

## اعمال سناریوی مدیریتی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با مدل مفهومی و ریاضی MODFLOW (مطالعه موردی: دشت خزل- نهاوند)

رسول قبادیان<sup>۱\*</sup>، زینب بهرامی<sup>۲</sup>، سمانه دباغ‌باقری<sup>۳</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲ و ۳. کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۵/۰۶، تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۸/۱۹)

### چکیده

در بسیاری از کشورهای خشک جهان از جمله ایران اصلی‌ترین منبع تأمین آب، ذخایر آب زیرزمینی است. افزایش بی‌رویه جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها سبب افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور مثل دشت خزل هم‌دانش شده است. دشت خزل از لحاظ کشت محصولات استراتژیک و تأمین آب منطقه، اهمیت دارد و به مطالعات کمی و کیفی جدی منابع آب زیرزمینی نیازمند است. بنابراین، در تحقیق حاضر ابتدا، مدل کمی آبخوان دشت یادشده با کد MODFLOW در بسته نرم‌افزار GMS تهیه و در دو حالت جریان ماندگار (مهرماه ۱۳۸۵) و غیرماندگار (از آبان‌ماه ۱۳۸۵ تا مهرماه ۱۳۸۶) واسنجی و در مهرماه ۱۳۸۷ صحت‌سنجی شد. طی واسنجی مدل به‌روش سعی و خطا، مقادیر ضرایب نفوذپذیری و توانایی عبور جریان بستر رودخانه‌ها و مرزها در حالت ماندگار و آبدهی و ذخیره ویژه در حالت غیرماندگار کالیبره شد. سپس نوسانات سطح آب برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده با شرایط کنونی و با اعمال سناریوی مدیریتی کاهش ۱۰ درصدی پمپاژ چاه‌ها، پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در نواحی شمال شرق دشت رخ می‌دهد که مقدار آن به ترتیب ۱/۸۲، ۳/۶ و ۸/۲ متر برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده به‌دست آمد درحالی که با اعمال سناریوی یادشده این مقادیر برابر ۰/۵۲، ۲/۷ و ۷/۰۷ متر خواهند بود.

کلیدواژه‌گان: آب زیرزمینی، دشت خزل، واسنجی، MODFLOW.

## مقدمه

با رشد روزافزون جمعیت و پیشرفت فناوری، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح ایستابی افزایش یافته است. سالانه در ایران حدود ۳۱ میلیارد مترمکعب آب اضافی و غیراصولی برداشت می‌شود که افت هرچه بیشتر کمی و کیفی و عدم تعادل طبیعی منابع آب را در پی دارد. در حالی که بیلان آب در بسیاری از نقاط کشور منفی است [۱۷]، مدیریت صحیح و مطالعات دقیق درباره آب‌های زیرزمینی بیش از پیش اهمیت دارد. در سال‌های اخیر به علت استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، طرح ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی مطرح و در حال اجراست، بنابراین اهدافی چون بررسی وضعیت فعلی منابع آب زیرزمینی، تأمین پتانسیل موجود آب زیرزمینی از طریق محاسبه بیلان آب زیرزمینی، پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره‌های آتی و امکان برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب برای بهبود شرایط آبخوان در آینده و کاهش تأثیرات منفی افت سطح آب زیرزمینی مانند از بین رفتن اراضی حاصل‌خیز و کاهش بازدهی محصولات و کاهش درآمدهای اقتصادی در سال‌های آینده ضروری به نظر می‌رسد [۱۱ و ۱۵]. شناخت رفتارهای یک سیستم سفره آب زیرزمینی، به انجام تحقیقات بلندمدت برای هر منطقه نیاز دارد که با توجه به وضعیت کنونی و سقف محدود بودجه‌ها عملاً امکان‌پذیر نیست. در این میان با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌توان شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است را به وجود آورد. در این زمینه، یکی از روش‌های مؤثر و سریع مطالعه چگونگی حرکت، بررسی بیلان و مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی روش‌های غیرمستقیم مطالعه یعنی استفاده از مدل‌های کامپیوتری است. این مدل‌ها شرایط طبیعی سفره را با یک سری روابط ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند. در صورت دقیق بودن مدل، می‌توان از آن برای پیش‌بینی وضعیت منابع آب در آینده و بررسی تأثیر شرایط مدیریتی اعمال شده، استفاده کرد [۱۸].

مشاهده هیدروگراف واحد ۱۰ ساله دشت خزل همدان نشان داد تراز سطح آب زیرزمینی طی این مدت حدود ۶ متر افت داشته است، بنابراین کنترل برداشت از سفره اهمیت فراوان دارد. بدین‌منظور، در تحقیق حاضر برای شناخت خصوصیات سفره آب زیرزمینی دشت خزل و

پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی بر اثر کاهش میزان برداشت از سفره، مراحل زیر انجام شد:

۱. مدل ریاضی آبخوان با استفاده از مدل 6.5 GMS<sup>۱</sup> و منطبق بر خصوصیات سفره آب زیرزمینی تهیه شد.

۲. سفره آب زیرزمینی در شرایط رژیم جریان ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی شد.

۳. نوسانات سفره آب زیرزمینی در شرایط عادی بررسی و سناریوی مدیریتی اعمال شد.

هدف از این تحقیق تفسیر کمی سامانه آبخوان دشت خزل است. نتایج این نوع تحقیقات می‌تواند به‌عنوان راه‌کارهایی برای مدیریت و کنترل بحران کمی منابع آب زیرزمینی استفاده شود. به‌طور مثال، می‌توان با پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت، محل‌های مناسب را برای تغذیه مصنوعی آبخوان شناسایی و از افت بی‌رویه سطح ایستابی و تأثیرات بعد از آن جلوگیری به عمل آورد.

## پیشینه تحقیق

کیم و سلطان [۶] تأثیرات شبکه نوین آبیاری در لایه آبدار نوین مصر و پیش‌بینی روند بالآمدن سطح ایستابی در لایه آبدار با استفاده از مدل MODFLOW را بررسی کردند. نتایج نشان داد در صورت اعمال نشدن مدیریت صحیح، بسیاری از اراضی زهدار می‌شوند. یعنی در این اراضی سطح آب زیرزمینی به اندازه‌ای بالا می‌آید که خاک شرایط نامناسبی برای کشت و حتی پروژه‌های عمرانی دارد و به زهکشی کردن نیاز است. رابینسون و ری [۱۴] برای تعیین الگوهای جریان آب زیرزمینی، مناطق اصلی تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی، و تخمین زمان‌های سیر در آبخوان باز در حوضه آبریز دشت ساحلی‌ای در ویرجینیا<sup>۲</sup> از مدل جریان MODFLOW<sup>۳</sup> و مدل ردیابی ذرات MODPATH<sup>۴</sup> استفاده کردند. آنها با تجزیه و تحلیل مناطق تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی و مسیر جریان، استراتژی مدیریتی ویژه‌ای را به‌منظور کاهش انتقال نیترات از آب‌های زیرزمینی به آب‌های سطحی ارائه دادند. ریکو و همکارانش [۱۵] برای بررسی سیستم مدیریت منابع

1. Groundwater Modeling System
2. Virginia. U.S.A.
3. Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model
4. A particle tracking post-processing package for MODFLOW

(AN) ناشی از نشت ۳ تانک خسارت‌دیده در زلزله آگوست ۱۹۹۹ ترکیه، در کارخانه تولید فیبرهای مصنوعی پلیمری واقع در ساحل جنوبی دریای مارمارای ترکیه را مدل‌سازی کردند. ابتدا جریان غیرماندگار ۲ و ۳ بعدی آبخوان باز با مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW شبیه‌سازی و در ادامه با مدل MT3DMS انتشار آلاینده مد نظر در محل نشت مدل‌سازی شد. مدل‌های جریان و آلودگی ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ارتفاع سطح آب و غلظت در ۲۶۶ روز نخست واسنجی و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ۵۴۰ روز باقی‌مانده، صحت‌سنجی شدند. در کل، مدل جریان قوی‌تر از مدل آلودگی بود. براساس نتایج، جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب به شمال دریا بود. مقادیر سرعت آب زیرزمینی در نواحی با نفوذپذیری زیاد حدود ۰/۲۵ متر در روز و در نواحی با نفوذپذیری کم برابر ۰/۱۵ متر در روز برآورد شد. نتایج نشان داد سیستم تصفیه و پمپاژ در مناطقی با نفوذپذیری زیاد برای بازسازی سایت مؤثر بود و اندازه‌های صافی‌ها در مناطقی با نفوذپذیری زیاد به‌علت رقیق شدن آلاینده‌ها بر اثر تغذیه طبیعی کمتر بود. یادانا و چگبله [۲۲] هدایت هیدرولیکی و الگوی جریان آب زیرزمینی را با مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW (در حالت ماندگار) در منطقه جنوب شرق غنا در کتاستریپ<sup>۵</sup> بررسی کردند. در تحقیق آنها مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان باز تحکیم‌نیافته حدود ۲ تا ۲۰ متر در روز یا متوسط ۱۵ متر در روز برآورد شد. الگوی تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی نشان داد این تغییرات به دلیل نوع مواد آبخوان است. مدل کالیبره‌شده تغذیه آب زیرزمینی نشان داد حدود ۶/۹ تا ۳۴ درصد از بارندگی سالانه، آبخوان‌های کم‌عمق را تغذیه می‌کند. سورینادیو و همکارانش [۱۸] به منظور پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی ورودی به معدن فعال زغال‌سنگ از طریق ۶ رگه معدنی زغال‌سنگ توسعه‌یافته، تحقیقات کاملی انجام دادند. بدین ترتیب، در محل استخراج زغال‌سنگ از دره گوداواری<sup>۶</sup> به وسعت ۵/۳۳ کیلومترمربع واقع در آندهرآ پرادش<sup>۷</sup> کشور هند مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی را با مدل MODFLOW به صورت ۲۰ لایه و ضخامت ۳۲۰ متر انجام دادند. مدل جریان تحت شرایط پایدار کالیبره شد و جریان

آب‌های زیرزمینی در حوضه منچای اسپانیا از مدل MODFLOW استفاده کردند. نتیجه اینکه مدل توانست مناطق دیگر را بدون تغییرات، برنامه‌ریزی و پارامترهای جدید به‌طور معناداری به پایگاه داده معرفی کند. وانگ و همکارانش [۲۰] با تلفیق مدل MODFLOW با Arcmap(GIS)<sup>۱</sup> وضعیت آبخوانی در شمال چین را بررسی کردند. نتایج بحرانی بودن وضعیت منابع آب زیرزمینی را بر اثر برداشت بی‌رویه نشان داد.

