

بررسی اثرات خشکسالی هوشناسی و هیدروژئولوژیکی بر بیلان آب زیرزمینی دشت توپسرکان

سمانه پورمحمدی^{۱*}، محمدتقی دستورانی^۲، هادی جعفری^۳، علیرضا مساح بوانی^۴، مسعود گودرزی^۵، فاطمه باقری^۶ و محمدحسن رحیمیان^۷

^۱ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری موسسه تحقیقات آب ایران (محقق مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها)، ^۲ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۳ استادیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، ^۴ دانشیار، مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، ^۵ استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، ^۶ دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه شاهرود و ^۷ دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان و کارشناس مرکز ملی تحقیقات شوری

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۲

چکیده

بررسی اثرات خشکسالی بر منابع آب دشتهای کشور در مدیریت بهینه منابع آب در بخش کشاورزی و منابع طبیعی بسیار حائز اهمیت می باشد. مدل آبهای زیرزمینی می تواند به عنوان یک ابزار ارزشمند در مدیریت منابع آب زیرزمینی به کار رود. لذا بررسی بیلان آب زیرزمینی تحت تأثیر خشکسالی هوشناسی به کمک مدل های ریاضی از جمله اهداف کاربردی و مهم در توسعه پایدار منابع طبیعی و محیط زیست می باشد. توپسرکان از دشتهای مهم استان همدان است که منبع اصلی تأمین آب باغات و کشتزارهای وسیع آن چاههای حفر شده در دشت می باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات خشکسالی هوشناسی بر تغییرات بیلان آب زیرزمینی به کمک مدل سازی ریاضی با استفاده از مدل MODFLOW در نرم افزار GMS می باشد. به این منظور پس از محاسبه شاخص بارش استاندارد و تعیین سالهای خشک و تر در منطقه مطالعاتی و انتخاب سه سال شاخص به عنوان سال نرمال (۱۳۸۷)، ترسال (۱۳۸۸) و خشکسال (۱۳۸۹) به بررسی بیلان آب زیرزمینی در این سه سال پرداخته شده است. در همین راستا سال نرمال به عنوان سال واسنجی مدل و سالهای ترسال و خشکسال به عنوان صحت سنجی مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل MODFLOW به خوبی توانسته است سطح ایستابی چاههای مشاهداتی را در سال نرمال، ترسال و خشکسال (به ترتیب با ریشه خطای استاندارد ۰/۷۳، ۰/۸۵، ۰/۹۳) پیش بینی نماید. بررسی تطابق شاخص خشکسالی هوشناسی و هیدروژئولوژیکی نشان داد که خشکسالی هوشناسی به تنهایی نمی تواند بر تغییرات افت سطح آب زیرزمینی تأثیر بگذارد و استفاده بی رویه از چاههای بهره برداری و برداشت از آنها تأثیر زیادی بر تغییرات آب زیرزمینی خواهد داشت. نکته قابل توجه آن که بر اساس نتایج حاصله خشکسالی هوشناسی بر تغییرات بیلان آب زیرزمینی به شدت تأثیرگذار بوده است.

کلمات کلیدی: سطح ایستابی، شاخص بارش استاندارد، مدل سازی، MODFLOW، منابع آب

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک منبع مهم تامین آب شیرین جایگاه ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد، به‌طوری که بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی و بیلان آن برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری یک ضرورت اساسی به نظر می‌رسد. مدل آب‌های زیرزمینی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ارزشمند در مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌کار رود. در همین راستا، استفاده از مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی از جمله MODFLOW برای تعیین بیلان آب و بررسی تراز سطح ایستابی مفید خواهد بود (Omuscو و همکاران، ۲۰۰۵). در ارتباط با بررسی تغییرات سطح ایستابی و بیلان آب زیرزمینی در منابع داخلی و خارجی تحقیقات متعددی صورت گرفته است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در تحقیق دیگری که به‌وسیله Shirafkan و Jafari (۲۰۱۳) صورت گرفت به بررسی بیلان آبی دشت بهاباد استان یزد پرداخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان افت سطح ایستابی دشت در قسمت‌های شمالی ۶۰ سانتی‌متر و در قسمت‌های جنوبی ۴۰ سانتی‌متر در سال ۱۳۸۷ بوده است. طی تحقیقی که به‌وسیله Taie Semiromi و همکاران (۲۰۱۲) صورت گرفت به بررسی اثر تغذیه مصنوعی بر توزیع مکانی و زمانی خشکسالی‌های هیدرولوژیک با استفاده از شاخص حالت پیرومتریک (PSI) پرداخته شد. نتایج نشان داد که تغذیه سیلاب به‌طور مصنوعی تنها در سال‌های اولیه بر کاهش افت سطح آب زیرزمینی موثر بوده، در سال‌های بعدی در اثر برداشت بی‌رویه چاه تأثیر چندانی نداشته است.

در تحقیقی که Nighbakht و همکاران (۲۰۱۲) بر روی بیلان آبی دشت عجب شیر آذربایجان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که تبدیل سامانه آبیاری سنتی به سامانه تحت فشار باعث افزایش سطح ایستابی دشت تا ارتفاع ۸۸ سانتی‌متری خواهد شد. در تحقیقی که به‌وسیله Yang و همکاران (۲۰۱۲) بر روی یکی از آبخوان‌های چین صورت گرفت، با استفاده از یک مدل عددی انتقالی به بررسی سطح ایستابی دشت از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ پرداختند، نتایج نشان داد که شعاع مخروط افت در چاه‌ها افزایش و سطح ایستابی دشت پائین افتاده است. طی تحقیقی که به-

وسیله Ahmad و Ashraf Mohammadi Qaleny (۲۰۱۲) صورت گرفت با استفاده مدل‌سازی آب زیرزمینی و با کمک ابزارهای تصمیم‌گیری در منطقه چاج در حوضه ایندوس پاکستان به این نتیجه رسیدند که عوامل تغییر اقلیم و بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی اثرات طولانی مدتی روی سامانه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه می‌گذارند. در تحقیق صورت گرفته به‌وسیله Mohammadi Qaleny و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی عوامل اقلیمی بر افت سطح ایستابی دشت ساوه پرداختند. با استفاده از آمار چاه‌های مشاهداتی، بهره‌برداری، چشمه و قنوات دشت و رابطه آن با ایستگاه‌های باران-سنجی و شاخص خشکسالی و ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه، مشخص شد رابطه همبستگی مناسبی بین کاهش دبی رودخانه، شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و سطح ایستابی دشت وجود دارد.

