.ir

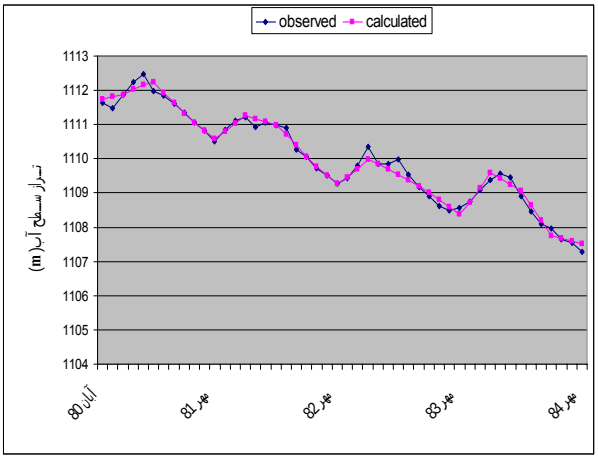
مدل وجود ندارد. با توجه به نقشه هم پتانسیل سطح آب در منطقه، ۲ نوع مرز در مدل در نظرگرفته شده است. مرزهای جنوب شرقی (مرزهای ورودی آب زیرزمینی) و شمال غربی (مرزهای خروجی آب زیرزمینی)، مرز با دبی معلوم فرض می‌شوند که مقادیر دبی ورودی و خروجی زیرزمینی از این مرزها طبق رابطه $Q = T \times i \times L$ بدست می‌آید که در این رابطه T ضریب قابلیت انتقال، i گرادیان هیدرولیکی و L طول مقطع ورود یا خروج می‌باشد. بقیه مرزها با توجه به نقشه هم پتانسیل، مطابق با خط جریان در نظر گرفته شده و آنها را مرز با دبی صفر در نظر گرفته‌ایم.

مرحله واسنجی مدل بصورت اتوماتیک و با استفاده از کد Pest انجام گرفته است. در این تحقیق در مرحله کالیبراسیون مدل به برآورد تغذیه آبخوان اقدام شده است و ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و تراز سنگ کف بر اساس مطالعات "مهندسین مشاور آبخوان" در منطقه، مورد استفاده قرار گرفته و تغییر داده نشده است. لازم بذکر است به دلیل عدم وجود اطلاعات مناسب و کافی در تعیین تغذیه آبخوان ناشی از فاضلاب شهری، پساب صنعتی و آبهای برگشتی و از آنجا که اعتبار اطلاعات موجود در این زمینه کمتر از داده‌های ضرایب هیدرودینامیکی موجود برای آبخوان تشخیص داده شد، در این مدل مقادیر تغذیه ناشی از فاضلاب شهری، پساب صنعتی و آبهای برگشتی از طریق مدل شبیه‌سازی و پس از کالیبراسیون آن بدست آمده است.

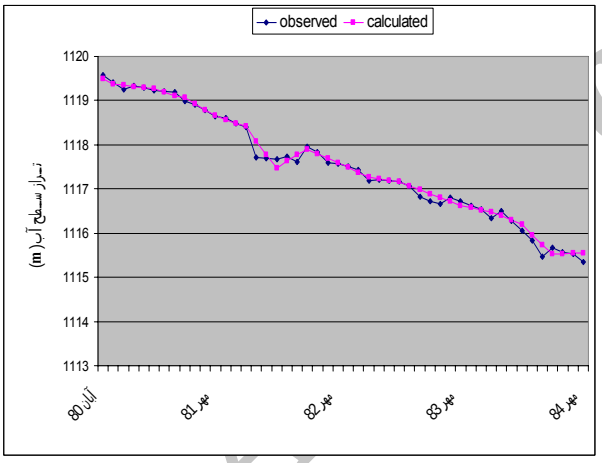
نتایج حاصل از واسنجی مدل در ۲ پیزومتر از ۱۳ پیزومتر منطقه، در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. در نهایت برای تحلیل دقت مرحله واسنجی، مدل کالیبره شده برای سال آبی ۸۵-۸۴ صحت سنجی گردیده است. نتایج مربوط به تحلیل صحت سنجی مدل شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است.