یائوتی و همکارانش [۲۱] از مدل MODFLOW برای بررسی تغییرات شرایط هیدروژئولوژیکی و شبیه‌سازی رفتار جریان، تحت استرس‌های مختلف در آبخوان غیرمحصور بویواریگ<sup>۲</sup> استفاده کردند و با استفاده از روش سعی و خطا به شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نوسانات بار هیدرولیکی به تغییرات فصلی تغذیه از بارش و آبیاری بستگی دارد. نگوین و همکارانش [۹] شبیه‌سازی سه‌بعدی آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن شرایط هیدروژئولوژیکی زیرسطحی، موقعیت رودخانه‌ها و کانال‌ها و نرخ پمپاژ معین با مدل MODFLOW در منطقه تای ایسلند (واقع در جنوب غربی ویتنام) انجام دادند. نتایج نشان داد جریان آب زیرزمینی به‌شدت تحت تأثیر نوسانات فصلی سطح آب رودخانه میکانگ<sup>۳</sup> و به‌ویژه سیلاب‌ها در طول فصل بارندگی است و نرخ پمپاژ ۸۳۶۰۰ مترمکعب در روز در فصل خشک به‌عنوان یکی از فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر سطح آب زیرزمینی در فصل بارندگی و خشک در نقاط مختلف ایسلند در نظر گرفته شد.

لی‌یو و همکارانش [۷] برای بررسی تأثیر لایه‌بندی آبخوان بر ضخامت ناحیه تداخل آب شور و شیرین (در آبخوان ساحلی حالت ماندگار) علاوه بر شبیه‌سازی عددی با نوعی مدل ترکیبی به‌دست‌آمده از مدل‌های MODFLOW و SEAWAT2000 و MT3DMS<sup>۴</sup> یک سری آزمایش از سه لایه ماسه ساحلی با متغیر در نظر گرفتن شکل لایه‌ها انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد اثر لایه‌بندی آبخوان بر جریان کنترل‌شده آب زیرزمینی و انتقال املاح در نواحی زیرسطحی آبخوان‌های ساحلی اهمیت دارد. سنگور و یونلو [۱۶] در یک مطالعه در ترکیه، انتقال آلاینده آکریلونیتریل

5. Keta Strip  
6. Godavari  
7. Andhra Pradesh

1. Geographic Information System  
2. Bou-Areg  
3. Mekong  
4. Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model

زیرزمینی ورودی به حفره‌ها و گودال‌های معدن از طریق ۶ رگه معدنی زغال‌سنگ توسعه یافته پیش‌بینی شد.

کارای و هجنل [۴] با اشاره به این موضوع که جریان در تشکیلات سنگ‌های درز و شکاف‌دار غیرلایه‌ای است و مدل‌سازی آن با قانون دارسی اعتبار ندارد، شبیه‌سازی جریان آب در تشکیلات یادشده را در قالب مدل MODFLOW-CFP انجام دادند. مدل اصلاح‌شده یادشده با تعداد زیادی نمونه عددی صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد مدل هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم در موارد واقعی قابلیت استفاده در جریان غیرلایه‌ای تشکیلات سنگی شکاف‌دار را دارد.

غفاریان [۲] در پژوهشی به‌منظور پیش‌بینی نوسانات تراز سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و بررسی پیش‌بینی فرونشست سطح زمین در دشت کاشمر، مدل جریان آب زیرزمینی را برای سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ با مدل MODFLOW (در حالت ناپایدار) اجرا و واسنجی کرد. او بعد از صحت‌سنجی مدل، نوسانات سطح ایستابی آب زیرزمینی برای شرایط مختلف بهره‌برداری را شبیه‌سازی کرد و نتیجه گرفت که در صورت ادامه روند بهره‌برداری کنونی از آبخوان، تراز سطح آب زیرزمینی سالانه حدود ۱ متر افت می‌کند. همچنین، در صورت افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصدی در میزان بهره‌برداری از آبخوان دشت کاشمر، تراز سطح آب زیرزمینی سالانه به ترتیب حدود ۱/۵، ۲/۲ و ۲/۲ متر افت خواهد کرد. با توجه به میزان افت ۵/۱ متر پیش‌بینی شده تا سال ۱۳۹۶، کاهش فشار آب منفذی بین رسوبات سبب افزایش تنش مؤثر و به نوبه خود تراکم و تحکیم در رسوبات می‌شود. با توجه به روند کنونی بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، سطح زمین بین ۰/۰۴ تا ۱/۴۶ متر نشست خواهد کرد؛ اما در صورت افزایش میزان بهره‌برداری از آبخوان دشت کاشمر با درصدهای یادشده، پیش‌بینی می‌شود به ترتیب حداقل ۰/۰۴، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ و حداکثر ۱/۵۸، ۱/۹ و ۳/۶ متر نشست در سطح زمین رخ دهد. پورحقی و همکارانش [۱۳] به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از آبخوان دشت نورآباد در شرایط خشکسالی، وضعیت آبخوان را با مدل MODFLOW شبیه‌سازی کردند. با مقایسه میانگین سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در دوره ناپایدار ضریب تبیین معادل ۰/۹۹ برآورد شد که نشانگر واسنجی موفقیت‌آمیز مدل بود. در ادامه وضعیت آبخوان برای مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۳ پیش‌بینی شد.

هیدروگراف پیش‌بینی دشت، افت سطح آب زیرزمینی را به‌میزان (۱/۵۵-) متر برای دو سال آینده نشان داد. اجرای مدل در شرایط خشکسالی نشان داد سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط (۲/۰۵-) متر افت می‌کند که با کاهش ۲۰ درصدی آبدی چاه‌های بهره‌برداری این مقدار افت به (۱/۳-) متر کاهش می‌یابد و بیلان آبخوان به‌طور متوسط ۳/۵ میلیون مترمکعب بهبود می‌یابد. قبادیان و همکارانش [۳] با استفاده از مدل GMS 6.5، تأثیر احداث شبکه آبیاری و زهکشی سد گاوشان بر منابع آب دشت میان‌دریوند کرمانشاه را بررسی کردند. ضریب تبیین در صحت‌سنجی مدل ۰/۹۹۶ بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد در نواحی مرکزی دشت سطح آب تا حدود ۱/۸ متر بالا می‌آید. پناهی و همکارانش [۱۱] برای بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت زنجان از مدل MODFLOW استفاده کردند. پس از تهیه مدل مفهومی و تعیین شرایط مرزی و اولیه، شبیه‌سازی کمی انجام و با استفاده از الگوریتم PEST واسنجی شد. نتایج مدل کمی پایدار و ناپایدار نشان داد مقدار متوسط سالانه آب ذخیره‌شده در آبخوان برابر ۲۱ میلیون مترمکعب و میزان تخلیه سالانه آب از این آبخوان توسط چاه‌ها و چشمه‌ها حدود ۳۵۷ میلیون مترمکعب است که ۱۷ برابر ذخیره سالانه آب در آبخوان است. این امر نشان‌دهنده برداشت بسیار بی‌رویه از آبخوان و استفاده از ذخیره آب موجود در آن است که با ادامه این روند آبخوان دشت به‌طور کامل نابود خواهد شد. نیکبخت و همکارانش [۱۰] در پژوهشی اثر افزایش راندمان آبیاری بر نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت عجب‌شیر را با کمک نرم‌افزار MODFLOW بررسی کردند. از آمار مهر ۱۳۸۳ برای واسنجی مدل در شرایط ماندگار (با ضریب تبیین ۰/۹۸۲۶ و شیب خط رگرسیون ۰/۹۷۲۸) و از دوره آماری مهر ۱۳۷۸ تا شهریور ۱۳۸۴، برای واسنجی مدل در شرایط غیرماندگار استفاده شد. در نهایت، سطح آب زیرزمینی و بیلان آبخوان در دو حالت ادامه روند کنونی روش آبیاری (ثقلی) و تغییر سیستم‌های آبیاری به تحت فشار برای دوره زمانی پاییز ۱۳۸۴ تا تابستان ۱۴۰۰ پیش‌بینی شد. براساس نتایج، با ادامه روند کنونی آبیاری، بیلان آبخوان در انتهای دوره زمانی پیش‌بینی، ۲/۴۳- میلیون مترمکعب در سال خواهد بود. با تبدیل سیستم‌های آبیاری سنتی به تحت فشار و افزایش راندمان آبیاری، این مقدار ۳/۹۹ میلیون مترمکعب در سال به‌دست آمد (۳/۲۳ میلیون مترمکعب افزایش در

بارش محاسبه شد که مقادیر متوسط درازمدت ماهیانه در جدول ۱ ارائه شده است.