در تحقیقی که Gaur و همکاران (۲۰۱۱) بر روی آبخوان رودخانه بنگانگا در هند انجام دادند از مدل ترکیبی MODFLOW و GIS برای تعیین زون‌های مستعد آب زیرزمینی استفاده کردند. به این منظور از نقشه کاربری اراضی، توپوگرافی، زهکشی، خاک و زمین شناسی و عامل شیب برای تعیین زون‌های مستعد آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش تخلیه آب چاه‌ها در زون‌های مستعد تنش زیادی بر سطح آب آبخوان نخواهد داشت و نهایتاً به این نتیجه رسیدند که استفاده تلفیقی از این دو مدل برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی منطقه و استحصال آب موثر خواهد بود. در تحقیق دیگری که به‌وسیله Praveena و همکاران (۲۰۱۰) صورت گرفت به بررسی دو آبخوان در حوضه بالاسر^۱ هندوستان با استفاده از شبیه‌سازی با مدل MODFLOW پرداختند و پاسخ مدل را نسبت به پنج سناریوی پمپاژ با وضعیت پوشش موجود ارزیابی کردند.

استراتژی مدیریتی امید بخش را برای آبخوان‌های مورد بررسی شامل کاهش ۵۰ درصدی پمپاژ آبخوان دوم در منطقه پایین دست رودخانه موجود در منطقه و افزایش ۱۵۰ درصدی پمپاژ آبخوان اول و دوم در

¹ Balasore

و نگهداری آب‌های زیرزمینی ایجاد کند. جنس این ذرات رسوبی از اجزای گرانیت (آرن) با درصد فراوان کوارتز است. سنگ کف این رسوبات آبرفتی مناسبی را در تمامی دشت، سنگ‌های نفوذ ناپذیر گرانیت، هورنفلس، شیبست و اسلیت تشکیل می‌دهد. در این دشت تعداد ۱۰۴۹ حلقه چاه بهره‌برداری و ۱۵ چاه مشاهداتی و سه چاه پیژومتری موجود می‌باشد. بخش اعظم مصارف چاه‌های بهره‌برداری برای امور کشاورزی منطقه استفاده می‌شود. در شکل ۱ دشت تویسرکان به همراه پراکنش چاه‌های مشاهداتی و خطوط هم‌پتانسیل سطح ایستابی برای سال آبی ۸۸-۸۷ دیده می‌شود.

روش تحقیق: در این تحقیق به منظور مدل‌سازی آب زیرزمینی از مدل ریاضی MODFLOW در نرم‌افزار GMS استفاده شد. برای این منظور سه دسته کلی داده‌های ورودی نیاز می‌باشد، که عبارتند از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه (مرز آبخوان، توپوگرافی سطح و کف و ضخامت آبخوان)، ضرایب هیدرودینامیک دشت (ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی) و اطلاعات هیدرواقليمی (رواناب و بارش) و هیدروژئولوژیکی (تغذیه، ورودی و خروجی جریان زیرقشری از دشت، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تراز سطح ایستابی) می‌باشد. با توجه به این‌که اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری در دسترس، مربوط به سال آبی ۸۸-۸۷ است، برای واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار از همین سال استفاده شد. به این منظور از میانگین سه ماه بهمن، اسفند و فروردین که بر اساس هیدروگراف معرف دشت سطح ایستابی تقریباً ثابتی در سال داشت به‌عنوان دوره پایدار^۳ و از داده‌های سطح ایستابی ۱۲ ماه سال آبی ۸۸-۸۷ به‌عنوان دوره ناپایدار^۴ استفاده شد. برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های سطح ایستابی در سال‌های آبی ۸۶-۸۷ و ۸۸-۸۹ استفاده شد. آماره‌های خطا بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل بررسی شد و مقادیر خطای استاندارد، خطای مطلق و میانگین خطا برای هر سه دوره تعیین شد.

نقاط با پتانسیل بالا بیان کردند در پژوهشی که Qushei (۲۰۱۰) بر روی بیلان آبی دشت دامغان سمنان انجام داد به این نتیجه رسید که سطح آب دشت در طی ۱۴ سال حدود ۳۴ متر افت داشته است و همچنان ممنوعیت استفاده از آب زیرزمینی در این دشت باید رعایت شود. در همین راستا Holma و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل‌های استوکاستیکی و تعیینی^۱ اثرات تغییر اقلیم روی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه کالتیشال^۲ انگلستان را با هدف بهبود شیوه‌های مدیریت بر این منابع بررسی نمودند. بر اساس نتایج حاصله آن‌ها توصیه نمودند که مدل‌سازی استوکاستیکی در سامانه‌های آب زیرزمینی حساس از قابلیت بالاتری برخوردار می‌باشد.

در تحقیقی که به‌وسیله El Yaouti و همکاران (۲۰۰۸) در آبخوانی در مصر صورت گرفت به بررسی تغییرات آب دشت به کمک مدل MODFLOW و نرم افزار GMS پرداختند. واسنجی در سال ۱۹۹۰ و اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ صورت گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات سطح سفره بستگی به تغییرات فصلی تخلیه ناشی از نفوذ طبیعی بارش و آبیاری دارد. بنابراین هدف تحقیق حاضر بررسی اثرات خشکسالی بر تغییرات سطح ایستابی و بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان همدان به‌وسیله مدل عددی MODFLOW می‌باشد.

مواد و روش‌ها

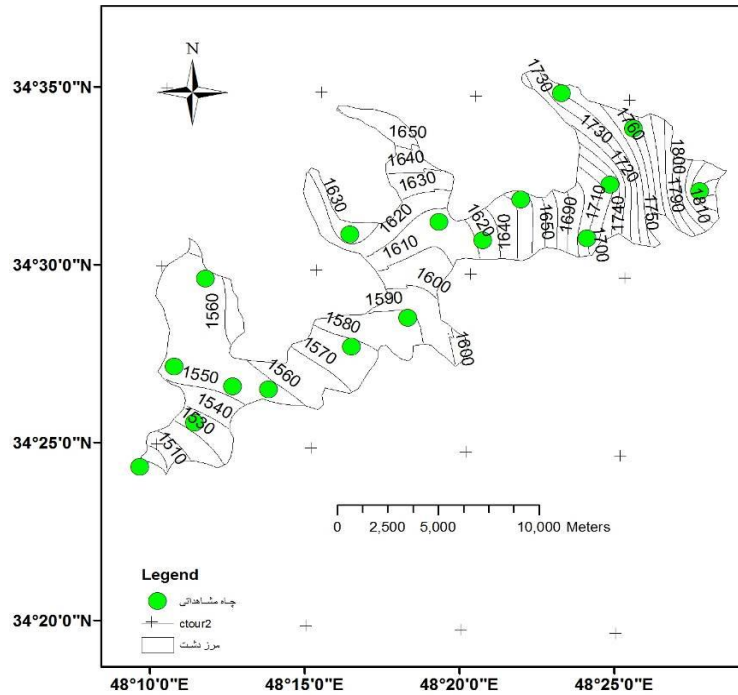
منطقه مورد پژوهش: دشت تویسرکان در قسمت جنوبی استان همدان واقع شده است. مساحت دشت تویسرکان ۱۶۴ کیلومتر مربع بوده و میانگین بارش این دشت ۴۲۰ میلی‌متر است. از ویژگی‌های رسوبات دشت می‌توان به دانه‌بندی مناسب آن که عمدتاً حاوی گراول، ماسه و سیلت با درصد بسیار کمی از ذرات ریزدانه رسی است اشاره نمود. با افزایش عمق از مقدار ذرات ریز دانه به شدت کاسته می‌شود. این رسوبات آبرفتی توانسته است آبخوان بسیار مناسبی برای حفظ

