

پیش‌بینی اثرات ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه بر آبخوان دشت زرنديه (استان مرکزی) با استفاده از نرم‌افزار GMS

محمد نخعی^۱، علی حسنی^۲، همایون مقیمی^{۳*} و اسفندیار عباس نوین‌پور^۴

- ۱- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
 - ۲- کارشناس ارشد منابع آب (هیدروژئولوژی)، ساوه، ایران
 - ۳- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
 - ۴- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- * نویسنده مسئول: homayounmoghimi@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

چکیده

آبخوان دشت زرنديه، به وسعت حدود ۱۲۰۰ کیلومترمربع در استان مرکزی واقع شده است. برای شناخت بهتر، حفاظت و مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی اقدام به ساخت مدل ریاضی آبخوان به کمک کد MODFLOW تحت رابط GMS ۷٫۱ شد. نخست، مدل مفهومی و سپس مدل ریاضی عددی مبتنی بر آن ساخته و بر اساس تغییرات سطح آب با استفاده از آمار سطح ایستابی ۱۴ حلقه چاه پیرومتری منطقه، در یک گام زمانی یک‌ماهه برای حالت پایدار (مهر ۱۳۸۹) و یک دوره ۱۲ ماهه (آبان ۱۳۸۹ تا مهر ۱۳۹۰)، این مدل برای حالت ناپایدار، به دو روش دستی و اتوماتیک واسنجی شد. در این مرحله مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی (K) بهینه گردید. در پایان واسنجی در حالت پایدار میزان RMS به ۱/۲۶۵ متر و در حالت ناپایدار این میزان ۲/۱۴۵ متر برآورد شد که کمتر از مقدار خطای مجاز مدل $\pm ۲/۵$ متر بوده و قابل قبول است. صحت‌سنجی مدل در یک دوره زمانی ۱۲ ماهه از آبان ۱۳۹۰ تا پایان مهر ۱۳۹۱ با مقدار RMS برابر با ۲/۴۶ متر نشان داد مدل قابلیت و توانایی پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان را دارد. در ادامه اقدام به پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان گردید و نتایج نشان داد که طی ۳ سال آینده (۱۳۹۸-۱۴۰۱)، با ادامه روند کنونی برداشت چاه‌های بهره‌برداری، در بعضی از قسمت‌های آبخوان دچار افت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حساسیت‌سنجی، مدل‌سازی آب زیرزمینی، مدیریت و برنامه‌ریزی، واسنجی، GMS.

مقدمه

هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد (قدرتی، ۱۳۹۱). در ساخت یک مدل استفاده از فرضیات ساده کننده ضروری است، زیرا شرایط طبیعی به قدری پیچیده‌اند که امکان شبیه‌سازی دقیق آنها با مدل فراهم نمی‌گردد (وزارت نیرو، ۱۳۸۴). استفاده از مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی شده از سال ۱۳۴۷ در مطالعات آبخوان‌های ایران متداول شد و آبخوان‌های متعددی توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. از جمله تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق دهقانی (۱۳۸۱)، شفیعی مطلق (۱۳۸۴)، ناصری (۱۳۸۵)، میرعباسی و

مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی از سال ۱۸۰۰ (میلادی) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل ریاضی دربردارنده‌ی مجموعه‌ای از معادله‌های دیفرانسیل می‌باشد که جریان را تحت حاکمیت خود دارد. قطعیت پیش‌بینی‌های انجام شده بر اساس مدل‌های آب زیرزمینی در ارتباط با این مسئله است، که مدل تا چه حد بتواند شرایط واقعی را تخمین بزند. در این رابطه، مدل ریاضی در صورت شناخت درست و به شرط آماده بودن زمینه، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارا در اختیار مدیران قرار گیرد. مدل ریاضی آب زیرزمینی شبیه‌سازی یک سامانه

مدل سازی شد و نتایج باهم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل مفهومی مادفلو با ضریب تبیین $0/7836$ در مرحله تست نسبت به فرا مدل شبیه ساز بیان ژن با ضریب تبیین $0/739$ با اختلاف بسیار جزئی دارای عملکرد بهتری می باشد. (Chenini and Benmammou, 2010) برای نشان دادن قابلیت GIS در مناطق خشک مطالعه ای را در راستای تغذیه مصنوعی و توسعه منابع آب زیرزمینی منطقه ای در کشور تونس انجام دادند. یک مدل آب زیرزمینی، MODFLOW-2001، برای تخمین اثر چنین شارژ آب بر رفتار پیژومتریک سیستم هیدرولوژیکی استفاده شد. علاوه بر این، این شبیه سازی ها به مدیریت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه کمک کرد. مرزبندی پهنه های مصنوعی مبتنی بر GIS که در این مطالعه توسعه یافته است بر اساس شرایط منطقی و استدلال است، به طوری که تکنیک های مشابه، با اصلاحات مناسب، می تواند در جاهای دیگر، به ویژه در سیستم های آبخوان مشابه در مناطق خشک که وقوع آب زیرزمینی محدود است، اتخاذ شود. مدل سازی جریان آب زیرزمینی برای اندازه گیری و کالیبراسیون حالت پایدار با استفاده از نرم افزار MODFLOW در حوضه رودخانه ماهش هند انجام شد. از این نرم افزار یک مدل مفهومی برای واسنجی داده های سال های ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۴ استفاده شد. نتایج نشان داد که این آبخوان در حال حاضر در تعادل می باشد (Khadri and Panda, 2016). مطالعات انجام گرفته نشان می دهد که استفاده از مدل های ریاضی برای شبیه سازی رفتار آبخوان در پاسخ به تنش های وارده به سیستم دارای قابلیت بالایی است؛ بنابراین در این تحقیق سعی خواهد شد از مدل برای پیش بینی اثرات ناشی از بهره برداری بی رویه بر آبخوان دشت زرنديه استان مرکزی و همچنین ارائه راهکارهای مدیریتی استفاده شود. قابل ذکر است که در محدوده مطالعاتی دشت زرنديه، تاکنون تحقیقی در خصوص پیش بینی و مدیریت آبخوان با استفاده از مدل ریاضی انجام نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه شبیه سازی آبخوان دشت زرنديه با استفاده از مدل ریاضی (نرم افزار GMS) و سپس ارزیابی رفتار کمی و بررسی پیشینه و آینده آبخوان با استفاده از مدل ساخته شده می باشد. هدف ثانویه این مطالعه ارزیابی تطابق مدل ریاضی با شرایط طبیعی آبخوان می باشد تا مشخص گردد که آیا در این آبخوان مدل ریاضی می تواند