مهم‌ترین جریان سطحی در دشت خزل رودخانه گاماسیاب است که با جمع‌آوری آب رودخانه‌های ملایر، تویسرکان و فارسبان از دشت خارج و پس از الحاق رودخانه‌های کنگاور کهنه و آران در محل دوآب به سمت استان کرمانشاه جاری می‌شود. شکل ۲ موقعیت رودخانه‌های دشت خزل را نشان می‌دهد. رودخانه گاماسیاب که عمده‌ترین جریان سطحی در دشت محسوب می‌شود در محل ورود و خروج خود از دشت فاقد ایستگاه هیدرومتری به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان است. بنابراین، برای محاسبه دبی ورودی و خروجی آن از دشت خزل از معادله بیلان آب سطحی (معادله ۱) استفاده شد. بدین‌منظور ابتدا آمار و اطلاعات دبی در ایستگاه‌های کارخانه، وسج و فارسبان به ترتیب روی رودخانه‌های قلقلرود (تویسرکان)، حرم‌رود (ملایر) و سراب‌رود (فارسبان) به‌عنوان ورودی به دشت و آمار دبی اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های دوآب، آران و کنگاور کهنه تجزیه و تحلیل شد. با معادله اساسی بیلان آب سطحی یعنی رابطه ۱ کل دبی ورودی به دشت ( $Q_{in}$ ) محاسبه می‌شود، سپس با استفاده از رابطه ۲ دبی ورودی گاماسیاب به دشت و از رابطه ۴ دبی خروجی گاماسیاب از دشت محاسبه شد.

$$(P + Q_{in} + Q_g) - (Q_{out} + E_s + T_s + I) = \Delta S \quad (1)$$

که در آن:

$P$  برابر بارش،  $Q_{in}$  برابر جریان آب سطحی ورودی به سامانه،  $Q_g$  برابر جریان آب زیرزمینی ورودی به رودخانه (رابطه ۳)،  $Q_{out}$  برابر جریان آب سطحی خروجی از سامانه،  $E_s$  برابر تبخیر از سطح،  $T_s$  برابر تعرق،  $I$  برابر نفوذ به داخل خاک شامل نفوذ مستقیم از ریزش‌های جوئی و برگشت آب آبیاری و  $\Delta S$  همان تغییر در ذخیره سامانه آب سطحی است [۸].

جریان آب سطحی ورودی به دشت خزل عبارت است از:

$$Q_{in} = Q_{\text{ایستگاه فارسبان}} + Q_{\text{ایستگاه وسج}} + Q_{\text{گاماسیاب}} + Q_{\text{ایستگاه کارخانه}} \quad (2)$$

در رابطه ۲ غیر از دبی ورودی رودخانه گاماسیاب سایر اجزا معلوم‌اند [۱۹].

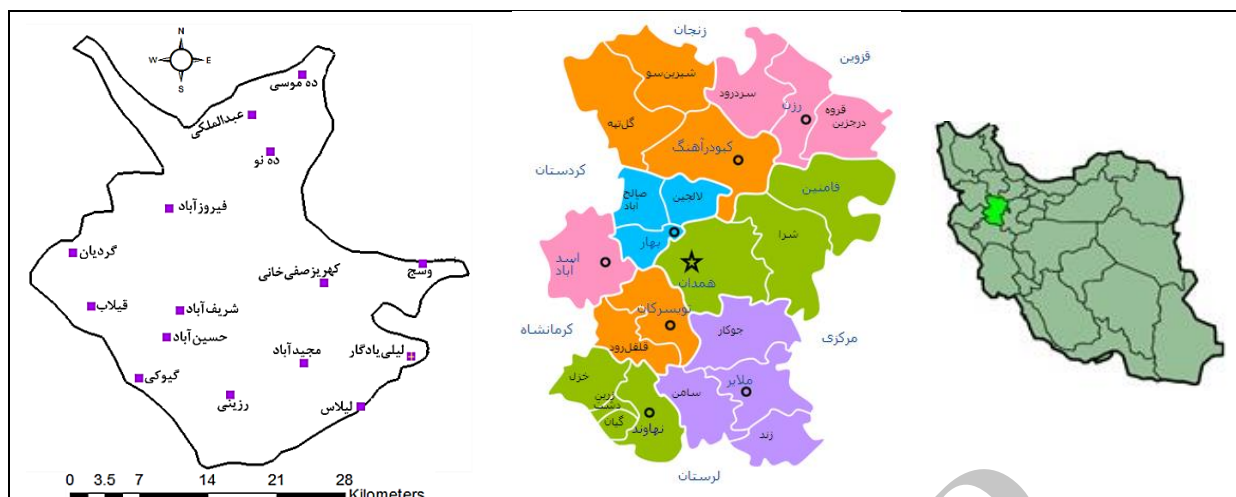
سال). همچنین براساس نتایج، با تغییر سیستم‌های آبیاری، سطح آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر در انتهای دوره زمانی پیش‌بینی، به‌طور متوسط ۴/۶۳ متر افزایش خواهد یافت. پورمحمدی و همکارانش [۱۲] بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان همدان را با کمک مدل MODFLOW به‌منظور مدیریت بهینه منابع آب به‌ویژه مصارف کشاورزی، بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد بیلان دشت منفی و کسری مخزن به‌میزان ۱۲/۲ - میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ است. نتایج بیلان آب دستی و تغییرات سطح ایستابی دشت، نتایج مدل آب زیرزمینی مادفلو را تأیید کرد. ایشان ضریب همبستگی در واسنجی مدل را در شرایط ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۷ و ۰/۹۷ محاسبه کردند.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعه‌شده

دشت خزل واقع در شهرستان نهاوند در استان همدان با مساحت ۱۹۱۹۸/۸ هکتار بین طول‌های شرقی ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه و ۳ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه و ۴۳ ثانیه و عرض‌های شمالی ۳۴ درجه و ۲۴ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه و ۵۷ ثانیه قرار دارد. شیب عمومی دشت از جنوب شرق به طرف شمال غرب است و مرتفع‌ترین نقطه حوضه بیش از ۱۵۹۰ متر ارتفاع و پست‌ترین قسمت آن ۱۴۶۴ متر از سطح دریا اختلاف دارد. متوسط سالانه بارش و تبخیر در منطقه به ترتیب ۴۹۰ و ۱۲۴۲/۶۱ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۱۳/۶ درجه سانتی‌گراد است [۱۹]. در شکل ۱ موقعیت استان همدان در ایران، دشت خزل در شمال‌غربی نهاوند و موقعیت پیزومترها در محدوده دشت خزل نشان داده شده است.

در تهیه مدل ریاضی آب زیرزمینی پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژی اهمیت بسزایی دارد. پارامترهای هواشناسی شامل دما، بارندگی و تبخیر است. میانگین پارامترهای حداکثر مطلق، متوسط حداکثر، متوسط، متوسط حداقل، حداقل مطلق در دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۸۹ در ایستگاه وسج واقع در محدوده مطالعاتی، محاسبه شد که در جدول ۱ تنها مقدار متوسط ماهیانه دما آورده شده است. براساس آمار بارندگی ۱۲ ساله در ایستگاه سیاه‌دره (۱۳۷۷-۱۳۸۸)، مقادیر ماهیانه بارش، متوسط درازمدت ماهیانه و سالیانه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان همدان در ایران، موقعیت خزل در شمال غرب نهاوند و دشت خزل

جدول ۱. مقادیر متوسط بلندمدت پارامترهای هواشناسی برای محدوده دشت خزل [۱۹]

ماه‌های سال	بارش	تبخیر	دما (°C)
فروردین	۸۷/۴	۱۰۴	۱۰/۶
اردیبهشت	۴۶/۳	۱۵۷/۷	۱۵/۴
خرداد	۱/۲۵	۲۳۳/۲	۲۰/۸
تیر	۰/۴۵	۲۸۸/۴	۲۵/۴
مرداد	۰/۹۱	۳۰۰/۸	۲۶/۶
شهریور	۴/۷	۵	۲۲/۸
مهر	۷/۱	۱۴۷/۸	۱۷/۲
آبان	۹۰/۹۵	۶۳/۸	۱۰/۹
آذر	۶۸/۲	۱۶/۸	۴/۹
دی	۶۳/۵	۳/۱۳	۱/۶
بهمن	۶۶/۳	۴/۹۴	۱/۳
اسفند	۵۲/۵	۲۸/۱	۶/۲
متوسط سالانه	۴۹۰	۱۲۴۲/۶۱	۱۳/۶



شکل ۲. موقعیت رودخانه‌های موجود در محدوده دشت [۱۹]

استفاده از فرمول‌های متعددی قابل محاسبه است که در تحقیق حاضر برای تعیین این مقدار از فرمول فائو استفاده شده است.

$$F = \sum_{i=1}^{12} \cdot / \lambda(R - C \log E)^{1/5} \quad (5)$$

که در آن F برابر میزان نفوذ سالیانه برحسب R.mm برابر بارندگی ماهیانه برحسب E.mm برابر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه برحسب C.mm برابر ضریب ثابت وابسته به دما  $C = 0.6917 \times T^{-0.3981}$  و T نیز متوسط دمای ماهیانه (درجه سانتی‌گراد) است [۱].

مقدار نفوذ مستقیم از نزولات جوی در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به رابطه ۱ با در نظر گرفتن تغییر در ذخیره سمانه آب سطحی برابر با صفر و محاسبه سایر پارامترها در نهایت دبی ورودی به دشت خزل توسط رودخانه گاماسیاب محاسبه شد که جدول ۵ مقدار آن ارائه شده است.

به‌منظور شناخت ضخامت آبرفت و تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان از مشخصات سه حلقه چاه اکتشافی به‌همراه پیزومترهای مختص به آن و نتایج آزمایش‌های پمپاژ انجام‌شده روی دو حلقه از چاه‌ها استفاده شد. خلاصه اطلاعات در جدول ۶ ارائه شده است.

$$Q_g = K \times b \times L \times \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (3)$$

که در آن:

K برابر ضریب هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، b برابر عرض قسمت خیس شده یا تغذیه داخل رودخانه (متر)، L برابر طول قسمتی از مسیر رودخانه که سبب تغذیه سفره شده (متر) و  $\frac{\Delta h}{\Delta x}$  همان شیب هیدرولیکی بین سطح آب رودخانه و دشت مجاور است [۸].

$$Q_{out} = Q_{\text{دوآب}} - Q_{\text{آران}} - Q_{\text{کنگاور کهنه}} \quad (4)$$

که در آن:

$Q_{out}$  برابر دبی جریان سطحی خروجی از خزل توسط گاماسیاب است که مقادیر نهایی آن در جدول ۲ ارائه شده است [۱۹].

