نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۷، ص. ۲۸۱-۲۶۷

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 2, May.-Jan. 2018, p. 267-281

ارزیابی اثربخشی سناریوهای احیای آبخوان توسط شاخص‌های پایداری و بهره‌برداری منابع آب، مطالعه موردی: آبخوان شهرکرد

بنفشه شیخی پور[۱]- سامان جوادی[۲*]- محمد ابراهیم بنی حبیب[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

چکیده

افزایش بی‌رویه‌ی جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور همچون دشت شهرکرد شده است. در پژوهش حاضر جهت مدیریت بهینه دشت مذکور، مدل کمی این آبخوان تهیه سناریوهای کاهش برداشت ۵، ۱۰ درصد، ساخت سد زیرزمینی و تغذیه مصنوعی برای ۳ سال آینده پیش‌بینی و تأثیر آن‌ها مدل‌سازی شده است. در نهایت دو شاخص فنی پایداری (I_u) و بهره‌برداری اصلاح شده (WEI+) جهت تعیین میزان اثربخشی سناریوها محاسبه می‌شود. شاخص پایداری نشان دهنده‌ی میزان مصرف از منابع طبیعی موجود با توجه به مقدار تقاضا است که مقدار بهینه آن عدد ۱ بوده و می‌تواند مقادیر منفی نیز داشته باشد. شاخص بهره‌برداری نیز بیان کننده‌ی مقدار فشار به منابع آب با توجه به مقدار برداشت بوده و دارای مقادیر مثبت و مقدار بهینه‌ی آن، اعداد نزدیک به صفر می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد وضعیت اولیه‌ی آبخوان بسیار نامناسب و برداشت از آبخوان بیش از ظرفیت آن می‌باشد. مقدار شاخص بهره‌برداری برای حالتی‌که سناریویی وجود ندارد، برابر با ۱/۰۶۸ و برای سناریوهای سد زیرزمینی، اجرای طرح تغذیه مصنوعی، کاهش برداشت ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۱/۰۶۸، ۱/۰۶۱، ۱/۰۴۵ و ۰/۹۶۹ می‌باشد. همچنین مقادیر شاخص پایداری به ترتیب برابر با ۰/۰۷۰-، ۰/۰۷۰-، ۰/۰۷۱-، ۰/۰۷۸ و ۰/۱۱۴ می‌باشد. نتایج نشان داد، سناریو کاهش ۱۰ درصد برداشت، بهترین سناریو بوده و پس از آن، سناریوهای کاهش ۵ درصدی برداشت از چاه‌ها در طرح تغذیه مصنوعی و سد زیرزمینی در جایگاه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. با استفاده از دو شاخص بازتعریف شده در این مقاله می‌توان به بررسی عملکرد آبخوان‌های دیگر و روش‌های مدیریتی مختلف پرداخت.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، شاخص پایداری، سد زیرزمین، مدل‌سازی

مقدمه

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشکی همچون ایران، که به دلیل عدم وجود رودخانه‌های دائمی با کمبود منابع آب سطحی مواجه می‌باشد، مهم‌ترین منبع جهت فعالیت‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب می‌باشد. از آن‌جایی که مقدار عرضه اقتصادی آب همیشه محدود بوده و مقدار تقاضا نیز با رشد جمعیت و گسترش سطح زیرکشت دائماً درحال افزایش است، برنامه‌ریزی و انجام روش‌های مدیریتی لازم جهت استفاده بهینه از منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (۱۳). سناریوهای مختلفی جهت مدیریت آب‌های زیرزمینی تاکنون ارایه شده است که ضروری است جهت ارزیابی تأثیر آن‌ها بر آبخوان از شاخص‌های کمی استفاده گردد.

پژوهشگران روش‌ها و سناریوهای مختلف مدیریتی را جهت بهبود وضعیت آبخوان مورد بررسی قرار داده‌اند که از بین آن‌ها می توان به احداث سدهای زیرزمینی، تغذیه مصنوعی و کاهش برداشت توسط بهره‌برداران اشاره نمود. با ساخت سد زیرزمینی در آبخوان می‌توان مانع حرکت و خروج جریان آب زیرزمینی از آبخوان گردید، که در نتیجه موجب ذخیره‌ی آب و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی می‌شود. ونرومپی (۱۵) در گزارشی با ارزیابی پنج سد زیرزمینی در بلژیک به این نتیجه رسید که سدهای زیرزمینی دارای مزایایی نسبت به سدهای سطحی می‌باشند که عبارتند از: افزایش ذخیره آب موجود، هزینه‌ی ساخت کمتر، ریسک کمتر در برابر آلودگی، قابلیت تکرار، سهولت بهره برداری و امکان استفاده از زمین‌های موجود در بالای سد. با توجه به قابلیت سدهای زیرزمینی، این راهکار در کشورهای مختلف برای رسیدن به اهداف متفاوت مورد توجه قرار گرفته است. ایشیدا و همکاران (۴) و استوانویک (۱۴) به بررسی سدهای زیرزمینی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول : (Email: javadis@ut.ac.ir
DOI: 10.22067/jsw.v32i1.68794

در کشورهای مختلف مانند ژاپن، هند، اتیوپی، بورکینافاسو، کنیا، کره جنوبی، چین، برزیل، ایالات متحده آمریکا، عراق، الجزایر و سومالی پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که ساخت سد زیرزمینی منجر به ذخیره حجم زیاد آب در آبخوان‌ها شده و موجب بهبود وضعیت آب و شرایط کشاورزی در آن مناطق گردیده است. دولت ژاپن در سال ۱۹۸۷ جهت توسعه منابع آب زیرزمینی و کشاورزی بزرگترین سد زیرزمینی موجود در دنیا را درساناگوا و فوکوزاتو در جزیره میاکوجیما ساخته است. کورداچی و همکاران (۱۱) به بررسی تأثیر احداث سد زیرزمینی بر آبخوان شهر بیسکرا واقع در الجزایر پرداخته‌اند. در این پژوهش برای به دست آوردن توپوگرافی منطقه و شبکه رودخانه‌ها از نرم‌افزار ARCGIS و برای مشاهده‌ی نتایج احداث سد زیرزمینی از MODFLOW استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که به دلیل عدم وجود عوامل تابش خورشید و تبخیر، حجم زیادی از آب در آبخوان ذخیره می‌گردد.

تغذیه مصنوعی سناریوی مدیریتی دیگری است که می‌تواند در جهت متعادل نگهداشتن حجم ذخیره مخازن آب زیرزمینی و توسعه‌ی بهره‌برداری از منابع آب انجام گیرد. اهداف مختلفی در جهت بررسی طرح‌های تغذیه مصنوعی وجود دارد، به طور مثال میراحمدپور و همکاران (۸) به بررسی تأثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی با هدف حفظ منابع آب زیرزمینی به عنوان راهکاری جهت جلوگیری از افزایش نرخ فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان دهنده‌ی تأثیر رضایت‌بخش پروژه‌ی تغذیه مصنوعی بر کاهش فرونشست زمین در این دشت می‌باشد. همچنین سلیم پور و همکاران (۱۲) به برآورد میزان تغذیه آبخوان دشت شهرکرد، جهت کاهش آثار منفی طرح انتقال آب بهشت آباد به فلات مرکزی ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، جهت تغذیه آبخوان، به سالانه ۱۰ میلیون متر مکعب آب نیاز می‌باشد.

