پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷ با استفاده از مدل عددی MODFLOW

احمد فاتحی مرج[۱*]، مجید طائی سمیرمی[۲]، عبدالنبی کلاهچی[۳] و سید خلّاق میرنیا[۴]

۱* - نویسنده مسئول، استادیار پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری fatehi1339@gmail.com
۲- کارشناس ارشد پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
۳- استادیار پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
۴- دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۲۰

چکیده

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در مناطق در حال توسعه، به‌ویژه زمانی که تقاضا برای آب آشامیدنی سالم با توجه به رشد سریع این جوامع در حال افزایش است، از اهداف ضروری محسوب می‌شود. گسترش کنترل نشده صنایع، اراضی کشاورزی، سکونت‌گاه‌ها و هم‌چنین مدیریت ناکافی اعمال شده بر منابع آب زیرزمینی، لزوم اتّخاذ شیوه‌های صحیح مدیریتی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. امروزه براساس قابلیّت تطابق زیاد مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی آب زیرزمینی با سیستم هیدرولیکی آبخوان و امکان استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی وضعیت آینده، شرایط مناسبی را به‌منظور مدیریت و استفاده بهینه از این منابع فراهم آورده است. بر این اساس هدف از تحقیق حاضر پیش‌بینی سطح ایستابی برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آتی (۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷) با استفاده از مدل MODFLOW جهت ارائه شیوه‌ای صحیح در مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان گربایگان به‌عنوان منطقه‌ای با اهمیّت استراتژیک از نظر کشاورزی می‌باشد. در این تحقیق پس از تهیّه لایه‌های ورودی به مدل در محیط سامانه اطّلاعات جغرافیایی (GIS)، شرایط مرزی و شبکه‌بندی آبخوان تعیین شد، سپس با استفاده از اطّلاعات موجود اقدام به واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار نموده و برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، آزمون صحّت‌سنجی انجام شد. سپس هیدروگراف واحد و تراز سطح ایستابی آبخوان برای ۵۰ سال آینده پیش‌بینی شد. نتایج حاکی از آن است که شیب افت هیدروگراف واحد آبخوان برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آینده، به ترتیب به میزان ۰/۳۳۱، ۰/۲۹۸ و ۰/۲۷ متر بر سال بوده که می‌توان دریافت با افزایش دوره پیش‌بینی شیب افت کاهش می‌یابد که نشان از افت قابل توجه سطح ایستابی با گذشت زمان می‌باشد.

کلید واژه‌ها: *مدیریت منابع آب زیرزمینی، مدل‌سازی،* **MODFLOW**، *سطح ایستابی، گربایگان.*

مقدمه

در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه خشک جهان مثل ایران، اصلی‌ترین منابع آب ذخایر آب زیرزمینی می‌باشد به‌طوری که منابع آب زیرزمینی ایران در حدود ۷۷/۸ درصد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی را تأمین می‌کند (۴). این در حالی است که از ۴۰۰ میلیارد مترمکعب بارش متوسط کشور، تنها ۳۵ میلیارد مترمکعب آن به‌مصرف تغذیه آبخوان‌ها می‌رسد (۷). هم‌گام با پیشرفت فن‌آوری، بهره‌برداری از این ذخایر در چند دهه اخیر به شدّت رو به فزونی گذاشته، در نتیجه افت سطح ایستابی و کاهش این ذخایر رو به افزایش است. این امر مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی را به‌طور جدّی مدّ نظر مسئولان و دست‌اندرکاران قرار داده است (۱۸). عموماً اهداف مطرح در این نوع مدیریت، به‌دست آوردن حداکثر کمیّت و کیفیّت آب متناسب با هدف مورد نظر و با کم‌ترین هزینه می‌باشد (۱۷). به‌طور کلّی ارزیابی و مدیریت منابع آب به عنوان عوامل کلیدی راه‌کار توسعه جامع محسوب می‌گردند (۱۵). از این رو براساس قابلیت تطابق زیاد مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی آب زیرزمینی با سامانه هیدروژئولوژی[1] آبخوان و امکان استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی وضعیت آینده، شرایط مناسبی را به منظور مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی فراهم آورده است. در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی تحقیقات متعددی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. پیسینارس و همکاران[2] (۱۴) به ارزیابی و ارائه راه‌کارهایی جهت تعدیل اثرات ۸۷ چاه بهره‌برداری واقع در اراضی کشاورزی دشت ایسمریدا[3] یونان به مساحت ۴۶/۷۵ کیلومترمربع پرداختند. جریان آب زیرزمینی در این آبخوان به‌واسطه وجود سه سال داده‌های صحرایی از طریق مدل MODFLOW شبیه‌سازی شد. نتایج بیان‌گر دقّت بالای مدل در شبیه‌سازی سطح پتانسیومتری

1. Hydrogeology
2. Pisinaras et al.
3. Ismarida

مـی‌باشـد. وانـگ و همکـاران[1] (۱۹) بـا اسـتفاده از تلفیـق مـدل MODFLOW و برنامه سامانه اطلاعات جغرافیایی MAPGIS تحت محیط اینترنت، وضعیّت آبخوان دشت واقع در شـمال چـین (NCP) را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از سامانه اطلاعـات جغرافیـایی جهت ایجاد لایه‌های ورودی مدل استفاده گردیـد و در نهایـت بـیلان آب زیرزمینی دشت مذکور برای بـازه زمـانی یکسـاله (۲۰۰۳-۲۰۰۲) تهیّه شد. نتایج حاکی از بیلان منفی دشت بـه‌میـزان ۱۰۱۶× ۷/۱۵۶- مترمکعب می‌باشد که مبیّن وضعیّت بحرانی منابع آب زیرزمینـی ایـن دشت در اثر بهره‌برداری بیش از حد مجاز اسـت. هلمـن و همکـاران[2] (۱۰) با استفاده از مدل‌های استوکاستیکی و تعیّنـی[3] اثـر تغییـر اقلـیم روی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه کولتیشال[4] انگلسـتان را با هدف بهبود شیوه‌های مدیریت بـر ایـن منـابع بررسـی نمودنـد. بـر اساس نتایج حاصله، آن‌ها توصیه نمودند که مدل‌سازی استوکاسـتیکی در سامانه‌هـای آب زیرزمینـی حسّـاس از قابلیّـت بـالاتری برخـوردار می‌باشد.

فـاتحی مـرج (۲)، کتیبـه و حـافظی (۵) بـا اسـتفاده از مـدل MODFLOW به بررسی مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و ارزیابی عملکرد طرح تغذیه مصنوعی دشت آب باریـک بـم پرداختنـد. شبیه‌سازی آبخوان موئیّـد آن اسـت کـه رونـد افـت سـطح ایسـتابی، علی‌رغم تغذیه مصنوعی کماکان ادامه دارد به طوری که در اسفند ماه ۱۳۸۳ میزان افت نسبت به اسفند ۱۳۵۲ در حدود ۱۸ متر خواهـد بـود. فضل‌اولی و همکاران (۳) تاثیر پخش سـیلاب را در تغذیـه مصـنوعی سفره آب زیرزمینی دشت موسیان واقع در استان ایـلام بـا اسـتفاده از مدل MODFLOW مورد ارزیابی قرار دادند. شبیه‌سـازی آبخـوان تـا سال ۱۴۰۰ نشان داد که آبخوان مذکور با وجود انجام عملیات پخش-سیلاب طی سال‌های اخیر، هم‌چنان بـا افـت سـطح ایسـتابی مواجـه خواهد بود. هم‌چنین نتایج حاصل از آزمـون تحلیـل حساسـیّت مبـیّن تأثیرگذاری بسیار زیاد عامل تغذیه بر نوسانات سطح ایستابی مـی‌بـود. عطـایی‌زاده و چیـت‌سـازان (۱) بـا اسـتفاده از مـدل ریاضـی MODFLOWبه بررسی اثر خشکسالی بر میزان ذخیره آبخوان دشت میداود پرداختند و بدین ترتیب مقدار ذخیره و بیلان آبخـوان محاسـبه گردید. جهت تبیین اثـر خشکسـالی سـال آبـی ۸۷-۱۳۸۶ بـر میـزان ذخیره آبخوان، اطّلاعات اقلیمی و هیدرولوژیکی ایـن سـال وارد مـدل شد و پس از مدل‌سازی، میزان ذخیره و بیلان آبخوان محاسبه گردیـد و مشاهده شد که ذخیره آبخوان از مقدار ۶۱۲ میلیـون متـرمکعـب در سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ به میزان ۵۹۱/۶ میلیون مترمکعب در سـال آبـی ۸۷-۱۳۸۶ تقلیل یافته است. به لحاظ نقش بسزایی که دشت مـذکور در اقتصاد کشاورزی منطقه ایفا می‌نماید و وابستگی شـدید کشـاورزی این ناحیه به آب‌های زیرزمینی، لذا بررسی وضـعیّت آینـده ایـن منبـع حیاتی اجتناب ناپذیر می‌باشد. لذا هدف از تحقیـق حاضـر پـیش‌بینـی نوسانات سطح ایستابی آبخوان دشت گربایگان در صورت تداوم شـیوه مدیریتی حاکم بر آن، برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تـا ۱۴۳۷ بـا اسـتفاده از مدل MODFLOW می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

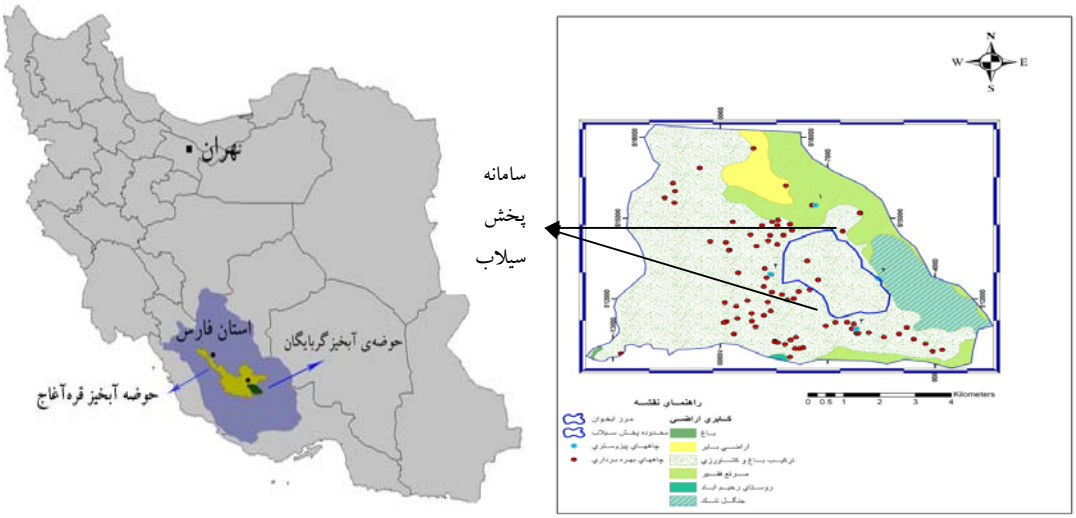
دشـت گربایگـان بـا مسـاحت ۸۳ کیلـومترمربـع بـا مختصـات جغرافیایی ´۵۳ °۵۳ تا ´۵۷ °۵۳ طول شـرقی و°۲۸ ´۳۵ تـا ´۴۱ °۲۸ عرض شمالی در ۱۹۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز (۴۸ کیلـومتـری شهرستان فسا)، بر روی مخروط افکنه‌ای کم عمـق تـا نسـبتاً عمیـق قرار گرفته است (۴). حدّاکثر و حدّاقل ارتفاع دشت به‌ترتیب ۲۰۶۶ متر متعلّق به کوه نصیرآباد و ۱۱۰۰ در محل تلاقی مخروط افکنـه بیشـه-زرد با مسیل شور می‌باشد. محل اجرای سامانه پخش سیلاب کـوثر در ۵۰ کیلومتری جنوب شرقی فسا واقع شـده اسـت. شـکل(۱) موقعیـت آبخوان مورد مطالعه را بـر روی نقشـه اسـتان فـارس و ایـران نشـان می‌دهد ویژگی‌های اقلیمی این منطقه نیـز بـه اختصـار در جـدول (۱) ارائه شده است.

آبخوان مورد مطالعه واقع بر مخـروط افکنـه بیشـه‌زرد مسـاحتی بالغ بر ۶۵ کیلومترمربع را شامل می‌گردد. ضخامت آبرفت در این واحد ژئومورفولوژیکی از ۱۹ متر در محل خروج مسـیل بیشـه زرد از جبهـه کوهستان، تا ۵۸ متر در بخش غربی آبخـوان متغیـر مـی‌باشـد. نتـایج حاصـل از آزمـون پمپـاژ، حـاکی از ضـریب آبگـذری ۱۳۳/۸ مترمربع در روز و آبدهی ویژه ۰/۱ برای این آبخوان می‌باشد که وجـود آبخوان آزاد را در محدوده مطالعاتی اثبات می‌نماید. قابـل توجّـه اسـت که در سطح آبخوان مذکور، چهار چاه پیزومتری فعّال وجود داشته کـه از سال ۱۳۷۱ ثبت تراز سطح ایستابی در آن‌ها شروع شده است (۸).

روش تحقیق

در ابتدا تنظیم مدل ریاضی MODFLOW برای ورود اطلاعات و اجرای شبیه‌سازی انجام می‌شود (۱۲). برای انجام محاسـبات در مـدل آب زیرزمینی، نخست باید کل زمـان مـورد مطالعـه (t) را بـه اجـزای کوچـک‌تـری (Δt) تقسـیم نمـود. هرچـه Δt کوچـک‌تـر باشـد دقـت محاسبات بیش‌تر می‌شود امـا حجـم محاسـبات نیـز متقـابلاً افـزایش می‌یابد (۱۳). بعد از این مرحله، فراخوانی لایـه‌هـای اطلاعـاتی تهیـه شده در محیط GIS در مدل صـورت مـی‌گیـرد. سـفره آب زیرزمینـی معمولاً در طبیعت بـه‌صـورت پیوسـته اسـت در حـالی کـه بـرای بـه کارگیری مدل ریاضی باید حدود تقریبـی سـفره آب زیرزمینـی معـین شده و سپس شبکه‌بندی انجام شود (۱۶ و ۱۸). بـرای ایـن منظـور بـا بهره‌گیری از مطالعات ژئوفیزیک، چینه‌شناسی، حفاری‌هـای اکتشـافی، استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و خطوط تـراز سـطح آب زیرزمینی مرز آبخوان تعیین مـی‌شـود. بـرای حـل تقریبـی معـادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی، از روش تفاضل‌های محـدود (اسـاس روش حل در مدل MODFLOW) استفاده می‌شود.

1. Wang et al.
2. Holman et al.
3. Deterministic
4. Coltishall



شکل ۱- موقعیت دشت گرابیگان به‌همراه مکان احداث سامانه پخش سیلاب در نقشه ایران و استان فارس

جدول۱- خصوصیّات اقلیمی دشت گرابیگان

میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)	میانگین بیشینه دمای مطلق (سانتی‌گراد)	میانگین کمینه دمای مطلق (سانتی‌گراد)	میانگین دمای سالانه (سانتی‌گراد)	متوسط تعداد روزهای بخبندان	میانگین تبخیر سالانه (میلی‌متر)
۲۸۹/۴	۳۳/۹	۶/۴	۲۰/۶	۲۶	۲۹۳۴/۹

برای این منظور پس از مشخص کردن محدوده آبخوان، باید سفره را به شبکه‌های مستطیلی یا مربعی که توسط خطوط موازی با محورهای X و Y ایجاد می‌شود تجزیه کرد (۱۸). بعد از شبکه‌بندی، اقدام به واسنجی مدل می‌شود. شبکه‌بندی آبخوان مورد مطالعه با ابعاد سلول ۱۰۰ در ۱۰۰ متر صورت گرفت که با احتساب مساحت آبخوان تعداد ۱۱۶ ستون و ۹۲ سطر به‌دست آمد. به لحاظ عمق محدود منطقه اشباع[1] آبخوان ناشی از ضخامت کم آبرفت و همچنین شرایط تقریباً همگن و هم‌روند رسوبات، تنها یک لایه به‌صورت عمودی (K) منظور گردید که با توجّه به آزمایش‌های پمپاژ صورت گرفته در سطح آبخوان این لایه از نوع آبخوان آزاد تشخیص داده شد. در این تحقیق بعد از اجرای موفقیّت آمیز مدل، واسنجی در دو حالت پایدار و ناپایدار انجام می‌گیرد. حالت پایدار معرّف وضعیتّی است که سامانه تغذیه و تخلیه آبخوان در حالت طبیعی بوده و پمپاژ از آبخوان، صفر یا قابل توجه نبوده است. به لحاظ محدود بودن مقدار برداشت از آبخوان تا قبل از سال ۱۳۵۷ و همچنین وجود هشت نقطه مشاهداتی در این سال، واسنجی در حالت پایدار برای این دوره گزینه مناسب به نظر می‌رسید. از این رو مقادیر پارامترهایی نظیر هدایت هیدرولیکی، ضریب تخلخل، تغذیه ناشی از بارندگی و تخلیه توسّط زهکش اصلی آبخوان (رود شور) به‌طور مرتّب تغییر داده شده تا اینکه تراز سطح ایستابی محاسبه شده توسّط مدل با تراز سطح ایستابی اندازه‌گیری شده، حدّاکثر انطباق را پیدا کنند. در این شرایط پارامترهای تثبیت شده، به عنوان مبنا برای واسنجی در حالت ناپایدار در نظر گفته می‌شود. در واسنجی در حالت ناپایدار عوامل تغذیه و تخلیه به روش سعی و خطا تغییر داده می‌شود و مدل اجرا می‌گردد تا این‌که حدّاکثر انطباق بین سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل گردد. با توجّه به وجود ۳۳ دوره تنش، ۶۶ درصد آن‌ها (۲۲ دوره) جهت واسنجی (خرداد ۷۱ تا اردیبهشت ۸۲) و ۱۱ دوره نیز با هدف صحّت سنجی[2] (خرداد ۸۲ تا آبان ۸۷) انتخاب شد. جهت تحلیل کمّی این مقایسات، معیارهای سنجش خطا شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[3])، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NMSE[4])، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MAPE[5]) و ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط (۱) تا (۵) به ترتیب جهت محاسبه پارامترهای فوق مورد استفاده قرار می‌گیرد. شایان توجّه می‌باشد که دو روش سعی و خطا و خودکار برای واسنجی وجود دارد. طبق مطالعات به‌عمل آمده روش سعی وخطا نسبت به روش خودکار که در مدل MODFLOW به روش Pest معروف است دارای ارجحیّت می‌باشد، زیرا با تغییر مکرّر پارامترهای ورودی، مدل و ارزیابی اثر این تغییرات، به درک بهتری از وضعیّت حاکم بر سامانه آبخوان کمک می‌نماید.

1. Saturated Zone

2. Verification
3. Root of Mean Square Error
4. Normalized Mean Square Error
5. Mean Absolute Percentage Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(X_t - \hat{X}_t\right)^2} \quad (۱)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{t=1}^{n}\left(X_t - \hat{X}_t\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(X_t - \hat{X}_t\right)^2} \quad (۲)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\frac{\left(\left|X_t - \hat{X}_t\right|\right)}{X_t} \quad (۳)$$

$$R^2 = \frac{b^2\sum\left(Y - \overline{X}\right)}{X_t} \quad (۴)$$

$$b = \frac{\sum\left(Y - \overline{Y}\right)\left(X - \overline{X}\right)}{\sum\left(X - \overline{X}\right)^2} \quad (۵)$$

در روابط فوق X_t ، $\hat{X}_t$ و $\overline{X}_t$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی شده و میانگین مقادیر مشاهداتی و b شیب خط رگرسیون می‌باشد که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود که در این رابطه Y و $\overline{Y}$ به ترتیب مقدار پیش‌بینی شده و میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و هم‌چنین X و $\overline{X}$ به ترتیب مقدار مشاهداتی و میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد (۱۱).

معادلات حاکم

مدل MODFLOW

معادله‌ای که مدل MODFLOW بر اساس آن در هر سلول شبکه عمل می‌کند رابطه (۶) بوده که در واقع توصیف کننده جریان آب زیرزمینی تحت شرایط غیرماندگار[1] در محیط ناهمگن و ناهم‌روند می‌باشد (۱۸).

(۶)

$$S\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right) + W$$

در این رابطه K_x ، K_y و K_z به‌ترتیب هدایت هیدرولیکی در امتداد محورهای مختصاتی x ، y و z بوده، h بار هیدرولیکی پتانسیومتری، S ذخیره ویژه آبخوان و W مبیّن میزان جریان حجمی بر واحد حجم بوده که نشان دهنده‌ی منابع افزایش دهنده و کاهش دهنده آب است.

اساس MODFLOW استفاده از روش تفاضل محدود می‌باشد که در واقع از معادله پیوستگی جریان ناشی می‌شود. با فرض ثابت بودن جرم مخصوص آب زیرزمینی، معادله‌ی پیوستگی برای نشان دادن بیلان جریان در یک سلول منفرد، طبق رابطه (۷) بیان می‌دارد که مجموع کلّ جریان‌های ورودی و خروجی یک سلول، مساوی با میزان تغییرات ذخیره‌ی آن می‌باشد.

$$\sum Q_i = S_3.\Delta h.\Delta V \quad (۷)$$

در این رابطه Q_i میزان جریان ورودی به سلول i ام، S_3 ذخیره ویژه موادّ متخلخل آبخوان (L^{-1})، Δh تغییر بار هیدرولیکی در طول زمان Δt و ΔV حجم سلول (L^3) می‌باشد. این معادله بر حسب جریان ورودی و افزایش ذخیره نوشته شده است، لذا برای جریان خروجی (تخلیه) به‌صورت جریان ورودی بیان می‌گردد تنها با این تفاوت که با علامت منفی نشان داده می‌شود (۶).

نتایج

با در اختیار داشتن سطح ایستابی در هشت نقطه متعلق به اسفند ۱۳۵۷ واسنجی در حالت پایدار صورت گرفته و بدین ترتیب پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان واسنجی گردید. در شکل‌های (۲) و (۳) تراز سطح ایستابی واسنجی شده به‌همراه موقعیت نقاط مشاهداتی و نمودار مقایسه تراز سطح ایستابی واقعی و تراز شبیه‌سازی شده نشان داده می‌شود.

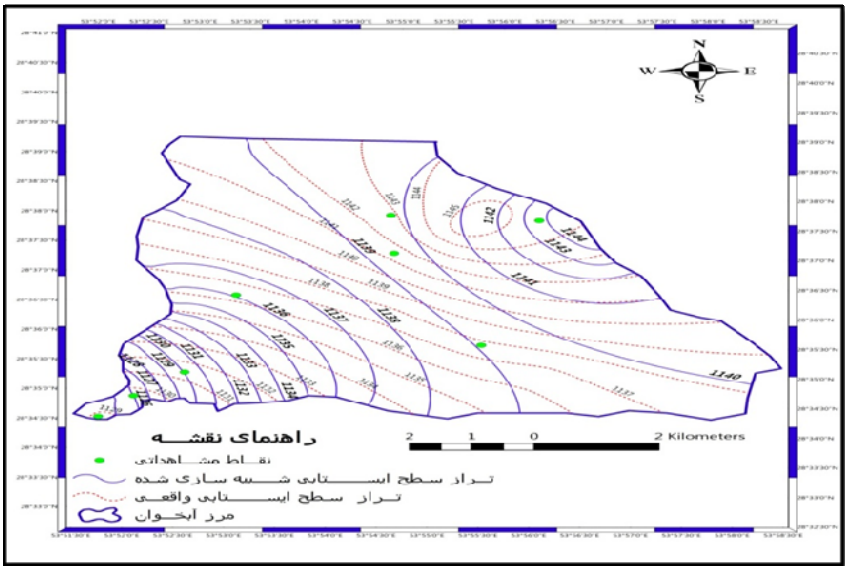
پس از تعیین دوره‌های تنش و گام‌های زمانی در هر سال، اقدام به واسنجی مدل در حالت ناپایدار نموده در این مرحله با توجّه به وجود آمار چهار پیزومتر واقع در سطح آبخوان از سال ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۷ و تقسیم‌بندی هر سال به دو دوره تنش خشک و مرطوب، ۳۳ دوره تنش حاصل شد که از این تعداد ۲۲ دوره جهت واسنجی و ۱۱ دوره نیز با هدف صحّت‌سنجی تفکیک گردید. در حالت ناپایدار تراز سطح ایستابی به ترتیب در ماه‌های مهر و فروردین به عنوان ترازهای مشاهداتی در هر دوره تنش لحاظ شده و واسنجی در حالت ناپایدار بر مبنای ترازهای فوق صورت گرفت. در این مرحله با تغییر مکرّر مقادیر تغذیه مصنوعی و تغذیه ناشی از بارش در سطح آبخوان و همچنین تغییر تخلیه حدّاکثر تا ۱۰ مقادیر اندازه گیری شده انطباق مناسب حاصل گردید. میزان این انطباق در قالب شکل (۴) و پارامترهای آماری مندرج در جدول (۱) برای هریک از پیزومترها ارائه شده است. با هدف ارزیابی واسنجی مدل، اقدام به صحّت‌سنجی مدل، طیّ ۱۱ دوره تنش نموده که دوره‌ها از خرداد ۱۳۸۲شروع و تا خرداد ۱۳۸۷ ادامه دارد. نتایج حاصل از این فرایند برای چهار چاه پیزومتری در شکل (۵) آمده است.

جهت تحلیل کمّی این مقایسه، معیارهای سنجش خطا شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NMSE)، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MAPE) و ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله صحّت‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مقایسات مندرج در جدول (۲) می‌باشد.

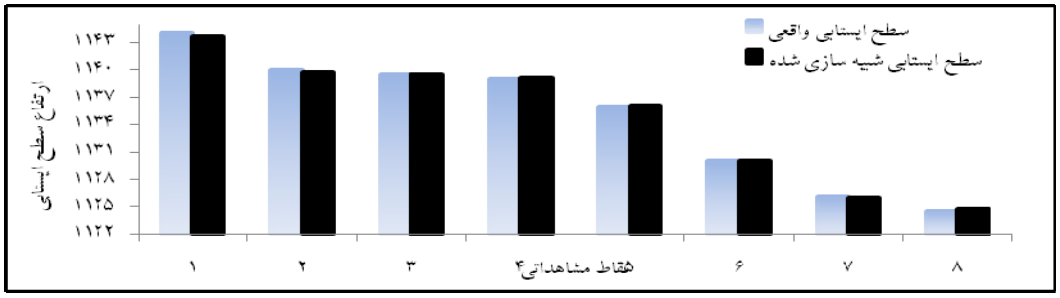
پیش‌بینی سطح ایستابی برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آتی (۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷)

به منظور ارزیابی مدیریت آبخوان در شرایط فعلی و پاسخ به این سوال اساسی که با روند کنونی برداشت، تغییرات سطح ایستابی طیّ ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آینده چگونه خواهد بود، گزینه تداوم روند فعلی برداشت از آبخوان اعمال گردید. نتایج حاصل از این پیش‌بینی به شکل هیدروگراف واحد و تراز سطح ایستابی برای سال‌های ۱۳۹۷، ۱۴۱۷ و ۱۴۳۷به ترتیب در شکل‌های (۶) تا (۱۱) آمده است.

1.Transient



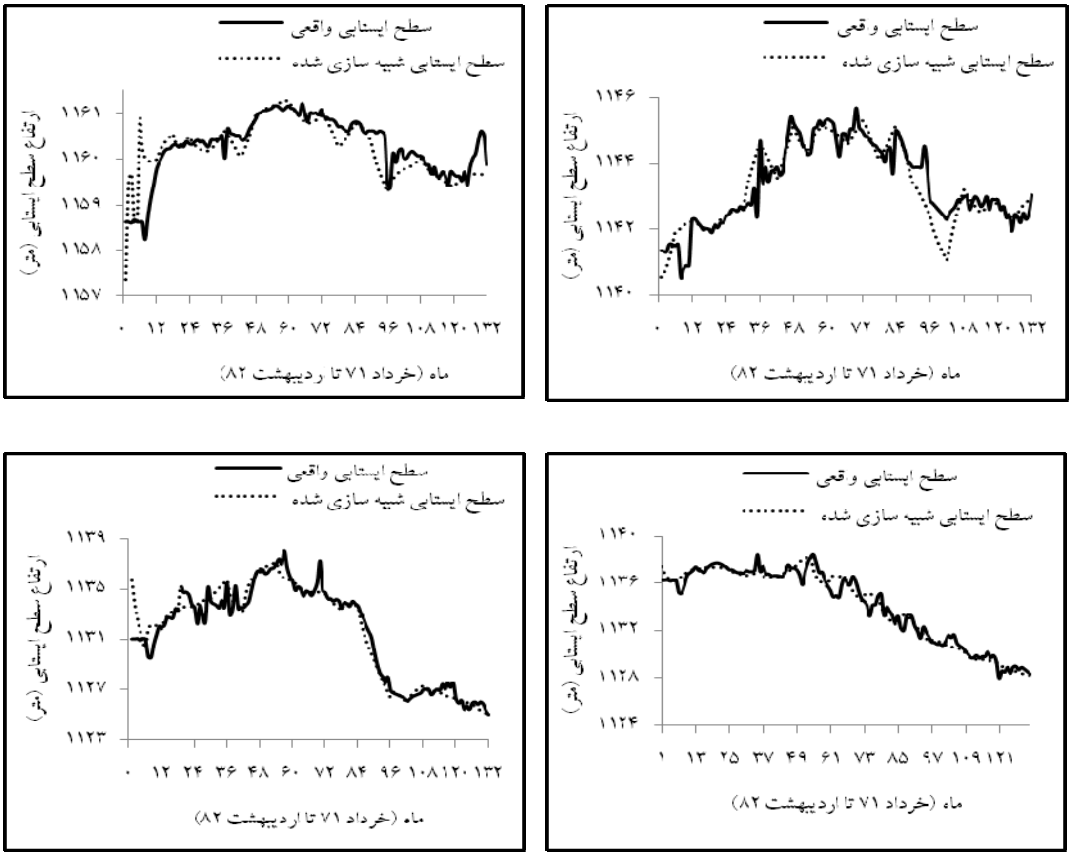
شکل ۲- تراز سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و واقعی به‌همراه موقعیّت نقاط مشاهداتی در حالت پایدار



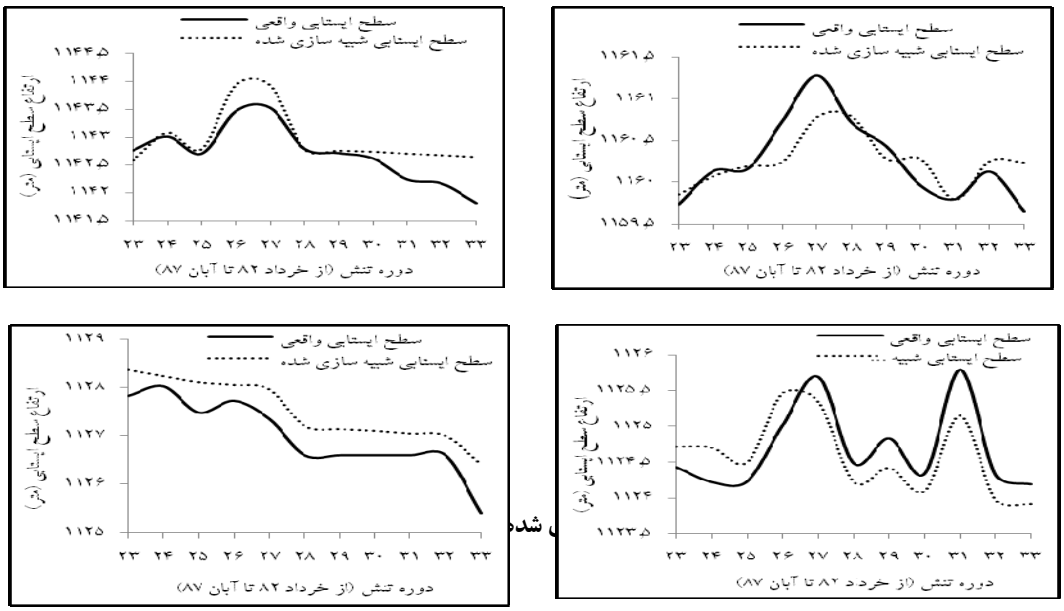
شکل ۳- تراز سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و واسنجی شده در حالت پایدار در نقاط مشاهداتی

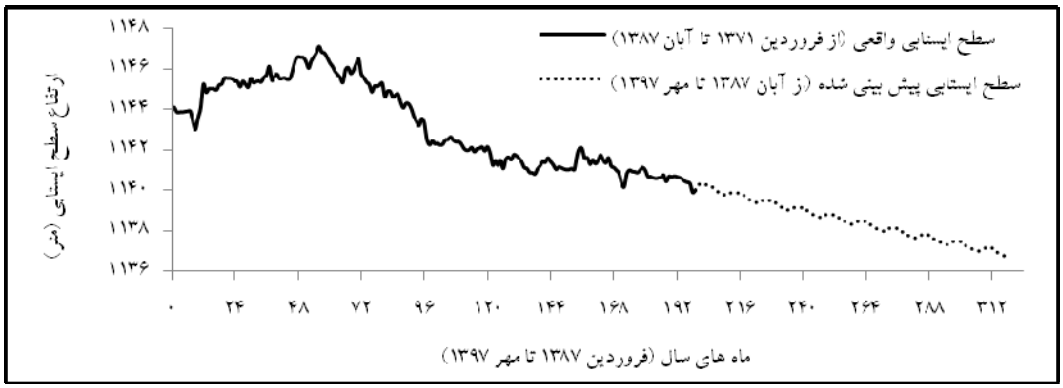
جدول ۲- معیارهای آماری مورد استفاده در ارزیابی میزان خطا در مرحله واسنجی ناپایدار و صحت سنجی برای چاه‌های پیزومتری

پارامترهای آماری	ریشه‌ی میانگین مربعات خطا		میانگین مربعات خطای نرمال شده		میانگین قدر مطلق خطای نسبی (درصد)		ضریب تعیین	
	واسنجی ناپایدار	صحت سنجی	واسنجی ناپایدار	صحت سنجی	واسنجی ناپایدار	صحت سنجی	واسنجی ناپایدار	صحت سنجی
پیزومتر شرق قلعه خرابه گربایگان	۰/۴۵۸	۰/۳۰۱	۰/۴۷۴	۰/۴	۳/۱۷	۰/۰۱۹	۰/۵۶۸	۰/۶۲۸
پیزومتر شمال رحیم آباد کنار رودخانه	۰/۵۴۲	۰/۳۸۴	۰/۱۹۳	۰/۶۰۹	۰/۰۳	۰/۰۴۷۸	۰/۸۱۸	۰/۶۸
پیزومتر رحیم آباد جاده چاه دولت	۰/۹۲۳	۰/۳۸۴	۰/۰۶	۰/۴۷۲	۰/۰۵۳	۰/۰۳۲۵	۰/۹۴۱	۰/۵۸۴
پیزومتر زیر پخش سیلاب گربایگان	۰/۶۵۸	۰/۵۶۷	۰/۰۴۴	۰/۵۹۱	۰/۰۴۲	۰/۰۴۷۲	۰/۹۵۷	۰/۹۴۶

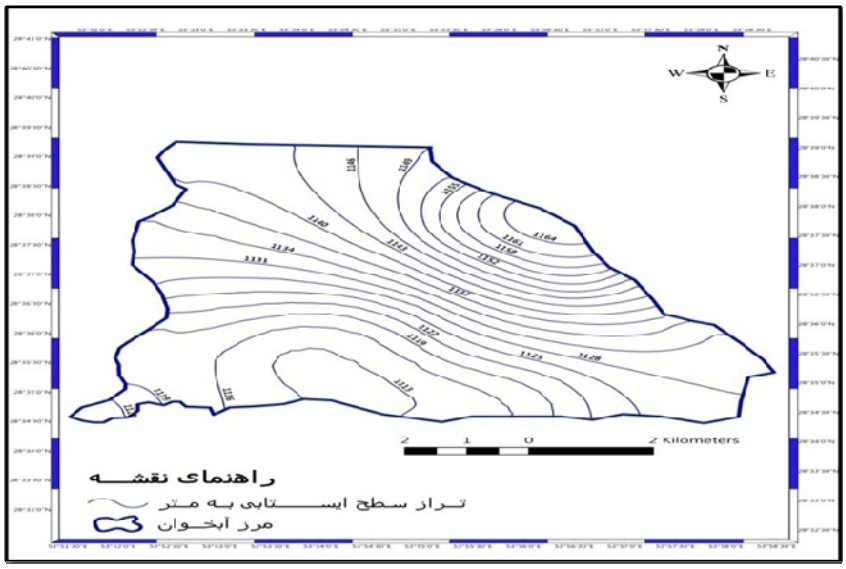


شکل٤- تراز سطح ایستابی واقعی و واسنجی شده در حالت ناپایدار برای چهار پیزومتر

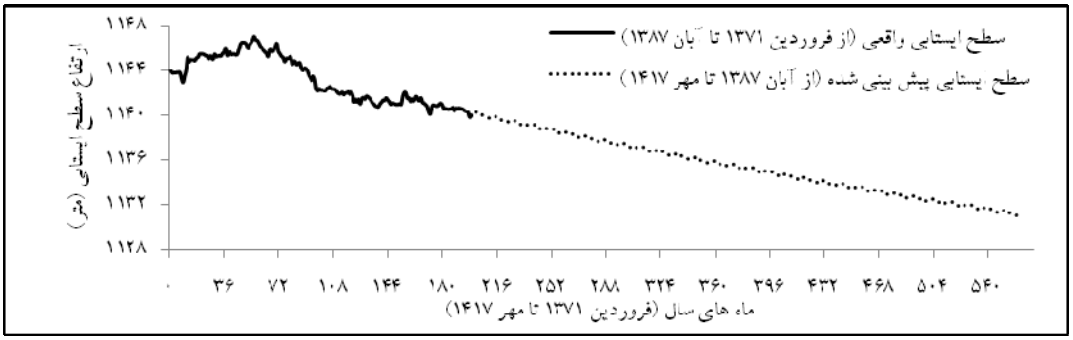




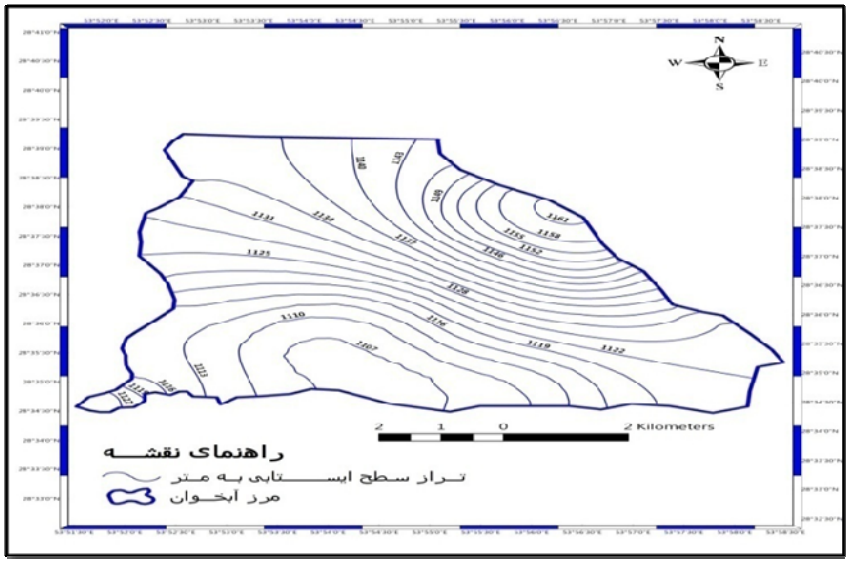
شکل٦- هیدروگراف واحد واقعی و پیش‌بینی شده برای ۱۰ سال آتی در صورت ادامه روند کنونی برداشت (آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۹۷)



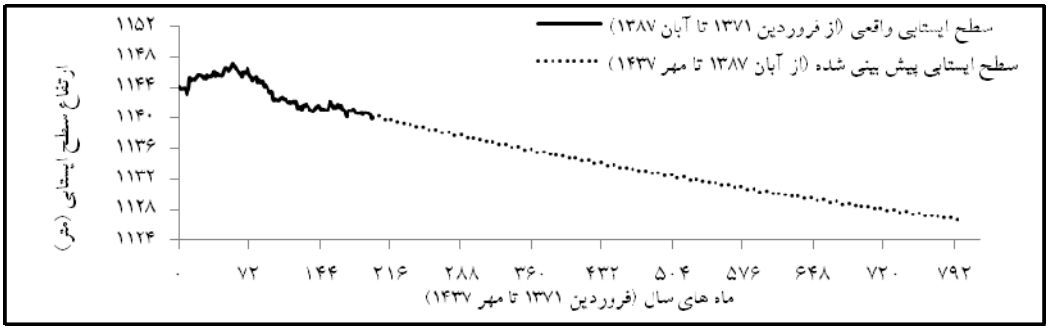
شکل۷- تراز سطح ایستابی پیش‌بینی شده برای سال ۱۳۹۷



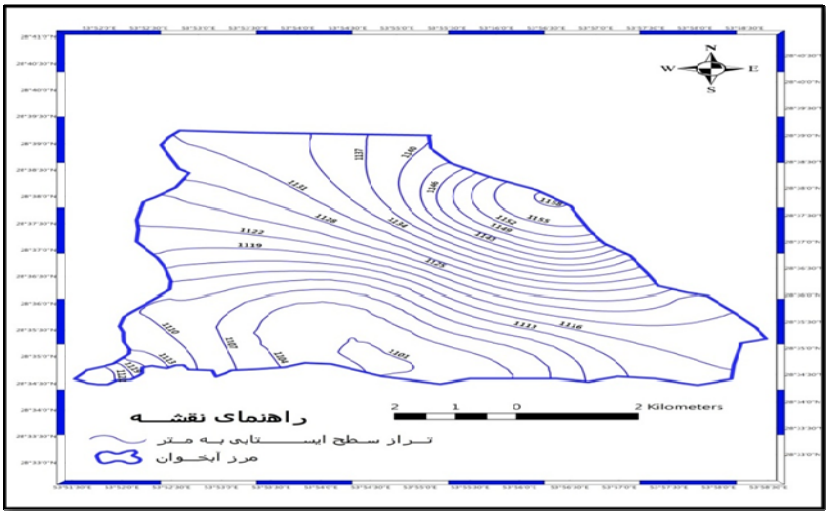
شکل ۸- هیدروگراف واحد واقعی و پیش‌بینی شده برای ۳۰ سال آتی در صورت ادامه روند کنونی برداشت (آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱٤۱۷)



شکل ۹- تراز سطح ایستابی پیش‌بینی شده برای سال ۱۴۱۷



شکل ۱۰- هیدروگراف واحد واقعی و پیش‌بینی شده برای ۵۰ سال آتی در صورت ادامه روند کنونی برداشت (آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۴۳۷)



شکل ۱۱- ارتفاع سطح ایستابی پیش‌بینی شده برای سال ۱۴۳۷

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی در حالت پایدار، ارائه شده در شکل (۳) مبین دقّت بالای شبیه سازی می‌باشد کـه ایـن امـر ناشـی از تخمین نسبتاً صحیح پارامتر های ورودی مدل و به طور مشـخّص ضرایب هیدرودینامیکی مـی باشـد. در ادامـه، واسـنجی در حالـت ناپایدار در طول ۲۲ دوره تنش انجـام شـد. در ایـن فراینـد تعـادل طبیعی به هم خورده آبخوان مورد شبیه سازی قرار گرفت. بواسطه وجود چهار چاه پیزومتری در سطح آبخوان، مـدل بـرای ایـن دوره واسنجی شد، نتایج حاصله (شکل ۴) نشان می‌دهد که واسنجی بـا صحّت بسیار بالایی صورت گرفته است. پارامترهای آمـاری مـورد بررسی نیز مؤید این مسئله می‌باشد به طوری‌که براسـاس جـدول (۲) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۰/۰۴۲ تا ۰/۱۲ تغییر می‌یابد. این امر احتمالاً ناشی از وجود جریان هـای زیرزمینـی[1] در این بخش می باشد که واسنجی دقیق را در این ناحیه تحت تـأثیر قرار داده است. در این راستا سرور و اگرس[2] (۱۶) نیز صحّت پایین شبیه‌سازی سطح ایستابی توسط مـدل FEFLOW در چـاه‌هـای پیزومتری واقع در مرزهای فاقـد جریـان حـوزه آبخیـز اینـدوس[3] پاکستان را مورد تأکید قرار داده‌اند. تداوم روند کنونی مـدیریت بـر آبخوان در مدل اعمال گردید و سطح ایستابی، افت و هیـدروگراف معرّف آبخوان برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آینده پیش‌بینی شـد. نتـایج حاصل از اعمال این سناریو در شکل‌های(۶) تـا (۱۱) آمـده اسـت. مطـابق بـا آخـرین سـال آمـاربـرداری (۱۳۸۷)، میـزان بهره‌برداری سالیانه توسّط چاه‌ها مستخرج از مـدل، ۷۳/۵ میلیـون مترمکعب می‌باشد. در صورت تداوم برداشـت بـه میـزان کنـونی و لحاظ متوسّط بارش طولانی مـدّت جهـت محاسـبه میـزان تغذیـه (طبیعی و مصنوعی)، افـت سـطح ایسـتابی در ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سـال آتی در بخش‌های مختلف آبخـوان، بـه میـزان قابـل ملاحظـه‌ای استمرار می‌یابد. به‌طوری که متوسط سطح ایسـتابی در سـال‌هـای ۱۳۹۷، ۱۴۱۷ و ۱۴۳۷ در مقایسه با سال ۱۳۸۷در محدوده احـداث سامانه پخش سیلاب (شمال شرقی)، بـه ترتیـب بـه مقـدار ۴/۱۳، ۸/۳ و ۱۲/۲۶ متر دچار افت می‌شود. در مناطق مرکـزی و جنـوبی آبخوان، میزان افت افزایش یافته و در ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آینده بـه ترتیب به ۴/۱۷، ۱۰/۷۱ و ۱۶/۰۷ متر می‌رسـد. بـا بررسـی توزیـع مکانی چاه‌های بهره‌برداری، می‌توان دریافت تراکم زیاد چاه‌هـا بـه دلیل آبدهی بالا و کیفیّـت مناسـب آب در بخـش‌هـای مرکـزی و جنوبی آبخوان و فاصله بیشتر ایـن ناحیـه از محـل پـروژه پخـش سـیلاب، افـت شـدیدی را سـبب شـده اسـت کـه بـا یافتـه‌هـای فاتحی‌مرج (۲)، کتیبه و حافظی (۵) در آبخوان آب باریک کرمـان، فضل‌اولی و همکاران (۳) در دشت موسیان استان ایلام، امبسـت و همکاران[4] (۹) در دشت تارنز ایندو-گانجتیک[5] هم‌خوان مـی‌باشـد.

با استخراج شیب افت هیدروگراف واحد بـرای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سـال آینده، به ترتیب به میـزان ۰/۳۳۱، ۰/۲۹۸ و ۰/۲۷ متـر بـر سـال، می‌توان دریافت با افـزایش دوره پـیش‌بینـی شـیب افـت کـاهش می‌یابد. به نظـر مـی‌رسـد دلیـل ایـن موضـوع ناشـی از وضـعیّت خشکسالی سال‌های اخیر (۸۵، ۸۶ و ۸۷) بوده، حـال آن‌کـه بـرای پیش‌بینی ضریبی از مقدار متوسّط بارش در مدل اعمال شـده کـه این امر باعث تعدیل شدّت افت در پیش‌بینی‌هـای طـولانی مـدّت شده است. بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده تداوم مـدیریت فعلـی حاکم، افت شدیدی را در دوره‌های مختلف رقـم مـی‌زنـد. بـا ایـن تفاسیر برای تـداوم بهـره‌بـرداری از آبخـوان مـذکور، خصوصـاً در خشکسالی‌ها، گزینه‌های دیگر مدیریتی باید مورد توجّه قرار بگیرد.

منابع

۱. عطـایی‌زاده، س. و م. چیـت‌سـازان. ۱۳۸۸. بررسـی تـأثیر خشکسـالی بـر کـاهش کمّـی آبهـای زیرزمینـی دشـت میـداود بـا اسـتفاده از مـدل ریاضـی. مجموعـه مقـالات دومـین همـایش ملّـی اثـرات خشکسـالی و راهکـارهـای مـدیریت آن، مرکـز تحقیقـات کشـاورزی و منـابع طبیعـی اصـفهان و سـتاد حوادث غیر مترقبه استانداری اصفهان، اصفهان.

۲. فـاتحی مـرج، ا. ۱۳۸۱. ارزیـابی تغذیـه مصـنوعی بـه‌وسـیله پخـش سـیلاب بـا اسـتفاده از مـدل ریاضـی در دشـت آب باریـک بـم (اسـتان کرمـان). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۳۶صفحه.

۳. فضل اولی، ر.، شریفی، ف. و ع. بهنیا. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر پخش سیلاب در تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت موسیان (استان ایلام). مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۹، شماره یک، صفحات۷۴-۵۴.

۴. قهاری، غ. و م. پاکپرور. ۱۳۸۶. بررسـی تـأثیر پخـش سـیلاب بـر منـابع آب زیرزمینـی دشـت گربایگـان. فصـلنامه علمـی- پژوهشـی تحقیقـات مرتـع و بیابان ایران، جلد ۱۴، شماره سه، صفحات ۳۹۰-۳۶۸.

1. Inflow
2. Sarwar and Eggers
3. Indus
4. Ambast et al.
5. Trans Indo-Gangetic

۵. کتیبه، ه. و س. حافظی.۱۳۸۳. بکارگیری مدل Modflow مدیریت بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی و ارزیابی عملکرد طرح تغذیه مصنوعی دشت آب باریک بم. مجله آب و فاضلاب، جلد ۱۵، شماره دو، صفحات ۵۸-۴۵.

۶. کرسیک، ن. ۱۳۸۱. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی. ترجمه منوچهر چیت سازان و حیدرعلی کشکولی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ اول، ۶۸۰ صفحه.

۷.کوثر، س. آ. ۱۳۷۴. مقدمه‌ای بر مهار سیلاب و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها: آبیاری سیلابی، تغذیه مصنوعی، بندهای کوتاه خاکی. انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، تهران، ۵۲۲ صفحه.

۸. مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۳۷۵. طرح توسعه ایستگاه تحقیقات کوثر. جلد سوّم، مطالعات اولیه شناخت، گزارشهای زیست محیطی، آبهای زیرزمینی، کنترل سیلاب و مهندسی رودخانه و تلفیق و ارائه راه‌حلها، ۲۰۵ صفحه.

9. Ambast, S. K., Tyagi, N. K. and S. K. Raul. 2006. Management of declining groundwater in the Trans Indo-Gangetic plain (India): Some options. Agricultural Water Management, 82: 279–296.

10. Holman, I. P., Tascone, D. and T. M. Hess. 2009. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia, UK: Implications for groundwater resource management. Hydrogeology Journal. 17: 1629-1641.

11. Jain, A. and S. K.V.P. Indurthy. 2003. Comparative analysis of event based rainfall-runoff modeling technique-deterministic, statistical and artificial neural networks. Journal of Hydrologic Engineering, 8(2) 459-471.

12. Mc Donald, N. and A. Harbaugh. 1998. A modular 3D finite difference ground water flow model. USGS.

13. Pinder, G. F. 2002. Groundwater modeling using geographical information systems. John wiley and sons Inc, New York, 1st Edition, 636pp.

14. Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V. A. and E. Zagana. 2007. A groundwater flow model for water resources management in the Ismarida plain. North Greece, Environmental Modeling and Assessment, 12: 75-89.

15. Sen, Z. 2008. Wadi hydrology. CRC Press, 1st Edition, 347pp.

16. Sarwar, A., Eggers, H. 2006. Development of conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources. Hydrogeology Journal, 14: 1676-1687.

17. Todd, D. K. and L.W. Mays. 2005. Groundwater hydrology. John wiley and sons Inc, New York, 3rd Edition, 636pp.

18. UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme). 2003. UN world water development report:Water for people water for life. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books, Paris, New York and Oxford.

19. Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. and X. Zhou. 2008. Application of MODFLOW and geographical information system to groundwater flow simulation in North plain, China. Environ Geol, 55: 1449-1462.