تبخیر و تعرق از سطح با توجه به نوع الگوی کشت، سطح زیر کشت و تبخیر و تعرق ماهانه هر گیاه با استفاده از نرم‌افزار AGWAT استخراج شد که در جدول ۳ آورده شده است. تبخیر مستقیم از سطح آب رودخانه‌ها با توجه به ناچیز بودن آن در مقایسه با تبخیر و تعرق در نظر گرفته نشد. برآورد میزان نفوذ مستقیم از ریزش‌های جوی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی و با

جدول ۲. دبی جریان سطحی خروجی ماهانه از دشت خزل توسط رودخانه گاماسیاب (سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ برحسب مترمکعب بر ثانیه) [۱۹]

نام رودخانه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
دوآب	۱/۰۱	۱۱/۶	۹/۱۰	۹/۸۲	۱۴/۹۰	۲۴/۰۰	۶۱/۹۰	۴۲/۸۰	۶/۱۸۶	۵/۷۹	۲/۵۰	۱/۲۷
آران	۰/۰۶	۲/۵۵	۱/۷۲	۱/۹۸	۲/۴۲	۷/۹۸	۱۶/۴۰	۱۳/۶۰	۲/۴۸	۰/۸۲	۰/۱۹	۰/۰۸
کنگاور کهنه	۰/۹۳	۰/۷۴	۲/۷۱	۲/۸۷	۰/۹۷	۰/۶۷	۲/۱۶	۰/۹۷	۰/۴۳	۰/۸۱	۰/۵۵	۰/۳۳
$Q_{out}$	۰/۰۲	۸/۳۱	۴/۶۷	۴/۹۷	۱۱/۵۱	۱۵/۳۵	۴۳/۳۴	۲۸/۲۳	۳/۹۵	۴/۱۷	۱/۷۶	۰/۸۶

جدول ۳. تبخیر و تعرق ماهانه دشت خزل در (سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ برحسب مترمکعب بر ثانیه)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
تبخیر و تعرق ( $m^3/s$ )	۱/۱۳	۰/۸	۰/۶۰	۰/۶۱	۱/۱۵	۲/۴۲	۵/۱۰	۶/۷۵	۵/۸۷	۳/۷۶	۳/۳۷	۱/۷۰

جدول ۴. نفوذ مستقیم از نزولات جوی (سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶)

پارامتر	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
R(mm)	۶۸	۱۷۹	۵۱/۵	۳	۰	۰	۰	۲۸/۵	۱۶۲	۵۷	۱۸	۵۸/۵
E(mm)	۲۶/۴۳	۶۲/۳۳	۱۰۱	۱۳۲/۸۹	۱۳۵/۵۹	۱۱۱/۷۷	۷۵/۴۶	۳۲/۷۴	۱/۵۳	۰	۰/۶	۱۴/۴۳
T(°C)	۹/۱۹	۱۶/۲۲	۲۲/۳۳	۲۶/۷۸	۲۷/۱۴	۲۳/۸۸	۱۸/۴۱	۱۰/۵۹	۱/۳۹	۰	۰/۷۵	۶/۱۵۵
C	۱/۶۷	۲/۰۹۷	۲/۳۸	۲/۵۶	۲/۵۷	۲/۴۴	۲/۲۰	۱/۷۶	۰/۷۸	۰	۰/۶۱	۱/۴۲
F	۱۰/۶۳	۵/۵۲۷	۰	۰	۰	۰	۳/۹۴۸	۱۰/۰۹۸	۶/۰۳	۰	۶/۱۲	۶/۱۲۶

جدول ۵. دبی جریان سطحی ورودی ماهانه به دشت خزل توسط رودخانه گاماسیاب (سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶)

پارامتر	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
دبی ورودی رودخانه گاماسیاب (m <sup>3</sup> /s)	۰/۰۱	۷/۱	۳/۱۲	۳/۰۵	۸/۷۶	۱۱/۱	۱۹/۸۵	۹/۶۹	۰/۸۳	۲/۹۸	۰/۹۲	۰/۳۵

جدول ۶. اطلاعات و ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شده در چاه‌های اکتشافی محدوده مطالعاتی دشت خزل [۱۹]

جنس سنگ کف	عمق برخورد (متر)	ضرایب سفره	عمق چاه (متر)	محل چاه	مختصات (UTM)	
					X	Y
رس و سیلت	۱۰۸	آبدهی مختصر	۱۰۸	کهریز صفی خانی	۲۴۰۳۲۰ - ۳۸۰۱۳۴۴	
رس، مارن، شن و ماسه	۱۲۰	T=۵۸, S=۰/۰۱۵	۱۲۰	شهرک	۲۳۸۱۰۰ - ۳۷۹۷۳۳۰	
رس، مارن، شن و ماسه	۱۱۷/۵	T=۳۳۵, S=۰/۰۱	۱۱۷/۵	مجیدآباد	۲۳۷۳۵۰ - ۳۷۹۱۸۰۸	

• Clay, Cobble, Sand (مخلوط قلوه سنگ، ماسه و رس)

• Sand, Gravel (مخلوط شن و ماسه)

• Clay, Sand (مخلوط ماسه و رس)

• Clay (رس)

• Clay, Silt, Sand (مخلوط ماسه، سیلت و رس)

• Clay, Silt, Sand, Gravel (مخلوط شن و ماسه و سیلت و رس جزئی)

• Gravel, Clay, Cobble, Sand, Silt (مخلوط شن و ماسه و سیلت و رس با قلوه سنگ جزئی)

• Clay, Silt (رس و سیلت)

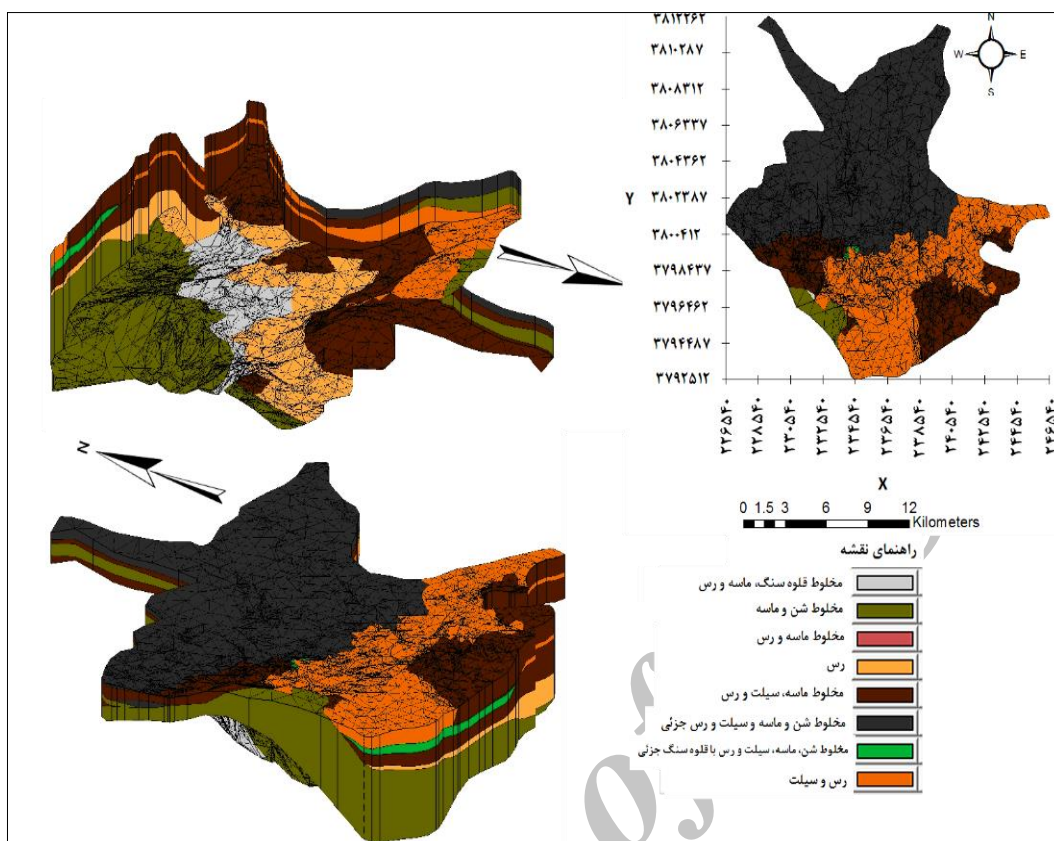
با استفاده از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی و لوگ حفاری تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه، چگونگی لایه‌بندی طبقات آبخوان (مدل استراتیگرافی) در محیط GMS ترسیم شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان یادآوری است که مدل سه‌بعدی آبخوان، شبکه‌ای با ۷۰ ردیف و ۷۰ ستون، شامل ۱۹۷۱ سلول فعال با ابعاد ۳۱۰×۳۱۵ متر در ۵ لایه بود.

در منطقه خزل ۲۹۰ حلقه چاه عمیق، ۳۰ حلقه چاه نیمه‌عمیق و ۱۶ دهنه قنات فعال وجود دارد. با توجه به آماربرداری از منابع آب زیرزمینی سالانه حجمی معادل ۱۰۶/۶۸۲ میلیون مترمکعب از آبخوان برداشت می‌شود که به‌طور میانگین آبدهی هر چاه برابر ۱۰/۳۳ لیتر بر ثانیه است [۱۹].

از میان مدل‌های عددی و تحلیلی شبیه‌سازی سفره آب‌های زیرزمینی، مدل‌های عددی جایگزین مدل‌های تحلیلی در محیط‌های طبیعی می‌شوند. نرم‌افزار GMS6.5 یک بسته نرم‌افزاری جامع در مدل‌سازی جریان آب در لایه‌های آبدار است که قابلیت استفاده GIS را دارد. برای مدل‌بندی دشت خزل از امکانات GIS و نیز از مدل MODFLOW 2000 گنجانده شده در بسته نرم‌افزاری GMS استفاده شد.