³ Steady

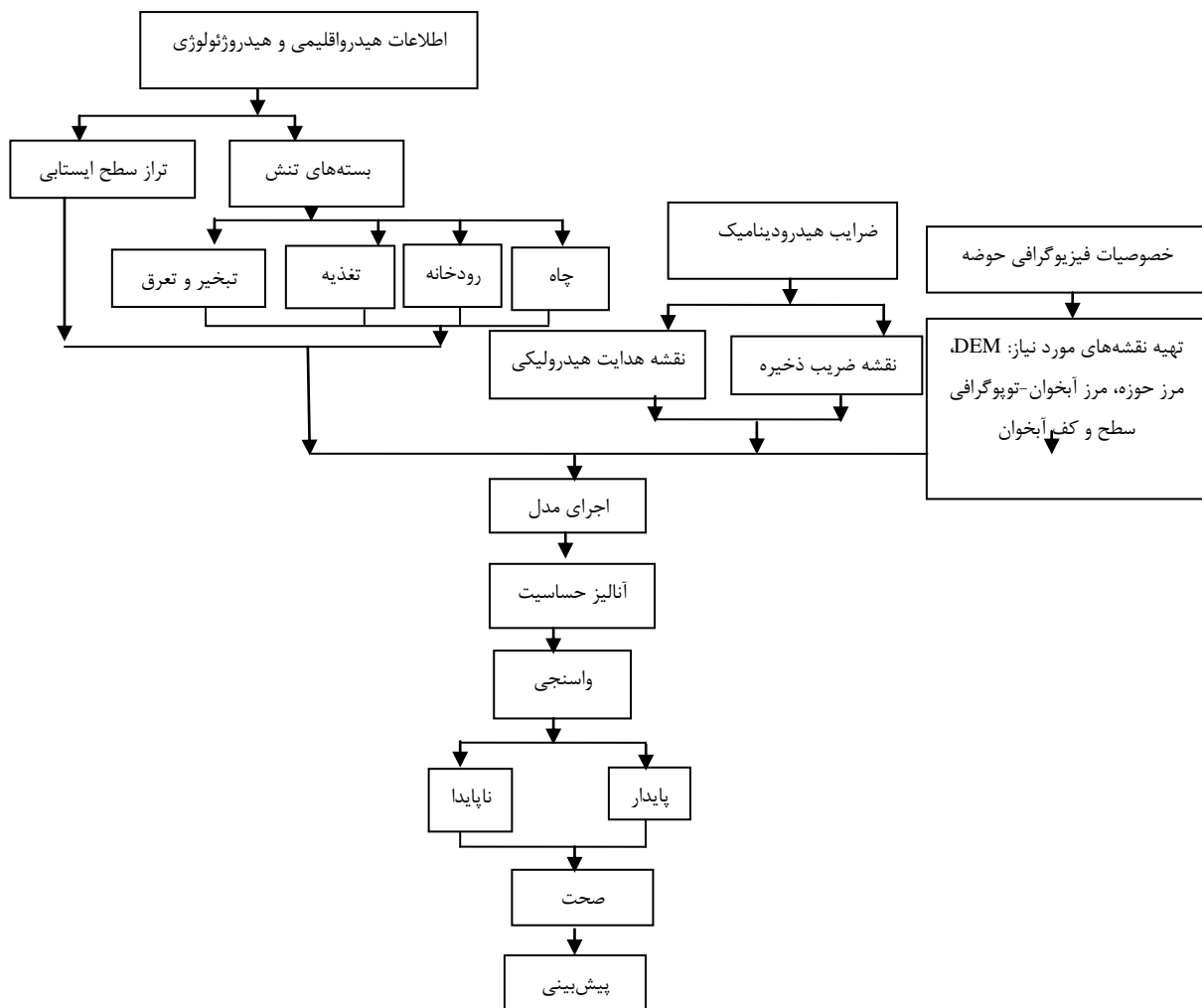
⁴ Unsteady

¹ Deterministic

² Coltishall



شکل ۱- پراکنش چاه‌های مشاهداتی در دشت توپسرکان و نقشه هم پتانسیل سطح ایستابی در سال آبی ۸۸-۸۷



شکل ۲- مراحل اجرای مدل آب زیرزمینی در نرم‌افزار جی ام اس

[A]، از تراز آب در پله زمانی قبلی استفاده شده و سپس معادله به صورت خطی در آمده و حل می شود (Remain و همکاران، ۲۰۰۸).

بیان آب زیرزمینی: عبارتست از تفاضل مجموع آب های ورودی و خروجی از آبخوان که طبق رابطه (۲) این تغییرات حجم مثبت و یا منفی باشد.

$$Q_{in} - Q_{out} = \pm \Delta S \quad (2)$$

که در آن، Q_{in} و Q_{out} به ترتیب مجموع جریان های ورودی و خروجی از محدوده مورد نظر بوده و $\pm \Delta S$ تغییرات ذخیره می باشد.