از آنجایی که مقدار بیلان گزارش شده در اکثر آبخوان‌های کشور منفی می‌باشد، یکی از راهکارهای لازم جهت مدیریت پایدار و تعادل بخشی آبخوان‌ها، کاهش درصد آبدهی چاه‌های بهره‌برداری است. در این راستا مطالعاتی با هدف تأثیر این روش بر سطح آبخوان انجام شده است. قبادیان و همکاران (۳) با استفاده از نرم افزار GMS نوسانات سطح آب در دشت خزل- نهاوند برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده با شرایط کنونی و سناریو مدیریتی ۱۰ درصدی پمپاژ چاه‌ها پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با اعمال این سناریو افت سطح آب زیرزمینی از مقدار ۱/۸۲، ۳/۶، ۸/۲ برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده به ترتیب به ۰/۵۲، ۲/۷، ۷/۰۷ کاهش می‌یابد. پورحقی و همکاران (۱۰) نیز وضعیت آبخوان دشت نورآباد را به منظور مدیریت بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از مدل مادفلو شبیه‌سازی کردند. اجرای مدل آن‌ها در شرایط خشکسالی نشان داد سطح آب زیرزمینی در دو سال آینده بطور متوسط ۲/۰۵- متر افت خواهد کرد که با کاهش ۲۰ درصدی آبدهی چاه‌های بهره‌برداری، این افت به ۱/۳- متر کاهش و بیلان آبخوان به طور متوسط ۳/۵ میلیون متر مکعب بهبود می‌یابد.

ارزیابی کمی و بررسی اثرگذاری روش‌های مدیریتی، ملزم به محاسبه شاخص‌های مناسبی می‌باشد. پدرو-مونزونیس و همکاران (۹) در مقاله‌ای با هدف معرفی شاخص‌هایی جهت کمک به تصمیم گیرندگان و ذینفعان، به طبقه‌بندی شاخص‌های مربوط به منابع آب پرداخته است. میلانو و همکاران (۷) به بررسی شاخص تخصیص آب (WAI) پرداخته‌اند. این شاخص به ارزیابی ظرفیت منابع آب جهت تأمین تقاضا در زمان حال و آینده می‌پردازد. با استفاده از این شاخص، گروه‌های مختلف رضایت از تقاضای آب برای جریان مورد نیاز زیست محیطی، بخش داخلی و کشاورزی تعریف شده است. مارتین- کاراسکو و همکاران (۶) نیز به معرفی چهار شاخص برای ارزیابی کمبود آب پرداخته‌اند. این شاخص‌ها شامل شاخص رضایت تقاضا[1]، قابلیت اطمینان تقاضا[2]، پایداری[3] و پتانسیل مدیریتی[4] می‌باشند. در پژوهش آن‌ها، برای بیان مقدار شاخص از روشی استفاده شده است که می‌تواند قابلیت اطمینان و آسیب‌پذیری سیستم به کمبود آب را نشان دهد.

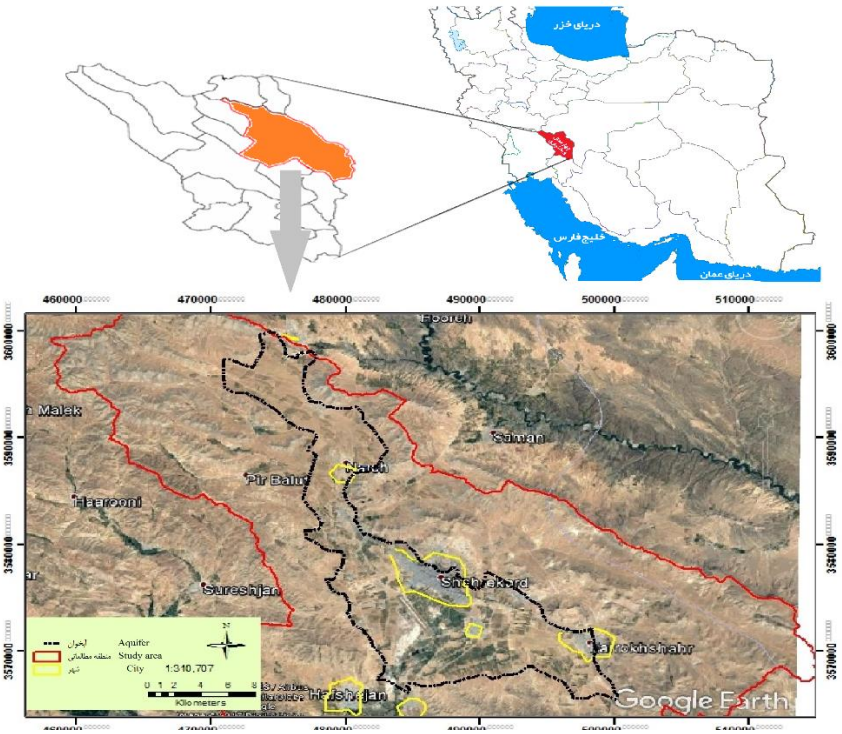
در مطالعات گذشته تنها یک روش مدیریتی در هر منطقه‌ی مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین جهت ارزیابی سناریو مورد بررسی از شاخص‌های مشخصی استفاده نشده و معیار عملکرد سناریوها با میزان افزایش ارتفاع تراز آب زیرزمینی، مورد سنجش قرار گرفته است. در این پژوهش برای نخستین بار چهار سناریو مختلف مدیریتی در دشت شهرکرد با استفاده از مدلسازی مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای مشخص کردن وضعیت آبخوان در سه سال آینده و کارایی سناریوها دو شاخص پایداری و بهره‌برداری بازتعریف شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت شهرکرد در حوضه آبریز کارون بزرگ و از لحاظ تقسیمات سیاسی در استان چهارمحال و بختیاری و در جنوب غربی اصفهان قرار گرفته و شامل شهر شهرکرد می‌باشد. این منطقه بین طول‌های شرقی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض‌های ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). مساحت کل محدوده در حدود ۱۲۴۴ کیلومتر مربع بوده که در حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع آن را دشت و مابقی ارتفاعات رشته کوه‌های زاگرس می‌باشد.

1- Demand Satisfaction Index: IS
2- Demand Reliability Index: IR
3- Sustainability Index: IU
4- Management Potential Index: IM



شکل ۱- موقعیت دشت شهرکرد

Figure 1- Location of the Shahrekord aquifer

این ناحیه دارای ارتفاع متوسط ۲۰۶۰ متر از سطح دریا بوده که حداکثر ارتفاع در نواحی شمالی منطقه و در حدود ۲۱۸۵ متر از سطح دریا می‌باشد. بر اساس نقشه شیب منطقه، حداقل شیب در نواحی مرکزی دشت و در حدود صفر و حداکثر ۱/۳ درصد می‌باشد. رودخانه اصلی موجود در این دشت رودخانه جهان بین است که به‌صورت فصلی می‌باشد. بر اساس آمار موجود تا سال ۱۳۸۳-۱۳۸۴در سطح حوزه آبریز دشت شهرکرد جمعا ۵۰۳ حلقه چاه عمیق و ۳۳۲ چاه نیمه عمیق در بخش‌های مختلف آبخوان حفر گردیده است.