با استفاده از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی و لوگ مختص به پیرومترهای منطقه، مدل استراتیگرافی آبخوان ساخته شد که شامل ۸ نوع جنس خاک مختلف در لایه‌های آبخوان بود. این ۸ نوع خاک در زیر آورده شده‌اند:





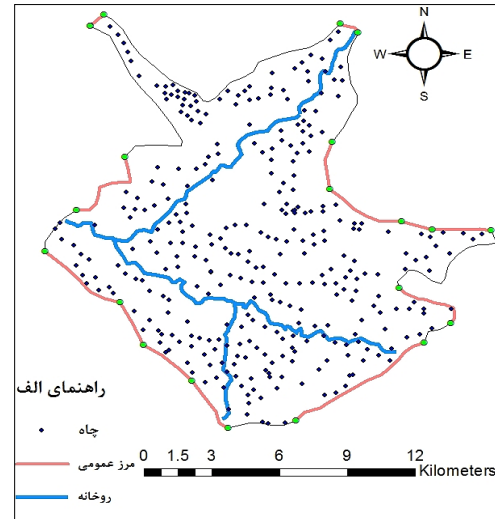
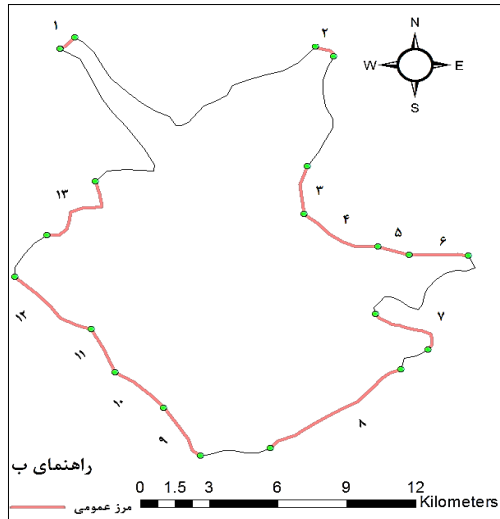
شکل ۳. لایه‌بندی آبخوان در محدوده مطالعه‌شده

ردیف در جهت x با طول ۳۱۵ متر برای هر ردیف، حداکثر ۷۰ ردیف در جهت y با عرض ۳۱۰ متر و ۵ ردیف در جهت z با ارتفاع متغیر برای هر سلول روی دشت خزل در نظر گرفته شده است.

واسنجی مدل در شرایط جریان ماندگار، برای مه‌رم‌ماه ۱۳۸۵ انجام شد و مقادیر بهینه ضریب نفوذپذیری هشت نوع خاک و ضرایب توانایی مرزها و بستر رودخانه‌ها به‌دست آمد. مدل برای بازه زمانی آبان ۱۳۸۵ تا مهر ۱۳۸۶ در شرایط جریان غیرماندگار اجرا شد و با مقایسه سطح آب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل با سطح آب اندازه‌گیری‌شده در ۱۵ حلقه چاه پی‌زومتری مقادیر ضریب ذخیره ویژه و آبدی ویژه بارها طی عمل واسنجی اصلاح و در نتیجه سطح آب شبیه‌سازی‌شده به سطح آب مشاهده‌ای نزدیک شد. پس از کالیبراسیون، مدل برای استرس‌های خارج از بازه زمانی واسنجی نیز اجرا شد. برای این منظور از داده‌های مشاهداتی بار آبی مه‌رم‌ماه ۱۳۸۷ استفاده شد.

در ادامه داده‌های مورد نیاز دو لایه اطلاعاتی چشمه و چاه (source & sink) و تغذیه (Recharge) به مدل داده شد. در لایه source & sink وضعیت ۱۵ پی‌زومتر منطقه (خطوط هم‌عمق آب زیرزمینی در مهر ماه ۱۳۸۵ شرط اولیه مدل است)، شرایط مرزی (مرزهای بدون جریان و جریان عمومی)، مشخصات چاه‌ها و چشمه‌ها، مشخصات رودخانه‌ها شامل توانایی عبور آب از بستر رودخانه، بار آبی در رودخانه و رقم بستر رودخانه وارد شد. در شکل ۴ قسمت الف، لایه source & sink و در قسمت ب، موقعیت مرزهای بار عمومی مشاهده می‌شود.

در لایه Recharge عوامل تغذیه آبخوان مثل تغذیه از نزولات جوی و یا تغذیه از آب برگشتی به‌دست‌آمده از آبیاری به مدل معرفی می‌شود. با توجه به بافت خاک و روش آبیاری حدود ۳۰ درصد از حجم آب زیرزمینی استفاده‌شده در کشاورزی یعنی ۳۲ میلیون مترمکعب در سال به سفره نفوذ می‌کند. با توجه به کمیت و کیفیت داده‌های پایه، یک شبکه‌بندی سه‌بعدی شامل حداکثر ۷۰



شکل ۴. الف) لایه اطلاعاتی source & sink (ب) مرزهای بار عمومی

$$SE_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (۸)$$

که در آن، s: انحراف معیار نمونه و n: تعداد اعضای نمونه است.

### نتایج و بحث

#### نتایج اجرای مدل برای شرایط ماندگار

هدف از اجرای مدل در شرایط ماندگار، کالیبراسیون پارامترهای هدایت هیدرولیکی و توانایی مرز برای عبور آب از بستر رودخانه و زهکش و نیز به دست آوردن بار آبی اولیه برای اجرای مدل در شرایط غیرماندگار است. مقادیر اولیه و کالیبره شده هدایت هیدرولیکی و توانایی مرز برای عبور جریان به ترتیب در جدول های ۷ و ۸ ارائه شده است. در شکل ۵ نقشه خطوط تراز سطح ایستابی اندازه گیری و محاسبه شده برای جریان ماندگار در مهرماه ۱۳۸۵ نشان داده شده است.

برای اطمینان از نبود تفاوت معنادار بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، تجزیه و تحلیل آماری روی نتایج انجام شد که در اینجا از شاخص های آماری ضریب تبیین (رابطه ۶)، میانگین خطا (رابطه ۷)، خطای استاندارد میانگین (رابطه ۸) و شیب خط رگرسیون استفاده شد.

$$R^2 = \left( \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (۶)$$

که در آن  $x_i$ : مقدار مشاهداتی در پیزومتر نام؛  $\bar{x}$ : میانگین مقادیر مشاهداتی؛  $y_i$ : مقدار محاسباتی برای پیزومتر نام؛  $\bar{y}$ : میانگین مقادیر محاسباتی است.

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n x_{p_j} - x_{m_j}}{n} \quad (۷)$$

که در آن، n: تعداد داده ها؛  $x_p$ : مقدار شبیه سازی شده و  $x_m$ : مقدار اندازه گیری شده است.

جدول ۷. مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و ذخیره ویژه (اولیه و کالیبره شده)

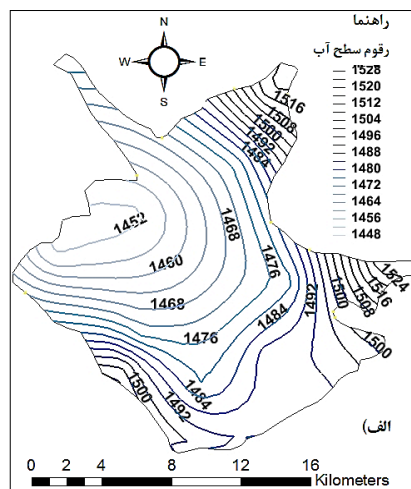
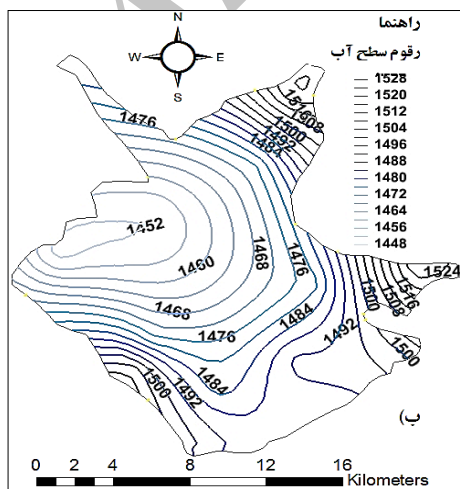
ماده	K اولیه (m/day)	K کالیبره شده (m/day)	S <sub>y</sub> اولیه	S <sub>y</sub> کالیبره شده	S <sub>s</sub> اولیه (1/m)	S <sub>s</sub> کالیبره شده (1/m)
Clay, Cobble, Sand	۳۲	۳۰	۰/۲	۰/۳	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۴
Sand, Gravel	۱۲	۱۱	۰/۲۵	۰/۲	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۲
Clay, Sand	۱۸	۱۴	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۹
Clay	۴	۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۱
Clay, Silt, Sand	۳۰	۲۵	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۴
Clay, Silt, Sand, Gravel	۳۱	۲۹	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۱
Gravel, Clay, Cobble, Sand, Silt	۳۴	۳۳	۰/۳۵	۰/۱۱	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۸
Clay, Silt	۸	۱۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۹

جدول ۸. مقادیر بهینه توانایی مرز برای عبور آب از بستر رودخانه‌ها و مرزهای بار عمومی

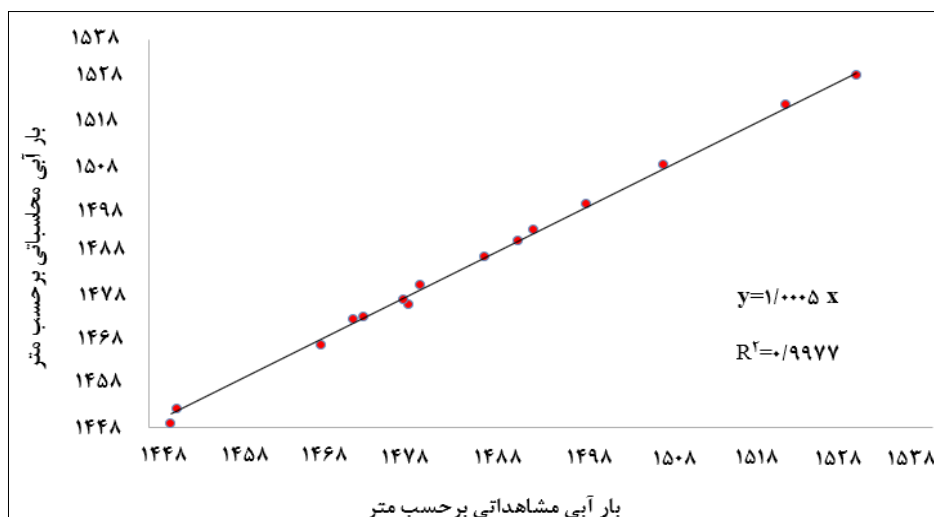
شرط مرزی	مقادیر اولیه (m <sup>2</sup> /d/m)	مقادیر نهایی (m <sup>2</sup> /d/m)
بستر رودخانه	قلقلرود	۱۰
	حرم‌رود	۱۵
	فارسیان	۲۳
	گاماسیاب	۹
مرز بار عمومی	مرز ۱	۱۰۰
	مرز ۲	۲۵۰
	مرز ۳	۱۴۰
	مرز ۴	۱۲۵
	مرز ۵	۳۵۰
	مرز ۶	۳۲۵
	مرز ۷	۸۰
	مرز ۸	۱۰۰
	مرز ۹	۵۸
	مرز ۱۰	۳۲۵
	مرز ۱۱	۸۵
	مرز ۱۲	۱۲۰
	مرز ۱۳	۱۵۰

در تحقیق خود، ضریب تبیین را در واسنجی مدل کمی برابر ۰/۹۹ محاسبه کردند که این مقدار گویای مدلی دقیق و کارآمد بود. همچنین پورمحمدی و همکارانش [۱۲] به واسنجی مدل با ضریب تبیین ۰/۹۸ با عنوان مدلی دقیق اشاره کردند. در تحقیقات دیگری نیز پژوهشگران برای واسنجی مدل آبخوان به تحلیل آماری ضریب تبیین پرداخته‌اند. با مقایسه نتایج ضریب تبیین این مطالعه با تحقیقات انجام‌شده، می‌توان گفت که مدل تهیه‌شده برای آبخوان یادشده دقت زیادی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد.