آماره های خطا: همان طور که ذکر شد طی فرایند واسنجی و صحت سنجی مدل آب زیرزمینی برای تعیین دقت مدل آماره های خطا تعیین شدند. به این منظور از دو آماره خطای مطلق و ریشه خطای استاندارد استفاده شد. آماره $RMSE^1$ یا مقدار جذر میانگین مربعات خطا، بیانگر میزان خطای برآورد متغیرها نسبت به مقدار مشاهداتی است که بر اساس ریشه مربعات خطا مورد محاسبه قرار می گیرد و فرمول آن به شرح زیر است.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [D_{es} - D_o]^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در آن، D_{es} مقدار سطح ایستابی شبیه سازی شده خروجی از نرم افزار، D_o مقدار سطح آب مشاهداتی چاه های مشاهداتی دشت و n تعداد داده ها می باشد.

$$MAE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i| \right] \quad (4)$$

$$e_i = X_e - X_o \quad (5)$$

که در آن، X_e مقدار دبی شبیه سازی شده، X_o مقدار دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری و n تعداد داده ها می باشد.

شاخص های خشکسالی: در این تحقیق دو شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی و یک شاخص هواشناسی مورد بررسی قرار گرفت که در زیر هر یک به اختصار معرفی می شوند.

شاخص استاندارد بارش (SPI): این شاخص برای هر منطقه بر اساس ثبت بارندگی های طولانی مدت آن

در مرحله بعد با استفاده از شاخص های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی سال های خشک و تر تفکیک شدند و به مقایسه و بررسی بیان آب زیرزمینی در سه سال متوالی ۸۶ تا ۸۹ به ترتیب به عنوان سال های خشک، نرمال و تر پرداخته شد. شکل ۲ روند نمای اجرای مدل MODFLOW در نرم افزار GMS را نشان می دهد. در زیر جزئیات روش تحقیق بیان شده است.

در مدل MODFLOW برای حل معادله جریان آب زیرزمینی از طریق تفاضل های محدود، به روش های مختلف عددی نیاز است. زیرا هر روش عددی به تنهایی برای تمامی مسائل آب زیرزمینی مناسب نیست. با استفاده از پردازش های چندگانه، می توان مسائل را به طور صحیح حل کرد. اما ساعت اجرا و فضای حافظه مورد نیاز در روش های حل گوناگون، متفاوت است. تقریب تفاضل های محدود برای هر پله زمانی، به صورت یک سری از معادلات همزمان، به فرم معادله ۱ که در زیر شکل ماتریسی آن آمده است، نتیجه می دهد (Obuobie و همکاران، ۲۰۱۲).

$$[A] \times [h] = [q] \quad (1)$$

که در آن، $[A]$ ماتریس ضرایب تراز آب، $[h]$ بردار مقادیر تراز آب و $[q]$ بردار مقادیر ثابت است. به طور کلی دو نوع حل کننده مستقیم و تکراری وجود دارد. در راه حل مستقیم، یک سری از معادلات همزمان از طریق یک الگوریتم جبری آماده حل می شوند که به لحاظ تئوری حل دقیقی می باشد. اما در بیشتر وضعیت ها، به دلیل دقت محدود کامپیوتر جواب دقیقی نمی دهد. حذف گوسی روش شناخته شده برای راه حل مستقیم می باشد. در راه حل تکراری، چندین حل تقریبی از معادلات حل شده ساخته می شود. هر حل تقریبی، یک تکرار نامیده می شود. تکرار پی در پی، دقت حل را بهبود می بخشد. در نهایت یک حل کننده تکراری مناسب، حل کننده ای است که هم گرا به جواب صحیح می باشد. هدف، کمینه کردن تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به حلی با دقت قابل قبول است. در حل مسائل آب زیرزمینی که معادله جریان به صورت غیرخطی در می آید، ماتریس $[A]$ خود تابعی از مقادیر ارتفاع آب است. در این حالت از روش تکراری پیکارد استفاده می شود. در این روش برای محاسبه ماتریس

¹ Relative Root Mean Square Error

شاخص‌های اقلیمی مانند *SPI* مورد بررسی قرار داد (Shahid و Hazarika، ۲۰۱۰). از این رو نیاز است که مقادیر پمپاژ از آب زیرزمینی دشت توپسرکان در سال‌های مختلف به‌همراه مقادیر *SPI* و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (*SWI*) مورد مطالعه قرار گیرد.

شاخص سطح آب استاندارد (*SWI*): شاخص سطح آب استاندارد در سال ۲۰۰۴ به‌وسیله Bhuiyan و همکاران (۲۰۰۶) برای پایش نوسانات سطح سفره‌های آب زیرزمینی در بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی ارائه شده که با روش زیر محاسبه می‌شود.

$$SWI = \frac{W_{ij} - W_{im}}{\sigma} \quad (7)$$

که در آن، w_{ij} سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی i تا j ، میانگین ماهانه آن‌ها و σ انحراف از معیار می‌باشد. مقادیر مختلف *SWI* برای تعیین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در جدول ۱ آورده شده است (Bhuiyan و همکاران، ۲۰۰۶). مقادیر مثبت *SWI* نشان دهنده خشکسالی و مقادیر منفی نشان دهنده عدم خشکسالی و شرایط نرمال می‌باشد.

محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب بر آمار بلند مدت بارندگی برآزش داده می‌شود که معمولاً این توزیع گاما در نظر گرفته می‌شود، سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌شود (McKee، ۱۹۹۳). شدت و تداوم خشکسالی‌های اقلیمی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در مقیاس‌های بلند مدت به‌وسیله این شاخص برآورد می‌شود. رابطه شاخص *SPI* به‌صورت زیر است.

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (6)$$

که در آن، *SPI* شاخص استاندارد بارش، X_i مقدار بارندگی در سال مورد نظر، \bar{X} میانگین طولانی مدت بارندگی سالانه و S انحراف از معیار می‌باشد. طبقات مختلف *SPI* بر اساس نتایج McKee و همکاران (۱۹۹۳) در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجایی که علاوه بر خشکسالی یا کاهش مقدار بارش، برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی عامل مهمی در کاهش سطح آب زیرزمینی است؛ لذا، کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی را نمی‌توان به تنهایی با یکی از

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت شاخص‌های *SPI* و *SWI*

مقادیر <i>SWI</i> (Bhuiyan، ۲۰۰۶)	مقادیر <i>SPI</i> (McKee، ۱۹۹۳)	طبقه خشکسالی
< ۰	> ۰	بدون خشکسالی
۰ تا ۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹ -	خشکسالی ملایم
۱ تا ۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
۱/۵ تا ۱/۹۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
۲ و بیشتر	-۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

باشد که برای تعیین خشکسالی هیدروژئولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است؛ این شاخص به صورت روابط ۸ و ۹ بیان می‌شود.

$$PSI_a = \left[\frac{1}{2} \right] \left[\frac{V_i - V_{\min}}{V_{\text{mean}} - V_{\min}} \right] \quad (8)$$

$$PSI_b = \left[\frac{1}{2} \right] \left[\frac{V_i - V_{\text{mean}}}{V_{\max} - V_{\text{mean}}} \right] \quad (9)$$