مدلسازی آبخوان

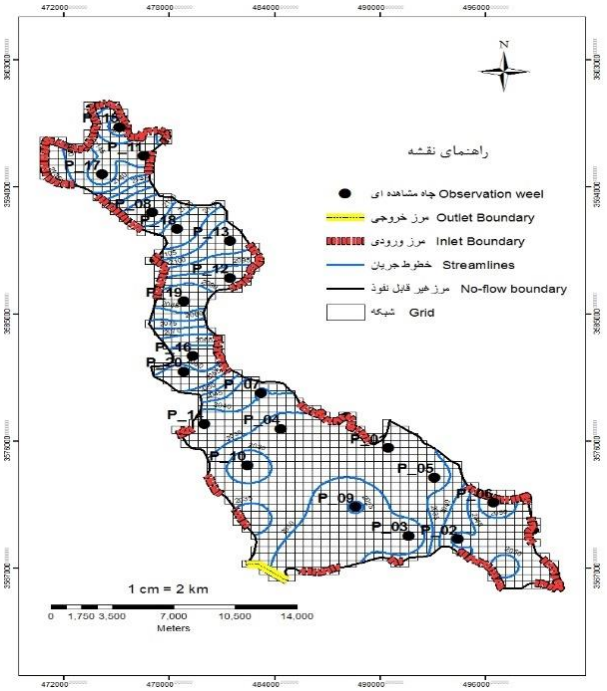
در این پژوهش جهت شبیه‌سازی آبخوان از مدل عددی MODFLOW در بسته نرم‌افزار GMS10.2 استفاده گردید. اطلاعات مورد استفاده برای شبیه‌سازی شامل آمار چاه‌های بهره برداری، بارندگی، اطلاعات مربوط به نوع مرزهای ورودی، سنگ کف و توپوگرافی منطقه می‌باشد همچنین ابعاد شبکه مورد استفاده نیز ۵۰۰ در ۵۰۰ متر است (شکل ۲). تعداد ۲۰ پیزومتر قابل اعتماد از بین پیزومترهای موجود در دشت به‌عنوان معرف سطح آب آبخوان استفاده شد که موقعیت این پیزومترها در شکل ۲ نشان داده شده است. مرزهای با جریان ورودی و خروجی معرفی شده به مدل به صورت مرز با معلوم معرفی شده است که در شکل ۲ مکان آن‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود. جهت انجام مدلسازی و محاسبه مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان، از داده‌های مربوط به مهر سال ۸۹ برای مدلسازی در حالت ماندگار، و از اطلاعات مربوط به آبان ۸۹ تا مهر ۹۱ برای حالت غیرماندگار استفاده گردیده است همچنین برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های مربوط به آبان ۹۱ تا مهر ۹۲ استفاده گردیده است.

سناریوهای مدیریتی اعمال شده

در این مطالعه جهت مدیریت آبخوان، چهار سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که شامل احداث سدزیرزمینی، اجرای طرح تغذیه مصنوعی و کاهش ۵ و ۱۰ درصدی برداشت آب از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد.

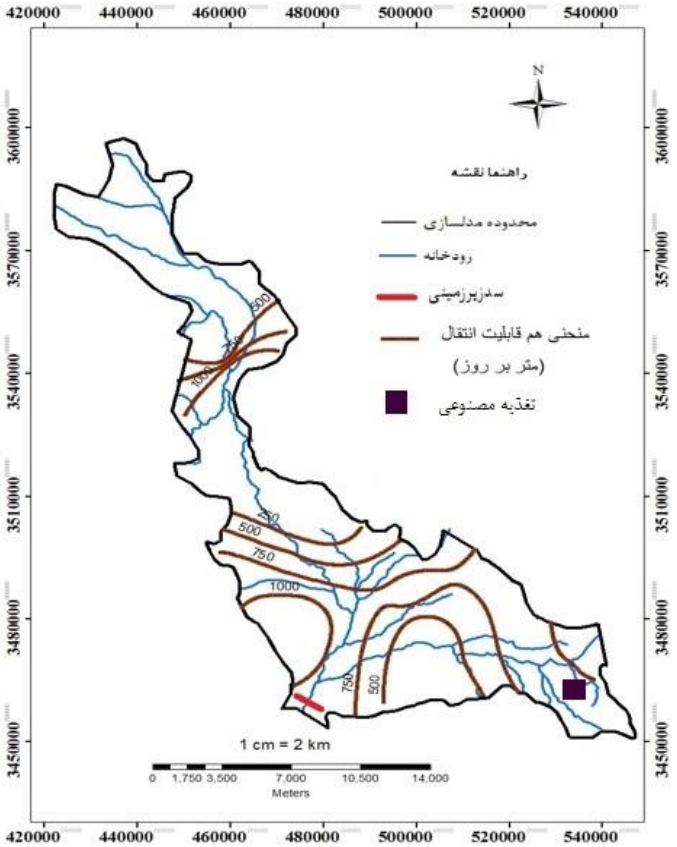
سد زیرزمینی

مسیر رودخانه‌های فصلی محل مناسبی جهت احداث سد زیرزمین می‌باشند. در این حالت سدزیرزمینی به عنوان یک منبع ذخیره‌ی نگهداشت آب محسوب می‌شود که می‌توان در فصول تر، آب باران و سطحی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم ذخیره کرده و در فصول پرمصرف با بارندگی کمتر از آب ذخیره شده استفاده کرد. یکی از اولویت‌های انتخاب مکان احداث سد دهانه‌های باریک خروجی می باشد. این مکان از خروج بی‌رویه آب در دسترس جلوگیری می‌کند و همچنین دراین حالت هزینه‌های طرح نیز کاهش می‌یابد (۵).



شکل ۲- مرزها و پیزومترهای آبخوان

Figure 2- Boundaries and piezometers in the aquifer



شکل ۳- ضریب قابلیت انتقال و محل قرارگیری سدزیرزمینی و تغذیه مصنوعی

Figure 3- Coefficient of transmissibility and location of the groundwater dam and artificial recharge

با توجه به موارد ذکر شده و نظرسنجی از کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای استان، بهترین مکان جهت احداث سد زیرزمینی مطابق شکل ۳ و در محل خروجی آبخوان انتخاب شده و همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، قابلیت انتقال نیز در محل انتخابی دارای مقدار ۷۹۰ متر مربع در روز می‌باشد که این نشان دهنده‌ی مقدار نسبتا بالایی در دشت است. با انتخاب این مکان برای ساخت سدزمینی مقدار حجم آب خروجی از آبخوان کمتر شده و بنابراین می توان سطح تراز آبخوان در انتهای دشت را افزایش داد.

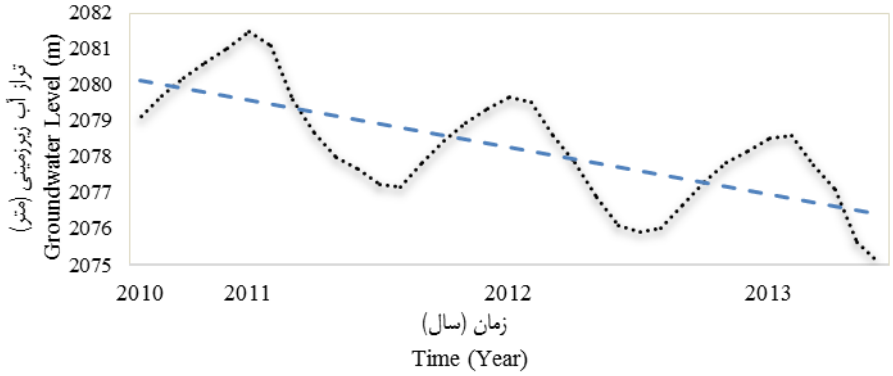
تغذیه مصنوعی

مهم‌ترین عامل در بحث تغذیه‌ی مصنوعی، درشت دانه بودن آبرفت محل اجرای طرح می‌باشد و اگر بافت ریزدانه باشد، تغذیه به صورت کامل انجام نشده و آب جمع شده در مخزن حالت ماندآبی به خود گرفته و به تدریج تبخیر می‌گردد. از آنجایی که بافت آبرفت در بستر رودخانه درشت دانه است بنابراین محل مناسبی جهت تغذیه مصنوعی می‌باشد (۱).

با مطالعات صورت گرفته پیشین، بررسی‌های میدانی و مکان‌یابی انجام شده در دشت شهرکرد، اجرای طرح تغذیه مصنوعی در زیرحوضه شورابچه، واقع در جنوب شرقی دشت شهرکرد انتخاب گردید (شکل ۳). از آن‌جایی که در این زیرحوضه کار سازه‌ای انجام نشده، بنابراین برای جانمایی طرح تغذیه مصنوعی جدید، منطقه‌ای در خروجی زیر حوضه داخل مسیر آبراهه در نظر گرفته شده است. بدین منظور، پنج حوضچه متوالی در مسیر آبراهه در نظر گرفته شده که حوضچه اول به عنوان حوضچه رسوبگیر تلقی می‌شود. حجم زیادی از رسوبات در این حوضچه ته‌نشین شده و آب از طریق سرریز وارد حوضچه بعدی می‌شود. به طور کلی انتخاب این محل دارای مزیت-هایی مانند نزدیک بودن به اراضی هدف، بالا بودن ضریب نفوذپذیری، نداشتن عارضه به دلیل قرار گرفتن در مسیر آبراهه و وجود دو رشته قنات در بالادست می‌باشد. می‌توان در فصول غیرزراعی آب قنات‌های بالادست را جهت تغذیه آبخوان به سمت حوضچه‌ها هدایت کرد با توجه به حجم حوضچه‌ها (۲۰۰۰۰۰ متر مکعب) و فرض چهاربار آبگیری در سال، حجم آب کنترل شده در طول یک سال حدود ۱ میلیون متر مکعب می‌باشد (۱).

کاهش برداشت ۵ و ۱۰ درصدی از سفره آب زیرزمینی

از دلایل اصلی افت سطح آب زیرزمینی، برداشت زیاد آب آبخوان توسط بهره‌برداران می‌باشد. شکل ۴ نشان دهنده‌ی هیدروگراف آبخوان از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ می‌باشد که با استفاده از مقادیر تراز گزارش شده از پیزومترهای موجود در دشت توسط سازمان آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری به دست آمده است. با توجه به خط برازش داده شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که روند تغییرات سطح آب در این سه سال بصورت نزولی بوده و مقدار افت تراز آبخوان در دوره‌ی زمانی سه ساله برابر با ۴/۰۴ متر و به‌طور متوسط برابر با ۱/۳۴ متر در هر سال می‌باشد. همچنین طبق گزارشات آب منطقه‌ای شهرکرد، بیش از ۶۰ درصد از چاه‌های موجود در این دشت برای مقاصد کشاورزی حفر گردیده‌اند. باتوجه به موارد ذکر شده یکی از راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از افت شدید، کاهش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری با مصرف کشاورزی می‌باشد. برای اجرای این روش و مدیریت آن نیاز به کنتورهای حجمی جهت ثبت حجم برداشت از چاه‌ها توسط بهره‌برداران و نظارت بر آن می‌باشد که در حال حاضر درصد بالایی از چاه‌های بهره‌برداری موجود در این دشت دارای این نوع کنتور است، از این‌رو اجرای این روش در دشت ممکن می‌باشد. در این مطالعه دو سناریو کاهش ۵ و ۱۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در نظر گرفته شده و نتایج آن برای سه سال آینده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است.



شکل ٤- هیدروگراف دشت شهرکرد (مهر ۸۸ - شهریور ۹۱)

Figure 4- Hydrograph of Shahrekord (October 2012- November 2013)

شاخص‌های مورد بررسی

در این پژوهش جهت بررسی و ارزیابی تأثیر سناریوهای مدیریتی بر آبخوان و مقایسه‌ی آن‌ها از دو شاخص فنی معرفی گردیده است. این شاخص‌ها عبارتند از شاخص توسعه‌ی پایدار (I_u[1]) و شاخص بهره‌برداری (WEI[2]) که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی عملکرد آبخوان و میزان اضافه برداشت می‌باشد. از آن‌جایی که در مطالعات پیشین از این دو شاخص جهت بررسی وضعیت رودخانه‌ها استفاده گردیده و تاکنون برای منابع آب زیرزمینی استفاده نشده است، بنابراین در این مقاله برای بررسی منابع آب زیرزمینی از این دو شاخص استفاده گردیده و بازتعریف شده است.

شاخص پایداری (I_u)

یکی از شاخص‌های فنی موجود در این پژوهش، شاخص پایداری می‌باشد، این شاخص نشان دهنده‌ی میزان مصرف از منابع طبیعی با توجه به مقدار تقاضا است که بطور کلی از رابطه ۱ به دست می‌آید. با توجه به مقدار آب برگشتی کشاورزی و تصفیه آب، این شاخص می‌تواند مقداری کمتر از صفر داشته باشد. مقدار منفی نشان دهنده‌ی مصرف بسیار زیاد از منابع طبیعی آب زیرزمینی می‌باشد و ممکن است به دلیل برداشت بیش از حد، آبخوان مستعد به کمبود آب نیز باشد. مقدار بالای این شاخص نیز نشان دهنده‌ی وجود آب مازاد برای مصارف مختلف در این حوضه یا در صورت نیاز در حوضه مجاور است (۶).

$$\text{شاخص توسعه پایدار} = \frac{\text{مصرف کل}-\text{مقدار آب موجود}}{\text{مقدار آب موجود}} \quad (۱)$$

مارتین-کاراسکو و همکاران (۶) از این شاخص جهت بررسی عملکرد رودخانه ابرو در اسپانیا استفاده کرده‌اند. بنابراین جهت استفاده از این شاخص، لازم است پارامترهای موجود در رابطه ۱ برای آب زیرزمینی بازتعریف گردد. مقدار آب موجود در آب زیرزمینی مقدار حجم آب وارد شده به آبخوان از راه‌های مختلف مانند نفوذ از بارش یا آب سطحی، جریان آب زیرزمینی ورودی و حجم آب برگشتی از مصارف مختلف کشاورزی صنعت و شرب می‌باشد. همچنین در این مقاله جهت پایداری بیشتر آبخوان، مقدار تغییرات آب زیرزمینی نیز به عنوان مقدار آب موجود در آبخوان تعریف گردیده است. مصرف کل نیز شامل مقدار آب برداشت شده از آبخوان با استفاده از چاه‌های بهره‌برداری، چشمه و قنات‌ها می‌باشد. در نهایت شاخص پایداری در آب زیرزمینی به شکل رابطه‌ی ۲ بازتعریف می‌شود.

$$\text{شاخص پایداری} = \frac{\text{تخلیه چاه چشمه و قنات}-\text{تغییرات} + \text{کل تغذیه}}{\text{تغییرات}+\text{تغذیه کل}} \quad (۲)$$

1- Sustainability Index
2- Water Exploitation Index

شاخص بهره‌برداری (+WEI)

این شاخص نشان دهندی مقدار فشار وارده به منابع آب با توجه به مقدار برداشت از آن می‌باشد. این شاخص عبارت است از نسبت میانگین تقاضا از منابع آب نسبت به میانگین متوسط بلند مدت سالانه مصرف. اگر داده‌های ما ماهیت فصلی بودن داشته باشند و یا داده‌ها دارای عدم قطعیت باشند، مقدار شاخص WEI دارای خطا خواهد بود. همچنین در صورت استفاده از داده‌های سالانه، ممکن است میانگین سالانه‌ی داده‌ها با هم برابر شوند که در این صورت مقدار فشار وارد بر منابع آب را نمی‌تواند بصورت واقعی محاسبه گردد. برای رفع این محدودیت‌ها، شاخص WEI به‌شکل رابطه‌ی ۳ اصلاح شده است (۹).

$$\text{شاخص بهره برداری اصلاح شده} = \frac{\text{آب برگشتی}-\text{مصرف}}{\text{مقدار آب تجدیدپذیر}} \quad (۳)$$

اگر مقدار شاخص بهره‌برداری (WEI) بین ۰٪ تا ۲۰٪ باشد نشان می‌دهد که در این شرایط استرسی وجود ندارد و اگر این مقدار بین ۲۱٪ تا ۴۰٪ باشد نشان دهنده‌ی استرس آبی و اگر این مقدار بیش از ۴۰٪ باشد نشان دهنده‌ی استرس بالا در رودخانه‌های اروپا می‌باشد (۲).

این شاخص جهت بررسی رودخانه‌های موجود در سطح اروپا استفاده شده است بنابراین برای استفاده از این شاخص نیز مانند شاخص پایداری، لازم است پارامترهای مربوط به معادله‌ی ۳ نیز برای آب زیرزمینی باز تعریف گردد. مقدار مصرف در آب زیرزمینی شامل مقدار برداشت از آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری و قنات می‌باشد و آب برگشتی نیز مقدار حجم آبی است که پس از استفاده‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت به آبخوان باز می‌گردد. همچنین مقدار آب تجدیدپذیر در آب زیرزمینی، به حجم آبی گفته می‌شود که بصورت طبیعی مانند نفوذ از بارش یا آب سطحی، جریان آب زیرزمینی ورودی وارد آبخوان گردد، بنابراین حجم آب برگشتی به آبخوان به‌عنوان آب تجدیدپذیر تعریف نمی‌شود. در نهایت شاخص بهره‌برداری در آب زیرزمینی به‌صورت رابطه ۵ به دست می‌آید.

(۴) آب برگشتی- کل جریان ورودی به آبخوان = مقدار آب تجدیدپذیر

(۵)

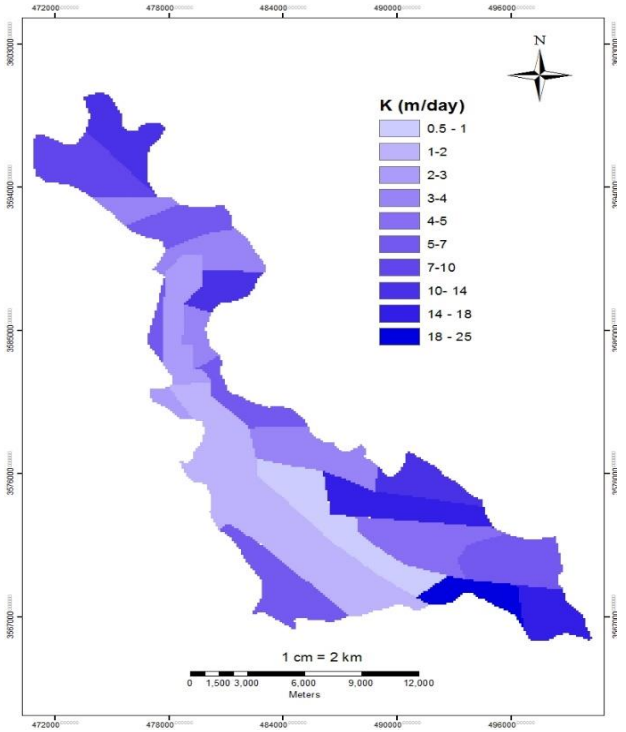
$$\text{شاخص بهره برداری اصلاح شده} = \frac{\text{و چاه برگشتی قنات و}-\text{تخلیه چاه و قنات}}{\text{برگشتی}-\text{تغذیه کل}}$$

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

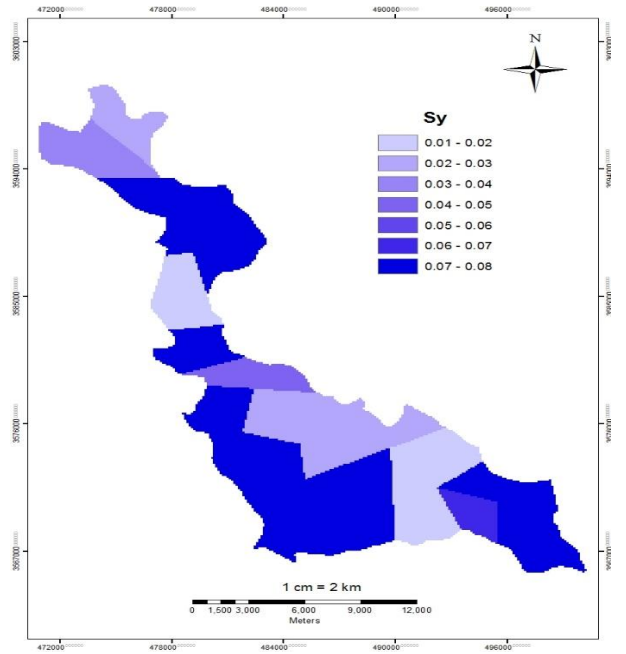
جهت انجام مدلسازی در حالت ماندگار از اطلاعات مربوط به مهر سال ۸۹ استفاده و مقادیر هدایت هیدرولیکی در این گام با روش سعی

و خطا کالیبره گردید. مدل در حالت غیـر مانـدگار در ۲۴ گـام زمـانی بصورت ماهانه از آبان ۸۹ تا مهر۹۱ داده‌های مربوط به آبـدهی ویـژه با استفاده از روش PEST کالیبره شد. همچنین برای صـحت‌سـنجی مدل از داده‌های مربوط به سال آبی ۹۱-۹۲ اسـتفاده گردیـد. مقـادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به‌دست آمده از واسنجی مدل به ترتیب در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.



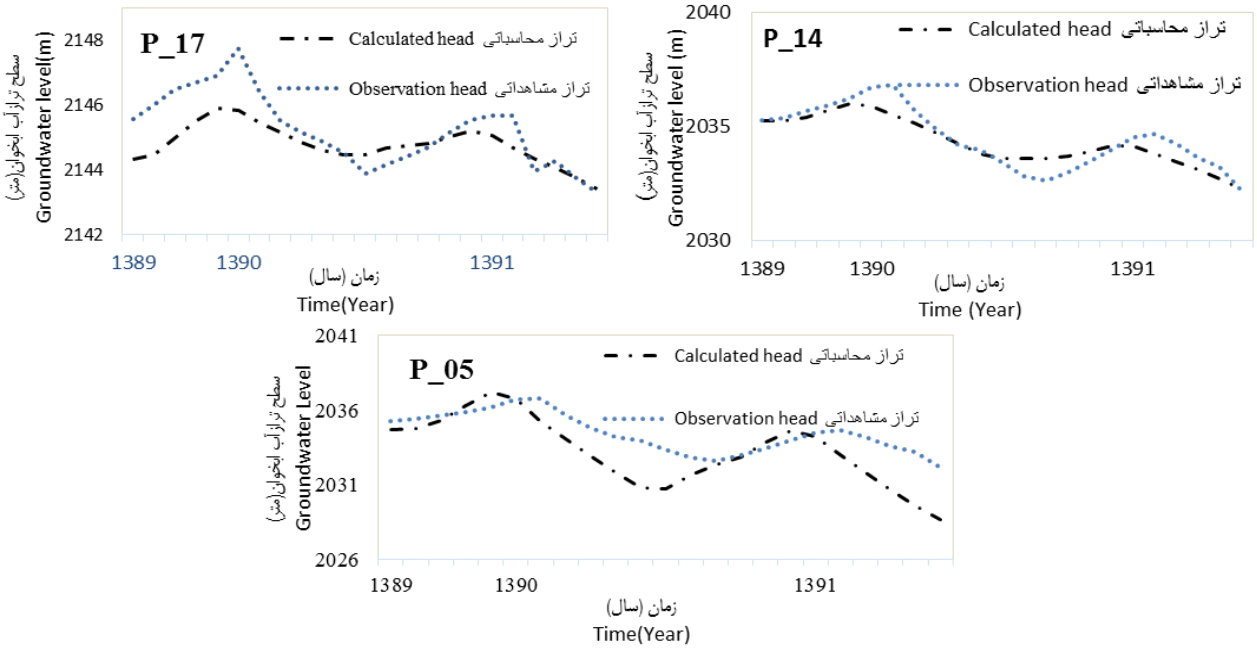
شکل ۵- میزان هدایت هیدرولیکی آبخوان پس از کالیبراسیون

Figure 5- Hydraulic conductivity in aquifer after calibration



شکل ٦- ضریب آبدهی ویژه آبخوان پس از کالیبراسیون

Figure 6- Specific yield in aquifer after calibration



شکل ۷- تراز مشاهده شده و محاسبه شده سه پیزومتر نمونه

Figure 7- Calculated and observation head of three sample piezometers

میانگین مربعات خطای مدلسازی در حالت ماندگار برابر با ۴۳ سانتی‌متر و در حالت غیرماندگار برابر با ۱/۱ متر است همچنین میانگین مربعات خطای صحت‌سنجی برابر با ۱/۴ متر است که این مقادیر نشان دهنده‌ی دقت قابل قبول در مدل‌سازی می‌باشد. همچنین شکل ۷ نشان دهنده‌ی تراز سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در سه چاه پیزومتری در قسمت‌های مختلف آبخوان می باشد که به ترتیب در ابتدا، مرکز و انتهای دشت قرار دارند.

تأثیر احداث سد زیرزمینی بر آبخوان

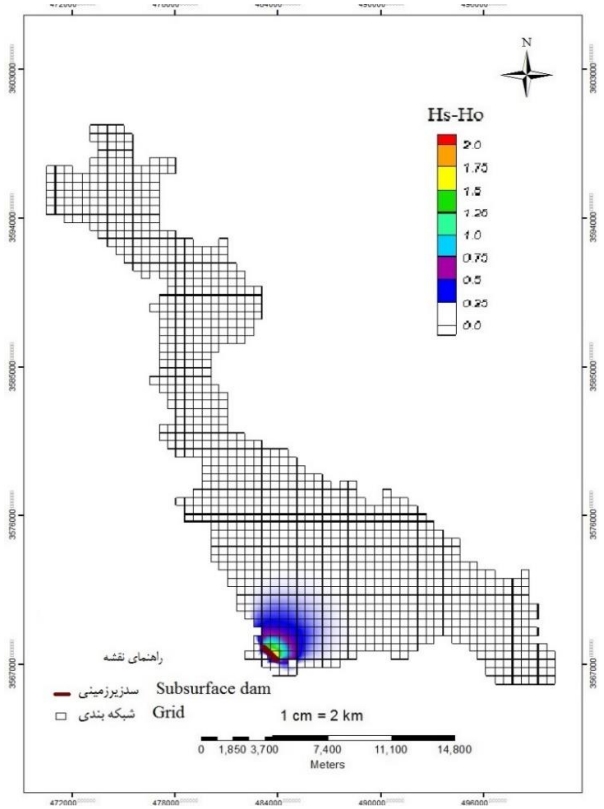
شکل ۸ نشان دهنده‌ی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی پس از احداث سد زیرزمینی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تراز سطح آب در بالادست سد افزایش یافته است. این سد تا مساحت ۱۴ کیلومتر مربع در بالادست خود تأثیر گذاشته و سطح آب در این ناحیه را تا حداکثر ۲ متر افزایش می‌دهد.

تأثیر تغذیه مصنوعی بر آبخوان

شکل ۹ نشان دهنده‌ی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی پس از اجرای طرح تغذیه مصنوعی می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است اجرای این طرح سطح آب زیرزمینی را تا مساحت ۳۰ کیلومتری و تا ارتفاع ۰/۴ متر افزایش می‌دهد.

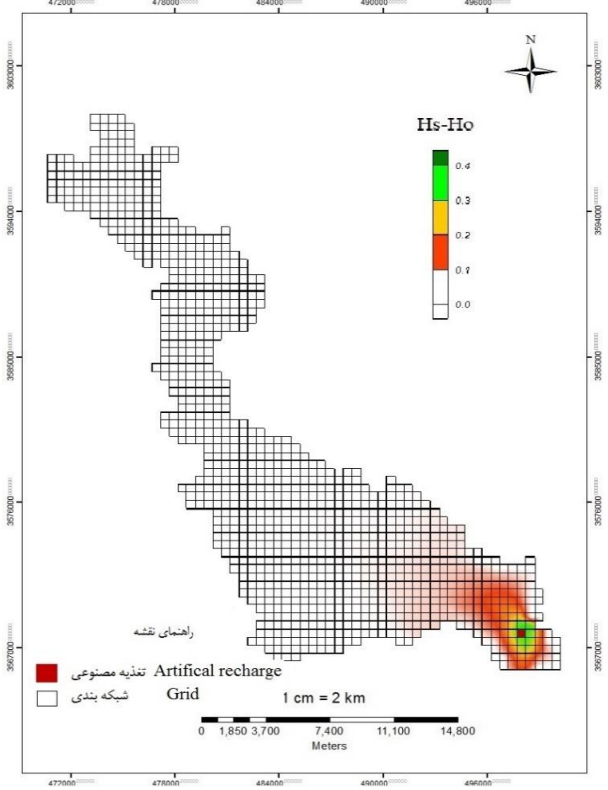
تأثیر سناریوهای مختلف کاهش برداشت بر آبخوان

شکل ۱۰ و ۱۱ نشان دهنده‌ی هیدروگراف پیش‌بینی شده‌ی آبخوان پس از اعمال سناریوهای کاهش برداشت ۵ و ۱۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد. خط برازش داده شده در این نمودارها نشان دهنده‌ی افت سطح آبخوان در سال‌های ۹۱ تا ۹۴ می‌باشد. مقدار افت آبخوان دراین سه سال به ترتیب برابر با ۲/۱۴ و ۲ متر که بطور متوسط برابر با ۱/۳۳ و ۰/۷۱ در سال می‌باشد. با مقایسه‌ی این دو شکل و شکل ۴ مشاهده می‌شود که با کاهش ۵ و ۱۰ درصدی برداشت، آب آبخوان سالانه به اندازه‌ی ۰/۶۳ و ۰/۶۷ متر کمتر از حالتی که هیچ روش مدیریتی وجود نداشته باشد، کاهش می یابد. همچنین شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان دهنده‌ی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی پس از اعمال سناریو کاهش ۵ و ۱۰ درصدی آبدهی چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ارتفاع آب در مرکز دشت بیش از قسمت‌های دیگر افزایش یافته است که این به دلیل تمرکز بیشتر چاه‌های بهره‌برداری در این ناحیه می‌باشد.



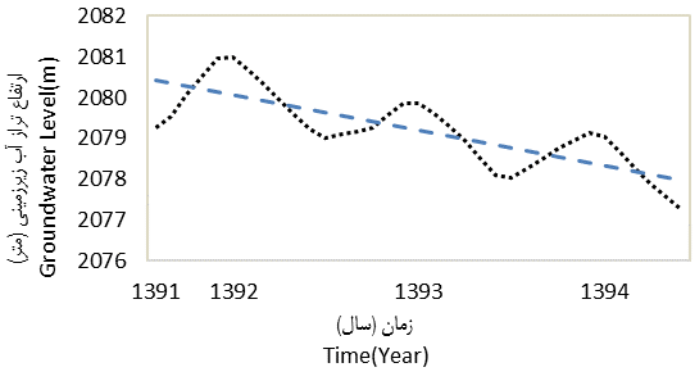
شکل ۸- بالاآمدگی تراز آب آبخوان پس از احداث سد زیرمینی

Figure 8- Increase of the aquifer water level after subsurface dam



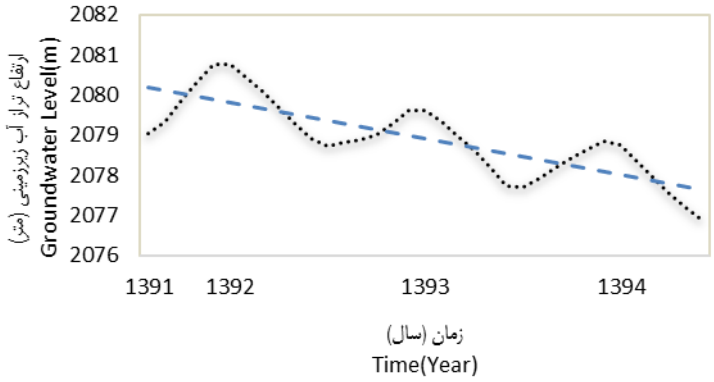
شکل ۹- بالاآمدگی تراز آب آبخوان پس از اجرای طرح تغذیه مصنوعی

Figure 9- Increase of the aquifer water level after artificial recharge



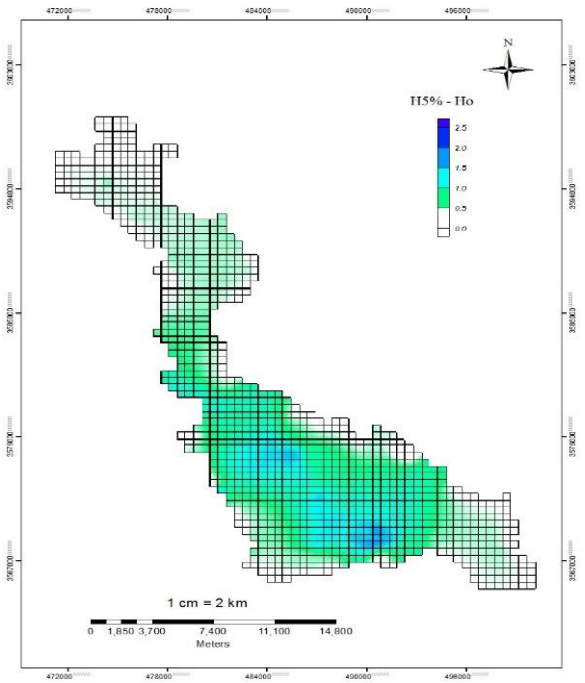
شکل ۱۰- هیدروگراف آبخوان پس اعمال سناریو ۵ درصد کاهش برداشت

Figure 10- Aquifer hydrograph after 5% reduction water withdrawal scenario



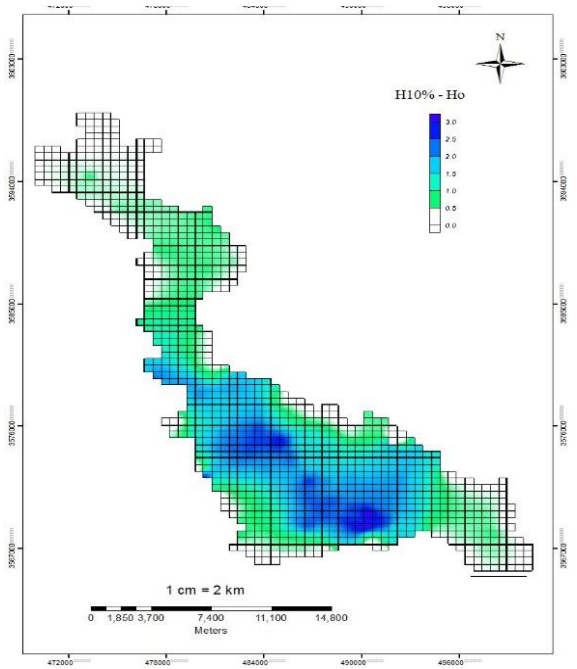
شکل ۱۱- هیدروگراف آبخوان پس اعمال سناریو ۱۰ درصد کاهش برداشت

Figure 11- Aquifer hydrograph after 10% reduction water withdrawal scenario



شکل ۱۲- افزایش تراز سطح آب پس از کاهش ۵ درصد برداشت

Figure 12- Increase of the aquifer water level after 5% Reduction on water withdrawal



شکل ۱۳- افزایش تراز سطح آب پس از کاهش ۱۰ درصد برداشت

Figure 13- Increase of the aquifer water level after 5% Reduction on water withdrawal

ارزیابی شاخص‌های پایداری (Iu) و بهره‌برداری (WEI+)

دو شاخص توسعه‌ی پایدار و بهره‌برداری با توجه به روابـط ۲ و ۵ به دست آمد، که نتیجه آن‌ها برای سناریوهای مختلف و همچنـین در شرایطی که هیچ سناریویی وجود نداشته باشد، در جدول ۱ نشان داده شده است. مقدار بهینه برای شاخص پایداری مقادیر بزرگ و نزدیـک به عدد ۱ می‌باشد در صورتی‌که، شاخص به دست آمده برای همـه‌ی سناریوها دارای اعداد کوچک و نزدیک به صفر اسـت (جـدول ۱) کـه این نشان دهنده‌ی مصرف زیاد از ایـن آبخـوان مـی‌باشـد. همچنـین مقدار بهینه برای شاخص بهره‌برداری، مقـادیر کوچـک و نزدیـک بـه صفر است در حالی‌که مقادیر به دست آمده این شاخص برای همـه‌ی سناریو های مورد بررسی دارای اعدادی بزرگ می‌باشدکه ایـن نشـان دهنده‌ی مقدار فشار وارد بر آبخوان است. محاسبه‌ی این دو شـاخص نشان می‌دهد که مقدار برداشت زیـاد از ایـن آبخـوان باعـث فشـار و استرس بر آن گردیده و این موضوع می‌تواند نشـان دهنـده‌ی کمبـود آب در این آبخوان باشد.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌ها برای سناریوهای مختلف

Table 1- Indicates of scenarios

Scenarios سناریوها	Index شاخص	
	WEI+	Iu
No-Scenario عدم وجود سناریو	1.068	0.070
Underground Dam سدزیرزمینی	1.068	0.070
Artificial Recharge تغذیه مصنوعی	1.061	0.071
5 % Reduction on water withdrawal ۵٪ درصد کاهش برداشت	1.045	0.078
10 % Reduction on water withdrawal ۱۰٪ درصد کاهش برداشت	0.969	0.114
15 % Reduction on water withdrawal ۱۵٪ درصد کاهش برداشت	0.886	0.140

با توجه به جدول ۱ و مقادیر به‌دست آمده‌ی شاخص‌های پایداری و بهره‌برداری، سناریو ۱۰ درصد کاهش برداشت، باعث بهبودی بیشتر

این شاخص‌ها نسبت به سناریوهای دیگر شده و پس از آن به ترتیب سناریوهای ۵ درصد کاهش برداشت و تغذیه مصنوعی بر بهتر شدن مقدار این شاخص‌ها تأثیرگذار بودند. همچنین مقدار این شاخص‌ها برای سناریو سد زیرزمینی نسبت به حالتی که هیچ‌گونه سناریویی وجود ندارد، تغییری نکرده است. بر اساس روابط دو شاخص توسعه‌ی پایدار و بهره‌برداری، عامل مؤثر در بهبود این شاخص‌ها، مقدار تغذیه به آبخوان می‌باشد، با توجه به اینکه سد زیرزمینی تنها مانع خروج آب آبخوان شده و بر مقدار حجم آب ورودی به آبخوان تأثیری ندارد، درنتیجه سناریو سد زیرزمینی بر بهبود دو شاخص توسعه‌ی پایدار و بهره‌برداری تأثیری ندارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله سناریوهای مختلف آب زیرزمینی جهت مدیریت آبخوان دشت شهرکرد مورد بررسی قرار گرفته و وضعیت آبخوان بعد از اعمال سناریو های احداث سد زیرزمینی، تغذیه مصنوعی و کاهش برداشت ۵ و ۱۰ درصدی از چاه‌های بهره‌برداری مدل‌سازی گردید. جهت مقایسه‌ی این روش‌ها و مشاهده‌ی میزان تأثیر این سناریوها از دو شاخص پایداری و شاخص بهره‌برداری اصلاح شده، برای آبخوان بازتعریف و محاسبه شد. طبق نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که وضعیت اولیه‌ی آبخوان بسیار نامناسب و مقدار برداشت از این آبخوان بیش از توان آبخوان می‌باشد. همچنین باتوجه به مقادیر شاخص‌های به دست آمده، سناریو کاهش برداشت ۱۰ درصد باعث بهبود هر دو شاخص شده و بعنوان بهترین سناریو انتخاب گردید. پس از این سناریو کاهش ۵ درصدی برداشت در جایگاه دوم و پس از آن اجرای طرح تغذیه جایگاه‌های بعدی قرار گرفته و سناریو سد زیرزمینی تأثیری بر مقدار این دو شاخص نداشته است. با توجه به مقادیر محاسبه شده‌ی شاخص‌ها مشاهده می‌شود که اگرچه سناریوهای مدیریتی باعث بهبود این دو شاخص گردیده ولی همچنان مقادیر به‌دست آمده تفاوت زیادی با مقادیر بهینه‌ی آن‌ها دارد. برای نزدیک‌تر کردن مقادیر شاخص‌های محاسبه شده به مقدار بهینه آن‌ها می‌توان از چندین سناریو مدیریتی به صورت همزمان استفاده کرد. همچنین می‌توان از دو شاخص پایداری و بهره‌برداری اصلاح شده، که در این مقاله برای آبخوان بازتعریف شده است، جهت بررسی عملکرد آبخوان‌های دیگر در برابر برداشت و بررسی روش‌های مدیریتی مختلف استفاده نمود. لازم به ذکر است که در این مقاله به بررسی جنبه‌ی فنی و کمی آبخوان و سناریوهای پرداخته شده است، در حالی‌که می‌توان جهت توسعه پایدار آبخوان علاوه بر این دو شاخص، شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نیز لحاظ گردد.

منابع

1- Anonymous. 2012. Second Phase Studies of Artifical Recharge in shahrekord Plain, Chaharmahal Provincial Water Authority- Shahrekord (In Persian).
2- European Environment Agency EEA. 2013. Results and lessons from implementing the Water Assets Accounts in the EEA area, From concept to production. EEA Technical report No 7/2013 European Environment Agency.
3- Ghobadian R., Bahrami Z., and Dabagh Bagheri S. 2016. Applied management scenario to predict fluctuations in groundwater levels with MODFLOW conceptual and mathematical models (Case Study: Khazal-Nahavand plain), Journal of Ecohydrology, 3(3):303-319 (In Persian).
4- Ishida S., Tsuchihara T., Yoshimoto S., and Imaizumi M. 2011. Sustainable use of groundwater with underground dams, Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ), 45(1):51–61.
5- Lalehzari R., and Tabatabaei S.H. 2015. Simulating the impact of subsurface dam construction on the change of nitrate distribution. Environmental Earth Sciences, DOI:10.1007/s12665-015-4362-2.
6- Martin-Carrasco F., Garrote L., Iglesias A., and Mediero L. 2013. Diagnosing causes of water scarcity in complex water resources systems and identifying risk management actions, Water resources management, 27:1693-1705.
7- Milano M., Ruelland D., Dezetter A., Fabre J., Ardoin-Bardin S., and Servat E. 2013. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin, J Hydrol, 500, 114–126.
8- Mirahmadpour S., and Taleb-bidokhti N. 2016. Investigating the Artificial Nutrition Project of Groundwater Resources in Tehran's Shahriar Plain as a Way to Prevent the Transition of Earth. 15th National Hydraulics of Iran, COI:IHC15_195 (In Persian).
9- Pedro-Monzonís M., Solera A., Ferrer J., Estrela T., and Paredes-Arquiola J. 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management, Journal of Hydrology, 527:482-493.
10- Porhaghi A., Akhondali A., Radmanesh F., and Mirzaee Y. 2016. Manage the Groundwater Sources Exploration of the Nourabad Plain in the Drought Conditions with MODFLOW Modeling, Eco Hydrology, 3:319-303 (In Persian with English abstract).
11- Ouerdachi L., Boutaghane H., Hafsi R., Tayeb T B., and Bouzahar F. 2012. Modeling of underground dams application to planning in the semi−arid areas (Biskra, Algeria), Energy Procedia, 18:426-437.

12- Salimpour Sh., Azhdari-moghadam M., and Hashemi-mofrad A. 2015. Estimation of Farsan aquifer volume for reducing the negative effect of Beheshtakad water transfer tunnel on groundwater level, 14th National Hydraulics of Iran, COI:IHC14_195 (In Persian).
13- Shahraki J., and Mohseni S. 2013. Compromise multi-criteria decision making Application in water resources optimal allocation, Case study Yazd city, Journal of Iranian of Irrigation and Water Engineering.
14- Stevanović Z. 2015. Subsurface dams as a solution for supplementary recharge and groundwater storage in Karst aquifers in Arid areas, Engineering Geology for Society and Territory, 1_90.
15- Vanrompay L. 2003. Report on The Technical Evaluation & Impact Assessment of Subsurface Dams (SSDs) TLDP Technical Report Pp.

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 2, May.-Jan. 2018, p. 267-281

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۷، ص. ۲۸۱-۲۶۷

Assessing the Effectiveness of Aquifer Regeneration Scenarios by Sustainability Index and Water Exploitation Indicators of Water Resources, Case Study: Shahrekord Aquifer

B. Sheikhipour[1]**- S. Javadi**[2]***- M. E. Banihabib**[3]

Received: 04-12-2017
Accepted: 26-02-2018

Introduction: Most part of Iran is located in an arid and semi-arid region, thus in most parts of a region; groundwater is the only water resource also Population growth, limitation of surface water resources and excessive water withdrawal from the aquifers, caused a sharp drop in groundwater level in many plains of Iran such as Shahrekord plain, So it is necessary to have suitable management plans to improve the aquifer and evaluate some indicators to see the effects of the methods. In this research, many management plans were assessed for the case study.

Materials and Methods: A groundwater numerical flow model (GMS 10.2) was established by using the monthly data including hydraulic heads, depletion volume of the wells, springs and qanats, precipitation values in Shahrekord aquifer. The model was prepared and calibrated for both status of steady (October 2010) and unsteady flow (November 2010-October 2012), and verified for the following year (November 2012- October 2013). The final values of hydraulic conductivity and specific discharge were obtained by trial and error and PEST method. The water level fluctuation was predicted for three years later (until October 2016) by applying management scenarios of 5% and 10% reduction in water withdrawal, underground dam and artificial recharge. After that, two indicators of Sustainability Index and modified Water Exploitation Index (WEI+) were calculated to determine the effect of the scenarios. The Sustainability Index indicates the consumption ratio of natural resources to water demand. The optimal value of this Index is 1 and it may also have negative values. Low values of this index mean high usage of natural resources. The Water Exploitation Index shows to which extent the total water demand puts pressure on water resources. This index has positive values and its optimal value is close to zero. These two indicators were used for surface water resources in the past studies so in this article they were redefined for underground water resources.

Results and Discussion: The result of groundwater modeling shows that the hydraulic conductivity from 1 to 25 m/day and specific yield from 0.01 to 0.08 are varied also the result of prediction shows that the underground water level would be decreased about 1.34 meter per year in the next 3 years when it hadn't any management plans in this area but after 5% and 10% reduction water withdrawal scenarios Decreasing of water level were, respectively, 1.33 and 0.71 meter for each year also, considering that there were more wells in the center of the aquifer, water level in this area increased more than other areas, after 5% and 10% Reduction scenarios. According to the results of the artificial recharge and underground dam storage prediction, groundwater head increased in upstream of underground dam and the area near the artificial recharge. Considering the results it was found that the current condition of the aquifer is inappropriate and the amount of withdrawal from the aquifer is more than its capacity. The amount of Water Exploitation Index for business as usual scenario equal to 1.068 and for underground dam, artificial recharge, 5% and 10% reduction water withdrawal, were, respectively, equal to 1.068, 1.061, 1.045 and 0.969. Also the amount of Sustainability Index for business as usual scenario equal to 0.071 and for the other scenario were 0.068, 0.071 and 0.114. , respectively.

Conclusion: Considering the values of the indicators, 10% reduction water withdrawal scenario improved both indicators and selected as the best scenario. After that, 5% reduction water withdrawal was in the second place, then the artificial recharge scenario and underground dam scenarios, respectively, were in the third and fourth place. The scenario of underground dam had any positive effect on these two indicate. Regarding the calculated values of the indicators, it can be seen that although management scenarios have improved these two

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: javadis@ut.ac.ir)

indicators, the amounts obtained are also significantly different from their optimal values. Several management scenarios can be used simultaneously to bring the calculated index values closer to their optimal values. Used two indicators of sustainability and modified water exploitation can be used exploitation for other management scenarios and assess the performance of them for the other aquifers.

Keywords: Artificial recharge, Groundwater, Modeling, Sustainability Index, Underground dam