هر چقدر مقدار ضریب تبیین و شیب خط رگرسیونی به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت زیاد مدل در برآورد بار آبی است. ضریب تبیین برای مقایسه داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در محل هر پیزومتر در شکل ۶ نشان داده شده است که برابر ۰/۹۹۷۵ و بیانگر انطباق نسبتاً خوب تراز مشاهداتی و محاسباتی در پیزومترها و نیز شبیه‌سازی قابل قبول مدل در شرایط جریان ماندگار است. با توجه به نتایج مطالعات مشابه انجام‌شده، می‌توان گفت که ضریب تبیین معیار مناسبی برای ارزیابی دقت مدل‌های آب زیرزمینی است. پورحقی و همکارانش [۱۳]



شکل ۵. نقشه خطوط تراز سطح ایستابی (الف) شبیه‌سازی‌شده و (ب) اندازه‌گیری‌شده در مهرماه ۱۳۸۵

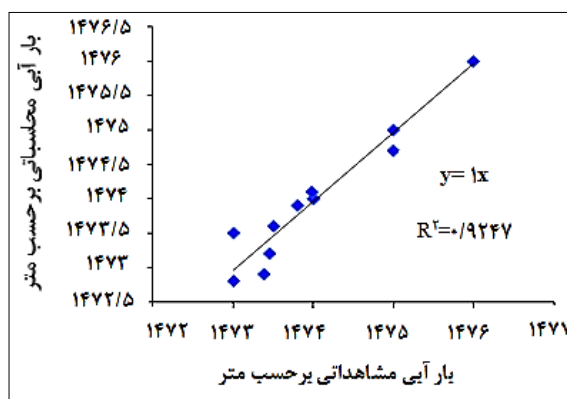
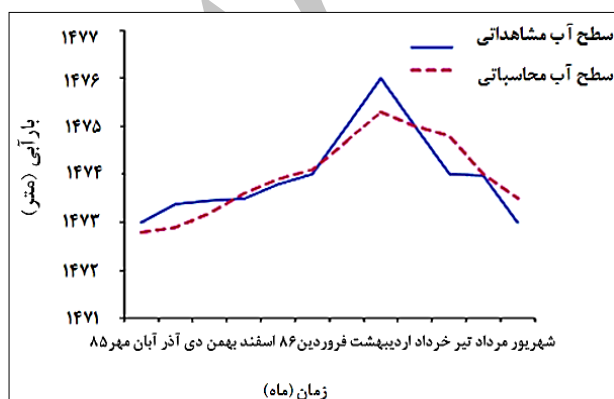


شکل ۶. مقایسه داده‌های محاسباتی و مشاهداتی رقوم سطح آب در پیزومترهای دشت خزل برای مهرماه ۱۳۸۵ در شرایط جریان ماندگار

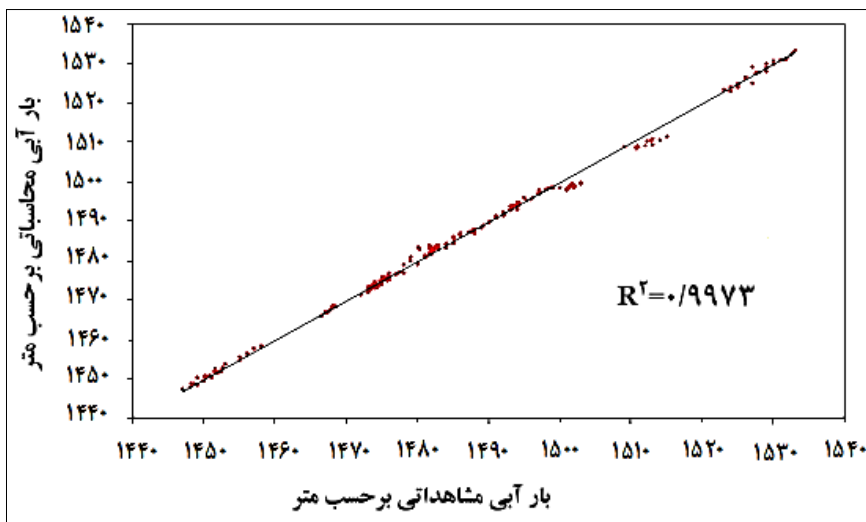
شده است. این نمودارها تطابق مناسبی را بین نتایج محاسباتی و مشاهداتی نشان می‌دهند. تجزیه و تحلیل آماری در محل ۱۵ پیزومتر محدوده مطالعاتی انجام شد. با توجه به شکل ۸ پراکندگی نقاط نسبت به خط  $y=x$  کم است و ضریب تبیین محاسبه‌شده، دقت زیاد مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به‌بیانی با استناد به ضریب تبیین و شیب خط رگرسیونی می‌توان گفت که مدل در شبیه‌سازی بار آبی در دشت خزل موفق بوده و نتایج قابل قبولی ارائه کرده است. تحلیل آماری بار آبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در پیزومترهای منطقه در جدول ۹ آورده شده است.

#### نتایج اجرای مدل برای شرایط غیرماندگار

در این مرحله شبیه‌سازی در ۱۲ دوره تنش یک‌ماهه (از آبان ۱۳۸۵ تا مهر ۱۳۸۶)، انجام شد. در مرحله واسنجی مدل، پارامترهای ضریب ذخیره ویژه ( $S_s$ ) و آبدهی ویژه ( $S_y$ ) کالیبره شدند. مقادیر اولیه و کالیبره‌شده  $S_s$  و  $S_y$  در جدول ۷ ارائه شده است. سپس مقادیر سطح آب شبیه‌سازی‌شده در محل پیزومترها استخراج شد. برای ارزیابی مدل، نمودار همبستگی بین مقادیر سطح آب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌شده در چاه‌های پیزومتری ترسیم شد که یک نمونه آن در شکل ۷ ارائه



شکل ۷. نمودارهای الف) نمودار همبستگی بین سطح آب مشاهده‌ای در مقابل محاسباتی؛ ب) تغییرات سطح آب در مقابل زمان در پیزومتر حسین‌آباد سرکان در سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶



شکل ۸. مقایسه سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در پیزومترهای دشت خزل در سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶

جدول ۹. تحلیل آماری مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهداتی بار آبی در پیزومترها

نام پیزومتر	ضریب تبیین	شیب خط رگرسیون	قدر مطلق بیشینه تفاوت (متر)	میانگین خطا (متر)	خطای استاندارد میانگین
ده موسی	۰/۸۹	۱	۱/۱	۰/۰۷۳	۰/۳۱
ده نو	۰/۹۲	۱/۰۰۰۱	۱	۰/۱۱	۰/۲۲۵
عبدالملکی	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۶	-۰/۱۱	۰/۱۶۵
فیروزآباد	۰/۹۶۶	۱/۰۰۰۲	۰/۹	۰/۲۸۳	۰/۱۶
گردیان	۰/۸۹	۱/۰۰۰۳	۱/۲۷	۰/۴۹	۰/۱۶
قیلاب	۰/۸۲	۰/۹۹	۰/۹	-۰/۲	۰/۱۹۴
شریف‌آباد	۰/۸۴	۱	۰/۵	۰/۰۲۳	۰/۰۸۶
حسین‌آباد	۰/۷۵۸	۱	۰/۵	-۰/۰۲۶	۰/۱۲
گیوکی	۰/۸۴	۰/۹۹	۱/۲۸	-۰/۲۱	۰/۲۴۱
کهریز صفی‌خانی	۰/۹۰	۱	۰/۹	-۰/۰۴۶	۰/۱۳
مجیدآباد	۰/۸۲	۱/۰۰۰۲	۱/۲۶	۰/۲۶۴	۰/۱۹۲
لیلاس	۰/۹۲	۱	۱	-۰/۰۲	۰/۱۳
لیلی یادگار	۰/۹۳	۱/۰۰۰۲	۱	۰/۲۳۶	۰/۱۲
رزینی	۰/۹۶	۱/۰۰۰۳	۱	۰/۴۱	۰/۱۲
وسج	۰/۹۷	۰/۹۹۹۶	۱	-۰/۱۱	۰/۱۲

کمترین مقدار آن حدود ۲- سانتی‌متر در پیزومتر لیلاس بوده است.

