

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان شهداد

محمدباقر رهنما<sup>۱\*</sup>، ندا سهرابی<sup>۲</sup>، غلامعباس بارانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۹

چکیده

شبیه‌سازی عددی نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی ابزاری کارآمد جهت مدیریت منابع آب است. در این پژوهش تغییرات سطح ایستایی آبخوان شهداد در استان کرمان با استفاده از نرم‌افزار GMS و مدل MODFLOW شبیه‌سازی و موردبررسی قرار گرفت و تغییرات سطح ایستایی آبخوان بیانگر افت سطح ایستایی در قسمت شمال، شرق، جنوب و قسمتی از نواحی مرکزی آبخوان است. برای واسنجی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده ماهانه تراز آب در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ و برای صحت‌سنجی از آمار ماهانه سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۵ استفاده شد. تخمین پارامترهای آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و میزان تغذیه با روش مدل‌سازی معکوس و استفاده از کد PEST انجام پذیرفت. مقدار ضریب تبیین در مرحله صحت‌سنجی، برای مدل ۰/۹۵ به دست آمد که بیانگر انطباق قابل‌قبول داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در دوره صحت‌سنجی و قابلیت مدل در پیش‌بینی تغییرات سطح ایستایی آبخوان است. با انجام آنالیز حساسیت، مشخص شد مدل نسبت به پارامتر دبی خروجی از چاه‌های بهره‌برداری بیش از تغذیه سطحی و ضریب هدایت هیدرولیکی حساسیت دارد و جهت کاهش افت سطح ایستایی لازم است میزان برداشت ماهانه از چاه‌های بهره‌برداری ۳۰ درصد کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان شهداد، دشت شهداد، شبیه‌سازی، نرم‌افزار GMS

مقدمه

آبخوان‌های کشور نشان می‌دهد که میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی بیشتر از میزان تغذیه آن‌ها بوده و باعث افت سطح آب در اکثر آبخوان‌ها شده است (محمد جانی و همکاران، ۱۳۹۳). به همین جهت برای جلوگیری از ادامه افت سطح ایستایی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل در مدیریت منابع آب قرار گیرد؛ بنابراین شناخت و عملکرد در بیشتر مسائل هیدرولوژیکی و مطالعات منابع آب زیرزمینی، در دسترس بودن آمار و اطلاعات این منابع از اهمیت بالایی برخوردار است و به‌منظور ارزیابی اثرات ناشی از توسعه در شرایط موجود و ارائه روش‌های مدیریتی بر منابع آب زیرزمینی، چه از نظر کمی و چه کیفی، شبیه‌سازی ریاضی و کامپیوتری این منابع، ابزاری قوی در بهره‌برداری بهینه از این منابع محسوب می‌گردد. یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای کنترل و مدیریت افت ایجادشده، استفاده از نرم‌افزار GMS و مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی MODFLOW است. این نرم‌افزار قابلیت تلفیق کد MODFLOW با GIS را دارد. این نرم‌افزار توسط سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا (USGS) در سال ۱۹۸۴ تهیه شده

آب زیرزمینی همواره به‌عنوان یک منبع تأمین آب شیرین جایگاه ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد. منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین بخش از آب‌های شیرین قابل‌استفاده و در دسترس بشر است. خشک‌سالی‌ها و کاهش بارش در سال‌های اخیر چرخه‌ی تجدیدپذیر آب‌های زیرزمینی را با مشکل مواجه ساخته است. دو عامل، افزایش سطح توقعات بشر و توسعه بخش کشاورزی، منجر به افت سطح آبخوان‌های آب زیرزمینی شده است. تحقیقات انجام‌شده در رابطه با

۱- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، پردیس دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(Email: mbr@uk.ac.ir)

\*- نویسنده مسئول:

برای حفر چاه‌های شرب جدید را شناسایی نمودند (عقلمند و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین جعفر زاده و همکاران، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل مفهومی بیلان دشت بیرجند پرداختند و در این پژوهش در ابتدا جهت بررسی پیامدهای کمی گرم شدن جهانی هوا، با استفاده از بهترین خروجی مدل‌های گردش عمومی اثر تغییر اقلیم بر بارش برآورد گردید و در ادامه به منظور تحلیل وضعیت کمی آبخوان دشت بیرجند، از مدل مفهومی بیلان استفاده شد و نتایج این مطالعه نشان داد که سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند در بازه مطالعه شده با روندی نزولی مواجه خواهد گردید (جعفر زاده و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین حسینی و همکاران، سطح آب زیرزمینی را با استفاده از یک شبکه عصبی الگوریتم ژنتیکی ترکیبی در دشت شبستر تخمین زدند و دریافتند که با استفاده از این الگوریتم می‌توان به بازسازی دوره‌های طولانی‌مدت از آمار مفقودشده پرداخت و سناریوهای آینده را شبیه‌سازی کرد (Hosseini et al., 2014). آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۶، باهدف جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی به تعیین میزان تغذیه آبخوان و انتخاب محل مناسب تغذیه پرداختند و مشخص شد در قسمت جنوب غرب دشت دامغان نوسانات سطح آب زیرزمینی کمتر است و به‌عنوان سایت مناسب جهت تغذیه آبخوان می‌توان در نظر گرفت (Ashtiani et al., 2016). همچنین بیات و همکاران، آبخوان بهار دشت همدان را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی آبخوان روند کاهش سطح آب زیرزمینی از بخش غرب به شرق آبخوان را نشان داد که همسو با گرادیان هیدرولیکی است (بیات و همکاران، ۱۳۹۶). غلامی و همکاران، با شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با نرم‌افزار GMS6.0 در آبخوان دشت ساری- نکا واقع در جنوب محدوده بهشهر- بندر گز پرداخته و نتایج بیلان آبی نشان داد که سطح آب زیرزمینی این آبخوان در حالت تعادل قرار دارد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۲). امینی و همکاران، با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی کمی در دو حالت پایدار و ناپایدار برای آبخوان دشت بابل-بابلسر انجام دادند و نتایج نشان داد که وضعیت دشت آبخوان بابل-بابلسر با شرایط روند برداشت در زمان این مطالعه دارای افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های آتی خواهد بود (امینی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین امیدنی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت برخوار اصفهان با استفاده از نرم‌افزار GMS پرداختند و نتایج مدل نشان‌دهنده افت سطح ایستابی در نواحی شمالی، غربی و برخی نواحی مرکزی دشت با ادامه روند برداشت در زمان مطالعه است (امیدنی و همکاران، ۲۰۱۶). بخت، سیستم هیدرولوژیکی آبخوان آزاد رفح در مصر را بررسی نمود. وی با استفاده از مدل MODFLOW به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی این آبخوان در دو حالت پایدار و ناپایدار پرداخت و پس از کالیبراسیون خودکار مدل با کد PEST در نرم‌افزار GMS، تغییرات شوری این آبخوان در اثر پیشروی آب‌شور دریا را با استفاده از مدل

است. این مدل جریان را به‌صورت سه‌بعدی و به روش تفاضل محدود برای حالت پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی می‌نماید (قدرتی و ثبانی، ۱۳۹۰). در ایران و جهان تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی تغییرات سطح ایستابی آبخوان‌ها و پیش‌بینی سطح آبخوان در دهه‌های آتی انجام شده است.