که در آن‌ها، PSI_a و PSI_b شاخص‌های حالات پیزومتریک بوده که بین صفر تا یک متغیر است و

شاخص حالت پیزومتریک (PSI^1) مدیریت موثر در خشکسالی به طور عمده وابسته به انتخاب مناسب شاخص‌ها و آستانه‌ها می‌باشد (Steinmann^۲ و Cavalcanti، ۲۰۰۵) در تحقیق حاضر شاخص *PSI* به عنوان یکی از ابزار پایش خشکسالی آب زیرزمینی^۳ مورد استفاده قرار گرفت. شاخص *PSI* شاخصی می-

¹ Piezometric State Index

² Steinmann

³ Groundwater Drought

متوسط، بیشینه و کمینه سطح پتانسیومتریک برای کلیه سری داده‌های ثبت شده می‌باشد. در این شاخص شدت خشکسالی آب زیرزمینی به صورت مندرج در جدول ۲ طبقه‌بندی می‌شود.

به ترتیب در شرایطی که، V_i کوچک‌تر از V_{mean} و V_i بزرگ‌تر و یا مساوی V_{mean} باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ V_i ارتفاع سطح ایستابی در زمان مورد مطالعه و V_{mean} ، $V_{m a}$ و $V_{m i}$ به ترتیب ارتفاع

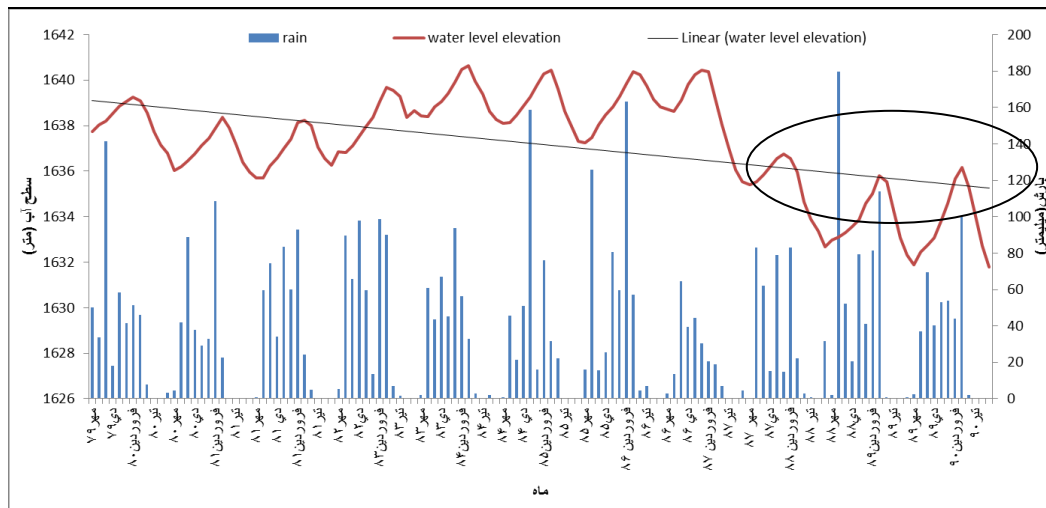
جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی آب زیرزمینی بر اساس شاخص PSI

شاخص PSI	۰-۰/۱۵	۰/۱۵-۰/۳	۰/۳-۰/۵	۰/۵-۱
شدت خشکسالی	حداقل تاریخی	شرایط خطرناک	شرایط هشدار	شرایط نرمال

نتایج و بحث

در سال‌های اخیر دیده می‌شود به طوری که هر چند در سال ۸۸-۸۹ بارش نسبت به دو سال قبل از آن تا حدودی افزایش یافته اما سطح ایستابی افزایش نیافته است.

در شکل ۴ هیدروگراف معرف دشت تویسرکان به همراه مقدار بارش ماهانه از سال ۷۹ تا سال ۹۰ دیده می‌شود. با توجه به شکل افت محسوس سطح ایستابی



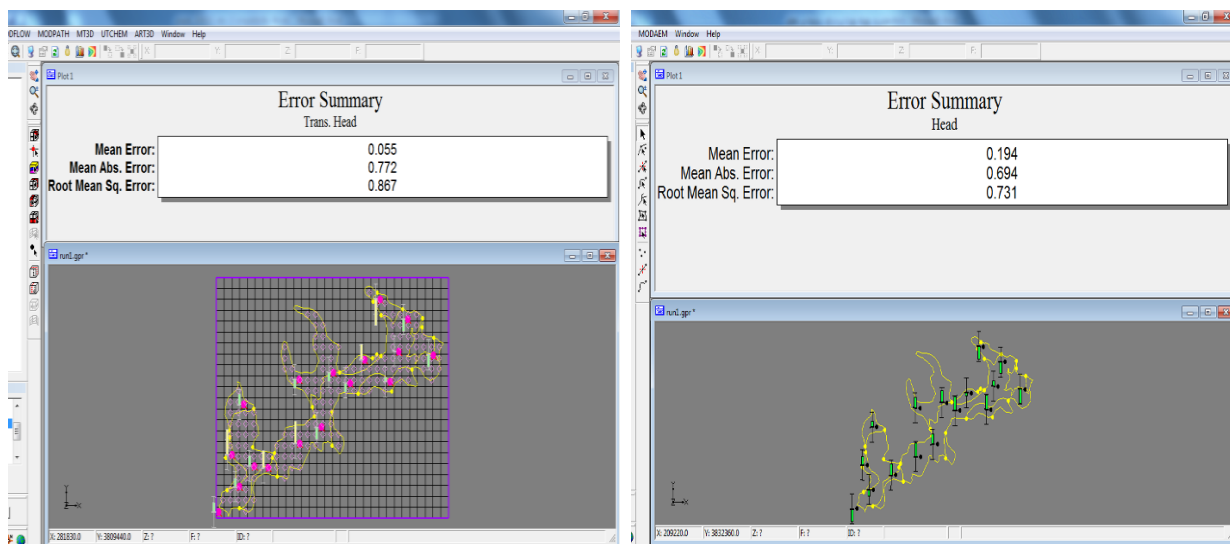
شکل ۴- هیدروگراف معرف دشت تویسرکان (سال‌های واسنجی و اعتبارسنجی با دایره نشان داده شده است)

ناپایدار سال نرمال (واسنجی) بوده، کمترین میزان خطای مطلق و خطای استاندارد نیز مربوط به شرایط پایدار سال ۸۸-۸۷ می‌باشد که به ترتیب مقادیر ۰/۶۹ و ۰/۷۳ را نشان می‌دهد. مقادیر خطای کم تمامی دوره‌ها نشان دهنده واسنجی مناسب مدل می‌باشد.