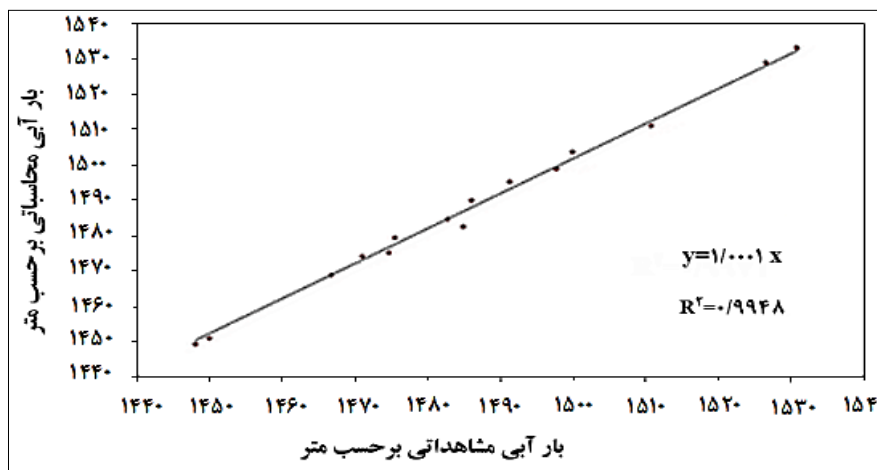
**صحت‌سنجی**

پس از کالیبراسیون مدل، باید آن را برای استرس‌های خارج از بازه زمانی کالیبراسیون اجرا کرد و نتایج آن را با مشاهدات مقایسه کرد. در صورت مشاهده اختلاف بیش از حد، تصحیحات لازم روی آن صورت می‌گیرد. بدین‌منظور برای

با توجه به جدول ۹، می‌توان گفت که مدل کمی آبخوان در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی، مدلی موفق و کارآمد بوده است. بیشترین اختلاف بین بار آبی شبیه‌سازی و مشاهده‌شده در پیزومتر گیوکی به‌میزان ۱/۲۸ متر رخ داده است که می‌تواند به‌علت نزدیکی بیش از حد این پیزومتر به مرز آبخوان و خطای ناشی از شرط مرزی باشد. همچنین بیشترین میانگین خطا حدود ۴۹ سانتی‌متر (میانگین ۱۲ ماهه) در پیزومتر گردیان و

مشاهداتی در محل ۱۵ پیزومتر محدوده نشان داده شده است. ضریب تبیین برابر ۰/۹۹۴ بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان از واسنجی صحیح مدل دارد.

صحت‌سنجی مدل از داده‌های مشاهداتی بار آبی مهرماه ۱۳۸۷ استفاده شده است. در واقع، با استفاده از پارامترهای واسنجی شده، مدل برای مهرماه ۱۳۸۷ اجرا شد. در شکل ۹ مقادیر محاسباتی سطح آب در مقابل مقادیر سطح آب



شکل ۹. مقایسه داده‌های مشاهداتی و محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی

پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف، توسط پژوهشگران داخلی و خارجی انجام شده است. غفاریان [۲] در تحقیق خود بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی دشت کاشمر، پیش‌بینی کرد با ادامه روند کنونی بهره‌برداری، متوسط سطح آب زیرزمینی در دشت یادشده، سالانه یک متر افت خواهد کرد. همچنین پورحقی و همکارانش [۱۳] با توجه به هیدروگراف پیش‌بینی آب زیرزمینی بر مبنای مدل MODFLOW نتیجه گرفتند که میزان افت سطح سفره طی دو سال آینده برابر ۱/۵۵ متر خواهد بود. با مقایسه نتیجه پیش‌بینی مدل مطالعه حاضر با تحقیقات انجام شده، می‌توان گفت که مدل MODFLOW در صورتی که به درستی واسنجی و صحت‌سنجی شود، ابزاری مناسب برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی خواهد بود. نتایج مختص به آن پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی به شرایط پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی و همچنین وضعیت زمین‌شناسی و استراتیگرافی آبخوان بستگی دارد و چنانچه پیش‌بینی درستی از سری‌های زمانی مختص به آن پارامترهای هواشناسی - هیدرولوژیکی در آینده برآورد شود، نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری از نوسانات سطح آب زیرزمینی در آینده به دست خواهد آمد.

پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در آینده پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل MODFLOW برای دشت خزل می‌توان گزینه‌های مختلف مدیریتی را بررسی کرد. از جمله می‌توان مقدار مجاز برداشت به منظور جلوگیری از کاهش بیش از اندازه سطح سفره آب زیرزمینی، پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در آینده بدون و با اعمال شرایط مختلف مدیریتی، مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی و غیره را ارزیابی کرد. همچنین نتایج مدل هیدرودینامیکی آبخوان، شرط لازم برای شبیه‌سازی آلودگی آب زیرزمینی با مدل‌های SEAM3D، RT3D، MODPATH، MT3DMS است. در ادامه این تحقیق، نوسانات سطح آب زیرزمینی در آینده بدون اعمال شرایط مدیریتی خاص پیش‌بینی شد. بدین منظور فرض شد مقادیر بارندگی ماهانه، دبی ماهانه رودخانه‌ها و سایر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه معادل مقادیر بلندمدت و برداشت از آبخوان همانند قبل باشد. سپس مدل برای ده سال آینده اجرا شد. همان‌گونه که در جدول ۱۰ ارائه شده است، نتایج بررسی و پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در منطقه بیانگر سرعت روند کاهشی منابع آب زیرزمینی در سال‌های متمادی است و بیشترین افت در نواحی شمال شرق دشت رخ می‌دهد که مقدار آن به ترتیب ۱/۸۲، ۳/۶ و ۸/۲ متر به دست آمد. تحقیقاتی با موضوع

محصولات استراتژیک و تأمین بخش عمده‌ای از آب مصرفی کشاورزی و شرب منطقه، حائز اهمیت است. با توجه به بیلان منفی (افت ۵/۸ متری طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹) و ادامه روند کنونی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، با کاهش آب زیرزمینی و در نتیجه لطمه به صنعت و کشاورزی و مسائل نشست زمین در محدوده آبخوان مواجه خواهیم شد. بنابراین، مطالعات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در دشت خزل الزامی و مهم است. با توجه به قابلیت زیاد نرم‌افزار GMS در استفاده از GIS و همچنین لایه‌بندی دقیق آبخوان، در این تحقیق به منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت خزل از آن استفاده شد. بدین ترتیب که مدل کمی آبخوان با کد MODFLOW تهیه و در دو حالت جریان ماندگار (مهرماه ۱۳۸۵) و جریان غیرماندگار (از آبان‌ماه ۱۳۸۵ تا مهرماه ۱۳۸۶) واسنجی و در مهرماه ۱۳۸۷ صحت‌سنجی شد. با کالیبره کردن مقادیر ضریب نفوذپذیری و ضریب توانایی مرزها و بستر رودخانه‌ها در حالت ماندگار و مقادیر ضریب ذخیره ویژه و آبدی ویژه در حالت غیرماندگار، مدل به روش سعی و خطا با مقایسه مکرر سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در محل ۱۵ پیزومتر واسنجی شد. برای صحت‌سنجی مدل در مهرماه ۱۳۸۷ اجرا شد. مقایسه بار آبی محاسبه‌شده توسط مدل و بار آبی مشاهده‌شده در پیزومترها نشان داد مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیشتر از ۰/۹۹ است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل برای بررسی تأثیر شرایط مدیریتی اعمال‌شده در آینده بود. سپس نوسانات سطح آب زیرزمینی در دو حالت اعمال سناریوی کاهش ۱۰ درصدی در میزان برداشت از چاه‌ها و بدون اعمال سناریو در ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد بعد از یک سال سطح آب زیرزمینی آبخوان در نواحی شمال شرق دشت به اندازه ۱/۸۲ متر پایین می‌افتد که بیشترین مقدار افت در کل دشت بود. این مقدار برای ۳ سال و ۱۰ سال بعد به ترتیب برابر با ۳/۶ و ۸/۲ متر است، اما با اعمال سناریوی مدیریتی می‌توان پیش‌بینی کرد که طی ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده به ترتیب مقدار افت سطح آب ۰/۵۲، ۲/۷ و ۷/۰۷ متر برای همین منطقه خواهد بود. طی ۱۰ سال آینده سطح آب در منطقه یادشده ۱/۱ متر افت کمتری نسبت به دوره زمانی مشابه خود با شرایط بدون اعمال سناریو خواهد داشت.

سناریوی کاهش ۱۰ درصدی میزان برداشت آب از چاه‌ها یکی از راهکارهای مناسب برای جلوگیری از افت شدید سطح آب زیرزمینی در منطقه، کاهش میزان برداشت از چاه‌هاست. از این‌رو، پس از اجرای مدل تا ۱۰ سال آینده بار دیگر مدل را در حالتی که میزان برداشت از چاه‌ها ۱۰ درصد کاهش دوباره داشت اجرا شد و نتایج آن با هم مقایسه شد. در جدول ۱۰ نتایج مدل برای حالتی نشان داده شده است که میزان برداشت از چاه‌ها ۱۰ درصد کاهش یابد. همان‌طور که نتایج مدل نشان می‌دهد در صورت به‌کارگیری طرح پیشنهادی، سطح آب در آبخوان بالا می‌آید و این امر تأثیرات مثبتی روی آبخوان خواهد داشت، که از آن جمله می‌توان به جبران افت سطح ایستابی در آبخوان اشاره کرد که به دلیل خشکسالی‌های اخیر و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در منطقه روی داده است. محققان دیگر در دشت‌های داخل و خارج کشور، به بررسی تأثیر عوامل تنش‌زای هیدروژئولوژیکی پرداخته‌اند که در هر دشت با توجه به اقلیم، وضعیت منابع آب، میزان برداشت از چاه‌ها، وضعیت ساختارهای زمین‌شناسی و جنس مواد آبخوان و وضعیت آبخوان‌های مجاور، می‌توان تأثیرگذارترین پارامتر بر نوسانات سطح سفره را مشخص و با تغییر آن پارامتر، نوسانات سطح سفره را پیش‌بینی کرد. مثلاً یائوتی و همکارانش [۲۱] نشان دادند در آبخوان غیرمحصور بویوآریگ، تغییرات فصلی تغذیه از بارش و آبیاری، بیشترین تأثیر را بر نوسانات سطح سفره دارد. همچنین غفاریان [۲] در تحقیق خود به این نتیجه رسید که در صورت افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصدی در میزان بهره‌برداری از آبخوان دشت کاشمر، تراز سطح آب زیرزمینی سالانه به جای ۱ متر به ترتیب حدود ۱/۱۵، ۱/۵ و ۲/۲ متر افت خواهد کرد. در مطالعه‌ای دیگر نیکبخت و نجیب [۱۰] به این نتیجه رسیدند که با تغییر سیستم‌های آبیاری از سنتی به تحت فشار، سطح آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر در انتهای دوره زمانی پیش‌بینی، به‌طور متوسط ۴/۶۳ متر افزایش خواهد یافت. همان‌طور که گفته شد در مناطق مختلف، پارامتر تأثیرگذار بر نوسان سطح آب، می‌تواند متفاوت باشد. در تحقیق حاضر، بهره‌برداری از چاه‌های محدوده دشت، بیشترین تأثیر را بر نوسان سطح سفره داشت.