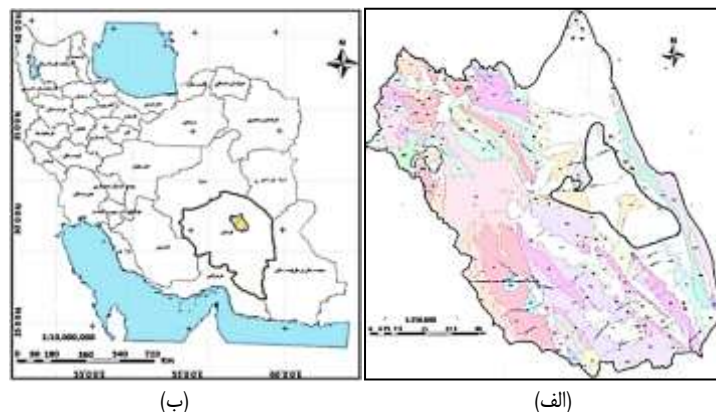
مدل وسیله‌ای جهت ارائه یک بیان تفهیمی یا ترسیمی از سیستم‌های فیزیکی با استفاده از معادلات ریاضی است. اگر به نحو مطلوبی تنظیم و ساخته شده باشد می‌تواند وسیله‌ای قابل قبول جهت پیش‌بینی‌های لازم به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از منابع آب در نظر گرفته شود (بربور و همکاران، ۲۰۰۸). امیری و همکاران به بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان راین در استان کرمان با نرم‌افزار PMWIN و مدل MODFLOW پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان، سطح ایستابی به تعادل می‌رسد (Amiri et al., 2019). پناهی و همکاران به بررسی شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی آبخوان زنجان در بازه زمانی ۱۵ ساله پرداختند و نقشه به‌دست‌آمده برای سطح آب زیرزمینی در سال‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده افت شدید سطح آب در نتیجه ادامه برداشت از سفره آب زیرزمینی این آبخوان است (Panahi et al., 2018). همچنین ذاکری و همکاران، آبخوان دشت زنجان را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی نمودند و نشان دادند که میزان تخلیه سالانه آب از این آبخوان بیشتر از ذخیره سالانه آب است و این امر نشان‌دهنده برداشت بی‌رویه از آبخوان و استفاده از ذخیره آب موجود در آن است که با ادامه این روند آبخوان دشت به‌طور کامل نابود خواهد شد و تراز محاسبه‌شده توسط مدل نشان‌دهنده حرکت آب‌های زیرزمینی در جهت شیب غالب منطقه است (ذاکری و همکاران، ۱۳۹۶). هاشمی و همکاران در سال ۱۳۹۱، جریان آب زیرزمینی در شبکه آبیاری و زهکشی شهرستان البرز را مدل‌سازی نمودند و اثرات احداث شبکه آبیاری و زهکشی بر رفتار آب‌های زیرزمینی منطقه و ارزیابی شاخص‌هایی جهت توسعه و بهره‌برداری پایدار مورد ارزیابی قرار دادند (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۱). قبادیان و همکاران، تأثیر احداث شبکه آبیاری و زهکشی سد گاوشان بر منابع آب زیرزمینی دشت میان دربند استان کرمانشاه را با استفاده از نرم‌افزار GMS بررسی نمودند و نتایج نشان‌دهنده افزایش سطح آب زیرزمینی ۱/۸ متر پس از یک سال، ۳/۲ متر برای پنج سال و ۵/۲ متر پس از ده سال بود که با اجرای این طرح در آینده اراضی زه دار، می‌شود (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۳). عقلمند و همکاران، مطالعه کاربرد بر روی آبخوان بیرجند انجام دادند و با مدل MODFLOW آبخوان مورد نظر را تجزیه و تحلیل نمودند و به این نتیجه رسیدند که با بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی و مطالعه جامع منابع آب منطقه، راهکارهای مناسب موجب پیشرفت منطقه و بهره‌برداری بهینه از منابع آب می‌شود (Aghlmand et al., 2019). در پژوهشی دیگر عقلمند و همکاران، با استفاده از نرم‌افزار GMS محدوده‌های مستعد

کاهش ۵۰ درصدی برداشت آب، نقش مهمی در کاهش فرونشست زمین این دشت دارد (Chitsazan et al. 2020). در تحقیق حاضر آبخوان شهداد که در محدوده مطالعاتی دشت شهداد قرار دارد و به دلیل تحقیقات محدود در این منطقه، این آبخوان انتخاب شد و با استفاده از نرم‌افزار GMS و مدل MODFLOW تغییرات سطح ایستایی آبخوان شهداد شبیه‌سازی شد و تغییرات سطح ایستایی در قسمت‌های مختلف آبخوان بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات سطح آب به مدت ۱۰ سال پس از زمان شبیه‌سازی پیش‌بینی شد.

### منطقه مورد مطالعه

دشت شهداد زیر حوضه غرب کویر لوت است. وسعت کل محدوده مطالعاتی شهداد ۵۵۴۵ کیلومتر مربع است و دشت شهداد دارای چندین آبخوان از جمله آبخوان‌های شهداد، دشتک کوهپایه، دره آبرفتی چهار فرسخ-اندوهجرد و در مرحله بعدی پهنه بسیار کوچکی بنام جوشان، هست و با توجه به اطلاعات ثبت‌شده، موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی منطقه و وسعت آن و قرار گرفتن بخشی از دو رودخانه شهداد و اندوهجرد در آبخوان شهداد، این آبخوان جهت مطالعه انتخاب شد. آبخوان شهداد در سیستم U.T.M در زون ۴۰ کره زمین واقع شده و در محدوده طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی قرار دارد. محدوده انتخابی آبخوان شهداد به وسعت ۴۷۲ کیلومتر مربع بوده و ارتفاع آن از سطح دریا از ۲۷۰ تا ۴۴۰ متر متغیر است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت شهداد در کشور ایران و استان کرمان و محدوده مطالعاتی آبخوان شهداد در این دشت نشان داده شده است.

MT3DMS شبیه‌سازی نمود. نتایج این مطالعه حاکی از افت سطح ایستایی این آبخوان از ۱/۹ تا ۸/۴ متر است (Bakhit, 2015). یاوتی و همکاران، به شبیه‌سازی آبخوان Bou-Areg در مراکش با استفاده از مدل MODFLOW پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که نوسانات سطح ایستایی در طول دوره شبیه‌سازی ۱۶ ساله وابسته به تغییرات فصلی میزان تغذیه، ناشی از بارش و نفوذ آبیاری به این آبخوان است و در این پژوهش واکنش سیستم آبخوان تحت شرایط مختلف را با تعریف سناریوهای مختلف پیش‌بینی نمودند (Yaouti et al., 2008). سوپیز و همکاران با مطالعه آبخوان حوزه کریتس در چاینا، کریت-یونان، به بررسی خصوصیات آبخوان از جمله هدایت هیدرولیکی آبخوان پرداختند و راه‌های مناسب مدیریت آب‌های زیرزمینی را در منطقه شناسایی و ارائه نمودند (Soupios et al., 2007). انصاری فر و همکاران، با ترکیب تفسیر داده‌های گمانه‌ای و روش حل معکوس، میزان هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه آبخوان بندر گز در شمال ایران به علت عدم دسترسی به داده‌های پمپاژ در منطقه تخمین زدند و الگوی توزیع مکانی مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه آبخوان حاکی از کاهش در جهت جنوب به شمال آبخوان داشت و این نتیجه همخوانی مناسب با رسوبات و دانه‌بندی آبخوان داشت (Ansarifar et al., 2020). میر احمدی به منظور ارزیابی اثر احداث سد زیرزمینی بر تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان زیر حوضه سد زیرزمینی راور با استفاده از مدل ریاضی GMS برای یک دوره چهارده ساله از ابتدا سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵، پرداخت و در نهایت مدل صحت‌سنجی شده برای پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان با در نظر گرفتن سناریوهای پیش‌بینی مختلف، به مدت چهار سال (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) انجام شد (میر احمدی، ۱۳۹۷). چیت‌سازان و همکاران، مطالعه موردی بر روی دشت دامنه‌داران در غرب استان اصفهان انجام دادند و با بررسی تغییرات سطح ایستایی آبخوان به این نتیجه رسیدند که



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت شهداد در استان کرمان (الف) و آبخوان شهداد در دشت شهداد استان کرمان (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۷)

مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۲).

### شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان با نرم‌افزار GMS

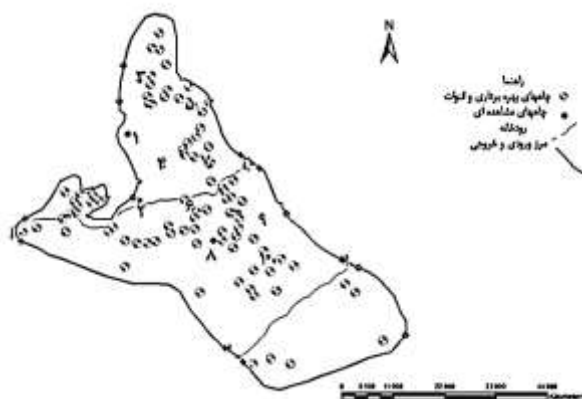
در این تحقیق برای شبیه‌سازی آبخوان شهداد از کد MODFLOW در بسته نرم‌افزاری GMS استفاده شده است. معادله حاکم بر جریان در محیط متخلخل اشباع با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} [Kxx \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [Kyy \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [Kzz \frac{\partial h}{\partial z}] - W = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $Kxx$ ،  $Kyy$  و  $Kzz$  ضرایب هیدرولیکی در راستاهای  $x$ ،  $y$ ،  $z$  برحسب واحد طول بر زمان،  $W$  میزان تخلیه برحسب حجم،  $h$  سطح آب برحسب واحد طول،  $Ss$  ذخیره ویژه مواد متخلخل و  $t$  زمان است. معادله (۱) جریان آب زیرزمینی را در شرایط غیر متعادل در یک محیط غیر همگن و تحت شرایط ناپایدار در راستای محورهای اصلی توصیف می‌کند. همچنین مشخصات جریان یا شرایط مرزهای یک سیستم آبخوان و مشخصات شرایط سطح اولیه سیستم جریان آب زیرزمینی را به صورت ریاضی نشان می‌دهد. در جریان‌های پایدار سمت راست رابطه (۱) برابر صفر خواهد بود (قدرتی و همکاران، ۱۳۹۵). اولین گام در مدل‌سازی توصیف مدل مفهومی است (خیاط خلقی، ۱۳۸۱). در ابتدا داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی و هیدرولوژیکی گزارشات پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد مورد بازبینی قرار گرفت و پس از بازسازی و اصلاح آمار موردنیاز شبیه‌سازی با نرم‌افزار SPSS و EXCEL، از طریق سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS (Shape file) به محیط مدل منتقل شدند. این داده‌ها شامل تعیین مرز آبخوان، تراز ارتفاعی سنگ کف، تراز ارتفاعی سطح زمین، چاه‌های بهره‌برداری، قنوات، چشمه‌ها، رودخانه‌ها، چاه‌های مشاهده‌ای، لایه قابلیت انتقال و لایه تغذیه سطحی است و سپس داده‌های GIS به مدل مفهومی تبدیل می‌شوند. جهت تعیین رقوم ارتفاعی سنگ کف از اطلاعات ثبت شده مطالعات ژئوالکترونیک آبخوان و چاه‌های عمیق موجود در منطقه مورد مطالعه، نقشه رقوم کف آبخوان تهیه شد و از آنجائی که داده‌های موجود پراکنده می‌باشند، با درون‌یابی مقادیر پارامتر برای هر سلول محاسبه شد. آمار چاه‌های مشاهده‌ای در این منطقه به صورت ماهیانه برداشت و ثبت شده بود که این اعداد اصلاح و اعداد اشتباه حذف شدند و پس از بازسازی مورد استفاده قرار گرفتند همچنین آمار قنوات، چشمه‌ها و چاه‌های بهره‌برداری مورد بازبینی و بازسازی آماری قرار گرفته است. در این منطقه بیشترین کاربرد چاه‌های بهره‌برداری مربوط به بخش کشاورزی و پس از آن شرب است. در ادامه جهت شبیه‌سازی آبخوان شهداد مدل مفهومی ایجاد و تمامی اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی از طریق پوشش‌ها به مدل داده شد. در این مدل‌سازی پوشش‌هایی که با توجه به شرایط آبخوان ایجاد شد، شامل شرایط مرزی، هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، چاه‌های مشاهده‌ای و

دشت شهداد از لحاظ اقلیم هواشناسی جز مناطق کویری با درجه حرارت بالا (گرم و خشک) است. میزان بارندگی سالانه در این دشت ۱۰۲ میلی‌متر و در مناطق پست کویر شهداد که آبخوان شهداد در این قسمت قرار گرفته است، ۴۰ میلی‌متر است. بیشترین میزان بارندگی در ماه‌های آذر لغایت اردیبهشت و کمترین مقدار آن در دی‌گرم ماه‌های سال یعنی ماه‌های خرداد تا آبان است. همچنین متوسط دمای درازمدت سالیانه و متوسط تبخیر در این منطقه به ترتیب برابر ۳۰٫۸ درجه سانتی‌گراد و ۳۲۴۶ میلی‌متر است (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۶-۱۳۹۵). قسمت‌های غرب و شمال غرب دشت شهداد که در واقع ارتفاعات نواحی شرقی و شمال شرق شهرستان کرمان است، عامل اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی دشت شهداد به حساب می‌آید. مهم‌ترین رودخانه‌هایی که در این محدوده مطالعاتی جریان دارند، رودخانه‌های شهداد و اندوهجرد می‌باشد. در این محدوده مطالعاتی مسیل‌های فصلی زیادی وجود دارد که هر یک به‌طور مجزا وارد کفه تبخیری کویر لوت می‌شود. به‌طور کلی کلیه مسیل‌ها و رودخانه موجود در این محدوده مطالعاتی پس از طی مسیری در جهت شرق وارد پهنه تبخیری کویر لوت می‌شوند (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۷). رودخانه شهداد از رودخانه‌های منفرد حوزه آبریز کویر لوت است که از ارتفاعات بلند پلوار واقع در شرق کرمان سرچشمه گرفته و به کویر لوت ختم می‌شود و در شهرستان شهداد جاری است. شاخه اصلی آن از دامنه کوه ۵۷۷۳ متری باغ بالا واقع در ۲۳ کیلومتری شمال کرمان سرچشمه می‌گیرد و در بستری از غرب به شرق جریان می‌یابد و روستاهای درب آسیاب، حجت‌آباد و علی‌آباد را مشروب نموده و وارد دهستان تیززین می‌شود. با دوشاخه دیگر از روستای شریف‌آباد و دره صعب‌العبوری می‌گذرد. سرانجام در حوالی روستای باقوک وارد دشت شهداد می‌گردد. رودخانه شهداد در این منطقه دوشاخه کوچک دیگر خود را به نام‌های خرشگی و جفتان را ضمیمه نموده و وارد شهر شهداد می‌شود. پس از عبور از این شهر در ریگزارهای شرقی آن وارد کویر لوت می‌شود. این رودخانه دارای آب دائمی است (رستمی و همکاران، ۲۰۱۵). رودخانه اندوهجرد، در جنوب دشت شهداد جاری است و قسمت انتها آب‌های شمالی کوه‌های عظیم پلوار را جمع‌آوری و پس از مشروب نمودن مناطق اطراف مسیر وارد کویر لوت می‌نماید. از تلاقی دوشاخه کوچک خود به نام‌های جنت‌آباد و دهن‌دورودی در غرب دهستان سیرچ تشکیل می‌شود. پس از جریان در جهت شرق و مشروب نمودن دهستان سیرچ شاخه‌ای به نام بندرجوشان و هشتادان را دریافت می‌نماید. از مسیر کوهستانی خارج شده و وارد زمین‌های جنوبی شهداد می‌گردد. اراضی روستاهای اندوهجرد، پیرغیب هنزا و اکبرآباد را مشروب و سپس وارد کویر لوت می‌شود (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده

رسم خطوط هم‌پتانسیل و هم عمق آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار Surfer، تغییرات لازم در مرزها اعمال و شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه انجام شد. مرزهای ورودی آبخوان، در قسمت شمال و شمال غرب و مرزهای خروجی نیز در سمت شرق این آبخوان قرار دارد. پس از اینکه مدل مفهومی با ایجاد شبکه‌ای به ابعاد  $153 \times 159$  سلول که اندازه ابعاد هر سلول  $250 \times 250$  متر مربع است، آبخوان موردنظر در یک لایه تهیه گردید که نتیجه آن ایجاد  $7838$  سلول فعال برای آبخوان بود. شکل ۲ نمائی از شبکه‌بندی منطقه را در مختصات UTM نمایش می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت آبخوان شه‌داد به همراه مرزهای ورودی و خروجی، رودخانه‌ها، چاه‌های مشاهده‌ای (با شماره جانمایی شده‌اند) و چاه‌های بهره‌برداری در نرم‌افزار GMS

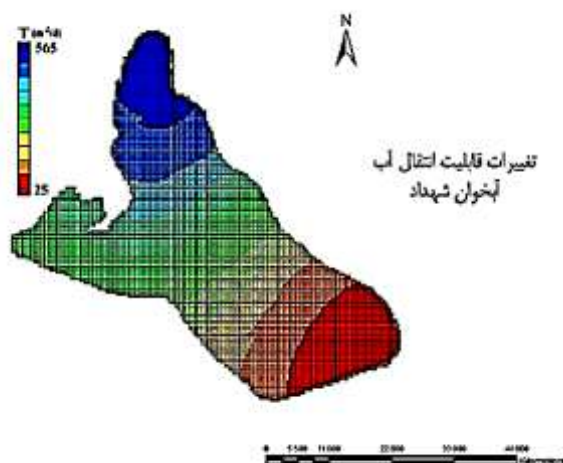
زمین‌شناسی حاکم بر منطقه از نظر خصوصیات دانه‌بندی ذرات نهشته شده و میزان هدایت هیدرولیکی دارای شرایط متفاوتی می‌باشند و همین تفاوت در پارامترهای مذکور موجب شده تا ضریب قابلیت انتقال (T) در محدوده آبخوان از طیف گسترده‌ای برخوردار باشد به‌طور کلی در محدوده آبخوان شه‌داد بازه متفاوتی از قابلیت انتقال مشاهده می‌شود. به این جهت پوشش ضرایب قابلیت انتقال آبخوان، با استفاده از داده‌های مطالعات منابع آب زیرزمینی دشت شه‌داد نقاط به‌صورت پراکنده به مدل وارد و سپس با درون‌یابی لایه رستری مقاومت عرضی کل آبخوان حاصل شد. مطابق شکل ۳، نقشه قابلیت انتقال در این نرم‌افزار ایجاد شد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است در بخش‌های شمالی آبخوان ضریب قابلیت انتقال در حدود  $560$  متر مربع در روز، در بخش‌های غربی و قسمتی از بخش مرکزی آبخوان در حدود  $300$  متر مربع در روز و در بخش‌های جنوبی و در نزدیکی رودخانه اندوهجرد، با توجه به وجود رسوبات ریز تر، ضریب قابلیت انتقال در حدود  $25$  متر مربع در روز است.

بهره‌برداری، تغذیه آبخوان، ضریب ویژه آبخوان و موقعیت رودخانه‌ها بود. دشت شه‌داد دارای  $199$  چاه بهره‌برداری،  $83$  قنات و  $27$  چشمه است و در محدوده آبخوان شه‌داد ده چاه مشاهده‌ای وجود دارد و تعداد چاه‌های بهره‌برداری که در محدوده این آبخوان قرار گرفته است،  $65$  چاه است (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شه‌داد،  $1397$ ). در ادامه مسیر جهت مشخص کردن مرزها ابتدا محدوده مورد مطالعه با توجه به مرز تعیین شده آبخوان در گزارش‌های مرکز مطالعات سازمان آب منطقه‌ای کرمان در نظر گرفته شد. در طی فرایند شبیه‌سازی با توجه به نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و

در این مرحله نیاز به تعیین رقوم ارتفاعی کف و سطح ایستابی آبخوان است و از آنجائی که داده‌های موجود پراکنده می‌باشند، با میانبایی مقادیر پارامتر برای هر سلول انجام شد و با توجه به مطالعات ژئوالکترونیک محدود، از اطلاعات چاه‌های عمیق موجود در منطقه مورد مطالعه، نقشه رقوم کف آبخوان تهیه شد و در مراحل شبیه‌سازی داده‌های مربوطه اصلاح شد. آمار چاه‌های مشاهده‌ای در این منطقه به‌صورت ماهیانه برداشت و ثبت شده بود. در این منطقه بیشترین کاربرد چاه‌های بهره‌برداری مربوط به بخش کشاورزی و پس از آن شرب است.

### روش تحقیق

از مهم‌ترین و حساس‌ترین پارامترها در تهیه مدل، هدایت هیدرولیکی تشکیلات آبخوان است که تا حد امکان طراحی مدل باید با استفاده از مقادیر واقعی این پارامتر که در صحرا و ترجیحاً توسط آزمایش‌های پمپاژ به‌دست آمده صورت گیرد (ظه‌ره‌وند و همکاران،  $1388$ ). آبرفت‌های دشت شه‌داد به دلیل شرایط مورفولوژیکی و



شکل ۳- نقشه قابلیت انتقال برحسب مترمربع بر روز برای منطقه مورد مطالعه (گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۵)

آبخوان محاسبه و در نرم افزار GMS وارد شد. در جدول ۱، پنج مورد از مقادیر محاسبه شده، به طور نمونه درج شده است.

$$T=K.b \quad (2)$$

جهت محاسبه هدایت هیدرولیکی، مقادیر قابلیت انتقال از نقشه خطوط هم‌ارزش قابلیت انتقال حاصل از درون‌یابی در مدل و مقادیر ضخامت آبرفت دشت شهداد از گزارش مطالعات منابع آب کرمان برداشت شد و با استفاده از رابطه (۲)، مقادیر هدایت هیدرولیکی

جدول ۱- محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان

ضریب هدایت هیدرولیکی	ضخامت آبخوان	ضریب قابلیت انتقال	عرض جغرافیائی	طول جغرافیائی
(متر در روز)	(متر)	(مترمربع در روز)	UTM	UTM
۱۱,۲	۵۰	۵۶۰	۳۳۸۰۷۶۰	۵۷۳۳۵۰
۴,۲۱	۹۵	۴۰۰	۳۳۶۴۲۵۰	۵۷۱۲۶۰
۴,۳۱	۶۵	۲۸۰	۳۳۶۲۶۲۰	۵۸۱۳۱۰
۳,۲	۱۰۰	۳۲۰	۳۳۶۱۳۱۰	۵۷۴۲۶۰
۲,۵	۳۰	۷۵	۳۳۵۳۰۹۰	۵۹۴۸۱۰

با توجه به متغیر بودن بارندگی و متغیر بودن میزان آورد سالانه در دوره چهارده ساله (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۷) مقدار تغذیه سطحی (SR) برحسب متر از روابط زیر محاسبه شد.

$$V = \left( \frac{P}{1000} * A * 10^6 + W * 10^6 \right) * IF \quad (3)$$

$$SR = \left( \frac{V}{A * 10^6} \right) \quad (4)$$

به طوری که در معادله (۳)، P بارندگی سالانه حوضه برحسب میلی‌متر، A مساحت زیر حوضه برحسب کیلومتر مربع، IF ضریب میزان آب برگشتی به آب زیرزمینی و W آورد سالانه برحسب میلیون متر مکعب است که بر اساس رابطه کتاین محاسبه شده است. با توجه به اینکه در منطقه آبخوان شهداد، میزان تبخیر بالاست و بافت خاک سبک است، ضریب IF، ۱۰ درصد در نظر گرفته شد و از آنجائی که سطح آب زیرزمینی در عمقی بیش از ۴ متر از سطح زمین قرار دارد، تبخیر از آب زیرزمینی در مدل در نظر گرفته نشد. جهت انجام

جهت تخمین ضرایب جریان بازگشتی از مصارف اصلی (شرب، صنعت و کشاورزی) در سطح حوزه آبخیز، درزی و همکاران، ضریب بازگشت به آب زیرزمینی را ۰/۲۵ تا ۰/۳، طالبی حسین‌آباد و همکاران، بین ۰/۲ و ۰/۳ و پیشنهاد نموده‌اند (کرامتی و همکاران، ۱۳۸۸). در محاسبات میزان تخلیه چاه‌های بهره‌برداری، با توجه به شرایط آبخوان از نظر زمین‌شناسی و اقلیم گرم و خشک، روش سنتی آبیاری در منطقه و بافت خاک منطقه میزان آب برگشتی کشاورزی را ۲۸ درصد کل آبی که از زیرزمین تخلیه می‌شود، در نظر گرفته شد و در هنگام وارد کردن میزان تخلیه چاه‌های بهره‌برداری در مدل عددی، مقدار آن‌ها ۲۸ درصد کاهش داده شد. در بحث تغذیه سطحی، منابع اصلی تغذیه‌ی آبخوان دشت شهداد شامل نفوذ بارندگی، آب برگشتی کشاورزی و رودخانه‌های فصلی می‌باشند. در شبیه‌سازی مدل عددی مقدار تغذیه سطحی توسط پوشش تغذیه سطحی به مدل اعمال شد و

محاسبه شده که کمترین میزان آبدهی ویژه در مرکز و غرب آبخوان است که در شکل ۴ آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی پس از مرحله واسنجی ناپایدار و طبق خروجی های حاصل از نرم افزار متوسط آبدهی ویژه در منطقه آبخوان شهرداد ۰/۱۵ به دست آمد. تغذیه آبخوان شهرداد از دو رودخانه شهرداد و اندوهجرد و حوزه آبریز کویرهای درانجیر-ساغند است و مطابق نقشه تراز آب زیرزمینی حاصل از نرم افزار، جهت جریان آب زیرزمینی از شمال و شمال غرب به سمت شرق و جنوب شرق آبخوان است.

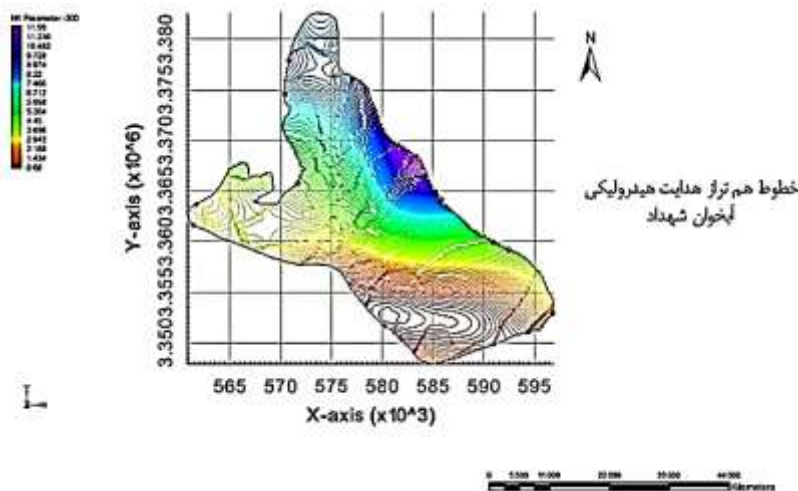
مقدار ضریب تبیین در دوره صحت سنجی برای مدل کمی ۰/۹۵، خطای میانگین ۰/۲۸ متر، خطای میانگین مطلق ۰/۳۸ متر و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) ۰/۴۷ متر به دست آمد. بنابراین مدل واسنجی شده به خوبی توانسته است شرایط حاکم بر آبخوان را شبیه سازی کند و می توان از آن برای پیش بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی آینده استفاده نمود. در شکل ۵ و ۶ تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی (مشاهداتی و محاسباتی) به طور نمونه در دو چاه مشاهده ای شماره ۱ که در قسمت شمال آبخوان و شماره ۱۰ در جنوب آبخوان قرار دارد، نشان داده شده است.

نتایج شبیه سازی در آبخوان نشان دهنده کاهش سطح آب زیرزمینی در قسمت های شمال، جنوب و شرق آبخوان و افزایش سطح آبخوان در مناطق مرکزی و غرب آبخوان بود. افزایش تراز آب زیرزمینی را می توان تا حدی به علت وجود چهار آب بند خاکی موجود بر روی رودخانه شهرداد و افزایش دبی رودخانه شهرداد پس از سیلاب ها و وجود مخروط افکنه ها در این منطقه مرتبط دانست و این امر نیاز به تحقیق بیشتری دارد. تغییرات سطح آب زیرزمینی در مهرماه سال ۱۳۸۱ و مهرماه ۱۳۹۵ حاصل از نرم افزار در شکل ۷ نشان داده شده است.

مدل سازی در این تحقیق پنج گام اصلی طی شد. گام اول مدل سازی در حالت پایدار است که جهت محاسبات آن در مدل MODFLOW از روش تکرار PCG2 استفاده شد و مدل سازی در حالت پایدار برای داده های مهرماه سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ صورت گرفت و در گام دوم جهت بهینه شدن پارامترها و کاهش خطاهای گام اول، اقدام به واسنجی مدل و رسیدن به یک برازش مناسب بین داده ها با استفاده از کد PEST در مدل MODFLOW شد. در این مرحله پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و هدایت هیدرولیکی افقی غیرهمسان جهت واسنجی مدل در حالت پایدار در نظر گرفته شد. مدل سازی گام سوم و چهارم هم مشابه گام اول و دوم صورت گرفت با این تفاوت که در گام سوم شبیه سازی برای حالت ناپایدار و از سال های آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ و با در نظر گرفتن تغییرات ایجاد شده در آبخوان انجام شد. همچنین در گام چهارم جهت انجام واسنجی برای حالت ناپایدار، پارامترهای تغذیه سطحی و ضریب آبدهی ویژه مدنظر قرار گرفتند. جهت تأیید اجرای مدل، نیاز به صحت سنجی بود که به همین منظور در گام پنجم به صحت سنجی مدل پرداخته شد و برای این گام داده های سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۵ مدنظر قرار گرفت.

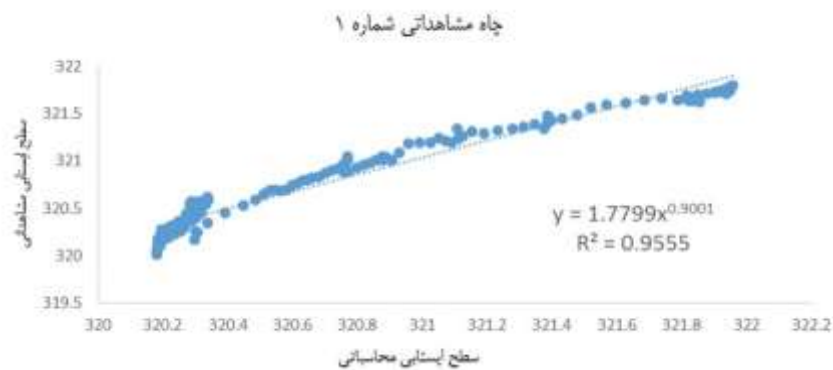
## نتایج

پس از مرحله کالیبراسیون شرایط پایدار به بررسی تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی این منطقه پرداخته شد. تغییرات هدایت هیدرولیکی آبخوان در محدوده ۰/۶ تا ۱۲/۲ برحسب متر بر روز به دست آمد به طوری که در قسمت جنوبی کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی و در شمال و شمال شرق بیشترین مقدار را دارد. همچنین آبدهی ویژه آبخوان در محدوده مطالعاتی، ۰/۱۳ تا ۰/۱۶۵ با نرم افزار

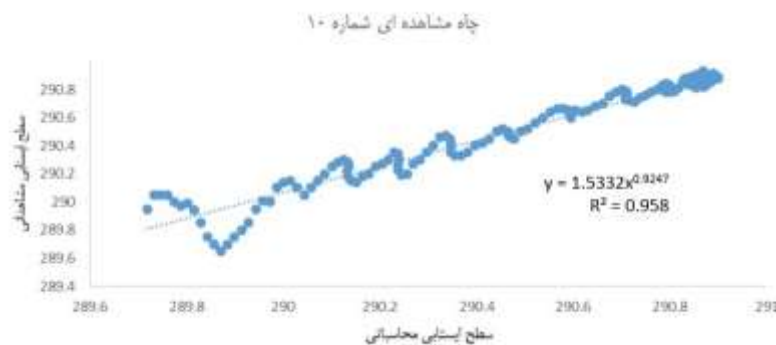


شکل ۴- نقشه خطوط هم تراز هدایت هیدرولیکی آبخوان شهرداد و ضوح نقشه تا حد امکان افزایش یافت





شکل ۵- تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی (مشاهداتی و محاسباتی) چاه مشاهده‌ای شماره ۱، در شمال آبخوان



شکل ۶- تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی (مشاهداتی و محاسباتی) چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰، در جنوب آبخوان

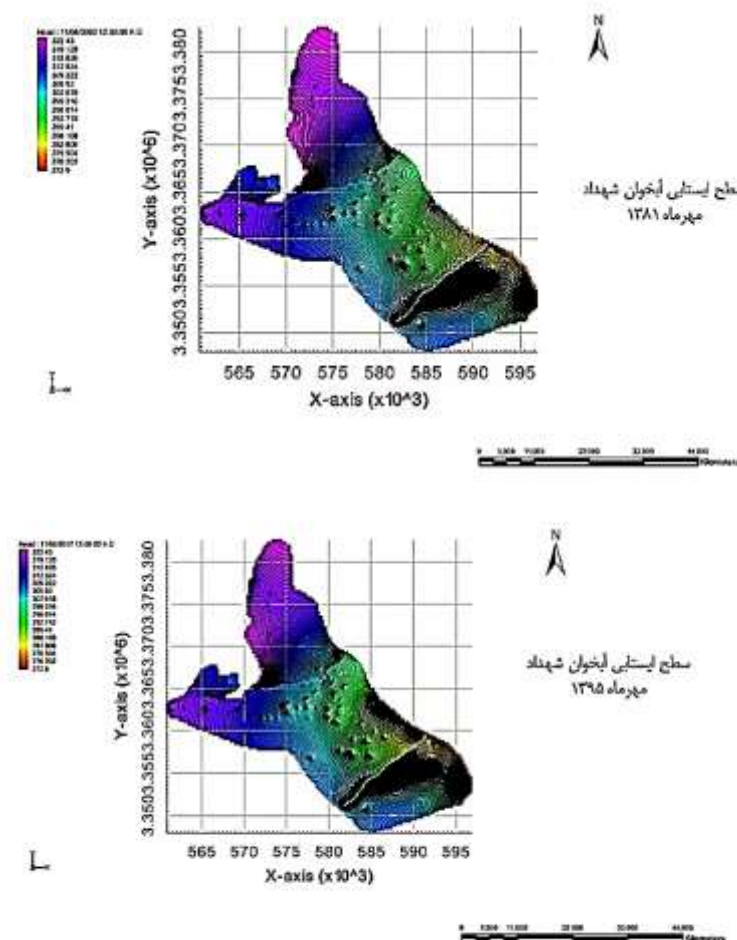
بزرگ‌تری در جهت نزدیک‌تر شدن به مقادیر مشاهده‌ای برداشته و خطاها را به حداقل رساند (میر احمدی، ۱۳۹۷). به همین منظور جهت شناسایی حساسیت بخش‌های مختلف آبخوان نسبت به عوامل ورودی، ابتدا منطقه مورد مطالعه به زون‌هایی تقسیم شد به نحوی که در هر ناحیه فقط یک چاه مشاهده‌ای وجود داشته باشد. سپس با استفاده از بسته PEST در نرم‌افزار GMS با تغییر عوامل ورودی از قبیل ضریب هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و میزان تغذیه، میزان بار آبی محاسبه شد و توسط مدل با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید و مقادیر خطای RMSE محاسبه گردید. تغییر عوامل ورودی برای میزان افزایش و کاهش ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد انجام شد و نتایج آنالیز حساسیت در چاه‌های مشاهده‌ای نشان داد که حساسیت برداشت از چاه‌های بهره‌برداری دو و نیم برابر هدایت هیدرولیکی و یک و نیم برابر تغذیه سطحی است. در واقع می‌توان گفت در این مدل عددی تغییرات پارامتر دبی خروجی از چاه‌های بهره‌برداری تأثیر بیشتری نسبت به دو پارامتر دیگر داشته است. نمودارهای آنالیز حساسیت مربوط به دو ناحیه که چاه مشاهده‌ای شماره ۳ در شمال آبخوان و شماره ۶ در مرکز آبخوان قرار داشتند، در شکل ۹ آورده شده است.

تغییرات سطح آب زیرزمینی در شکل ۷ حاکی از کاهش سطح آب در بیشتر نواحی آبخوان است و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در ۱۴ سال نشان‌دهنده افت سطح ایستابی در نواحی شمال، شرق و جنوب آبخوان است و در غرب آبخوان و مرکز در محدوده رودخانه شهداد افزایش سطح آب بخصوص در ماه‌های آذرماه تا اردیبهشت‌ماه وجود دارد که این امر می‌تواند متأثر از بارندگی و افزایش دبی رودخانه شهداد است. در شکل ۸ این تغییرات در شمال، جنوب، شرق، جنوب شرق، غرب و مرکز آبخوان نشان داده شده است.

### آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت در واقع به معنی مشخص نمودن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف آن است. در خلال آنالیز حساسیت، مقادیر واسنجی شده پارامترهای هیدرودینامیکی، مقادیر تغذیه و شرایط مرزی به صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شود. بزرگی تغییرات بار هیدرولیکی نسبت به مقادیر بار هیدرولیکی واسنجی شده، معیار حساسیت حل مسئله نسبت به آن پارامتر خاص است. در این بین عواملی که عکس‌العمل مدل به تغییراتشان بیشتر بوده یا به عبارتی مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیشتری نشان می‌دهد از اهمیت بیشتری برخوردارند، زیرا با تغییر کمتر در این پارامترها می‌توان گام





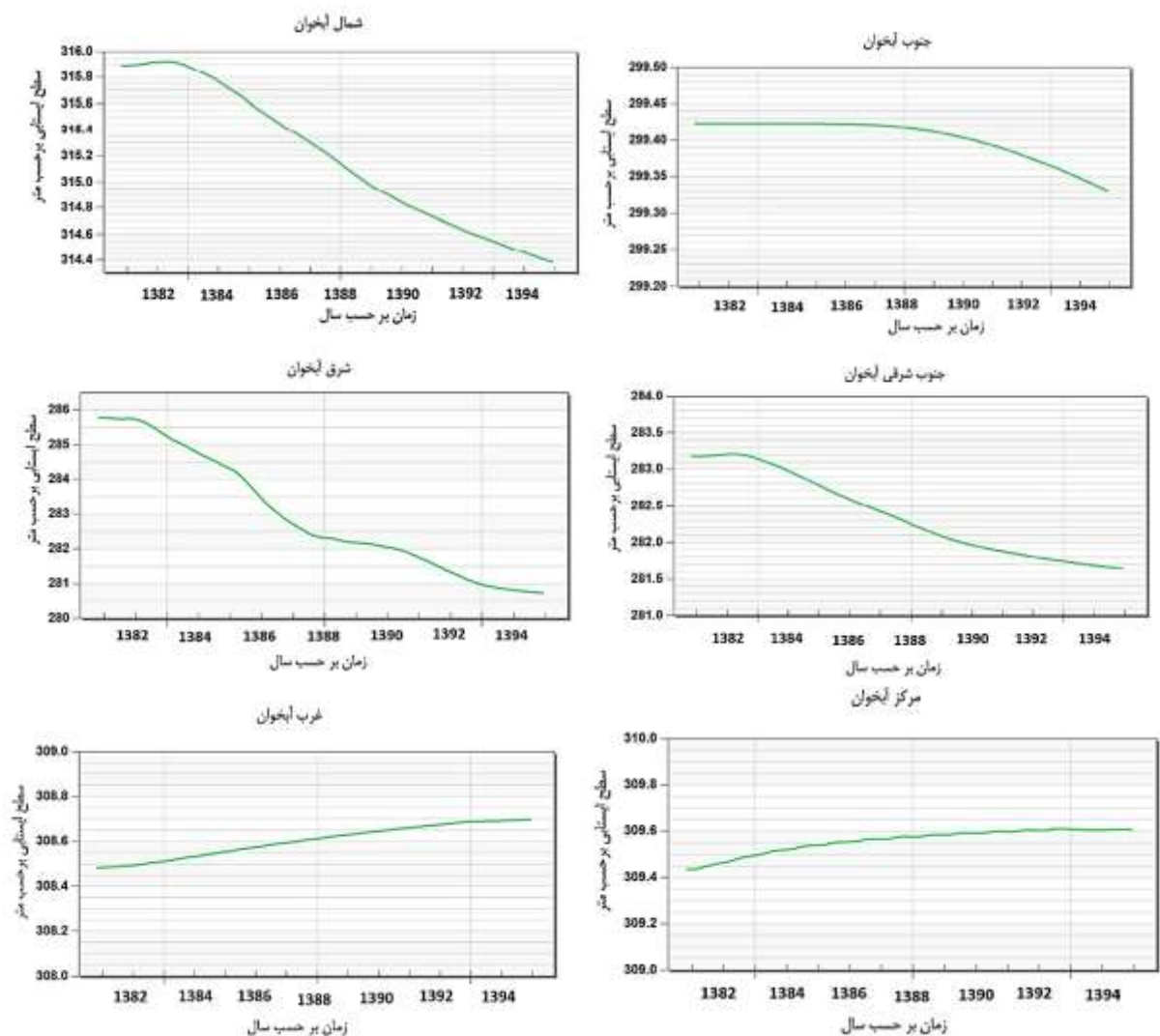
شکل ۷- وضعیت تغییرات سطح ایستایی آب زیرزمینی دشت شهداد در مهرماه سال ۱۳۸۱ و مهرماه ۱۳۹۵

۳۱۹/۵۱ متر به دست آمد که نسبت به سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۲/۳۹ و ۰/۶۶ متر افت داشته است. این مقدار با اعمال گزینه اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۳۱۹/۸۸، ۳۲۰/۲۷ و ۳۲۰/۳۸ متر حاصل شد. به عبارت دیگر کاهش برداشت به میزان ۳۰ درصد از چاه‌های بهره‌برداری تا سال ۱۴۰۵، میانگین سطح ایستایی آبخوان نسبت به ادامه روند کنونی برداشت‌ها، به مقدار ۰/۸۷ متر افزایش می‌یابد و این تأثیر در نه چاه مشاهده‌ای دیگر نیز مشهود است و در دیگر نواحی آبخوان کاهش برداشت ۳۰ درصدی از چاه‌های بهره‌برداری موجب افزایش سطح آب در بازه ۰.۵ تا ۱/۸ متر می‌شود. بر اساس اطلاعات به دست آمده از شبیه‌سازی با کاهش برداشت ۳۰ درصد از چاه‌های بهره‌برداری آبخوان به تعادل نسبی خواهد رسید. با توجه به نتایج حاصل از اعمال سناریوهای مختلف، می‌توان گفت که با یک برنامه‌ریزی صحیح و کنترل برداشت آب زیرزمینی از آبخوان دشت شهداد، میزان افت در این آبخوان را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

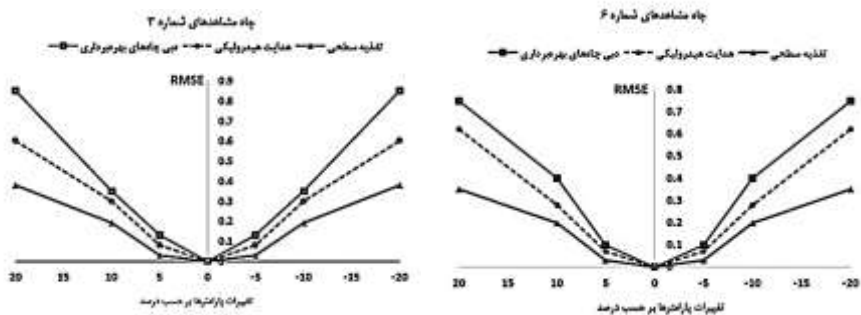
### پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی

با تعریف سه سناریو برای آینده آبخوان دشت شهداد، تراز آب زیرزمینی برای یک دوره ۱۰ ساله، برای هر یک از سه سناریو پیش‌بینی گردید. به دلیل آنکه میزان تغذیه تقریباً غیرقابل کنترل است، در همه این سناریوها مقدار تغذیه مطابق روند گذشته در نظر گرفته شد، ولی میزان برداشت از آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف به مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش داده شده است. پس از اعمال گزینه‌های مدیریتی مختلف به مدل و اجرای آن، نتایج پیش‌بینی‌ها به صورت تراز آب زیرزمینی حاصل شد. در شکل ۱۰، به عنوان نمونه نتایج اعمال سناریوهای ذکر شده در چاه مشاهده‌ای شماره ۸ نشان داده شده است.

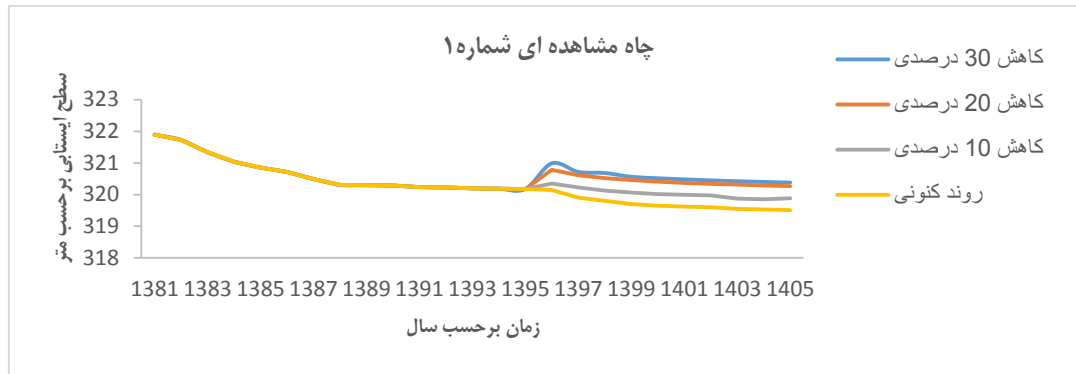
به طور کلی متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شماره ۱، با ادامه روند کنونی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان شهداد در سال ۱۴۰۵ (۱۰ سال پس از دوره شبیه‌سازی)،



شکل ۸- تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در نواحی مختلف آبخوان شهداد



شکل ۹- نتایج آنالیز حساسیت در دو ناحیه مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای در شمال و مرکز آبخوان



شکل ۱۰- تغییرات سطح آب چاه مشاهده‌ای شماره ۱ در سناریوهای مختلف

با استفاده از نرم‌افزار GMS. سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی. برلین. آلمان.

امینی، ر.، فضل‌اولی، ر. و عمادی، ع. ۱۳۹۶. مدل‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در حالت غیر ماندگار با مدل ریاضی GMS (مطالعه موردی: آبخوان دشت بابل بابلسر). هفتمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. تهران. مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار. موسسه آموزش عالی مهر اروند.

بیات ورکشی، م.، و فصیحی، ر. ۱۳۹۶. مقایسه مدل عددی، روش‌های هوشمند عصبی و زمین‌آمار در تخمین سطح آب زیرزمینی. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال هجدهم. شماره ۸۴.

جعفرزاده، ا.، خاشعی سیوکی، ع.، و شهیدی، ع. ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل مفهومی بیان (مطالعه موردی: دشت بیرجند). مجله‌ی مهندسی منابع آب. سال یازدهم.

خیاط خلقی، م. ۱۳۸۱. تهیه مدل مفهومی آبخوان سیاه کوه یزد. نشریه بیابان. دوره هفتم. شماره دوم. صفحه ۴۵-۵۴.

ذاکری نیری، م.، سلطانی، ش.، و دبداب، ب. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی عددی سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW (مطالعه موردی: آبخوان دشت زنجان). مجله مدیریت سامانه‌های منابع آب. سال اول. شماره ۳. صفحه ۵۶-۷۸.

رستمی راوری، ا.، و ابراهیمی تولکانی، ن. ۱۳۹۴. بررسی تخریب بند انحرافی بتنی رودخانه شهداد و راهکارهای مقابله با تخریب. کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، تهران.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۲. گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۳-۱۳۹۲.

## نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات سطح ایستابی ده چاه مشاهده‌ای آبخوان دشت شهداد، از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵، نشان داد که تراز سطح ایستابی در قسمت‌های شمال، جنوب، شرق و جنوب شرقی آبخوان به‌طور میانگین ۰/۲ تا ۵ متر کاهش سطح آب و در قسمت‌های مرکزی و غرب آبخوان به‌طور متوسط بین ۰/۱ تا ۰/۶ متر افزایش پیدا کرده است و این امر می‌تواند به‌واسطه تأثیر رودخانه شهداد باشد. در این تحقیق نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان داد که حساسیت مدل نسبت به پارامتر دبی خروجی از چاه‌های بهره‌برداری حدود ۲ برابر ضریب هدایت هیدرولیکی و ۱/۵ برابر پارامتر تغذیه است. در واقع می‌توان گفت در این مدل عددی تغییرات پارامتر دبی خروجی از آبخوان چاه‌های بهره‌برداری تأثیر بیشتری نسبت به دو پارامتر دیگر داشته است. نتایج پیش‌بینی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۵، نشان داد که با کاهش ۳۰ درصد برداشت از چاه‌های بهره‌برداری تغییرات سطح ایستابی روند کاهشی با شیب کمتر را دارد و نتایج شبیه‌سازی آبخوان دشت شهداد بیانگر این است برداشت بیش‌ازحد و افت سطح آب آبخوان دشت شهداد به‌خصوص در نواحی جنوبی و شرقی آن می‌تواند بخش کشاورزی منطقه را تحت تأثیر قرار دهد و اثر اقتصادی زیان‌باری را برای ساکنین آن به وجود آورد. برای مقابله با این وضعیت باید میزان برداشت از آبخوان کاهش یابد تا بین تغذیه و تخلیه آبخوان تعادل برقرار گردد. همچنین در صورتی که تهیه مدل با داده‌های اولیه کامل‌تر و دقیق‌تر نقش بسزایی در افزایش دقت و کارایی مدل جهت مدیریت منابع آب آبخوان دشت شهداد خواهد داشت.

## منابع

امیدی نیا انارکولی، ط.، میرعباسی نجف‌آبادی، ر. و طباطبائی، ح. ۲۰۱۶. بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت برخوار اصفهان

- محمد جانی، ا. و یزدانیان، ن. ۱۳۹۳. تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن. فصلنامه روند. سال بیست و یکم. شماره ۶۵ و ۶۶ صفحات ۱۱۷-۱۴۴.
- هاشمی، ف.، شاه نظری، ع.، عارف، ح. و مطلوبی، ع. ا. ۱۳۹۱. مدل سازی عددی جریان آب زیرزمینی شبکه آبیاری و زهکشی البرز با استفاده از MODFLOW. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. اصفهان. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Aghlmand, R., and Abbasi, A. 2019. Application of Modflow with boundary conditions analyses based on limited available observations: A case study of Birjand plain in east iran, Journal Water 2019, 11, 1904; doi:10.3390/w11091904.
- Amiri, F., Barani, Gh. A., Hessami Kermani, M.R., Tayebian, A., Sabahian, R. and Malakootian, M. 2019. Rediction of groundwater level fluctuations in steady and unsteady state conditions using PMWIN in Rayen Aquifer, Iran, Desalination and water treatment 151:414-424.
- Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., GHorbani, KH. and Kaboli, A.R. 2020. Spatial estimation of aquifer's hydraulic parameters by a combination of borehole data and inverse solution. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 79: 729-738.
- Ashtiani, Gh., Mahdavi, M., Malekian, A. and Motamedvaziri, B. 2016. Groundwater modeling for estimation of the recharge rate and identification of appropriate recharge sites in Damghan Plain, Iran. Journal Environ. Sci. 14.2: 139-153.
- Bakhit, H.M. 2015. Sustainable groundwater management in coastal aquifer of Sinai using evolutionary algoritms. 7th Groundwater symposium of the International Association for Hydro-Enviroment Engineering and Research (IAHR). Perugia. Italy.
- Brewer, K., Fogle, T., Stieve, A. and Barr, C. 2003. Uncertainly Analysis with Site-specific Groundwater Models: Experiences and Observations.
- Chitsazan, M., Rahmani, GH. and Ghafoury, H. 2020. Investigation of subsidence phenomenon and impact of groundwater level drop on alluvial aquifer, case study: Damaneh-Daran plain in west of Isfahan province, Iran. Journal Modeling Earth Systems and Environment, 6: 1145-1161.
- Hosseini, Z. and Nakhaei, M. 2014. Estimation of groundwater level using a hybrid genetic algorithm neural network. Journal Pollution. 1(1): 9-21.
- Panahi, M. Misagi, F. and Asgari, P. 2018. Simulation and estimate of groundwater level fluctuations using GMS (case study Zanjan plain). Journal Environmental Sciences. 16.1: 1-14.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۵. گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۴-۱۳۹۵.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۷. گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده مطالعاتی شهداد، ۱۳۹۶-۱۳۹۷.
- عقلمند، ر.، و عباسی، ع. ۱۳۹۸. مدیریت کمی منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از مدل عددی MODFLOW (مطالعه موردی: دشت بیرجند خراسان جنوبی). یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران. شیراز. دانشگاه شیراز.
- ظهوروند، ع.، و صبوری، م. ۱۳۸۸. مدیریت تغذیه مصنوعی توسط مدل سازی آب زیرزمینی و مدل VISUALMODFLOW. همایش ملی مدیریت بحران آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.
- غلامی، ز.، و فضل اولی، ر. ۱۳۹۲. شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS6.0 (مطالعه موردی آبخوان دشت ساری-نکا). ششمین همایش ملی آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک.
- قبادیان، ر.، فتحی چقاگی، ع. و زارع، م. ۱۳۹۳. تأثیر احداث شبکه آبیاری و زهکشی سد گلویشان بر منابع آب زیرزمینی دشت میان دربند با استفاده از مدل GMS6.5. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد ۲۸. شماره ۴.
- قدرتی، م. و ثعبانی، م. ۱۳۹۰. کتاب مدل های ریاضی آب های زیرزمینی (آموزش کاربردی مدل GMS). انتشارات سیمای دانش. صفحه ۲۰۷.
- قدرتی، م.، و بزرگری، ف. ۱۳۹۵. مدل ریاضی آب های زیرزمینی (آموزش کاربردی مدل GMS7.1). انتشارات سیمای دانش. صفحه ۷۶.
- کرامتی طرقي، م.، پاسبان عیسی، ن. ا. و قنبری، ع. ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر بر میزان آب خروجی از زهکش های شبکه آبیاری و زهکشی مغان و تأثیر شیوه های بهره برداری بر آن. دوازدهمین همایش ملی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. کرج. ص ۳۳۵-۳۴۹.
- میر احمدی، ص. ۱۳۹۷. ارزیابی اثر سدهای زیرزمینی بر تغذیه مصنوعی آبخوان های منتهی به کویر. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

Yaouti, F., Kaufmann, O., Khattach, D. and Mandour, EL. 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). Journal of Hydro-environment Research. 2.3: 192-209.

Soupios, M.P., Kouli. M., Vallianatos. F., Vafidis, A. and Stavroulakis, G. 2007. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in CHania (Crete-Greece). Journal of Hydrology. 338.1-2: 122-131.

## Investigation of Groundwater Level Variations in Shahdad Aquifer Using Groundwater Modeling System (GMS) Software

M.B. Rahnama<sup>\*1</sup>, N. Sohrabi<sup>2</sup>, Gh.A. Barani<sup>3</sup>

Received: Aug.09, 2020

Accepted: Jun.15, 2020

### Abstract

Numerical simulation of groundwater table variations can be an effective tool for water resources management. In this study, water table variations of Shahdad aquifer located in Kerman province, were simulated using Groundwater Modeling System (GMS) software and MODFLOW model. Changes in the aquifer water level indicate a decrease in the aquifer in the northern, eastern, southern, and some central parts of the aquifer. The developed model was calibrated using the monthly water level measurements for the period of 2012-2013 and then validated using the monthly statistics for the water year 2015-2016. Aquifer properties including hydraulic conductivity, storage coefficient, and recharge rate were estimated by inverse modeling with PEST Code. The coefficient of determination for the validation stage was calculated as 0.95, demonstrating the good consistency of observed and predicted data and the ability of the model to predict future aquifer water table variations. A sensitivity analysis showed that the model is more sensitive to the well discharge than to surface recharge or hydraulic conductivity. Monthly reduction of discharge from wells by 30 percent can stop this phenomenon.

**Keywords:** GMS software, Shahdad aquifer, Shahdad plain, Simulation

---

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman

2- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman

3- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

(\*- Corresponding Author Email: mbr@uk.ac.ir)