شکل ۶ همبستگی مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی سطح پیرومتریک چاه‌های دشت تویسرکان در محیط جی ام اس را نشان می‌دهد. این شکل نیز تأیید کننده میزان همبستگی بالای سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دشت تویسرکان می‌باشد.

در شکل ۵، نمایی از مدل واسنجی شده آب زیرزمینی دشت تویسرکان در شرایط پایدار و ناپایدار مشاهده می‌شود، در این شکل آماره‌های خطا در بالای تصویر و تطابق سطح ایستابی مشاهده‌ای و محاسبه شده که نشان دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی قابل قبول جریان آب زیرزمینی در آبخوان می‌باشد.

جدول ۳، آماره‌های خطای مدل در شرایط واسنجی در حالت پایدار و ناپایدار و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، آماره‌های خطا در تمامی دوره‌ها اعداد پائین بوده، همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بالا می‌باشد. کمترین میانگین خطا مربوط به شرایط



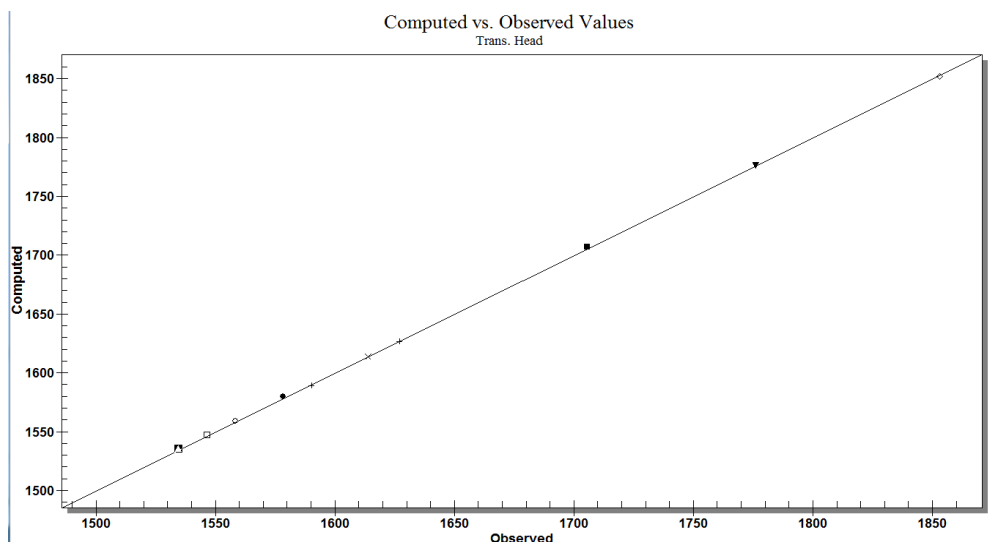
ب) واسنجی در شرایط ناپایدار

الف) واسنجی در شرایط پایدار

شکل ۵- نمایی از مدل واسنجی شده دشت توپسرکان در شرایط پایدار و ناپایدار به همراه آماره‌های خطا

جدول ۳- آماره‌های خطای مدل در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی مدل

سال تر	سال خشک	شرایط ناپایدار (سال نرمال)	شرایط پایدار (سال نرمال)	آماره‌های خطا
۰/۴۸	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۱۹	میانگین خطا
۰/۶۷	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۶۹	میانگین مطلق خطا
۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۷۳	میانگین خطای استاندارد
٪۹۰	٪۹۵	٪۹۷	٪۹۸	ضریب همبستگی



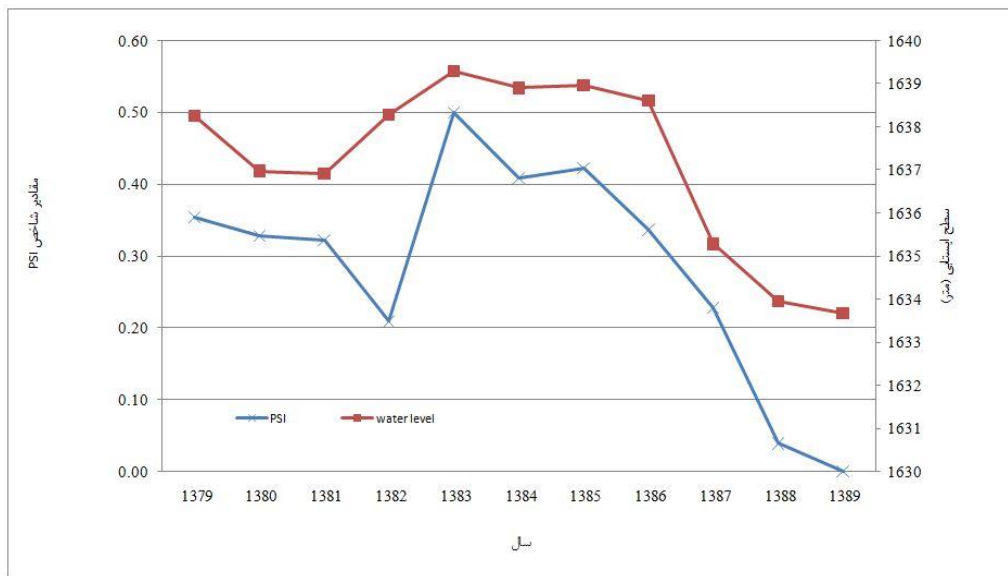
شکل ۶- همبستگی مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی سطح ایستابی چاه‌های دشت توپسرکان

بنابراین، شاخص حالت پیژومتریکی به خوبی می‌تواند تغییرات سطح ایستابی دشت را نمایش دهد و به‌عنوان شاخص خشکسالی مناسبی در دشت توپسرکان که بتواند تغییرات سطح ایستابی را نمایش دهد، می‌باشد. تحقیقات Solymani Motlaq (۲۰۱۱) و Bhuiyan و

در شکل ۷، شاخص خشکسالی حالت پیژومتریکی در قیاس با سطح ایستابی دشت توپسرکان را نشان می‌دهد. در تمامی سال‌ها به جز سال ۱۳۸۲ شاخص حالت پیژومتریکی هم‌خوانی مناسبی با تغییرات سطح ایستابی چاه‌های پیژومتریکی دشت توپسرکان دارد.

نموده است.