### نتیجه‌گیری

دشت خزل واقع در شهرستان نهاوند به لحاظ کشت



جدول ۱۰. پیش‌بینی تغییرات مقادیر بار آبی در محل پیزومترها در دو حالت اعمال شدن یا نشدن سناریوی مدیریتی برای یک، سه و ده سال آینده

نام پیزومتر	X	Y	مهر ۸۵	یک سال بعد		سه سال بعد		ده سال بعد	
				بدون سناریو	با سناریو	بدون سناریو	با سناریو	بدون سناریو	با سناریو
دهموسی	۲۳۷۵۴۸	۳۸۰۷۰۰۰	۱۴۹۲/۱۲	۱۴۹۰/۳	۱۴۹۱/۶	۱۴۸۶/۷	۱۴۸۷/۶	۱۴۸۲/۰۸۳	۱۴۸۳/۲۳
دهنو	۲۳۶۶۸۵	۳۸۰۸۷۰۰	۱۴۸۶/۵	۱۴۸۲/۳	۱۴۸۲/۷	۱۴۷۹/۳	۱۴۸۰/۲	۱۴۷۸/۷	۱۴۷۹/۴
عبدالملکی	۲۳۹۰۰۰	۳۸۱۰۵۴۵	۱۴۷۹/۹	۱۴۸۰/۳	۱۴۸۳	۱۴۷۵/۷	۱۴۷۷/۱	۱۴۷۵/۰۱	۱۴۷۶/۲۳
فیروزآباد	۲۳۲۸۹۸	۳۸۰۴۴۱۵	۱۴۵۵/۳۵	۱۴۶۱	۱۴۶۲/۴	۱۴۶۰/۰۳	۱۴۶۱/۹	۱۴۵۷	۱۴۵۸/۷
گردیان	۲۲۸۵۰۰	۳۸۰۲۳۷۳	۱۴۵۸/۶	۱۴۵۵/۶	۱۴۵۸/۶	۱۴۵۲/۳	۱۴۵۳/۴	۱۴۴۹	۱۴۵۱
قیلاب	۲۲۹۳۵۰	۳۷۹۹۹۲۱	۱۴۶۷/۶	۱۴۶۷/۲	۱۴۶۹/۴	۱۴۶۷	۱۴۶۸/۴	۱۴۶۴	۱۴۶۵
شریفاً‌آباد	۲۳۳۴۱۸	۳۷۹۹۷۳۵	۱۴۷۰/۶	۱۴۶۹/۵	۱۴۶۹/۹	۱۴۶۸/۵	۱۴۶۹/۳	۱۴۶۸	۱۴۶۸/۷
حسین‌آباد	۲۳۳۷۸۴	۳۷۹۸۵۲۳	۱۴۷۲	۱۴۷۱/۹	۱۴۷۲/۰۲	۱۴۷۱/۶	۱۴۷۱/۸	۱۴۷۱/۵	۱۴۷۱/۷
گیوکی	۲۳۱۵۴۵	۳۷۹۶۶۵۳	۱۵۰۰/۹	۱۴۹۷/۸	۱۵۰۳/۴	۱۴۹۶/۶	۱۴۹۹/۸	۱۴۹۵/۶	۱۴۹۸/۷
کهریز صفی‌خانی	۲۳۵۷۰۰	۳۷۹۵۸۷۵	۱۴۸۳	۱۴۸۲/۸	۱۴۸۳/۵	۱۴۸۱/۴	۱۴۸۲/۲	۱۴۸۰/۲	۱۴۸۱/۷
مجیدآباد	۲۳۹۰۵۰	۳۷۹۷۳۵۲	۱۴۷۹	۱۴۸۶/۱	۱۴۸۶/۷	۱۴۸۵/۳	۱۴۸۶/۰۸	۱۴۸۳/۵	۱۴۸۴/۳
لیلاس	۲۴۳۹۵۰	۳۷۹۷۶۳۲	۱۴۹۱/۶	۱۴۹۱/۳	۱۴۹۲/۴	۱۴۸۹/۳	۱۴۸۹/۶	۱۴۸۹	۱۴۸۹/۱
لیلی یادگار	۲۴۱۶۷۸	۳۷۹۵۳۵۰	۱۴۹۸/۱	۱۴۹۷/۰۵	۱۴۹۷/۱	۱۴۹۵/۸	۱۴۹۵/۹	۱۴۹۵/۷	۱۴۹۵/۹
رزینی	۲۳۷۰۸۵	۳۸۰۳۲۸۸	۱۴۹۲	۱۴۹۱/۷	۱۴۹۲/۴	۱۴۹۰/۷	۱۴۹۱/۵	۱۴۹۰/۵	۱۴۹۱/۵
وسج	۲۴۴۵۰۰	۳۸۰۱۹۰۰	۱۵۲۹/۹	۱۵۲۸/۳	۱۵۲۸/۳	۱۵۲۴/۶	۱۵۲۱/۶	۱۵۲۳	۱۵۲۴

## منابع

- [7]. Lu C, Chen Y, Zhang C, Luo J. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers. *Journal of Hydrology*. 2013; 505: 24-34.
- [8]. Mahmoodian Shooshtari M. *Hydraulics of Groundwater*. 1. University of Chamran press: University of Chamran; 2010 (In Persian).
- [9]. Nguyen TT, Tsujimura M, Naoaki S. Groundwater flow modeling: considering water use in Tay island, dong Thap Province, Shouthwest Vietnam. The 3th International Conference on Sustainable Future For Human security SUSTAIN. 2012, 3-5 November 2012, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, JAPAN. *Procedia Environmental Sciences*. 2013; 17: 211-220.
- [10]. Nikbakht J, Najib Z. Effect of irrigation efficiency increasing on groundwater level fluctuations (Cast study: Ajab-Shir Plain, East Azarbaijan). *Journal of Water and Irrigation Management (Journal of Agriculture)*. 2015; 5(1) 115-127 (In Persian).
- [11]. Panahi M, Misaghi F, Asgari P. Investigate of groundwater level fluctuations by using GMS. 2<sup>nd</sup> international conference on sustainable development, approaches & challenges with a focus on agriculture, environment and tourism. 23-25 Feb. 2016, Tabriz- Iran.
- [1]. Alizadeh A. *Principles of Applied Hydrology*. 23. Astan Qods Razavi press: Imam Reza university of Mashhad; 2010 (In Persian).
- [2]. Ghafarian Sayeli A. Simulation of groundwater level fluctuations by using MODFLOW code and prediction of land subsidence in the Kashmar plain. Msc thesis, Ferdowsi University of Mashhad. 2013; (In Persian).
- [3]. Ghobadian R, Fattahi Chaghbagi A, Zare M. the impact of construction the irrigation and drainage network the Gavoshan dam on Plain Miandarband Kermanshah water resources by using GMS 6.5. *Journal of water research in agriculture*. 2014; 28(4) 759-772 (In Persian).
- [4]. Karay G, Hajnal G. Modelling of groundwater flow in fractured Rocks. 7<sup>th</sup> Groundwater Symposium of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). *Procedia Environmental Sciences*. 2015; 25: 142-149.
- [5]. Kardavani P. *Geohydrology*. 2. University of Tehran press: University of Tehran; 2006 (In Persian).
- [6]. Kim J, sultan M. Assessment of long-term hydrologic impacts of Lake Nasser and related irrigation projects in Southwestern Egypt. *Journal of hydrology*. 2002; 262(1-4):68-83.



- [12]. Poormohammadi S, dastorani MT, Jafari H, Rahimian MH, Goodarzi M, Mesmarian Z, et al. The groundwater balance analysis in Tuyserkhan-Hamedan plain, by using the mathematical model MODFLOW. The Journal of ECO HYDROLOGY. 2016; 2(4): 371-382 (In Persian).
- [13]. Pourhaghi A, Akhondali AM, Radmanesh F, Mirzaee SY. Manage the Groundwater Sources Exploration of the Nourabad Plain in the Drought Conditions with MODFLOW Modeling. Journal of Irrigation of Science and Engineering. 2014; 37(2) 71-82 (In Persian).
- [14]. Rabinson MA, Reay WG. Groundwater Flow Analysis of a Mid- Atlantic Outer Coastal Plain Watershed. Virginia. U.S.A. Groundwater. 2002; 40(2): 123-131.
- [15]. Reico B, Ibanez J, Rubio F, Criado JA. A decision support system for analysing the impact of water restriction policies. Decision Support Systems. 2005; 39(3): 385-402.
- [16]. Şengör SS, Ünlü K. Modeling contaminant transport and remediation at an acrylonitrile spill site in Turkey. Journal of Contaminant Hydrology. 2013; 150: 77-92.
- [17]. Shayannejad M, Abedi MH. The impact of artificial recharge in the optimal exploitation of water resources. Proceeding of the first regional conference for optimal exploitation of water resources of Karun river and Zayanderud river basins, Shahrekord, Shahrekord university. 2006; (In Persian).
- [18]. Surinaidu L, Gurunadha VVS, Rao N, Rao S, Srinu S. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. Water Resources and Industry. 2014; 7(8): 49-65.
- [19]. The report of the suggest ban on the Nahavand groundwater. Hamedan Regional Water Authority. 2007; (In Persian).
- [20]. Wang S, Shao J, Song X, Zhang Y, Huo Z, Zhou X. Application of MODFLOW and geographical information system to groundwater flow Simulation in North Plain, China. Journal of Environmental Geology. 2008; 55(7): 1449-1462.
- [21]. Yaouti FEI, Madour AEI, Khatach D, Kaufmann o. Modeling Groundwater Flow And Advective Contaminant Transport In The BOU-AREG Unconfined Aquifer. Journal of Hydro-Environment Research. 2008; 2(3): 192-209.
- [22]. Yidana SM, Chegbeleh LP. The hydraulic conductivity field and groundwater flow in the unconfined aquifer system of the Keta Strip, Ghana. Journal of African Earth Sciences. 2013; 86: 45-52.

Archive