۲-۵- ساختار مدل بهینه‌سازی و سناریوهای مورد بررسی در آن

در این قسمت، ساختار مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در جهت بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی ارائه می‌گردد.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در پیزومتر الغدیر



شکل۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در پیزومتر شحنه

جدول ۲- نتایج مربوط به تحلیل صحت سنجی مدل در سال آبی ۸۵-۸۴

معیار	علامت اختصاری	شش ماهه اول سال ۸۵ (سانتیمتر)	شش ماهه دوم سال ۸۴ (سانتیمتر)
میانگین خطا	ME	-۵.۱	-۱.۲
میانگین قدرمطلق خطا	MAE	۹.۲۶	۸.۳
میانگین مجذور مربعات خطا	RMS	۱.۴۴	۱.۳

www.SID.ir

از آنجا که منطقه مورد مطالعه دارای منبع آب سطحی طبیعی نبوده و دارای آب سطحی انتقالی هستیم و کاربری این آب برای مصارف شرب و صنعت است، مساله بهره‌برداری تلفیقی در این تحقیق دارای تفاوتهایی نسبت به شرایطی که در منطقه منابع آب سطحی طبیعی وجود دارد، می‌باشد. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- از آب سطحی انتقالی به صورت مستقیم در بخش کشاورزی استفاده نمی‌شود؛ بلکه این آب از طریق تغذیه آبخوان بوسیله پساب‌های بخش شرب و صنعت، بصورت غیر مستقیم در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- امکان ذخیره آب سطحی انتقالی وجود ندارد و در نتیجه کل آب سطحی انتقال یافته، بایستی برای تامین بخشی از نیازها تخصیص یابد.
- آب سطحی انتقالی دارای محدودیتی برای تامین حقابه و نیازهای آبی زیست‌محیطی در پایین‌دست نمی‌باشد.
- بین آب سطحی انتقالی و آب زیرزمینی اندرکنش مستقیم وجود ندارد و تاثیر آب سطحی انتقالی بر آبخوان فقط از طریق ایجاد پساب در بخش شرب و صنعت می‌باشد.

از آنجا که برای منبع آب سطحی امکان ذخیره وجود ندارد، تنها متغیر تصمیم‌گیری در مدل بهینه‌سازی مقادیر ماهانه برداشت از آب زیرزمینی می‌باشد(GW_i) که بایستی بصورت بهینه در طول دوره مورد مطالعه حاصل شود. مقادیر ماهانه آب سطحی انتقالی از زاینده‌رود، بر اساس اطلاعات حاصله از سازمان آب منطقه‌ای یزد مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۵-۱- ساختار مدل بهینه‌سازی

ساختار مدل بهینه‌سازی در دو قسمت تابع هدف و قیود به صورت زیر ارائه می‌گردد.

- تابع هدف

تابع هدف بمنظور ماکزیمم کردن درصد تامین آب در طول دوره بهینه‌سازی بصورت رابطه (۱) ارائه می‌شود.

$$Z = Max[\frac{100}{y \times m} \times \sum_{i=1}^{y \times m} (\frac{W}{D})_i] \qquad (۱)$$

در این رابطه Z درصد تامین آب در طول دوره بهینه‌سازی، D_i نیاز آبی منطقه در ماه i، W_i میزان آب تخصیص داده شده به نیازها در ماه i که برابر است با مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته در ماه i ($W_i = GW_i + SW_i$)، y و m نیز بترتیب تعداد سال و ماه دوره بهینه‌سازی می‌باشد. نیاز آبی بخش شرب و صنعت بر اساس آمار حاصله از سازمان آب و فاضلاب یزد از سال ۸۱ تا ۸۵ به مدل داده شده است. نیاز آبی ناخالص محصولات کشاورزی در منطقه نیز با استفاده از الگوی کشت حاکم در منطقه و نیاز آبی خالص هر گیاه و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۰.۴۵ برآورد می‌شود. به عنوان نمونه حجم مصارف آب منطقه، درنظرگرفته شده در سال ۸۲ در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر نیاز آبی منطقه مورد مطالعه در سال ۸۲

ماه	نیاز شرب و صنعت (MCM)	نیازکشاورزی (MCM)	کل نیاز آبی منطقه (MCM)
فروردین	3.1	10.72	13.83
اردیبهشت	3.3	14.02	17.32
خرداد	3.7	14.16	17.86
تیر	4.5	17.93	22.43
مرداد	4.7	16.5	21.2
شهریور	4.36	12.97	17.33
مهر	3.4	8.86	12.26
آبان	2.74	2.7	5.45
آذر	2.62	0.68	3.33
دی	2.68	1.04	3.72
بهمن	2.3	2.07	4.37
اسفند	2.48	3.35	5.83

- قیود

از آنجا که در مورد آب سطحی انتقالی قابلیت ذخیره وجود ندارد، بایستی کل مقدار آب سطحی موجود مصرف شود و در نتیجه قیدی در رابطه با آب سطحی انتقالی در نظر نمی‌گیریم. محدودیت مربوط به آب زیرزمینی، کنترل سطح آب در آبخوان است.

جهت تعیین معادله تغییرات سطح آب زیرزمینی از اجزاء بیلان و نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی Pmwin استفاده شده است. طبق رابطه (۲) اجزاء بیلان در نظرگرفته شده در این تحقیق عبارتند از: میزان جریان ورودی زیرزمینی به آبخوان (IN)، میزان تغذیه آبخوان ازطریق پساب بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی (RCH)، میزان برداشت از چاهها توسط بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی (GW) و میزان جریان خروجی زیرزمینی از آبخوان (OUT). لازم به ذکر است در معادله بیلان منطقه، بدلیل عمق زیاد سطح آب زیرزمینی، از اثر تبخیر از سطح آبخوان صرفنظر شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

$$dV_i = (IN_i + RCH_i) - (GW_i + OUT_i) \qquad (۲)$$

براساس رابطه $dV = dh \times A \times S$ (dV تغییر حجم مخزن آب زیرزمینی، A مساحت منطقه مورد مطالعه و S آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد)، با تقسیم طرفین رابطه (۲) بر $A \times S$ داریم:

$$dh = h_{i+1} - h_i = \frac{1}{A \times S} \times [(IN_i + RCH_i) - (GW_i + OUT_i)] \qquad (۳)$$

از آنجا که $(IN_i - OUT_i)$ تابعی از h_i و RCH_i تابعی از W_i می‌باشد، درصورتیکه رابطه‌ای بین $(IN_i - OUT_i)$ با h_i و همچنین RCH_i با W_i بدست آوریم، با استفاده از رابطه(۳) میتوان به ازای هر مقدار GW_i (متغیر تصمیم‌گیری مسئله)، با استفاده از تراز سطح آب آبخوان در ماه i (h_i)، تراز سطح آب آبخوان در ماه بعد (h_{i+1})را محاسبه کرد.

لازم به ذکر است از آنجا که در منطقه مورد مطالعه تاثیر بارش و سیلابها در تغذیه آبخوان ناچیز است، مقدار تغذیه آبخوان (RCH) فقط تابعی از میزان آب تخصیص داده شده به نیازها (W) می‌باشد. به عبارتی فقط پساب شرب و صنعت و آب برگشتی کشاورزی است که باعث تغذیه آبخوان میگردد. برای تعیین رابطه بین RCH و W، از نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی منطقه استفاده می‌شود. بدین منظور پس از تعیین مقادیر ماهانه تغذیه آبخوان از طریق مدل شبیه‌سازی کالیبره شده و با در نظرگرفتن رابطه بین این مقادیر با میزان ماهانه آب تخصیص یافته در منطقه (W)، شکل ۷ حاصل می‌شود. در نتیجه رابطه (۴) بین RCH و W بدست می‌آید که در این رابطه مقادیر RCH_i و W_i بر حسب میلیون متر مکعب (MCM) می‌باشند.

$$RCH_i = 0.0796 \times W_i + 2.2496 \qquad (۴)$$

همچنین با توجه به نقشه خطوط هم‌پتانسیل سطح آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی شده و محاسبه مقادیر ورودی و خروجی زیرزمینی از رابطه $Q = T \times i \times L$، رابطه‌ای خطی بین $(IN - OUT)$ و سطح متوسط آب در آبخوان حاصل می‌گردد که در نتیجه آن داریم:

$$(IN - OUT)_i = (-0.4056 \times h_i) + 460.6 \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، h_i بر حسب متر و $(IN - OUT)_i$ بر حسب میلیون متر مکعب (MCM) می‌باشد. با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در معادله (۳) داریم:

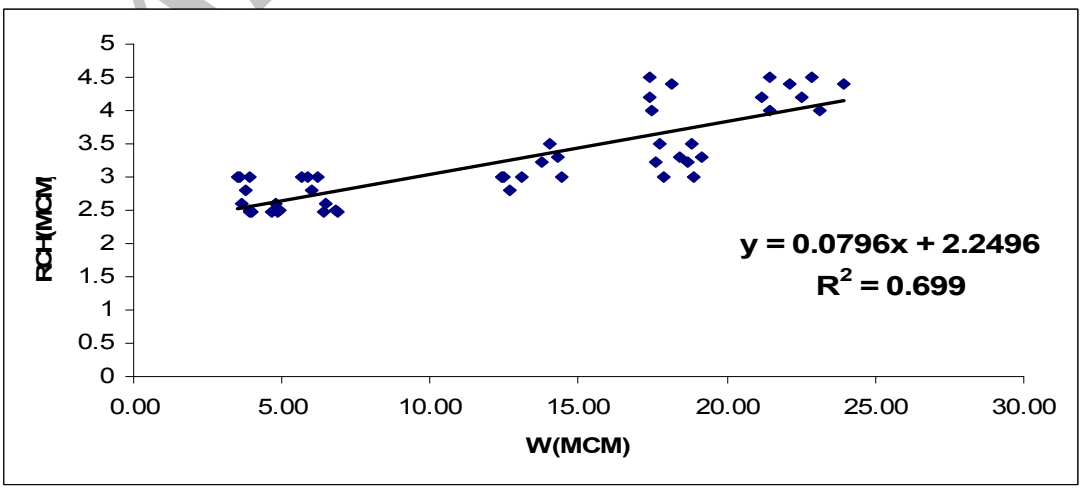
(۶)

$$h_{i+1} = h_i + \frac{1}{A \times S}\left\{\begin{matrix}[(-0.4056 \times h_i) + 460.6] + \\ [(0.0796 \times W_i) + 2.2496] - \\ [GW_i]\end{matrix}\right\}$$

با استفاده از معادله (۶) در تعیین متوسط سطح آب آبخوان درتمامی ماههای دوره بهینه‌سازی، قیود مورد نظر برای کنترل تغییرات سطح آب در آبخوان عبارتند از:

$$\left|\sum_{i=1}^{y \times m} dh_i\right| \le ht_{\max} \qquad (۷)$$

$$|dh_i| \le hm_{\max} \qquad (۸)$$



شکل۷- رابطه خطی ایجاد شده بین مقدار آب تخصیصی به منطقه (w) و مقدار تغذیه آبخوان (RCH)

Archive of SID
www.SID.ir

در این روابط، $ht_{\max}$ حداکثر مجاز تغییر تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی در طول دوره بهینه‌سازی و $hm_{\max}$ حداکثر تغییرات مجاز ماهانه سطح آب در آبخوان می‌باشد.

روند حل مساله بهینه‌سازی به اینگونه است که مقادیر نیاز آبی (D_i) و آب سطحی انتقالی موجود (SW_i) بصورت ماهانه و مشخص به مدل داده می‌شود که تمام آب سطحی انتقالی به دلیل عدم امکان ذخیره، باید جهت تامین بخشی از نیاز آبی (D) تخصیص یابد. سپس بایستی برداشت از آب زیرزمینی در هر ماه ($0 < GW_i < (D - SW)_i$) بگونه‌ای تعیین شود تا علاوه بر ماکزیمم شدن $\sum_{i=1}^{y\times m}(\frac{W}{D})_i$، قیود (۷) و (۸) نیز در جهت کنترل تغییرات سطح آب زیرزمینی رعایت گردد. در حقیقت جواب مدل بهینه‌سازی، مقادیر ماهانه برداشت از آب زیرزمینی (GW_i) می‌باشد که با درنظرگرفتن میزان آب سطحی انتقالی، با هدف ماکزیمم کردن تامین نیاز آبی در منطقه، همراه با کنترل تغییرات سطح آب زیرزمینی حاصل می‌شود.

لازم به ذکر است در این تحقیق رابطه‌ای پیوسته بین مدل شبیه‌سازی آبخوان و مدل بهینه‌سازی برقرار نیست و از مدل شبیه‌سازی تنها برای تعیین مقادیر تغذیه (RCH) استفاده گردیده است.

مدل بهینه‌سازی فوق در یک دوره ۵ ساله (۱۳۸۵-۱۳۸۱) به صورت ماهانه اجرا می‌شود. با توجه به دوره مدل‌سازی اشاره شده، تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۶۰=۱۲×۵ می‌باشد. در حقیقت جواب نهایی الگوریتم ژنتیک، کروموزومی خواهد بود که از ۶۰ ژن تشکیل شده است که هر ژن مقدار آب زیرزمینی برداشت شده در هر ماه را نشان می‌دهد. با توجه به مطالب ذکر شده پارامترهای تعریف شده در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ ارائه می‌شود.

۲-۵-۲- سناریوهای مورد بررسی در مدل بهینه‌سازی

در این قسمت با استفاده از روابط ۱، ۶، ۷ و ۸ و با درنظرگرفتن سطح آب در آبخوان در اسفندماه ۱۳۸۰ به عنوان هد اولیه مدل(h_0) و در شرایطی که مساحت منطقه مورد مطالعه (A) برابر با ۶۴۰ کیلومترمربع و آبدهی ویژه آبخوان ۰/۰۷ می‌باشد، دو سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴- پارامترهای بکار رفته در حل مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

پارامترهای مدل الگوریتم ژنتیک	مقدار یا حالت مورد استفاده
تعداد متغیرهای تصمیم گیری (تعداد ژنهای کروموزم)	۶۰
تعداد کروموزمهای تصادفی اولیه	۵۰
احتمال تزویج (P_C)	۰/۸
احتمال جهش(P_m)	۰/۰۰۸
نوع انتخاب	تورنمنت

۱- بررسی درصد تامین نیاز آبی منطقه متناسب با کنترل تغییرات سطح آب آبخوان به مقادیر مختلف، با در نظرگرفتن مقادیر فعلی آب سطحی انتقالی

۲- بررسی مقدار آب سطحی مورد نیاز ورودی به منطقه، برای تامین نیاز آبی ۱۰۰٪ در تمام ماهها و به صفر رساندن افت در سطح آب آبخوان در طول دوره بهینه‌سازی ($ht_{\max} = 0$)

نتایج مدل بهینه‌سازی در سناریوی اول نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن حداکثر کاهش تجمعی ارتفاع آب آبخوان ($ht_{\max}$) در طول ۵ سال برابر با ۰.۵، ۱، ۱.۵ و ۲ متر، درصد تامین آب در منطقه به ترتیب ۸۵، ۹۱، ۹۶ و۱۰۰ درصد حاصل می‌گردد. به عبارتی با مقادیر فعلی آب ورودی به منطقه (حداکثر ۵۰ میلیون متر مکعب در سال)، تامین نیاز آبی ۱۰۰٪ در تمام ۶۰ ماه دوره طرح، هنگامی حاصل می‌شود که کاهش سطح آب آبخوان در طول ۵ سال، تا ۲ متر مجاز شود. در حالاتی که $ht_{\max}$ به ۰.۵ تا ۱.۵ متر محدود می‌شود، عدم تامین آب ۱۰۰٪ درماههای خشک سال اتفاق می‌افتد.

در مورد سناریوی دوم لازم به ذکر است که در حال حاضر مقدار آبی در حدود ۵۰ میلیون متر مکعب در سال وارد منطقه می‌شود که طرح‌هایی برای افزایش میزان آب سطحی انتقالی تا سقف ۱۰۰ میلیون متر مکعب در سال در دست مطالعه است و بدین ترتیب پتانسیل افزایش آب سطحی انتقالی تا حدوداً ۲ برابر میزان کنونی وجود دارد. بنابراین با توجه به عدم قطعیت در میزان آب سطحی انتقالی، حساسیت مدل به مقادیر مختلف آب سطحی ورودی به منطقه مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور، مدل بهینه‌سازی در شرایط تامین نیاز آبی منطقه به میزان ۱۰۰٪، برای مقادیر مختلف آب سطحی انتقالی اجرا گردیده و تغییرات سطح آب در آبخوان

www.SID.ir
Archive of SID

متناسب با هر میزان آب انتقالی بدست آمده است. تغییرات در میزان آب سطحی انتقالی، از طریق اعمال ضریبی بر الگوی ماهانه فعلی آب انتقالی صورت می‌گیرد. نتایج تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی نسبت به عدم قطعیت در میزان آب سطحی انتقالی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی نسبت به عدم قطعیت در میزان آب سطحی انتقالی

مقدار سالیانه آب سطحی انتقالی (mcm)	تغییر سطح آب آبخوان پس از ۵ سال (m)
40	2.67-
45	2.24-
50	1.81-
55	1.38-
60	0.96-
65	0.58-
70	0.21-
75	0.15

نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهند که اگر سالیانه ۴۰ درصد به حجم آب سطحی انتقالی افزوده شود و یا به عبارتی سالیانه ۷۵-۷۰ میلیون متر مکعب آب وارد منطقه شود، علاوه بر تامین آب از کلیه ماهها، کاهش سطح آب آبخوان در طول ۵ سال صفر می‌گردد. همچنین الگوی ماهانه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی در جهت تامین اهداف سناریوی دوم در جدول ۶ ارائه شده است.

۳- نتیجه‌گیری

۱- آب انتقالی به یزد بر آبخوان این منطقه تاثیر مثبت گذاشته است. این تاثیر در شکل‌های ۳ و ۴ بخوبی قابل ملاحظه است. با ادامه روند کنونی انتقال آب، انتظار می‌رود افت سطح آب در آبخوان متوقف شود. با وجود تاثیر مثبت انتقال آب، منطقه مورد مطالعه همچنان با بیلان سالیانه‌ای در حدود ۳۵- میلیون متر مکعب مواجه می‌باشد.

۲- نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهند که آبخوان منطقه نسبت به برداشت‌های جدید (برای تامین آب کشاورزی اراضی توسعه)، حساسیت شدیدی از خود نشان می‌دهد و به این دلیل بهتر است از برداشت‌های جدید از آبخوان در جهت توسعه کشاورزی منطقه خودداری شود.

۳- نتایج مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در سناریوی اول، نشان می‌دهد که با مقادیر آب سطحی ورودی فعلی به منطقه (حداکثر ۵۰ میلیون متر مکعب در سال)، تامین آب ۱۰۰٪ در تمامی ماهها، همراه با کاهشی در حدود ۲ متر در سطح آب آبخوان، در طول ۵ سال میباشد.

۴- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی نسبت به عدم قطعیت در میزان آب سطحی انتقالی (جدول ۴) مشخص می‌نماید که اگر سالیانه ۴۰ درصد به حجم آب انتقالی افزوده شود و یا به عبارتی سالیانه ۷۵-۷۰ میلیون متر مکعب آب وارد منطقه شود، علاوه بر تامین آب در کلیه ماهها، کاهش سالیانه سطح آب آبخوان منطقه به صفر می‌رسد.

۵- با توجه به جدول ۵، درصورت افزایش ۴۰ درصدی در حجم آب انتقالی، درصد تخصیص به نیازها از منابع آب سطحی در دوره شش ماهه مهر تا اسفند بالای ۵۰٪ می‌گردد. در طول این مدت در پی کاهش برداشت از منابع زیرزمینی، تراز سطح آب زیرزمینی بالا می‌آید. در ماههای گرم سال به دلیل افزایش تقاضا ، تخصیص به نیازها بیشتر از طریق منابع آب زیرزمینی انجام می‌گیرد.

۴- تشکر

در انتها از زحمات و کمک‌های مسئولان و کارشناسان سازمان آب منطقه‌ای یزد که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۶- میانگین درصد تخصیص بهینه از منابع سطحی و زیرزمینی برای تامین اهداف سناریوی دوم

ماه / منبع	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
زیرزمینی	64.2	67.4	61.4	65	62.2	55.8	47.4	5.2	0	0	1.6	18.6
سطحی	35.8	32.6	38.6	35	37.8	44.2	52.6	94.8	100	100	98.4	81.4

Archive of SID
www.SID.ir

۵- مراجع

سازمان آب منطقه‌ای یزد، www.yazdwater.ir.

مهندسین مشاور آبخوان. (۱۳۸۰) ،"گزارش مطالعات آبهای زیرزمینی یزدگرد".

Deepak Khare, Jat M.K., and Ediwahyunan. (2006), "Assessment of Conjunctive Use Planning Options: A Case study of Sapon Irrigation Command Area of Indonesia" *Journal of Hydrology* ,328, pp. 764-777

Karamouz, M., Rezapourtabari, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2005), " Conjunctive Use of surface and groundwater Resources with Emphasis on Water Quality" ASCE, *Journal of Water Resources Planning and Management*, May15-19.

Matsukava, J., Finney, B., and Willis, R. (1992), "Conjunctive-Use planning in Mad river basin, California", ASCE, *Journal of water resources planning and management*, Vol.118, No.2, march-april.

Meybodi, M.Z. (2001), "A Simulation Approach to Probabilistic Production Planning Problem," *Proceedings of the Decision Sciences Institute*, San Francisco, pp. 728-730

Narayan Sethi, Sudhindra N. panda, and Manoj K. Nayak. (2006), "Optimal crop planning and water resources allocations in a coastal ground water basin, Orissa, India" *Agricultural water management*, 31 January pp. 209-220.

Safavi, H.R., Darzi, F., and Marino, M.A. (2009), "Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater", *Water Resources Management*, 2010, vol 24, no 10, pp. 1965-1988

Safavi, H.R., and Bahreini, G.R. (2009), "Conjunctive simulation of surface water and ground water resources under uncertainty", *Iran J Sci Technol Trans B 33(B1)*, pp.79-94

Yang, J.P., and Soh, C.K. (1997), "Structure optimization by genetic algorithms with tournament selection", *Journal of computing in civil engineering*", ASCE, Vol. 11, No. 3, pp. 195-200.

Young, R.A. and Bredehoft, D. (1972), "Digital computer simulation for solving", *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 3, pp.533-556.

Archive of SID

www.SID.ir