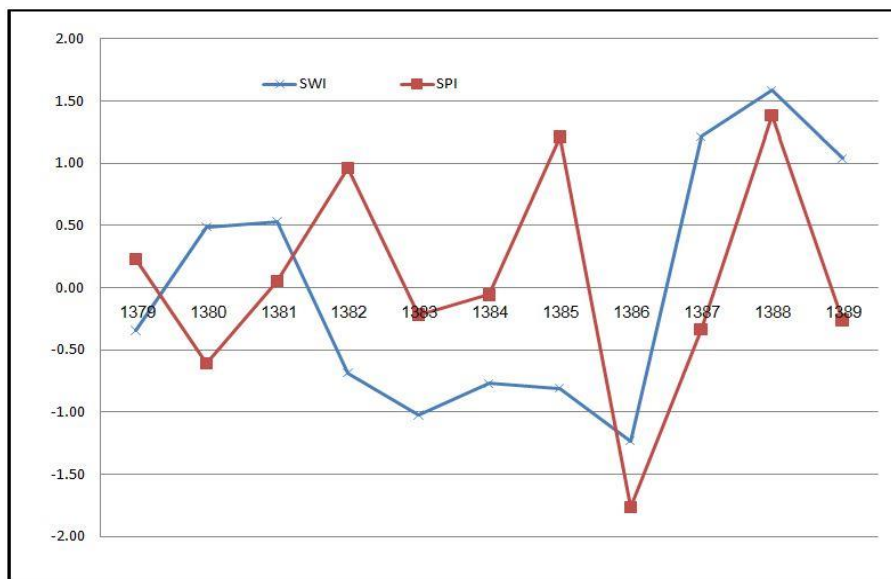
همکاران (۲۰۰۶) نیز قابلیت شاخص حالت پیژومتریک در نمایش وضعیت پیژومترها را تایید



شکل ۷- تغییرات زمانی شاخص خشکسالی حالت پیژومتریک در قیاس با سطح ایستابی دشت تویسرکان

در مقیاس زمانی سالانه و در نظر گرفتن میزان بهره- برداری با خشکسالی اقلیمی، تقریباً به طور همزمان از سال ۱۳۸۶ انجام شده است. شایان ذکر است که با احتمال وجود تطابق زمانی هر دو خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی در یک سال، ممکن است تأخیر شش تا نه ماهه با توجه به بافت خاک منطقه (شنی رسی) و نفوذپذیری بالای آن و عمق آب نزدیک به سطح زمین داشته باشد. از آنجایی که سطح ایستابی دشت فقط تحت تاثیر آب بارش به عنوان تغذیه نبوده، میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری نقش بسیار موثری در سطح ایستابی خواهد داشت. بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که هر چند در سال ۱۳۸۵ وضعیت ترسالی بوده، مقدار بارندگی مناسب بوده است. ولی برداشت از سطح سفره زیاد بوده به طوری که تغذیه اضافی نتوانسته است که افت سطح ایستابی را جبران نماید. این موضوع با مطالعه Imani (۲۰۱۱) و Solymani Motlaq (۲۰۱۱) مطابقت دارد. به طوری که سلیمانی مطلق و ایمانی نیز در مقایسه تغییرات دو شاخص بارش استاندارد و سطح آب استاندارد به این نتیجه رسیدند که برداشت چاه‌های بهره‌برداری بیش از بارش (تغذیه) می‌تواند بر خشکسالی و افت آب زیرزمینی موثر باشد.

در شکل ۸، تطابق شاخص بارش استاندارد و شاخص سطح آب استاندارد در دشت تویسرکان طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ بررسی شده است. همان‌طور که در روش تحقیق اشاره شد، هر چه شاخص سطح آب استاندارد به یک نزدیک‌تر می‌شود، به این معنی است که افت در سطح آب زیرزمینی دیده می‌شود و بنابراین در جاهایی که شاخص بارش استاندارد مثبت می‌باشد قاعدتاً شاخص سطح آب استاندارد باید عدد منفی را نشان دهد، البته به شرط این‌که خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی تطابق داشته باشد. با توجه به نمودار تطابق این دو شاخص هواشناسی از سال ۱۳۷۹ تا سال ۱۳۸۵ مناسب نبوده که نشان از تأخیر اثرات خشکسالی‌های هواشناسی بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی دارد. اما از سال ۱۳۸۶ تطابق خوبی بین دو شاخص بارش استاندارد و سطح آب استاندارد دیده می‌شود. به طوری که هر چند سال ۱۳۸۰، سال نرمال رو به خشکسالی رخ داده است ولی اثر آن در خشکسالی آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۲ به بعد دیده می‌شود و یا هر چند در سال ۱۳۸۲ ترسالی هواشناسی رخ داده است ولی خشکسالی آب زیرزمینی دیده می‌شود. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتیجه گرفت که خشکسالی آب زیرزمینی دشت تویسرکان



شکل ۸- بررسی تطابق شاخص بارش استاندارد و شاخص سطح آب استاندارد

سال به کمک مدل MODFLOW تعیین شد، در سال ۱۳۸۷ که سالی نرمال بوده است، ضریب تغییرات ۳۴/۹ میلیون مترمکعب و در سال ۱۳۸۸ به عنوان ترسال ضریب تغییرات ۵۰/۱ میلیون مترمکعب در سال، در مدل شبیه‌سازی شده است. بنابراین، میزان تغذیه ناشی از بارش و رواناب تأثیر به‌سزایی در تغییرات بیلان آبی زیرزمینی خواهد داشت. نتایج رسیدند که در سال‌های خشکسالی هواشناسی بیلان آب زیرزمینی دشت افت می‌کند.

جدول ۷، بررسی اثر خشکسالی هواشناسی بر بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان را نشان می‌دهد. میزان ورودی‌ها شامل تغذیه و ورودی زیرزمینی و خروجی‌ها به‌طور کلی شامل برداشت و خروجی زیرزمینی در نظر گرفته شده است. بیلان آب برای سه سال که عبارتند از نرمال ۱۳۸۷، سال خشک ۱۳۸۶ و سال تر ۱۳۸۸ محاسبه و ضریب تغییرات مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول مشخص می‌باشد، میزان ضریب تغییرات آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۶ که سال خشکی می‌باشد ۳/۴- میلیون مترمکعب در

جدول ۷- بررسی اثر خشکسالی هواشناسی بر بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان

سال	ورودی‌ها (مترمکعب در روز)	خروجی‌ها (مترمکعب در روز)	ضریب تغییرات (میلیون مترمکعب در سال)
خشک (سال ۸۷-۸۹)	تغذیه	برداشت	-۳/۴
	ورودی زیرزمینی	خروجی زیرزمینی	
	جمع	جمع	
نرمال (سال ۸۸-۸۷)	تغذیه	برداشت	۳۴/۹
	ورودی زیرزمینی	خروجی زیرزمینی	
	جمع	جمع	
تر (سال ۸۹-۸۸)	تغذیه	برداشت	۵۰/۱
	ورودی زیرزمینی	خروجی زیرزمینی	
	جمع	جمع	

داد. به‌طوری که در هر سه دوره آماره‌های خطا پائین و درصد همبستگی سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بالا و قابل قبول بوده است. به‌طور مثال

نتایج تحقیق حاضر کارایی مدل واسنجی شده MODFLOW در سال نرمال برای استفاده در سال‌های مختلف ترسالی و خشکسالی با دقت بالا را نشان

نشده و نمی‌تواند افت سطح ایستابی را جبران نماید. در نهایت آن‌که به دلیل عدم تفکیک میزان بهره‌برداری از میزان کمبود بارش نمی‌توان به‌طور قطعی میزان تأخیر خشکسالی آب زیرزمینی را نسبت به خشکسالی اقلیمی تعیین کرد. بیلان آبی محاسبه شده به‌وسیله مدل MODFLOW و بررسی ضریب تغییرات نشان داد که هر چند تطابق کامل بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی و سطح ایستابی دشت وجود ندارد، لیکن میزان تغییرات بارش و خشکسالی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در تغییرات بیلان آب زیرزمینی دشت در همان سال داشته باشد. البته در صورتی‌که داده‌های برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در سال‌های بیشتری در دسترس بود و امکان اجرای مدل آب زیرزمینی در سال‌های بیشتری برای تعیین بیلان آب زیرزمینی وجود داشت، با اطمینان و قطعیت بیشتری، نتیجه حاصل شده از تأثیر خشکسالی بر بیلان آب زیرزمینی، برای سایر سال‌ها قابل تعمیم بود.

همبستگی سطح ایستابی شبیه سازی شده از ۹۰ درصد در سال تر تا ۹۸ درصد در شرایط ناپایدار تغییر کرده، ریشه خطای استاندارد از ۰/۷۳ در شرایط پایدار تا ۰/۹۳ در سال تر تغییر یافته است. همچنین، این تحقیق می‌تواند به کارایی مناسب شاخص خشکسالی حالت پیرومتریک (PSI) در نمایش وضعیت سطح ایستابی آبخوان اشاره نمود. از طرف دیگر بررسی تطابق شاخص خشکسالی استاندارد بارش و شاخص خشکسالی سطح آب استاندارد نشان داد که هر چند در سال‌های انتهایی دوره تطابق مناسبی بین این دو شاخص خشکسالی دیده می‌شود، ولی در سال‌های اولیه تطابق خوبی بین این دو شاخص نیست که از دو جنبه قابل بررسی است اول این‌که تأثیر خشکسالی هواشناسی با تأخیر بر سطح ایستابی دشت تأثیر گذار خواهد بود و از جنبه دیگر، میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به قدری بر تغییرات سطح ایستابی دشت موثر خواهد بود که حتی ترسالی (افزایش بارش به- عنوان تغذیه دشت) باعث جبران برداشت بی‌رویه

منابع مورد استفاده

1. Ashraf, A and Z. Ahmad. 2012. Integration of groundwater flow modeling and GIS, water resources management and modeling. *Journal of Groundwater*, 25: 121-125.
2. Bhuiyan, C., R.P. Singh and F.N. Kogan. 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8: 289-302.
3. El Yaouti, F., A. Mandour, D. Khattach and O. Kaufmann. 2008. Modelling groundwater flow and adjective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-Environment Research*, 2: 192-209.
4. Imani, M. and A. Talebi. 2011. Evaluation of ground water table in Bahabad plain using SPI and GRI. 4th Conference on Water Resources Management, Tehran, Amirkabir University of Technology (in Persian).
5. Holman, I.P., D. Tascone and T.M. Hess. 2009. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modeling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia UK—implications for groundwater resource management. *Journal of Hydrogeology*, 17: 1629-1641.
6. Gaur, S., B.R. Chahar and A. Didier. 2011. Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 127-139.
7. McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time steps. 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California, 179-184.
8. Mohammadi Qaleny, M., E. Kumars and S. Araqi Nejad. 2011. Evaluation of climate change in decreases of ground water resources (case study: Saveh Plain). *Journal of Conservation Water and Soil Research*, 19: 36-42 (in Persian).
9. Nikbakht, J., Z. Najib and M.A. Pooraqdam. 2012. Conversion of traditional irrigation systems to increase the pressure on groundwater storage case study Ajabshir plain, Azerbaijan. *Conference of Strategies for Achieving Sustainable Development*, 120-125 (in Persian).
10. Omuscu, F.K., U. Erkan and E. Turgu. 2005. An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Journal of Natural Hazards*, 35: 243-264.

11. Obuobie, E., B. Diekkrueger, W. Agyekum and S. Agodzo. 2012. Groundwater level monitoring and recharge estimation in the White Volta River basin of Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 25: 71-72.
12. Praveena, S.M., M.H. Abdullah and A.Z. Aris. 2010. Modeling for equitable groundwater management Praveena. *Journal of Environmental Research*, 43: 415-426.
13. Qushei, M. 2010. Calculation of ground water balance in Danghan Plain. *Conference of Applying Water Resources of Iran*, 74-25 (in Persian).
14. Remain, R., J.H. Panda and R. Mull. 2008. Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resource Management*, 22: 23-50.
15. Steinemann, A. and L. Cavalcanti. 2006. Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132: 164-174.
16. Shahid, S. and S. Hazarika. 2010. Groundwater drought in the north-western districts of Bangladesh. *Water Resources Management*, 24: 10-32.
17. Solymani Motlaq, M. 2011. Optimum utilization of groundwater resources management in drought conditions. MSc Thesis, 125 pages (in Persian).
18. Shirafkan, M. and H. Jafari. 2013. Evaluation of hydrological of aquifer balance in Bahabad of Yazd. 8th Conference of Engineering Geology and the Environment, Ferdowsi University of Mashhad (in Persian).
19. Taie Semiromi, M., A. Fatehi Marj and S.K. Mirnia. 2012. Evaluating effects of artificial recharge on temporal and spatial distribution of hydrogeological droughts using Piezometric State Index (case study: Garbaygan Plain). *Journal of Iranian Water Resources Research*, 8: 86-89.
20. Yang, Q.C., J. Liang and Z.P. Yang. 2012. Numerical modeling of groundwater flow in Daxing (Beijing, China). 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering.