نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۶ شماره ۴/۱ صفحه‌های ۳۰۷ تا ۳۲۰/ سال ۱۳۹۵

شبیه‌سازی اثرات تخصیص بهینه آب بر منابع آب زیرزمینی در دوره‌های تنش ماهانه (دشت باغملک، استان خوزستان)

رضا لاله‌زاری[۱*]، حکیمه عباسلو[۲]

تاریخ دریافت: ۹٤/۰٤/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰٦/۱۵

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اهواز

[۲] استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: lalehzari@hotmail.com

چکیده

تخصیص بهینه آب می‌تواند یک راهکار مناسب برای افزایش بهره‌وری منابع آب در نواحی خشک و نیمه‌خشک محسوب گردد. بدین منظور، منابع اصلی مصرف آب در دشت باغملک (استان خوزستان) در حد فاصل مهر ماه ۱۳۹۲ تا شهریور ماه ۱۳۹۳ و رقوم سطح ایستابی به مدت ۹ سال (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰) شناسایی و تحلیل شدند. مدل توسعه داده شده در این تحقیق از ترکیب دو مدل بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت و شبیه‌سازی آب زیرزمینی به دست آمد. همچنین رفتار جریان آب زیرزمینی بر پایه روش عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار Modflow برای تحلیل سناریوهای بهینه برداشت، شبیه‌سازی گردید. سال‌های مطالعه به ۳٦ دوره تنش فصلی تقسیم شده و هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و مقدار تغذیه در این دوره‌ها مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل جریان با واریانس خطای ۳/۰۵ و ۳/۹۲ به‌ترتیب برای فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی دقت شبیه‌سازی قابل قبولی دارد. علاوه بر این، پیش‌بینی سطح ایستابی پس از سناریوی برداشت بهینه نشان داد که دوره‌های اصلی مدیریت آب زیرزمینی در ماه‌های اردیبهشت و خرداد قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تخصیص، دشت باغملک، شبیه‌سازی آب زیرزمینی

Simulating the Effect of Optimal Water Allocation on Groundwater in Monthly Stress Periods (Baghmalek Plain, Khuzestan Province)

R Lalehzari[1*], H Abbaslou[2]

Received: 11 July 2015 Accepted: 5 September 2016
[1-] Young Researchers and Elite Club, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2-] Assist. Prof., Civil Engineering Dept., Faculty of Civil Engin., Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran
*Corresponding Author, Email: lalehzari@hotmail.com

Abstract

Optimized water allocation may be considered as a valuable solution to increase the productivity of water resources in arid and semi-arid areas. To achieve this purpose, the main resources of water consumption in Baghmalek plain (Khuzestan province) for duration of October 2013 to September 2014 and also water table heights for nine years (2002 to 2011) were evaluated. In this study, the final model was developed by combining the two cropping pattern multiobjective optimization and groundwater simulation models. Also, groundwater flow was simulated for addressing optimal discharge scenarios based on finite difference numerical approach using Modflow software. Study years were divided into 36 seasonal stress periods and hydraulic conductivity, specific yield and recharge were calibrated in these periods. The results showed that the flow model had an acceptable simulation accuracy by variance error of 3.05 and 3.92 in calibration and verification processes, respectively. Furthermore, the prediction of water table after the optimal discharge scenario indicated that the May and June months were the main periods of groundwater management.

Keywords: Allocation, Baghmalek plain, Groundwater simulation, Optimization

مقدمه

یکی از دلایل مهم تبدیل زمین‌های زراعی و قابل سکونت به بیابان، استفاده غیرهوشمندانه از منابع آب می‌باشد. منبع مطمئن و دائمی تأمین آب در بخش کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک و کویری، منابع آب زیرزمینی می‌باشد که با وقوع خشکسالی‌ها و پیشرفت تکنولوژی مورد تهاجم قرار گرفته است. بنابراین، یک سیستم جامع مدیریت تخصیص آب و توجه به واکنش‌های منابع تأمین کننده به‌ویژه آب زیرزمینی، موجب می‌گردد ابعاد جدیدی در فضای تصمیم‌گیری وارد شود. از این‌رو، پیش‌بینی رفتار آبخوان در مقابل سناریوهای صرفه‌جویانه و بهره‌برداری بهینه از آب، راهکار قابل قبولی را در این فرآیند با وضوح بیشتر نمایان می‌کند. در پیش‌گویی حرکت جریان آب زیرزمینی باید کلیه عوامل مؤثر بر سیستم، نقش خاص خود را ایفا کند. مدل‌سازی کمی، ارائه برنامه‌ای است که بتواند با دریافت ورودی‌های موردنیاز وضعیت آبخوان را در شرایط تحمیلی پیش‌بینی کند (لاله‌زاری و طباطبایی ۲۰۱۵). از سوی دیگر، افزایش نیاز آبی، چالش‌های جدیدی را برای برنامه‌ریزی سیستم‌های منابع آب مطرح

نموده است. بنابراین 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 راهکارهای مناسب برای حل آنها می‌باشد. مدیریت در استفاده تلفیقی از منابع از گزینه‌هایی است که می‌تواند به‌منظور مدیریت بهتر و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی مفید و مؤثر واقع شود (محمدرضاپور طبری و همکاران ۱۳۹۱).

کاراموز و همکاران (۲۰۰٤) مدل یکپارچه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پویا توسعه دادند. هدف مطالعه ارائه تابع پاسخ آبخوان به‌منظور فراهم کردن آب موردنیاز کشاورزی، کاهش هزینه‌های پمپاژ و کنترل نوسانات سطح ایستابی در بخش‌هایی از جنوب تهران بود. در این مطالعه تغذیه ناشی از چاه‌های جذبی در مدل شبیه‌سازی جهت بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی دیده شد. نتایج نشان داد که استفاده تلفیقی می‌تواند به‌عنوان ابزاری سودمند برای تأمین نیازهای کشاورزی مورد توجه قرار گیرد.

کاربرد یک سیستم پیوسته تصمیم‌گیری مبتنی بر اهداف مصرف بهینه آب، کارآیی فراوانی در مدیریت مطلوب آبخوان‌ها دارد. از این رو حفظ منابع آب زیرزمینی، استفاده مؤثر از آب باران، صرفه‌جویی در برداشت آب از رودخانه، رسیدن به بیشینه بهره‌وری و درآمد خالص از آب موجود در مطالعات مختلف بررسی شده است (علیمحمدی و حسین‌زاده ۱۳۸۹؛ لاله‌زاری و همکاران ۲۰۱٦). اهداف مذکور در جریان شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی و هیدروژئولوژی و بهینه‌سازی سیستم آب، خاک و گیاه برآورده شده و موجب پدید آمدن مفهوم تخصیص بهینه آب با توابع هدف مشخص به‌ویژه در شرایط خشکی می‌گردد (کارآموز و عراقی‌نژاد ۲۰۰۸؛ دلاور و همکاران ۲۰۱۲).

از گذشته تا امروز ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مختلفی در سیستم مصرف و کنترل آب زیرزمینی و مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی به‌کار برده شده است (هالاجی و یازیسیجیل ۱۹۹٦؛ ستهی و همکاران ۲۰۰٦). الگوهای چندهدفه NSGA-II و SGA در دشت کرج (محمدرضاپور طبری و همکاران ۱۳۸۸)، GMS در دشت عقیلی (نجاتی جهرمی و همکاران ۱۳۸۸)، Modflow در دشت شهرکرد (لاله‌زاری و همکاران ۲۰۱۳)، و برنامه‌ریزی دینامیک و الگوریتم ژنتیک (یانگ و همکاران ۲۰۰۹)، نمونه‌هایی از روش‌های مختلف مدل‌سازی آبخوان‌ها می‌باشند.

محمدرضاپور طبری و همکاران (۱۳۹۱) دستورالعمل بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی تهران را به‌صورت سالانه و ماهانه برای سه افق کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت تدوین و ارزیابی کردند. برنامه‌ریزی با هدف کمینه نمودن میزان کمبود سیستم برای مصارف صنعت، شرب و کشاورزی توسط مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندمرحله‌ای انجام گرفت. در این مدل، میزان تخصیص در هر ماه تابعی از ماه‌های قبل و بعد از آن بوده و الگوریتم به‌صورت دینامیکی عمل می‌کند. اولویت تخصیص به‌ترتیب با شرب، صنعت و کشاورزی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده کارآیی بالای الگوی پیشنهاد شده در جهت بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویه آب در نتیجه استفاده نامطلوب در اراضی کشاورزی و افزایش پایداری در سیستم آب زیرزمینی بود.

شبیه‌سازی برهم‌کنش آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از ایجاد اتصال دینامیکی بین منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دز توسط آذری و همکاران (۱۳۹۲) انجام گرفت. داده‌های ماهانه مقادیر برداشت، نفوذ، تراز رودخانه‌ها و رواناب، خروجی مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP) و تراز آب زیرزمینی و جریان بین آبخوان‌ها خروجی مدل آب زیرزمینی (Modflow) به تناوب بین یکدیگر در گردش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در قسمت‌های شمالی تا میانه دشت، رودهای دز و کرخه بیشتر باعث تغذیه آبخوان و

در قسمت‌های میانه دشت به پایین بیشتر نقش زهکش را به‌عهده دارند. به‌طورکلی در منطقه مطالعه به‌استثنای دشت دیمچه و لور، بیش از ۸۰ درصد از نیازها توسط آب سطحی و کمتر از ۲۰ درصد توسط آب زیرزمینی تأمین می‌شود.

در سال‌های اخیر برداشت بی رویه از منابع آب، خشکسالی، و فعالیت بشر در جهت تأمین غذا باعث خسارت‌های جبران‌ناپذیری به این منابع از نقطه نظر کمی و کیفی شده است. به‌همین منظور جهت مدیریت منابع آبی تخمین صحیحی از حجم آب زیرزمینی و بهینه‌سازی تخصیص در شرایط مختلف، کمک شایانی در مدیریت منابع آبی می‌کند. مطالعه پیش رو در قالب یک سیستم پیوسته شبیه‌سازی – بهینه‌سازی توسعه یافته است که هدف اصلی آن بررسی اثرات تخصیص آب در سناریوهای مختلف مدیریت برداشت برای مصارف مختلف دشت باغملک بر افت سطح ایستابی می‌باشد. بدین منظور اطلاعات آبخوان شامل سطح آب اندازه‌گیری شده پیزومترها در دوره‌های ماهانه، میزان بارندگی، تغذیه، برداشت چاه‌های کشاورزی، صنعتی و شرب و شرایط توپوگرافی سطح و سنگ بستر آبخوان به‌مدت ۱۲ سال (۹۳-۱۳۸۱) جمع‌آوری و مدل جریان آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. در مقابل بهینه‌سازی تخصیص آب به مصارف مختلف توسط الگوریتم ژنتیک انجام گرفته و اثرات مقادیر مختلف برداشت بر تغییرات سطح آب زیرزمینی تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

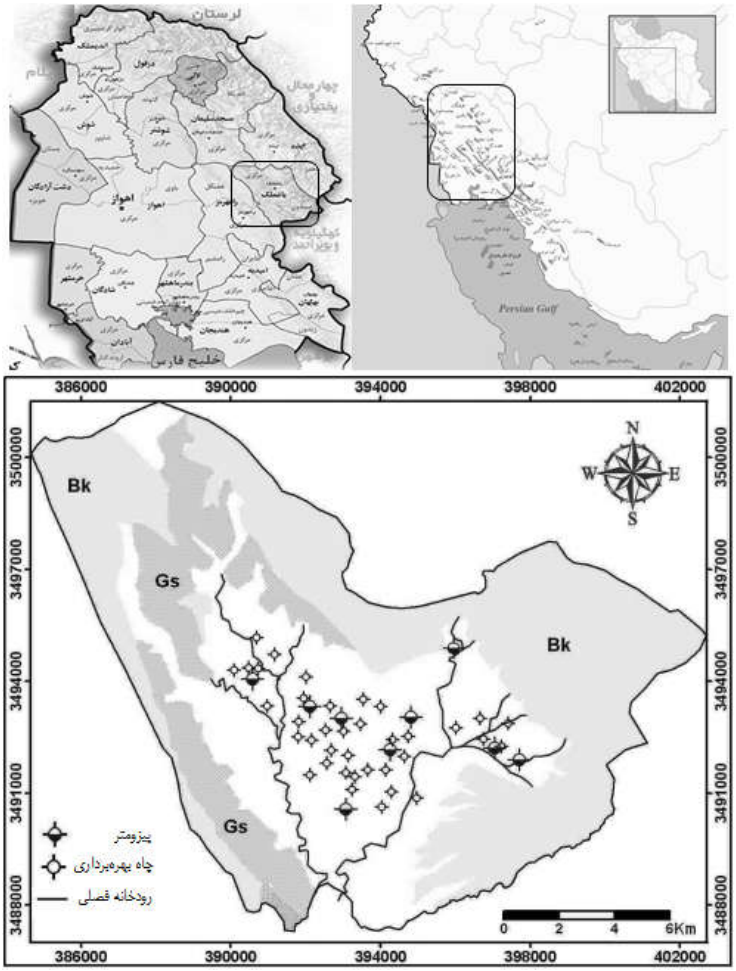
دشت باغملک بین طول‌های جغرافیایی '۳۹ °۴۹ تا '۱۱ °۵۰ و عرض‌های جغرافیایی '۲۲ °۳۱ و '۴۲ °۳۱ در ۱۴۰ کیلومتری شرق شهرستان اهواز در استان خوزستان قرار گرفته است (شکل۱). این محدوده در حوضه آبریز هندیجان – جراحی که بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان محسوب می‌شود واقع می‌باشد. این حوضه به لحاظ تقسیمات کشوری در استان‌های خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، فارس و بوشهر به‌ترتیب با گستردگی ۶۰، ۲۷، ۱۳ و ۰/۰۱ درصد مساحت گسترش یافته است. رودخانه گلال و رودخانه پادرازان، دو رودخانه مهم و فصلی دشت باغملک هستند. رودخانه گلال از قسمت شمالی منطقه وارد دشت شده و در جنوب همراه با رودخانه پادرازان به رودخانه ابوالعباس می‌پیوندد (سلطانی ۱۳۸۸). بیشینه ارتفاع محدوده ۳۳۰۳/۳ متر و کمینه آن ۳۹۱/۷ متر می‌باشد. وسعت ارتفاعات ۸۲۱/۶ کیلومترمربع، مساحت دشت ۶۲/۴ کیلومترمربع و وسعت آبخوان آبرفتی ۵۰/۹ کیلومترمربع است. ارتفاع متوسط در ارتفاعات ۱۲۳۱/۴ متر و در دشت ۷۴۳/۵ متر می‌باشد (بی‌نام ۱۳۹۲).

ویژگی های آبخوان

با توجه به بررسی پروفیل چاه‌های عمیق بهره‌برداری و اکتشافی موجود در دشت باغملک، منبع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در آبرفت عمدتاً درشت‌دانه در مجاورت سازندهای بختیاری و گچساران قرار گرفته است. سفره آبدار در بیشتر نواحی منطقه به‌صورت آزاد و در بعضی مناطق مانند قسمت‌های جنوبی و بخش‌هایی در غرب و جنوب غربی دشت، به‌صورت نیمه تحت‌فشار است. لازم به ذکر است که تغذیه سفره آبدار توسط دو سازند مهم موجود در منطقه (کنگومرای بختیاری و سازند گچساران) انجام می‌شود. بیشترین مقدار تغذیه از سمت شمال شرقی، در جایی که شیب کنگلومرای بختیاری به سمت دشت است صورت می‌گیرد. البته در بخش‌های غربی دشت گچساران در تغذیه سفره آبدار مؤثر است. از طرفی سفره آب زیرزمینی با رودخانه گلال و پادرازان در ارتباط بوده و رودخانه گلال نقش مهمی را در تغذیه سفره آبدار دشت باغملک ایفا می‌کند.

آمار و اطلاعات منابع آب

منابع برداشت آب از آبخوان شامل ۸۰ چاه کشاورزی با دبی متوسط ۲۰ لیتر بر ثانیه و کارکرد ۳۰۰۰ ساعت سالانه و با میانگین عمق ۷۸ متر و بیشینه عمق ۱۰۰ متر می‌باشد. این تعداد چاه ۸۵ درصد کل چاه‌های موجود و بقیه چاه شرب و صنعتی می‌باشند. سایر مشخصات منابع استخراج آب زیرزمینی در محدوده مطالعه در جدول۱ به‌طور خلاصه آورده شده است. چشمه و قنات به‌دلیل قرار گرفتن در خارج از مرزهای شبیه‌سازی آبخوان و اینکه منشأ استخراج آب آن‌ها اغلب آبرفتی نیست، از چرخه مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی حذف گردیدند.



شکل ۱- موقعیت دشت باغملک در استان خوزستان واقع در جنوب غربی ایران.

چرخه آب زیرزمینی و سطحی از یکسو و تحویل آن به شبکه‌های آبیاری به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان مصرف قلمداد می‌شود. آب موردنیاز کشاورزی در منطقه از طریق جریان‌های سطحی موجود و پمپاژ از آبخوان تأمین می‌گردد. عدم انطباق آبدهی رودخانه‌های فصلی با زمان کشت محصولات، استخراج آب زیرزمینی را برای کشاورزان در اولویت قرار داده است. ازاین‌رو برداشت آب کشاورزی، شرب و صنعت موجب رشد منفی و تغذیه از بستر رودخانه‌ها و اراضی کشاورزی و بارندگی از ضرایب مثبت بیلان آبخوان به‌شمار می‌روند.

جدول۱- منابع برداشت آب زیرزمینی در محدوده شهرستان باغملک (بی‌نام ۱۳۹۲).

نوع منبع	چاه نیمه‌عمیق	چاه عمیق	چشمه	قنات
تعداد	۷	۸۸	۱۰۲	۱
عمق متوسط (m)	۱۲/٤۲	۷۸/۲۵	–	–
دبی متوسط ($L\ S^{-1}$)	٤/۲	۱۸/۲	۳/۹۳	۰/۵
تخلیه سالانه ($1000m^3$)	٤۲/٦	۷٦۷۹	۱۲٦۵۵	٦۳
بیشترین عمق (m)	۲۰	۱۱۰	–	–
بیشترین دبی ($L\ S^{-1}$)	۹/۵	٤۲/۵	۳۸	۵
متوسط کارکرد (hr)	۱۱۲۹	۱٦۹۹	–	–

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی ترکیبی شامل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل Modflow و ابزار بهینه‌سازی برای تخصیص آب با هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری اقتصادی و کارآیی یک الگوی آبیاری به‌وسیله الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب، NSGAII توسعه داده شده است. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، توابع هدف نه یک نقطه بلکه یک فضای چندبعدی (به تعداد اهداف) از جواب‌های بهینه را تشکیل می‌دهند که به‌ازای هر پاسخ X در فضای تصمیم امکان‌پذیر، یک نقطه متناظر آن در فضای تابع هدف وجود دارد. مفهوم بهینه در مسائل با بیش از یک هدف به معنای یافتن پاسخ‌هایی است که هر یک از توابع هدف را در سطح قابل قبولی برآورده نماید. ازاین‌رو تصمیم‌گیرنده بر حسب شرایط حاکم بر آینده مسئله یکی از جواب‌ها را گزینش می‌کند. NSGAII، با تکیه بر اصل غلبگی و معیار فاصله جمعیتی یکی از بهترین مدل‌های چندهفه به شمار می‌رود.

بر این اساس در بخش اول مدل‌سازی، مدل مفهومی آبخوان باغملک در چهارچوب روش عددی تفاضل محدود برای پیش‌بینی رفتار جریان آب زیرزمینی توسعه یافت. اطلاعات موردنیاز از جمله داده‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری شده از ۸ پیزومتر در طول ۹ سال از ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ جمع‌آوری شد. سال‌های مورد مطالعه به ۳٦ دوره تنش فصلی تقسیم و هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه در این دوره‌ها واسنجی گردید. پس از واسنجی، صحت‌سنجی مدل در ۳ سال آبی از ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ انجام گرفت. سپس، مقدار آب برداشتی از آبخوان که در سه سناریوی تأمین ۷۰، ۹۰ و ۹۸ درصد از نیاز آبی کشاورزی منطقه در شرایط بهینه که از نتایج مدل بهینه‌سازی استخراج گردید به مدل شبیه‌سازی وارد و تأثیر آن بر خطوط هم‌تراز سطح ایستابی ترسیم گردید.

در بخش شبیه‌سازی آبخوان میزان حساسیت مدل به پارامترهای واسنجی‌شده نظیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه در سناریوهای مختلف ارزیابی گردید. بدین منظور شاخص حساسیت ان‌جی و لومیس که در سال ۱۹۸٤ پیشنهاد شده است به‌صورت رابطه۱ مورد استفاده قرار گرفت (ماهشواری و همکاران، ۱۹۹۰).

$$S = \frac{\frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(x_{si}-x_{mi}\right)}{x_{mi}}}{\Delta} \qquad [۱]$$

علاوه بر این چهار شاخص توافق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی[1]، متوسط قدر مطلق خطاها[2]، جذر میانگین مربعات خطاها[3] و شاخص کارآیی[4] برای ارزیابی مدل شبیه‌سازی‌شده به‌کار گرفته شد (محمدرضاپور طبری و همکاران، ۱۳۹۱).

1. Index of agreement (*IOA*)
2. Mean absolute error (*MAE*)
3. Root mean square error (*RMSE*)
4. Efficiency (*EFF*)

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{mi} - x_{si}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|x_{mi} - \bar{x}_m\right| + \left|x_{si} - \bar{x}_m\right|\right)^2} \qquad [۲]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_{mi} - x_{si}\right|}{n} \qquad [۳]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{mi} - x_{si}\right)^2}{n}} \qquad [۴]$$

$$EFF = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{si} - \bar{x}_m\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{mi} - \bar{x}_m\right)^2}}\right)^2 \qquad [۵]$$

در این روابط n تعداد پارامترهای خروجی، x_{mi} مقدار اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی، x_{si} مقدار شبیه‌سازی شده، $\bar{x}_m$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و Δ مقدارمطلق تغییردر پارامتر ورودی می‌باشند.

در بخش مدل بهینه‌سازی تخصیص آب، علاوه بر توابع هدف یاد شده، داده‌های ورودی به مدل شامل متغیر تصمیم‌گیری (آب تخصیص یافته، X) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر گیاه (ET) و بارندگی مؤثر (P) برای هر متغیر است. برای هر داده جهت شناسایی در محاسبات سه اندیس در نظر گرفته می‌شود، بنابراین:

$$X = \left[x_1, x_2, x_3, ..., x_{n\,\mathrm{var}}\right] \quad \forall \quad x_n = \left(WA_{ipj}\right)_n \qquad [۶]$$

$$P = \left[P_1, P_2, P_3, ..., P_{Sp}\right] \quad \forall \quad P_i = \left(ER_{pjn}\right)_i \qquad [۷]$$

$$ET = \left[ET_1, ET_2, ..., ET_{nvsr}\right] \quad \forall \; ET_n = \left(ET_{ipj}\right)_n \qquad [۸]$$

که در آن: $i = 1,2,3,...,Sp$ شماره دوره ۱۰ روزه، $p = 1,2,3,...,np$ شماره گیاه، $j = 1,2,3,4$ شماره هر مرحله از رشد و $n = 1,2,3,...,n\,\mathrm{var}$ شماره متغیر تصمیم‌گیری می‌باشند. از سوی دیگر برخی قیود مسأله شامل قید جلوگیری از تنش خشکی در مراحل حساس رشد مانند رابطه ۹ به مدل اضافه شد:

$$Ky_{pj} \geq ۰/۵ \Rightarrow ۰/۵ \leq \frac{ET_{apij}}{ET_{mpij}} \leq ۱ \qquad [۹]$$

که در آن، ETa و ETm به‌ترتیب تبخیدر و تعرق واقعی و پتانسیل می‌باشند. محدودیت‌های حاکم بر منابع آب نیز مورد توجه قرار گرفته و بر اساس حجم آب ناخالص مصرفی سهم آب زیرزمینی تعیین و به‌صورت ماهانه در مدل شبیه‌سازی اعمال گردید. بدین منظور، گیاهان عمده دشت باغملک و مناطق اطراف آن، هزینه تولید و قیمت فروش محصولات در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ جمع‌آوری گردید. از سوی دیگر، نیاز آبی از سه بخش بارندگی مؤثر، آب سطحی و پمپاژ آب زیرزمینی تأمین می‌شود که جریان‌های سطحی و آب باران در شرایط عدم وجود سازه‌های ذخیره آب مانند سد، آب‌بند یا استخر باید به‌صورت مستقیم تخصیص یابد. با توجه به امکان یا عدم امکان ذخیره‌سازی در هر مقطع زمانی یا مکانی محدوده حجم آب سطحی در دسترس برای هر دوره شبیه‌سازی قابل‌تفکیک و برآورد است. در مدل توسعه داده‌شده در صورت عدم تأمین نیاز آبی توسط بارندگی و سپس آب سطحی، برداشت از آبخوان اولویت بعدی تخصیص محسوب می‌شود. بر این اساس دو سیاست یا سناریوی کلی در خصوص حجم مجاز برداشت از منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی و مدیریت‌های مختلف در نظر گرفته شد:

الف: تعیین حجم برداشت از آب زیرزمینی: در این شرایط، هدف مدل محاسبه حجم برداشت از چاه‌ها در هر ماه است که خروجی برنامه تنها شامل یک جواب (تأمین کل نیاز آبی) می‌گردد.

ب: مشخص نمودن حجم مجاز برداشت برای یک سال: تخصیص کل حجم برداشت مجاز از آب زیرزمینی هر دوره ماهانه بر اساس سه عامل تأثیرگذار شامل تعداد و نوع مصرف کنندگان، شرایط محیطی و نیاز بخش کشاورزی و مقدار سایر منابع آب موجود انجام می‌شود. بنابراین، آب تخصیص‌یافته به هر دوره با قید رابطه ۱۰ محاسبه شد:

$$PW_{pi} \leq SW_i + GW_i \qquad [۱۰]$$

$$X_{pi} \times Cg_p = PW_{pi} \qquad [۱۱]$$

قید برداشت از آب زیرزمینی: مجموع آب پمپاژ شده در کل دوره‌ها باید کمتر یا مساوی حجم پمپاژ مجاز باشد.

$$\sum_{i=1}^{36} GW_i \le GW \qquad [12]$$

SW و GW به‌ترتیب حجم آب سطحی و زیرزمینی؛ PW حجم آب تخصیص‌یافته؛ X متغیر ورودی مدل و Cg، ضریب تبدیل حجم ناخالص آب بر حسب مترمکعب در هکتار به ارتفاع آب موردنیاز بر حسب میلی‌متر، i شماره دوره تنش و p شماره گیاه می‌باشد. علاوه بر این با ثابت بودن بارندگی مؤثر، برای محاسبه حجم برداشت از آب زیرزمینی رابطه ۱۳ به‌دست آمد:

$$0/5 \times ET_{mi} - \left(P_{EFi}\right) \le \frac{GW_i}{Cg} \qquad [13]$$

نتایج و بحث

در فرایند شبیه‌سازی آب زیرزمینی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به وسیله مدل Modflow واسنجی شد که مقادیر آن به‌ترتیب بین ٤ تا ۷ متر در روز و ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۳ برآورد گردید. واریانس خطای واسنجی ۳/۰۵ (دوره ۹ ساله از مهرماه ۸۱ تا شهریورماه ۹۰) و صحت‌سنجی ۳/۹۲ (دوره ۳ ساله از مهرماه ۹۰ تا شهریورماه ۹۳) به‌دست آمد. حساسیت مدل شبیه‌سازی نسبت به ضرایب واسنجی‌شده در جدول۲ آمده است. در هر مرحله ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه به‌صورت مثبت و منفی با آن‌ها جمع شد درحالی‌که سایر پارامترها بدون تغییر باقی ماند. مدل مجدداً برای هر تغییر اجرا و در مجموع ۱۸ شبیه‌سازی انجام و ضریب حساسیت آن‌ها، معادله ٤، محاسبه شد. مطابق جدول۲ بیشترین حساسیت نتایج مدل جریان در حالت کاهش هدایت هیدرولیکی اتفاق خواهد افتاد؛ در شرایطی که افزایش این پارامتر خطای زیادی را به وجود نمی‌آورد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های خطا (شاخص توافق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (IOA)، متوسط قدر مطلق خطاها (MAE)، جذر میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) و شاخص کارایی (EFF) در جدول۳ خلاصه شده است.

جدول۲- تحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی به تغییرات ضرایب واسنجی‌شده.

پارامتر	+٪۵۰	+٪۳۰	+٪۱۰	-٪۱۰	-٪۳۰	-٪۵۰
هدایت هیدرولیکی	۲/۳	۱/٦	۱/۳	۱۹	۲۲/۵	۲٦/٤
آبدهی ویژه	۰/۷۱	۰/۵٤	۰/۳۲	۱/۹۳	۲/۹۰	۳/۷٤
تغذیه	۹/٦۱	۷/٤۲	٦/۱۳	۷/۷٤	۱۰/٦	۱۳/۵

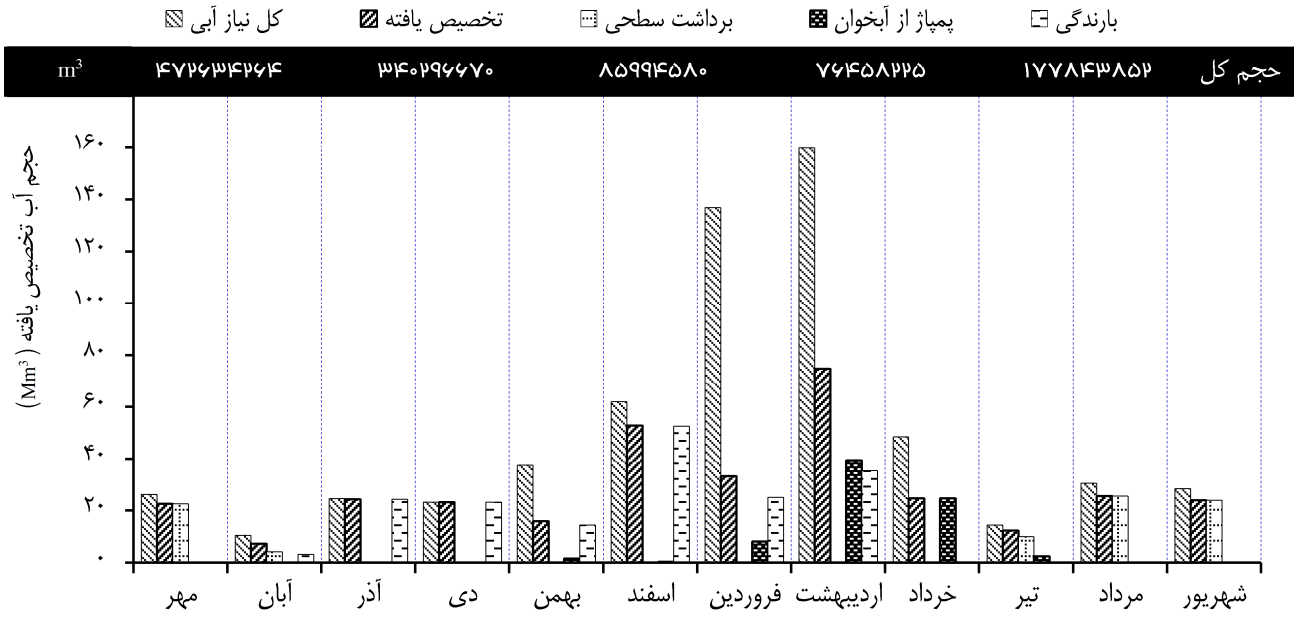
جدول۳- مقایسه مقادیر شاخص‌های خطای شبیه‌سازی مدل آب زیرزمینی.

شاخص خطا	دوره واسنجی	دوره صحت‌سنجی
IOA	۰/۹۹	۰/۹۹
MAE (m)	۰/۳٦	۱/۷٤
RMSE (m)	۰/۵۸	۲/۵۳
EFF	۰/۹۵	۰/۹۷

تحلیل شرایط آبخوان با اعمال سه سناریو شامل تأمین ۷۰، ۹۰ و ۹۸ درصد از کل نیاز آبی انجام شد. سناریوهای در نظر گرفته شده برای برنامه‌ریزی سطوح مختلفی از آب در دسترس شامل شرایط کم آبی (۷۰ درصد)، تنش محدود (۹۰ درصد) و سناریو ۹۸ درصد که نزدیک به تأمین کل نیاز آبی برای مطالعه اثرات بهینه‌سازی تعریف و نقش هر یک از منابع تأمین کننده آب در آنها تشریح شد. شکل۲ توزیع ماهانه نیاز آبی و مقدار تخصیص از منابع آب سطحی، زیرزمینی و تأثیر بارندگی مؤثر بر تأمین نیاز آبی بخش کشاورزی را در سناریوی کم‌آبی نشان می‌دهد. مطابق شکل، کل نیاز آبی

کمتر از ۵۰۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود که حدود ۷۰ درصد از آن برای تخصیص ماهانه برنامه‌ریزی شده است. دراین بین با تخصیص بهینه، استخراج آب زیرزمینی تنها کمی بیش از ۷۵ میلیون مترمکعب برآورد شده و بزرگ‌ترین منبع استحصال آب بارندگی با ۱۷۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. این موضوع به دلیل طولانی بودن فصل رشد محصولات گندم آبی، گندم دیم و جو دیم است که استفاده مؤثری از آب باران نموده و بخش عمده نیاز آن‌ها از این طریق تأمین می‌گردد.

در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر کل آب تخصیص داده شده از جریان‌های سطحی و تنها مربوط به برنج است و تقریباً بخش زیادی از نیاز آبی این محصول به‌واسطه بهره‌وری اقتصادی بالا فراهم می‌گردد. در ماه‌های آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت نیز سهم عمده بارندگی در برآوردن نیاز آبی گیاهان مشخص بوده و کمبود آن به میزان جزئی از طریق پمپاژ برداشت خواهد شد.



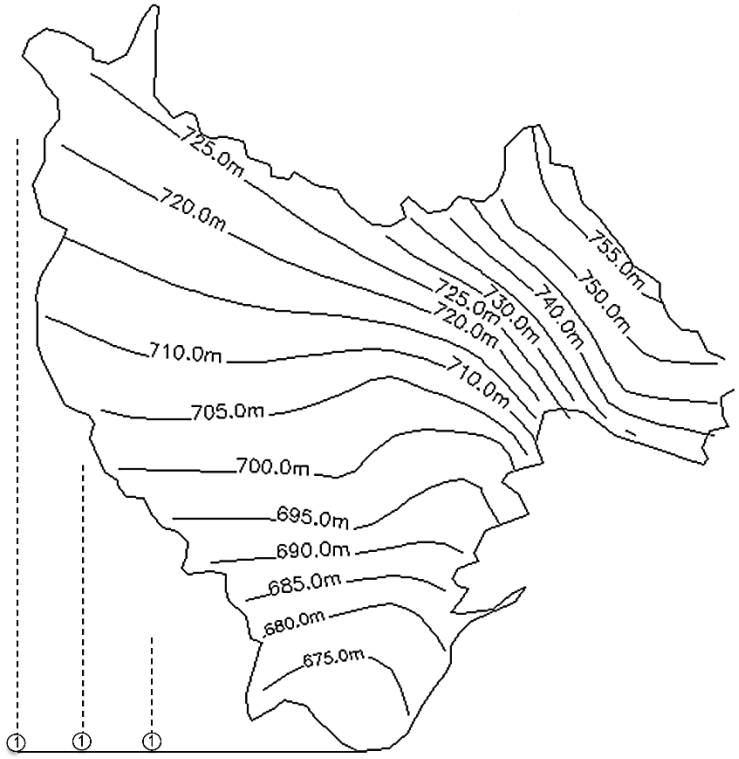
شکل۲- تفکیک ماهانه تخصیص از منابع آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی در سناریوی اول.

کمترین سقف تخصیص آب مربوط به دو ماه اردیبهشت و خرداد می‌گردد که به دلیل قرار داشتن اغلب محصولات بهاره در مرحله برداشت حساسیت کمتری به تنش خشکی از خود نشان می‌دهند. حدود ۲۰ میلیون مترمکعب آب توزیع‌شده در خرداد باید از آب زیرزمینی برداشت گردد. سناریوی اول یک سناریوی خشک بهینه محسوب شده که جهت حفظ منابع آب زیرزمینی با قبول کاهش درآمد پیشنهاد می‌گردد.

مدل جریان در آبخوان که در بخش شبیه‌سازی منابع آب واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت شده است برای پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی در مقادیر مختلف برداشت مورد استفاده قرار گرفت. تنش‌های وارده به آبخوان شامل پمپاژ از آب زیرزمینی و بازگشت بخشی از آب استخراج شده به صورت نفوذ عمقی می‌باشد. لذا در هر سناریو بخشی از خروجی مدل بهینه‌سازی که مربوط به محاسبات بیلان آب مورداستفاده است تفکیک و به فرمت ورودی بسته well از نرم‌افزار Modflow تبدیل شد. شکل۳ خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در سناریوی اول (تأمین ۷۰ درصد از نیاز کلی) را نشان می‌دهد. نقشه به‌دست‌آمده در آخرین دوره از سال مطالعه (شهریور ۹۳) سطح ایستابی در هر نقطه از دشت را در این سناریوی مدیریتی نشان

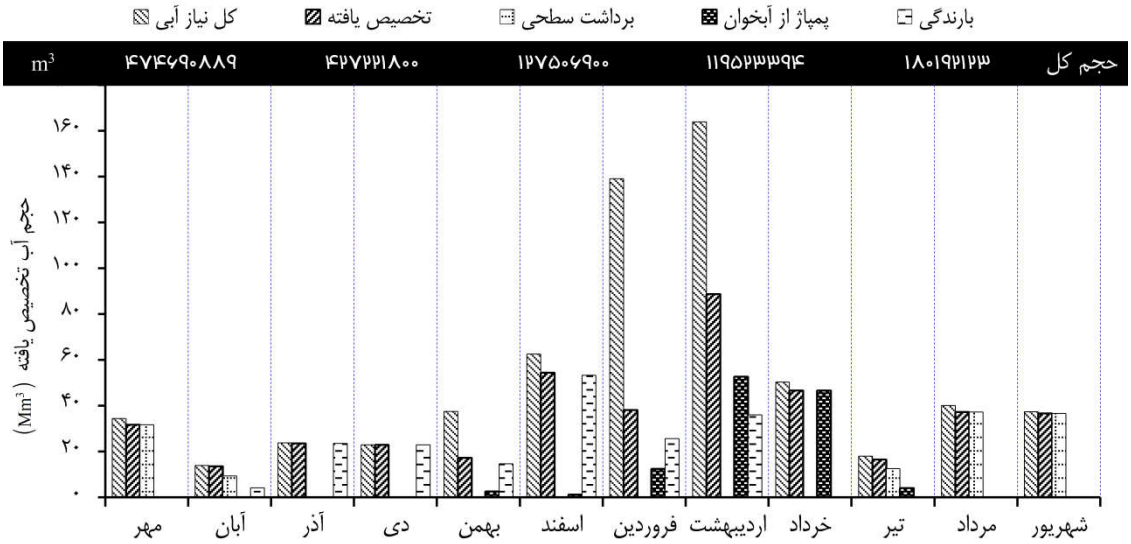
می‌دهد. خطوط نشان داده شده تعیین‌کننده فاصله رسیدن به ارتفاع‌های ٦٨٠، ٧٠٠ و ٧٢٠ هستند که برای مقایسه ارتفاع سطح ایستابی سناریوها استفاده می‌گردد.

در سناریوی دوم، تأمین ۹۰ درصد از کل نیاز آبی الگوی کشت در نظر گرفته شد. حجم تخصیص ماهانه از هر یک از منابع آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی در شکل٤ نشان داده شده است. در سناریوی قبل بهترین شرایط استفاده از آب سطحی و بارندگی انجام گرفت و نتایج مشابه آن در سناریوی دوم با تغییرات اندک به دست آمد. حجم استخراج از آب زیرزمینی به حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب افزایش یافته که بیشترین آن مربوط به ماه‌های اردیبهشت و خرداد جهت جبران کمبود بارش بوده است. همچنان مراحل پایانی برداشت گیاهان بهاره کمترین نسبت تخصیص آب را دارد. نتایج نشان می‌دهد در صورت محاسبه و لحاظ نمودن آب باران به‌عنوان مکمل آبیاری، می‌توان در دوره‌هایی از سال در مصرف آب زیرزمینی صرفه‌جویی نمود.

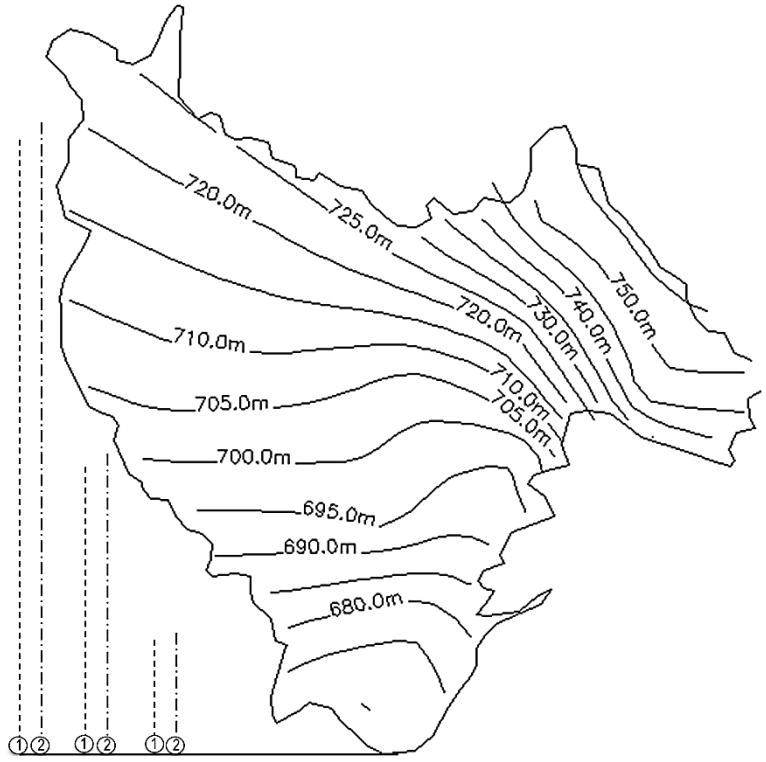


شکل۳. سطح آب زیرزمینی برای برداشت به میزان سناریوی اول.

حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب پمپاژ آب زیرزمینی در یک سال سطح ایستابی دشت باغملک را در موقعیت شکل٥ قرار می‌دهد. مقایسه خطوط اندازه‌گیری نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی حدود ۸۰ سانتی‌متر در نقاط بالایی دشت و نزدیک به ۳۰ سانتی‌متر در قسمت جنوبی نزول داشته است زیرا عمده چاه‌های برداشت آب در مرکز و شمال دشت قرار دارند. هر چه اختلاف بین طول خطوط اندازه‌گیری بیشتر باشد بیان‌کننده افت بیشتر سطح ایستابی است.

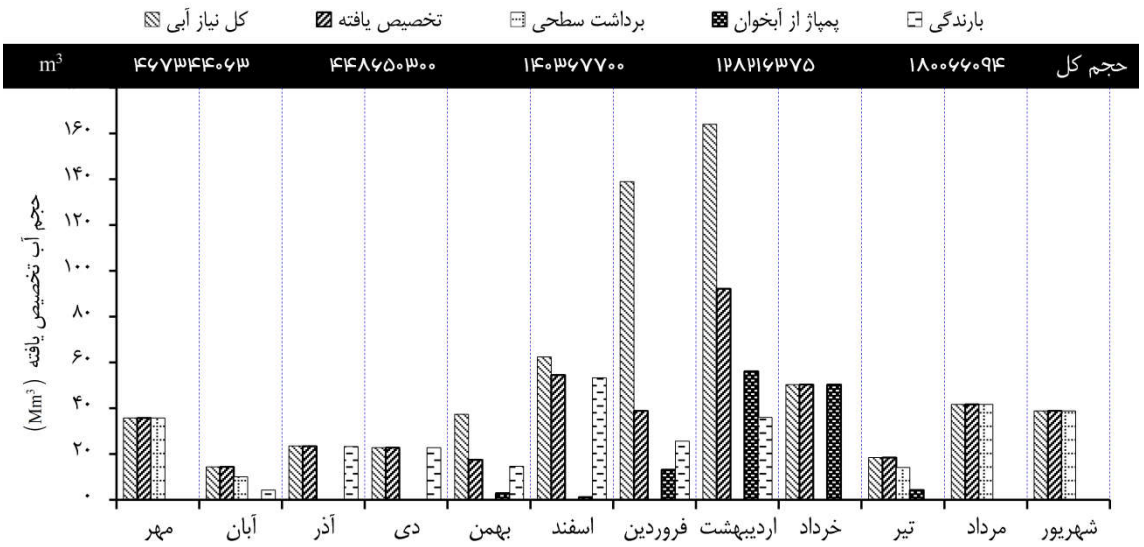


شکل۴- تفکیک ماهانه تخصیص از منابع آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی در سناریوی دوم.



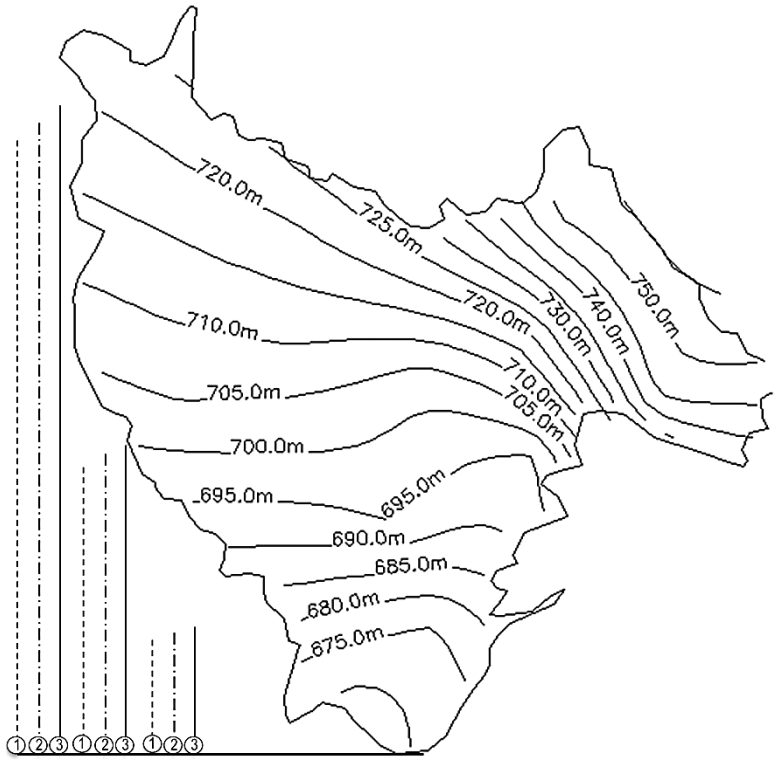
شکل۵- سطح آب زیرزمینی برای برداشت به میزان سناریوی دوم.

شکل٦ تخصیص حدود ۹۸ درصد (سناریوی۳) از نیاز آبی ماهانه شهرستان باغملک را به تفکیک منابع آبی نشان می‌دهد. بارندگی، آب سطحی و آب زیرزمینی به ترتیب بیشترین سهم را در شرایط بهینه دارند درحالی‌که در سناریوهای موجود برداشت آب زیرزمینی به مقدار بیش از نیاز گیاهان پمپاژ می‌شود. بیشترین حجم آب موردنیاز در اردیبهشت‌ماه باید تأمین شود (مراحل توسعه و رشد بیشتر محصولات که حساسیت به تنش آب بالایی دارند) که در صورت کمبود بارندگی باید از آب زیرزمینی برداشت شود.



شکل۶- تفکیک ماهانه تخصیص از منابع آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی در سناریوی سوم.

سناریوی سوم که در حقیقت گزینه بیشینه برداشت بهینه از آب زیرزمینی به شمار می‌رود نیازمند استخراج حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب آب می‌باشد. در این حالت نظر به شرایط فیزیکی و هیدرولیکی آبخوان خطوط پیزومتریک سطح آب با نقشه شکل۷ پیش‌بینی شد.



شکل۷- سطح آب زیرزمینی برای برداشت به میزان سناریوی سوم.

نزول سطح ایستابی از منحنی هم‌تراز و خطوط اندازه‌گیری نسبت به دو سناریوی قبل برآورد شده است. ازآنجا که شبیه‌سازی هیدرولیکی آبخوان در یک دوره ۱۲ ساله و با شرایط مختلف تنش آب انجام شد و ارتفاع آب زیرزمینی تنها برای یک سال توسط آن پیش‌بینی می‌شود، می‌توان نتایج مدل را قابل‌اعتماد دانست.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از خروجی مدل بهینه‌سازی به‌عنوان داده‌های ورودی جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی امکان پیش‌بینی و تحلیل اثرات هر سناریوی تخصیص آب بر سطح آب زیرزمینی را فراهم می‌آورد. تخصیص بهینه آب کشاورزی در کنترل و مدیریت آبخوان‌ها نقش اساسی دارد و در مطالعات یانگ و همکاران (۲۰۰۹)، خاشعی و همکاران (۱۳۹۲) و باریکانی و همکاران (۱۳۹۱) به جنبه‌هایی از موضوع پرداخته شده است. در بسیاری از پژوهش‌ها نقش آب زیرزمینی تنها به عنوان قیود سیستم بهینه‌سازی مطرح بوده که نتایجی محدودتر نسبت به تحقیق حاضر را ارائه نموده است (قهرمان و سپاسخواه ۲۰۰۲ و ربیعی و همکاران ۱۳۹۲). در این مطالعه، پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی پس از انتخاب پاسخ نهایی مدل بهینه‌سازی انجام می‌گیرد که نمونه‌ای از این گونه مدل‌سازی، شبیه‌سازی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری تلفیقی در دشت دز توسط آذری و همکاران (۱۳۹۲) است. مزیت این شیوه در بنا گذاشتن ساختاری است که قادر خواهد بود دوره‌های بحرانی برداشت و تخصیص آب زیرزمینی را تعیین کند. نتایج نشان داد این دوره‌ها در دشت باغملک در اردیبهشت و اوایل خردادماه قرار گرفته و دلیل آن کاهش نزولات جوی و مرحله حساس رشد اغلب محصولات بهاره است. در نهایت به‌نظر می‌رسد بهره‌گیری از یک مدل برنامه‌ریزی هوشمند با تعیین تمام قیود حاکم بر مسئله می‌تواند نتایجی را ارائه کند که در شرایط بحرانی بر اساس انتظارات تصمیم‌گیرنده، تمامی گزینه‌های بهینه را معرفی نماید. علاوه براین، همانگونه که در سایر تحقیقات نشان داده شده است مصارف آب شهری و صنعتی در مناطقی که بخش قابل توجهی از بیلان منابع آب را تشکیل می‌دهند، با در نظر گرفتن متغیرها و محدودیت‌های هر کدام در برنامه‌ریزی تخصیص آب مورد توجه قرار گیرند (محمدرضاپور طبری و همکاران ۱۳۹۱).

منابع مورد استفاده

آذری آ، آخوندعلی ع م، رادمنش ف و حقیقی ع، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندمنظوره برای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی منابع آب در شرایط برهم‌کنش آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: دشت دز). رساله دکتری هیدرولوژی. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

باریکانی ا، احمدیان م، خلیلیان ص و چیذری اح، ۱۳۹۱. استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و تعیین الگوی بهینه کشت دشت قزوین. اقتصاد کشاورزی و توسعه، شماره۷۷، صفحه‌های ۲۹ تا ٥٦.

بی‌نام ۱۳۹۲. گزارش بیلان آب محدوده مطالعاتی باغ‌ملک، مطالعات تهیه بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز رودخانه-های هندیجان - جراحی. سازمان آب و برق خوزستان.

خاشعی سیوکی ع، قهرمان ب و کوچک‌زاده م، ۱۳۹۲. کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی PSO (مطالعه موردی: دشت نیشابور). نشریه آب و خاک، جلد۲۷، شماره۲، صفحه‌های ۲۹۲ تا ۳۰۳.

ربیعی ز، هنر ت و کاظمی عر، ۱۳۹۲. تخصیص بهینه همزمان آب و زمین در شرایط کمبود منابع با استفاده از روابط بیلان آب در خاک (مطالعه موردی شبکه آبیاری و زهکشی سد درودزن استان فارس). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد۲، شماره۷، صفحه‌های ۱۵۹ تا ١٦٦.

سلطانی ف، ۱۳۸۸. تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت باغملک بر اثر خشکسالی و برآورد میزان تغییر حجم سفره آبدار. دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن. ۳۰ اردیبهشت. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان.

علیمحمدی س و حسین‌زاده ح، ۱۳۸۹. بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز رودخانه ابهر.

مجله آب و فاضلاب، شماره۳، شماره‌های ۷۵ تا ۸۷.

محمدرضاپور طبری م، مکنون ر و عبادی ت، ۱۳۸۸. مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از الگوریتم‌های SGAs و NSGA-II. مجله آب و فاضلاب، شماره۱، صفحه‌های ۱ تا ۱۲.

محمدرضاپور طبری م، مکنون ر و عبادی ت، ۱۳۹۱. ارائه ساختاری به‌منظور برنامه‌ریزی بلندمدت بهینه بهره‌برداری تلفیقی. مجله آب و فاضلاب، شماره٤، صفحه‌های ٥٦ تا ٦٩.

نجاتی جهرمی ز و چیت‌سازان م، ۱۳۸۸. شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دشت عقیلی با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۵۸ص.

Delavar M, Moghadasi M and Morid S, 2012. Real-time model for optimal water allocation in irrigation systems during droughts. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 138(6): 517-524.

Ghahraman B and Sepaskhah AR, 2002. Optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns. Irrigation Science 21: 127-137.

Hallaji K and Yazicigil H, 1996. Optimal management of coastal aquifer in southern Turkey. Journal of Water Resources Planning and Management 122(4): 233–244.

Karamouz M and Araghinejad S, 2008. Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: case study. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 134: 471-478.

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

Lalehzari R and Tabatabaei SH, 2015. Simulating the impact of subsurface dam construction on the change of nitrate distribution. Environmental Earth Science 74 (4): 3241-3249.

Lalehzari R, Tabatabaei SH and Kholghi M, 2013. Simulation of nitrate transport and wastewater seepage in groundwater flow system. International Journal of Environmental Science and Technology. 10: 1367-1376.

Lalehzari R, Boroomand Nasab S, Moazed H and Haghighi A, 2016. Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 142(1): 05015008.

Maheshwari BL, McMahon TA and Turner AK, 1990. Sensitivity analysis of parameters of border irrigation models. Agricultural Water Management 18: 277-287.

Sethi LN, Sudhindra N, Panda, Manoj K, Nayak, 2006. Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India. Agriculture water management. 83 (3): 209-220.

Yang CC, Chang LC, Chen CH and Yeh MS, 2009. Multi-objective planning for conjunctive use of surface and subsurface water using genetic algorithm and dynamics programming. Water Resource Management 23(3): 417-437.