همکاران (۱۳۸۶)، جمعه نیا (۱۳۸۸)، آذری بخشی (۱۳۸۹)، مهدوی و همکاران (۱۳۹۲)، مهدی روست و همکاران (۱۳۹۴)، آقاجانی و همکاران (۱۳۹۵)، آریایی مهر و همکاران (۱۳۹۶)، جعفری و همکاران (۱۳۹۷) و نخعی و صابری (۱۳۸۹) اشاره کرد که در دشت های مختلف در ایران به مدل سازی آبخوان های آب زیرزمینی پرداخته اند. در این مورد، مدل GMS یکی از پیش تازهای مدل سه بعدی در مسائل آب زیرزمینی است که قابلیت شبیه سازی شرایط ناپایدار و انواع گسترده ای از خصوصیات هیدروژئولوژیکی را دارد. GMS ابزاری توانمند در تخمین سرعت به تعادل رسیدن آبخوان در مقابل تغییرات اقلیمی و اختلال محیط زیست است (Yicheng et al, 2015) زم زم و رهنما (۱۳۹۱) در مورد تهیه مدل کمی و کیفی دشت رفسنجان با مدل مادفلو و MT3DMS بررسی انجام داده و پس از واسنجی مدل وضعیت آبخوان برای ۲ و ۵ سال آینده را پیش بینی کرده اند. بر این اساس پارامترهای کمی و کیفی در آینده نیز روند افزایشی خواهد داشت. برای جلوگیری از آن باید فعالیت کشاورزی کاهش و در مقابل تغذیه آبخوان افزایش یابد. کرد و همکاران (۱۳۹۸) بهینه سازی برداشت آب از آبخوان دشت اردبیل با مادفلو انجام دادند. بدین منظور پایگاه داده ای، شامل داده های کیفی و کمی در محیط ArcGIS تشکیل و روش های کریجینگ و منطبق فازی برای تهیه انواع نقشه های پهنه بندی، به کار گرفتند. پس از تعیین هندسه آبخوان، پارامترهای ورودی و خروجی، سیستم جریان آب زیرزمینی و پارامترهای هیدرولیکی، از کد MODFLOW (2005)، به وسیله نرم افزار PMWIN ورژن ۸، برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل استفاده کردند. نتایج به دست آمده برای تعادل بخشی سطح ایستابی آبخوان نشان داد که، بیشترین بهره برداری مربوط به شرق آبخوان و کمترین بهره برداری مربوط به مرکز دشت می باشد. گلایی و همکاران (۱۳۹۷)، عملکرد مدل مفهومی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن در مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان دشت لور-اندیمشک بررسی کردند. از اطلاعات آماری ماهانه سطح پیژومترها برای ۵ سال آبی (۸۹-۸۸ تا ۹۳-۹۲) مربوط به سطح ایستابی ۸ پیژومتر آبخوان دشت لور-اندیمشک، استفاده شد. با استفاده از مدل مفهومی آب زیرزمینی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن، هیدروگراف معرف آبخوان

و تنها رودخانه فصلی این دشت سه رود نام دارد که از به هم پیوستن مسیل‌ها در شمال غرب دشت تشکیل شده و پس از گذشتن از منطقه از دهانه غربی دشت خارج شده و به رودخانه شور متصل می‌شود. تغذیه اصلی دشت از ارتفاعات غربی و جنوب غربی صورت می‌گیرد. یک حوضه بسته عمیق که از رسوبات میوپلیوسن پرشده است که بر روی این تشکیلات رسوبات آبرفتی دوران چهارم با ضخامت زیادی رسوب‌گذاری شده است. سنگ کف منطقه در قسمت اعظم دشت شامل رسوبات میوپلیوسن است و در کناره‌ها شامل تشکیلات ائوسن است. جنس سنگ کف در قسمت‌های جنوبی و جنوب غربی دشت تماماً آذرین است و احتمالاً حد شمالی‌تر از آسیابک و زمان‌آباد و مامونیه تا قسمت جنوبی گسل سرتاسری شمال زاویه با توجه به نتایج ژئوفیزیک از تشکیلات میوپلیوسن که در مرکز دشت بیرون‌زدگی دارد، می‌باشد (شکل ۲).

داده‌های مورد استفاده

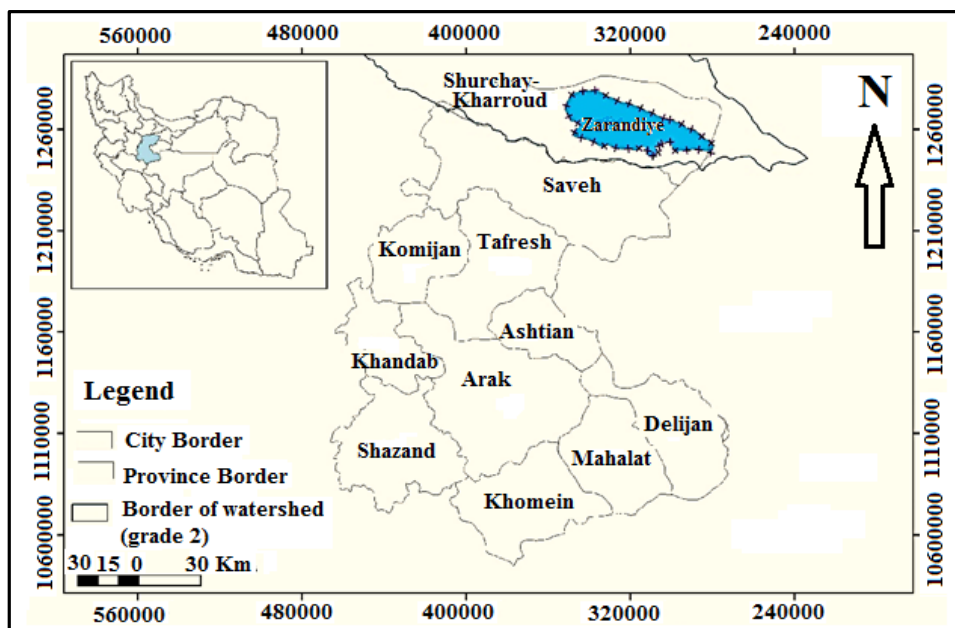
برای ساخت مدل عددی آبخوان برای منطقه مورد پژوهش نیاز به داشتن اطلاعات لازم در مورد وضعیت زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی، وضعیت توپوگرافی، وضعیت بهره‌برداری و تغذیه آبخوان و نیز هرگونه عواملی که در تغییرات سطح ایستابی مؤثر می‌باشد؛ در این فصل منطقه مورد پژوهش معرفی و عوامل مذکور بررسی و اطلاعات لازم ارائه می‌شود. در این تحقیق از داده‌های بارندگی و تبخیر دوره‌ی آماری طی (۱۳۸۹-۱۳۹۰) این مرحله، داده‌ها و اطلاعات موردنیاز از پایگاه‌های اطلاعاتی و گزارشات مختلف جمع‌آوری و سپس پردازش گردیده و برای مدل‌سازی و ورود به نرم‌افزار GMS آماده شد.

جهت کمک به مدیریت آبخوان به کار رود یا خیر. این امر طی فرآیند صحت‌سنجی مدل بررسی می‌گردد.

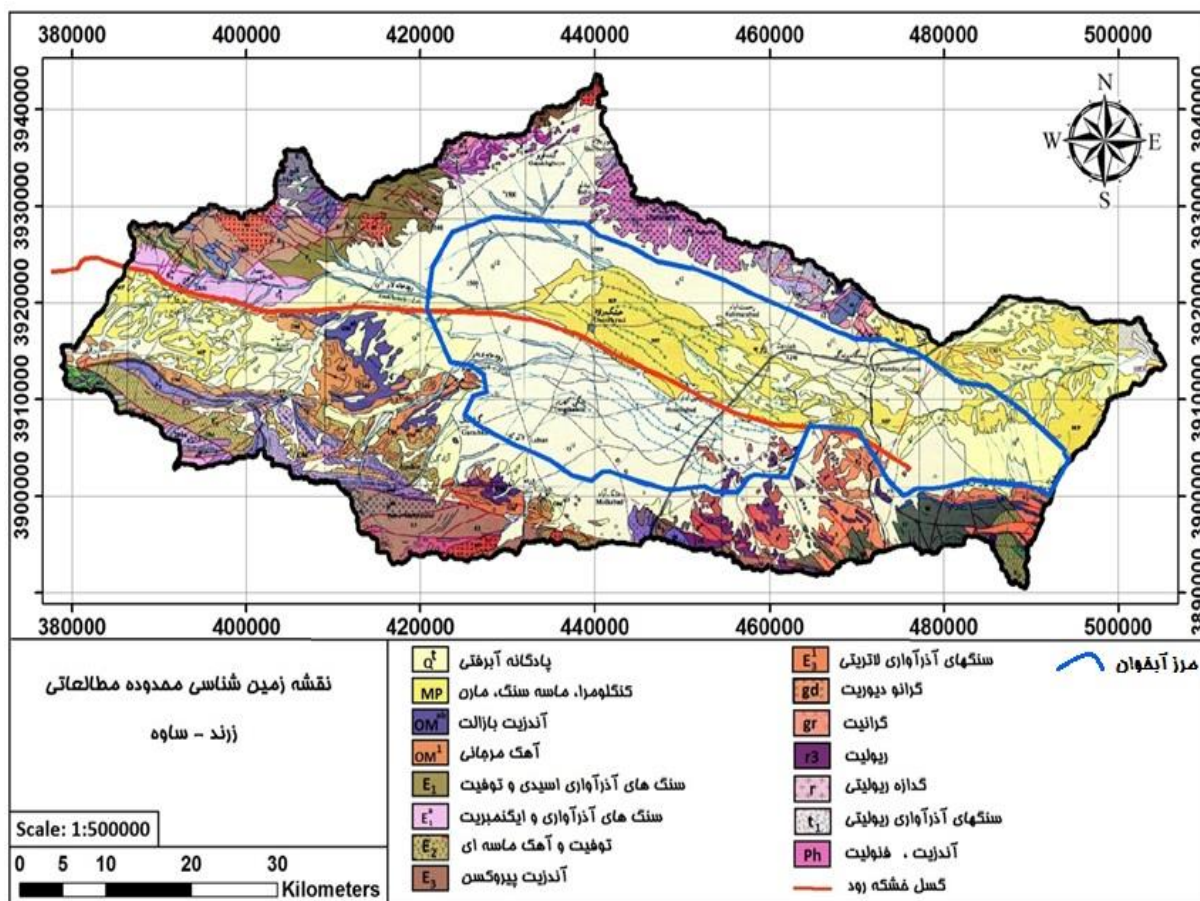
مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

دشت زرنديه در شمال استان مرکزی است. شهرهای مامونیه، زاویه، خشک‌رود و پرندهک از مراکز جمعیتی و صنعتی محدوده مطالعاتی زرنده است، منطقه مورد بررسی با وسعتی معادل ۳۶۳۱/۹۷۷ کیلومترمربع واقع در حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی و جزئی از زیر حوضه آبریز دریاچه نمک قم بوده که ۱۹۲۸/۹۹۲ کیلومترمربع آن را دشت و ۱۷۰۲/۹۸۵ کیلومترمربع آن را کوهستان در برمی‌گیرد و از شمال و شرق به حوضه آبریز رودخانه شور و از غرب و جنوب به حوضه آبریز رودخانه قره‌چای منتهی می‌شود (سازمان آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۱). شکل (۱) موقعیت دشت زرنديه را نشان می‌دهد، در این دشت شیب عمومی زمین از شمال غرب به جنوب شرق می‌باشد. با بررسی لاگ چاه‌های و انجام آزمایشات صحرائی از قبیل آزمون پمپاژ و آزمایشات آزمایشگاهی از قبیل دانه‌بندی و آزمایش بار ثابت و افتان مقادیر خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان محاسبه (T,K,S,R) و از این طریق نوع آبخوان مشخص شد و بر این اساس نوع آبخوان دشت از نوع آزاد است (شرکت آب منطقه‌ای استان مرکزی، ۱۳۹۱، ۱۳۹۶). با ترسیم نقشه تراز آب زیرزمینی از طریق اندازه‌گیری سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای مشخص شد که جهت جریان آب‌های زیرزمینی هماهنگ با شرایط توپوگرافی محدوده بوده و از غرب و جنوب غربی به طرف شرق و جنوب شرقی دشت می‌باشد. در دشت زرنديه هیچ‌گونه رودخانه دائمی وجود ندارد



شکل ۱- موقعیت دشت زرنديه در استان مرکزی و ایران.



شکل ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد پژوهش (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ساوه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

مراحل اجرای مدل GMS

۱۳۸۹ تا مهرماه ۱۳۹۰) با ۱۲ دوره تنش یک‌ماهه (۱۲ گام زمانی)، اجرا و واسنجی شده است. لایه‌های چاه‌های بهره‌برداری در مدل مفهومی شامل سه گروه کشاورزی، شرب و صنعتی است. با توجه به نوع کاربری هر چاه برای محاسبه میزان تخلیه خالص از آن، ضریب مناسبی به هر کدام اختصاص داده شده است. بر همین اساس مقداری از آب استحصال شده که طی پدیده برگشت به آبخوان برمی‌گردد؛ از میزان دبی چاه‌ها کم شده و دبی نهایی به‌عنوان میزان تخلیه خالص در محاسبات بکار گرفته شد. درصد میزان آب برگشتی به آبخوان را با توجه به نوع کاربری چاه در مدل به‌صورت جدول (۱) تعریف می‌گردد (گزارش آب منطقه‌ای استان مرکزی سال ۱۳۹۱). همان‌گونه که در جدول دیده می‌شود درصد آب برگشتی در کشاورزی، صنعتی و شرب به ترتیب ۱۵، ۷۰ و ۶۰ درصد محاسبه شده است. آب برگشتی کشاورزی به آبخوان، به روش نوبت، نحوه آبیاری، جنس و نفوذپذیری خاک و نوع گیاه بستگی دارد، که مقدار آن را با تعیین مازاد آب موردنیاز گیاه از آب مصرفی در مزارع می‌توان محاسبه نمود. در این محاسبات دقت برخی مؤلفه‌های ورودی بیلان آب زیرزمینی از جمله نفوذ از بارندگی و جریان سطحی، تغذیه از آب برگشتی مصارف، به‌دقت تخمین نفوذپذیری، ضریب ذخیره آبخوان، قابلیت انتقال و ضرایب آب برگشتی آبخوان بستگی دارد. در نتیجه با توجه به شرایط محدوده بیلان میانگین درصد آب برگشتی از کشاورزی در حدود ۱۵ درصد تخمین زده شده است. میزان نفوذ از مصارف صنعتی برحسب نوع دفع پساب آنها متفاوت است. روش دفع پساب در منطقه عمدتاً از طریق چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد و با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی منطقه ضریب نفوذ از این نوع مصارف برابر ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. طبق آمار و اطلاعات موجود، میزان حجم آب برگشتی در بخش شرب با توجه به نوع خاک (نفوذپذیری، تخلخل، بافت و دانه‌بندی و ...) ژئومورفولوژی و توپوگرافی دشت و همین‌طور با در نظر گرفتن نوع سیستم شبکه‌های دفع پساب، به‌طور تخمینی می‌توان گفت که ۶۰ درصد پساب برگشتی به آبخوان بازمی‌گردد.

در منطقه موردپژوهش به‌منظور تهیه نقشه‌های قابلیت انتقال و آبدی ویژه برای استفاده در مدل مفهومی؛ داده‌های حاصل از آزمایشات پمپاژ و دانه‌بندی را با داده‌های حاصله از لاگ

یکی از پیشرفته‌ترین و کامل‌ترین بسته‌های مدل‌سازی آب زیرزمینی، نرم‌افزار GMS است که انواع مختلف مدل‌های عددی را پشتیبانی می‌کند. GMS برای هر یک از مراحل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، شامل توصیف منطقه مورد پژوهش، تهیه مدل مفهومی، ایجاد شبکه، زمین‌آمار، واسنجی، مجسمه‌سازی، تحلیل حساسیت و نمایش گرافیکی و غیره ابزار مناسب را فراهم می‌آورد. GMS هم از مدل تفاضل محدود و هم از مدل عناصر محدود پشتیبانی می‌کند. در واقع GMS، یک رابط گرافیکی کاربر می‌باشد که شامل تعدادی کدهای تحلیلی نظیر MODFLOW، MT3DMS، RT3D، SEAM3D، MODPATH، SEEP2D، FEMWATER، NUFT، UTCHEM و غیره است. مدل مفهومی که مهم‌ترین اساسی‌ترین مرحله در تهیه مدل جریان آب زیرزمینی است. بدین منظور مدل با هدف ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد پژوهش و سازماندهی داده‌های صحرائی به‌منظور تجزیه و تحلیل سیستم تعریف می‌گردد. در این تحقیق، مدل ریاضی دشت زرنده به روش مدل مفهومی با استفاده از نرم‌افزار GMS که در واقع یک رابط بین کد MODFLOW و GIS می‌باشد، تهیه گردیده است. در این مرحله نقشه توپوگرافی، تراز سنگ کف، اطلاعات هواشناسی مانند؛ بارندگی و تبخیر به‌منظور محاسبه نرخ تغذیه آبخوان و آمار و اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌برداری شامل موقعیت، نوع مصرف و تخلیه سالانه به‌منظور تخلیه آبخوان و از چاه‌های مشاهده‌ای برای ترسیم نقشه تراز آب زیرزمینی و تعیین محدوده‌های ورود و خروج آب زیرزمینی و برای پردازش آن از نرم‌افزارهایی مانند؛ GIS و Excel و برای ساخت مدل مفهومی از نرم‌افزار GMS استفاده شده است. برای به‌کارگیری و راه‌اندازی این نرم‌افزارها نیازمند داشتن و جمع‌آوری داده‌های زیاد و مختلفی می‌باشد. این داده‌ها از ادارات مختلفی مانند هواشناسی، وزارت نیرو، سازمان آب منطقه‌ای و سازمان زمین‌شناسی کشور دریافت شده است. در این تحقیق با توجه به اینکه برداشت‌ها از منابع آبی به‌صورت ماهانه صورت می‌گیرد؛ دوره و پله زمانی برای حالت پایدار و ناپایدار نیز به‌صورت ماهانه انتخاب شده است. در شرایط پایدار، مدل برای یک دوره تنش یک‌ماهه (مهر ۱۳۸۹) و در شرایط ناپایدار، برای یک دوره یک‌ساله (آبان

مراجعه به جداول استاندارد (جدول ۲) مشخص شد و سپس این مقادیر وارد مدل گردید؛ تا در مراحل واسنجی به‌وسیله خود مدل به بهترین شکل بهینه گردد. بدیهی است که این مقادیر، در مرحله واسنجی مدل، در حد مجاز قابل تغییر خواهند بود.

شبکه‌بندی منطقه مدل، اولین نقطه شروع در طراحی واقعی مدل رایانه‌ای است. در MODFLOW که مدلی از نوع تفاضل محدود است، شبکه مدل توسط دو دسته خط موازی که عمود بر هم هستند، تشکیل می‌شود. بلوک‌های تشکیل‌دهنده خطوط مذکور، سلول نامیده می‌شوند. مرکز هر سلول، گره (نقطه‌ای که در آن محاسبات بار هیدرولیکی صورت می‌گیرد) نامیده می‌شود. فرض بر آن است که خواص هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی، در محدوده یک سلول یکنواخت است؛ در نتیجه، هر سلول توسط گره وابسته به آن مشخص می‌شود. این نوع شبکه مورد استفاده در MODFLOW، مرکز شبکه‌ای (خانه‌ای) نامیده می‌شود از لحاظ عملی، بهتر است که ابعاد کلی شبکه مدل، بزرگ‌تر از منطقه تخمینی مدل باشد؛ زیرا برای مثال ممکن است در اولین اجرای مدل مشخص شود که مرزهای هیدرولیکی بیش از اندازه نزدیک انتخاب شده‌اند و یا آبخوان (یا آبخوان‌های) مجاور را باید در منطقه مدل قرار داد. تغییر اندازه شبکه (طول‌های کلی در جهت ستون‌ها یا ردیف‌ها)، پس از ایجاد آن مستلزم وارد کردن مجدد سایر پارامترها است. هم‌چنین در این مرحله آرایه‌های مرزی شامل نوع سلول‌ها (فعال و غیرفعال) نیز تعیین می‌شوند. پس از شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی، لازم است که اطلاعات گردآوری‌شده مربوط به آبخوان به هر یک از سلول‌ها اختصاص یابد تا براساس معادله حاکمه، روابط ریاضی مربوط به جریان آب زیرزمینی، برای هر سلول حل گردد. لذا این اطلاعات در قالب لایه‌های اطلاعاتی به‌صورت مجزا و با استفاده از آرایه‌ها به کد رایانه‌ای معرفی می‌شوند. پس از بازبینی مدل شبیه‌سازی‌شده، مدل اجراشده و مقادیر مجهول با استفاده از مدل محاسبه می‌گردد.

حفری تلفیق نموده و سپس با استفاده از نرم‌افزار GIS درون‌یابی گردید. مرزهای آبخوان شامل مرزهای جانبی، مرزهای فوقانی (متشکل از لایه توپوگرافی سطح زمین) و مرزهای تحتانی آبخوان (متشکل از سنگ کف) می‌باشد. مرزهای جانبی آبخوان خود شامل مرزهای فیزیکی بدون جریان و مرزهایی با بار هیدرولیکی عمومی جریان (GHB) می‌باشند. در مدل، مرزهای آبخوان دشت مورد پژوهش، از نوع مرزهایی با بار هیدرولیکی عمومی (GHB) در نظر گرفته شده و در شبیه‌سازی، از این نوع شرایط مرزی استفاده شده است. به دلیل شرایط هیدرولوژی منطقه (نبود رودخانه‌های دائمی و یا دریاچه) و با توجه به سطح آب پیزومترها، تغذیه اصلی دشت (ورودی دشت) از ارتفاعات غربی و جنوب غربی انجام گرفته و جهت کلی آب از غرب و جنوب غرب به سمت شرق و شمال شرق (خروجی دشت) است (شکل ۵).

لایه اطلاعاتی هدایت هیدرولیکی که یکی از مهم‌ترین لایه‌ها در روند مدل‌سازی آب زیرزمینی به شمار می‌رود؛ از نقشه قابلیت انتقال آبخوان در نرم‌افزار GIS تهیه شد. به این منظور فایل متنی تهیه‌شده در نرم‌افزار GIS به نرم‌افزار GMS فراخوانده شد و در ادامه ضخامت اشباع آبخوان، با استفاده از گزینه Data Calculator در نرم‌افزار GMS، از تفریق نقشه رقومی تراز سنگ کف از نقشه تراز آب آبخوان برای همراه سال ۱۳۸۹ محاسبه شد و در پایان، با استفاده از همان گزینه، از تقسیم نقشه رقومی قابلیت انتقال به ضخامت آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی اولیه آبخوان برآورد شد و بدین ترتیب با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ به‌کل محدوده مورد پژوهش تعمیم داده شد. این پارامتر در حین واسنجی، جهت به‌دست آوردن بهترین انطباق بین داده‌های مشاهداتی (داده‌های صحرائی) و محاسباتی (محاسبه‌شده توسط مدل)؛ در دامنه‌ی مجاز خود تغییر یافته‌اند. آبدهی ویژه، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل‌سازی در حالت ناپایدار می‌باشد که مقادیر این پارامتر با استفاده از تلفیق داده‌های حاصل از آزمون‌های پمپاژ، چاه‌نگارهای مشاهده‌ای و اکتشافی و با

جدول ۱- در صد میزان آب برگشتی به آبخوان (گزارش آب منطقه‌ای استان مرکزی، ۱۳۹۱).

نوع چاه	کشاورزی	صنعتی	شرب
درصد میزان آب برگشتی	۱۵ درصد	۷۰ درصد	۶۰ درصد

جدول ۲- درصد مقادیر آبدهی ویژه، نگهداشت ویژه و تخلخل برای مواد مختلف (Singhal, 2010).

مشخصات زمین‌شناسی	نگهداشت ویژه $S_r(\%)$	آبدهی ویژه $S_p(\%)$	تخلخل $\eta(\%)$
گراول	۳-۱۲	۱۵-۳۰	۲۸-۳۴
شن	۵-۱۵	۱۰-۳۰	۳۵-۵۰
سیلت	۱۵-۴۰	۵-۲۰	۴۰-۵۰
رس	۲۵-۴۵	۱-۵	۴۰-۶۰
تپه شنی	۱-۵	۲۵-۳۵	۴۰-۴۵
اُس	۲۰-۳۰	۱۵-۲۰	۴۵-۵۰
سنگ‌ها	۵-۲۰	۵-۲۵	۱۵-۳۰
سنگ شنی	۵-۲۵	۰/۵-۱۰	۱۰-۲۵
دولومیک، سنگ آهک	۰-۵	۰/۵-۵	۰-۱۰
شیل	۵-۴۵	۱-۸	۵-۲۰
سنگ سیلتی	۱۵-۳۰	۴-۱۸	۳۰-۳۵
تیل (یخ نهشته)	-	۰-۳	۰-۵
سنگ کریستالی شکسته	-	۲-۵	۵-۱۰
سنگ کریستالی هوازده شده	-	۱۰-۲۰	۲۰-۴۰
بازالت	-	۲-۱۰	۵-۳۰

واسنجی^۱

مهم‌ترین و ساده‌ترین مقدار واسنجی را سطح آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد، چون علاوه بر سهولت اندازه‌گیری آن، خطای اندازه‌گیری نیز کم بوده و هم‌چنین واسنجی آن آسان‌تر انجام می‌شود.

به‌منظور بررسی دقت و صحت راه‌حل، لازم است که ارقام محاسبه شده با ارقام اندازه‌گیری شده مقایسه شوند. واسنجی عبارت است از تصحیح مقادیر ورودی تا مرحله‌ای که ارقام محاسبه شده با ارقام اندازه‌گیری شده صحرايي مطابقت پیدا کند. در حالت کلی، اولین مرحله در واسنجی مدل، طراحی یک مدل جریان ماندگار می‌باشد که جهت به دست آوردن توزیع مقادیر ارتفاع آب در گره‌ها مورد استفاده قرار گرفته و این مقادیر به‌عنوان شرایط اولیه در مرحله شبیه‌سازی جریان غیرماندگار به کار برده می‌شوند. مرحله واسنجی از دو بخش، شامل تعیین معیار واسنجی و تبیین میزان واسنجی، به شرحی که در ادامه بیان گردیده، تشکیل می‌گردد.

میزان واسنجی^۲

تعیین هدف واسنجی شامل مقدار واسنجی و خطای مربوط به آن می‌شود. مقدار خطای مجاز واسنجی با مقدار واسنجی در ارتباط است. در صورتی که مقدار واسنجی، بار هیدرولیکی انتخاب شود خطای آن در حد چند متر و کمتر از آن منظور می‌شود؛ ولی اگر بیلان آب به‌عنوان مقدار واسنجی انتخاب شود، خطای آن بایستی در حد چند یا کمتر از یک میلیون مترمکعب در سال باشد. روال معمول آن است که معیار واسنجی را پیش‌تر از انجام عمل واسنجی تعیین می‌کنند. در یک واسنجی خوب و قابل قبول، خطاهای بار هیدرولیکی محاسبه‌شده باید نسبت به بار هیدرولیکی کل، کوچک و قابل صرف نظر کردن باشد. معیار واسنجی ممکن

معیار واسنجی^۲

اولین قدم در واسنجی، تعیین معیار واسنجی است. این مقدار عبارت است از مقدار مشاهده‌شده که می‌تواند بار هیدرولیکی، جریان هیدرولیکی و یا بیلان آب زیرزمینی باشد.

³ Calibration Value

¹ Calibration

² Calibration Criteria

هم‌چنین واسنجی آسان‌تر آن نسبت به دیگر پارامترها به‌عنوان معیار اصلی واسنجی انتخاب شده است. به‌منظور نمایش میزان خطا برای واسنجی مدل، از روش مقایسه ترسیمی و مقایسه محاسبات آماری (به‌خصوص ریشه میانگین مربع اختلاف‌ها) استفاده گردید. پارامترهای مورداستفاده در روند مدل‌سازی، همواره با خطاهایی نظیر خطاهای دستگاهی (مانند تعیین موقعیت جغرافیایی چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری)، خطاهای انسانی (مانند خطای قرائت سطح آب زیرزمینی) و خطاهای نرم‌افزاری (مانند خطای میانی‌ای بین نقاط معلوم جهت ترسیم منحنی‌های هم‌پتانسیل) است. هم‌چنین از طرفی در این تحقیق برای ترسیم نقشه سنگ کف از نقشه‌ها و پروفیل‌های ژئوفیزیکی استفاده شده است که می‌تواند یکی از عوامل بروز خطا باشد؛ بنابراین میزان خطای قابل‌قبول مربوط به بار هیدرولیکی در این تحقیق، با توجه تجربیات حاصله از مدل‌سازی و مشورت با کارشناسان مربوطه، $\pm 2/5$ متر در نظر گرفته شده است (Anderson and Woessner, 1992).

روش‌های اجرای فرآیند واسنجی

به‌طور کلی دو راه برای انجام واسنجی وجود دارد:

الف) تنظیم دستی پارامترها به‌صورت سعی و خطا^۷

واسنجی دستی و به روش سعی و خطا، اولین روش مورداستفاده است و هنوز مورد تأیید بسیاری از کاربران می‌باشد. در این روش، واسنجی مدل با اجرای مکرر مدل و با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی به‌صورت پیشرو انجام می‌گیرد تا این‌که یک انطباق رضایت‌بخش بین نتایج مدل و مشاهدات صحرایی به دست آید. درائتای واسنجی دستی شرایط مرزی، مقادیر پارامتر و تنش‌ها برای هر اجرای متوالی مدل تا رسیدن به برآزش بارهای هیدرولیکی با اهداف واسنجی، تطبیق داده شوند. اولین مرحله واسنجی، زمانی خاتمه می‌یابد که برآزش ترسیمی خوبی بین بارهای هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده روی نقشه تراز آب زیرزمینی مشاهده شود.

ب) تخمین پارامتر به‌صورت خودکار^۸

واسنجی خودکار^۸، فناوری جدیدی است که برای به حداقل رساندن عدم قطعیت‌های مرتبط با ذهنیت استفاده‌کننده از

است بر مبنای میانگین خطا، میانگین خطای مطلق و یا جذر میانگین مربعات خطا باشد. در این معیارها که از اختلاف بین داده‌های بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل، محاسبه می‌شوند به‌صورت زیر هستند:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i \quad (1)$$

میانگین خطای مطلق^۵:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i| \quad (2)$$

جذر میانگین مربعات خطا^۶:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \quad (3)$$

که در آن‌ها n تعداد نقاط که مقایسه در آن‌ها انجام شده است، h_s بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در نقطه یا گره i ام، و h_m بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در نقطه یا گره i ام.

شرایط واسنجی

واسنجی مدل را می‌توان برای شرایط ماندگار، غیرماندگار و یا هر دو انجام داد. اگرچه واسنجی حالت ماندگار، عملاً در مدل‌سازی دارای ارجحیت است، ولی بنا به دلایل زیر، باید تلاش کرد که واسنجی حالت غیرماندگار نیز، وجود داشته باشد.

الف) جریان آب زیرزمینی به‌طور طبیعی غیرماندگار و اغلب در معرض تغییرات مصنوعی (ساخته دست انسان) است؛
ب) هدف معمول مدل، پیش‌بینی است که از لحاظ تعریفی وابسته به زمان می‌باشد؛

ج) واسنجی حالت ماندگار، شامل خواص ذخیره‌ای آبخوان که برای پیش‌بینی (حالت غیرماندگار) لازم است، نمی‌باشد.

د) در MODFLOW فرض می‌شود چگالی آب ثابت بوده و آب در سه جهت X و Y و Z می‌تواند حرکت کند و شرایط برای تمام سلول‌های مدل به‌صورت همگن در نظر گرفته می‌شود (Yang et al., 2009).

در این تحقیق، تراز سطح آب زیرزمینی به علت سهولت اندازه‌گیری و خطای کم ایجاد شده در حین اندازه‌گیری و

⁷ Trial & Error

⁸ Autocalibration

⁴ Mean Error (ME)

⁵ Mean Absolute Error (MAE)

⁶ Root Mean Squared Error (RMSE)

پیش‌بینی^{۱۱}

زمانی که مدل ترجیحاً در دو حالت ماندگار و غیرماندگار صحت‌سنجی گردید، از آن می‌توان برای پیش‌بینی که هدف بیشتر فرایندهای مدل‌سازی است، استفاده کرد. پیش‌بینی، پاسخ سیستم به تنش‌های هیدرولیکی وارده را مشخص می‌نماید.

نتایج و بحث

با توجه به اطلاعات موجود درباره‌ی آبخوان، مساحت محدوده‌ی مدل‌سازی و آزمون‌های انجام‌شده، برای این تحقیق شبکه با ۵۰۵۳ سلول فعال با ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب شد. البته جهت تعیین بهترین شبکه (شبکه بهینه)، هندسه آبخوان توسط سلول‌های مربعی با ابعاد ۶۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ متر در قالب اولین اجراء شبیه‌سازی گردید. معیار مقدار خطای هر نوع شبکه، ریشه میانگین مربعات خطای حاصل از هر شبیه‌سازی بوده است. پس از تخصیص صحیح پارامترهای مختلف به سلول‌های محدوده مدل‌سازی و انتخاب کد ریاضی، به‌منظور شناسایی مشکلات و خطاهای احتمالی؛ مدل ساخته‌شده توسط ابزار Model Checker موجود در نرم‌افزار GMS، بررسی شد. پس اجرای آزمایشی مدل و رفع خطاهای احتمالی آن، مدل برای اولین برای واسنجی شد. این تحقیق، واسنجی مدل در طی دو دوره پایدار و ناپایدار انجام‌شده است. لازم به ذکر است که دوره‌های واسنجی مدل، در حالت پایدار؛ طی یک دوره تنش یک‌ماهه و حالت ناپایدار؛ طی یک دوره تنش یک‌ساله (شامل ۱۲ گام زمانی)، انجام‌شده است. واسنجی مدل در هر دو حالت (پایدار و ناپایدار)، هم به‌صورت دستی و هم به‌صورت اتوماتیک (به‌وسیله کد نرم‌افزاری PEST) انجام پذیرفت.

واسنجی مدل در حالت ناپایدار

در طی واسنجی مدل در حالت پایدار پارامترهای مختلفی نظیر هدایت هیدرولیکی و شرایط مرزی و به‌طور کلی پارامترهایی که درجه اطمینان به صحت آن‌ها پایین می‌باشد؛ تغییر داده شد. با توجه به تأثیر بالای هدایت هیدرولیکی در امر واسنجی مدل، ابتدا مقادیر این پارامتر تغییر داده شد. در

مدل، بسط یافته است. به علت این‌که این روش شامل بخش قابل‌ملاحظه‌ای از معلومات آماری است و اساساً درک و شهود را مستثنی می‌سازد، رواج آن نسبتاً کند است. اغلب کدهای رایانه‌ای مربوط به واسنجی خودکار، به دنبال مجموعه پارامترهای بهینه‌ای هستند که مجموع مربعات انحراف بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده در آن‌ها به حداقل یک کاهش یابد. از جمله کدهایی که برای واسنجی خودکار استفاده می‌شود، می‌توان به PEST و UCODE اشاره نمود.

صحت‌سنجی^۹

هدف از تعیین صحت مدل، ایجاد اطمینان بیشتر در مدل با استفاده از مجموعه مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده و استرس‌ها برای دوباره‌سازی مجموعه دوم اطلاعات صحرایی است. اگر پارامترهایی مدل واسنجی شده نظیر شرایط مرزی، تنش‌ها و توزیع خصوصیات هیدروژئولوژیکی (نفوذپذیری، قابلیت انتقال، تخلخل مؤثر) صحیح باشند، مجموعه داده‌های مستقل صحرایی باید به‌طور نزدیک شرایط مرزی و تنش‌های جدید مدل را برازش کنند. اگر مدل اجراشده با شرایط تغییر یافته مذکور، توزیع بار هیدرولیکی را ایجاد کند که به‌طور نزدیک با مجموعه داده‌های مذکور سازگار باشد، مدل صحت-سنجی شده است.

تحلیل حساسیت^{۱۰}

با توجه به این‌که شناخت کامل سیستم آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های اندک موجود، امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین طبیعی است که عدم قطعیت‌هایی ناشی از تخمین پارامترهای آبخوان، تنش‌ها و شرایط مرزی (به دلیل کم بودن داده‌های اولیه) وجود داشته باشد. درجه اهمیت پارامترهای موردنظر و تأثیر بازه عدم قطعیت آن بر نتایج شبیه‌سازی را می‌توان با استفاده از تحلیل حساسیت ارزیابی نمود. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که چه پارامتر یا پارامترهایی اثر بیشتری روی نتیجه می‌گذارد. در نتیجه به پارامترهایی با اثر بیشتر روی نتیجه مدل، باید در فرایند واسنجی توجه بیشتری شود.

¹¹ Prediction

⁹ Verification

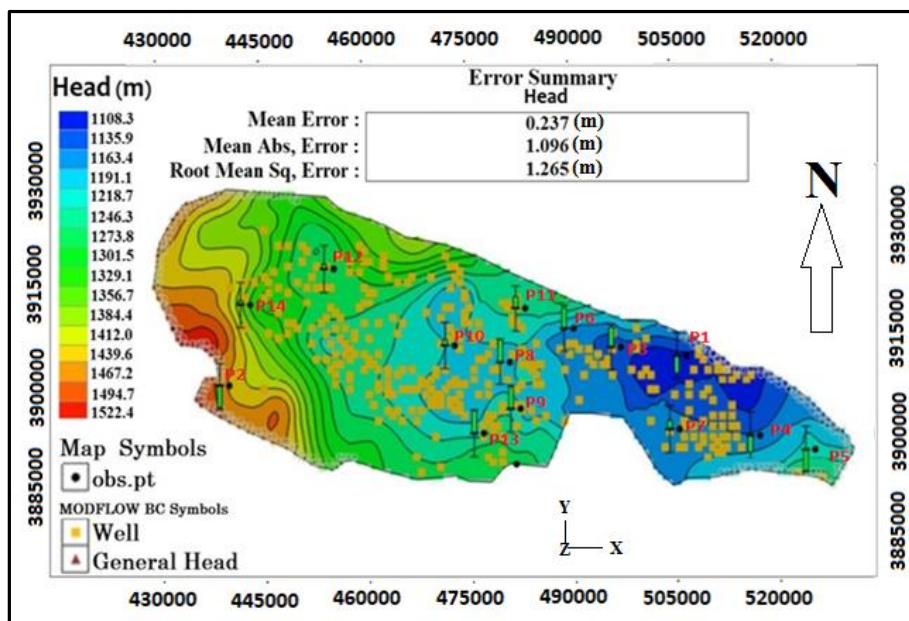
¹⁰ Sensitivity Analysis

کاهش یافته است. با توجه به مقادیر آنالیز باقی مانده‌ها (تفاضل سطح آب اندازه‌گیری شده و سطح آب محاسباتی) مشاهده می‌شود که تمامی مقادیر اختلاف‌های موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌شده، در حد قابل قبولی قرار دارند، در جدول ۴، مقادیر آنالیز باقیمانده‌ها ارائه شده است. در پایان واسنجی مدل در حالت پایدار، ضریب هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین پارامتری است که مقدار بهینه‌ی آن به دست آمده است.

در شکل ۴ پیژومترها به صورت دایره‌های توپر نمایش داده شده و در قسمت راهنمای نقشه دایره‌های توپر با عنوان چاه‌های مشاهده‌ای Observation Wells نمایش داده شده است. همچنین بر روی این نقشه در کنار پیژومترها ابزار هدف واسنجی نمایش داده شده است که همه آنها به صورت ستون سبزرنگ شده مقادیر بهینه ضریب هدایت هیدرولیکی واسنجی شده است.

تغییر و اصلاح مقادیر هدایت هیدرولیکی، از لاگ چاه‌های پیژومتری و مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج برای مواد مختلف، در منطقه استفاده گردید. با توجه به اینکه مقادیر هدایت هیدرولیکی در محدوده مشخصی تغییر می‌نماید، همزمان شرایط مرزی شامل نوع مرز و سلول‌های فعال و غیرفعال محدوده مرزی هم نیز تغییر داده شده است. طی مرحله واسنجی، پارامترهای ذکر شده، در طول چندین مرتبه اجرای مدل تغییر داده شد تا انطباق مناسبی بین بارهای هیدرولیکی محاسبه شده و مشاهداتی حاصل گردید؛ بدین معنی است که سطح آب محاسباتی در پیژومترها در محدوده خطای مجاز قرار گرفتند (شکل ۳).

جدول ۳، مقایسه به روش محاسبات آماری (با استفاده از معیار RMS)، در اولین اجرای مدل و نیز در مدل واسنجی شده نهایی را نشان می‌دهد. با توجه به مقدار خطای RMS در جدول مذکور، مشاهده می‌شود که مقدار RMS در پایان واسنجی به مقدار ۱/۲۶۵ متر رسیده و از حد مجاز خطا



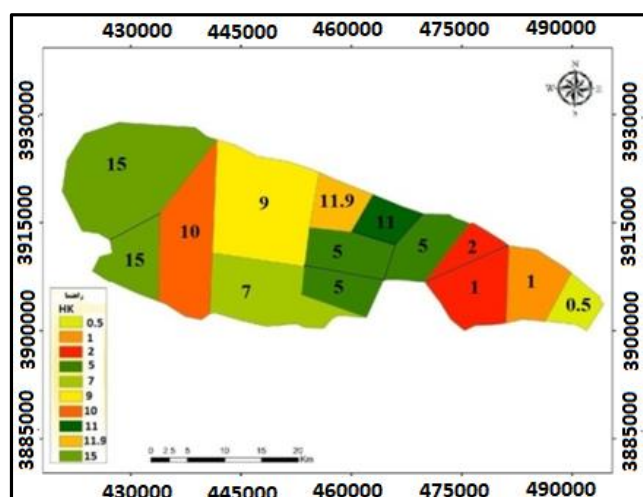
شکل ۳- نتیجه واسنجی مدل در حالت پایدار.

جدول ۳- مقایسه نتایج واسنجی مدل در حالت پایدار به روش محاسبات آماری (روش آماری RMS).

مقدار RMS به متر	دوره واسنجی
۵۹/۸۱۸	اولین اجرا
۱/۲۶۵	پایان واسنجی (آخرین دوره)

جدول ۴- مقادیر آنالیز باقی مانده‌ها تفاضل سطح آب اندازه‌گیری شده و سطح آب محاسباتی در مرحله واسنجی طی دوره پایدار (مهر ۸۹).

نام	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	بار آبی مشاهداتی (متر)	بار آبی محاسبه شده (متر)	بار آبی باقیمانده (متر)
پیزومتر ۱	۴۳۰۸۲۴	۳۹۱۷۶۷۲	۱۱۰۴/۲	۱۱۰۲/۸۶	-۱/۳۴
پیزومتر ۲	۴۲۸۶۳۷	۳۹۰۹۷۲۲	۱۴۵۱/۷	۱۴۵۳/۰۷۷	۱/۳۸
پیزومتر ۳	۴۳۹۶۰۵	۳۹۲۱۱۹۲	۱۰۲۸/۲	۱۰۲۹/۴۴	۱/۲۵
پیزومتر ۴	۴۵۲۳۱۰	۳۹۱۳۷۱۹	۱۰۱۳/۲	۱۰۱۱/۹۸	-۱/۲۲
پیزومتر ۵	۴۵۵۳۹۷	۳۹۰۵۱۷۹	۱۰۳۱/۸۵	۱۰۳۱/۳۴	-۰/۴۸
پیزومتر ۶	۴۵۹۲۳۴	۳۹۰۷۵۱۷	۱۰۶۰/۹۶	۱۰۶۰/۲۹	-۰/۶۶
پیزومتر ۷	۴۵۸۱۰۹	۳۹۱۲۱۰۲	۱۰۳۵/۹۸	۱۰۳۵/۲۹	-۰/۶۸
پیزومتر ۸	۴۵۹۷۳۱	۳۹۱۷۳۳۹	۱۰۴۲/۹۷	۱۰۴۳/۴۹	۰/۵۳
پیزومتر ۹	۴۶۴۸۱۸	۳۹۱۵۳۸۸	۱۱۰۴/۲۱	۱۱۰۵/۰۱	۰/۷۹
پیزومتر ۱۰	۴۶۹۷۶۲	۳۹۱۳۵۶۷	۱۱۵۳/۹۴	۱۱۵۵/۱۲	۱/۲۳
پیزومتر ۱۱	۴۷۶۶۶۰	۳۹۱۲۷۲۰	۱۱۵۹/۲	۱۱۶۰/۰۸	۰/۸۷۶
پیزومتر ۱۲	۴۷۵۹۳۴	۳۹۰۵۵۸۱	۱۱۷۷/۹۸	۱۱۷۷/۹۴	-۰/۰۴
پیزومتر ۱۳	۴۸۴۴۰۵	۳۹۰۴۹۷۶	۱۱۸۷/۹۵	۱۱۸۶/۸۹	-۱/۰۵
پیزومتر ۱۴	۴۹۰۲۱۳	۳۹۰۳۶۴۴	۱۲۰۷/۲۱	۱۲۰۶/۰۲	-۱/۱۹

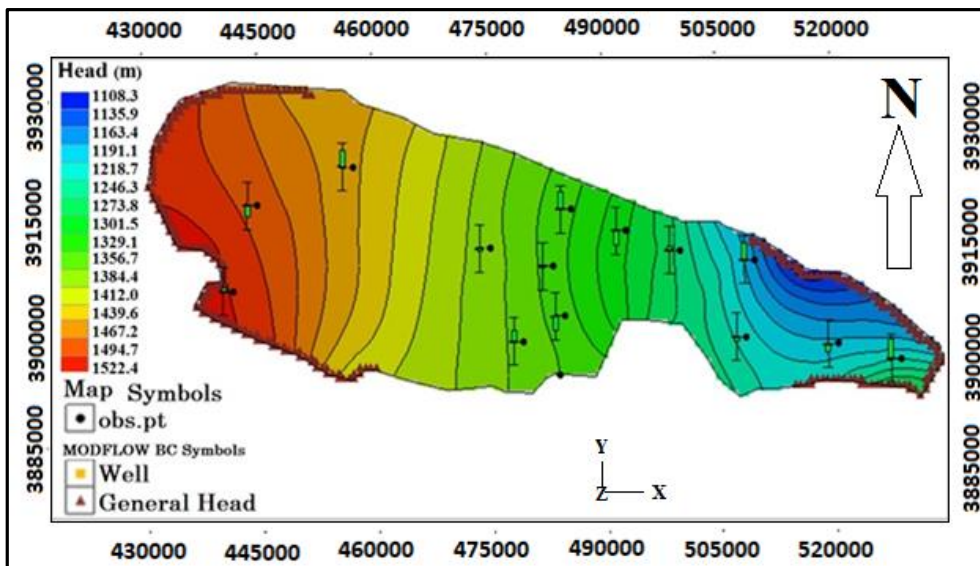


شکل ۴- مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی در ضخامت (مترمربع بر روز) طی واسنجی حالت پایدار.

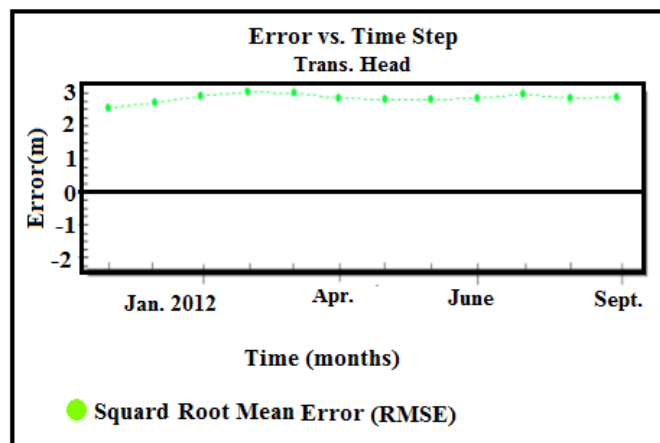
واسنجی مدل در حالت ناپایدار

تمام پیزومترها در محدوده‌ی مجاز خطا قرار گرفتند (شکل ۵). شکل ۶، خلاصه میزان خطاهای رخ داده در ماه‌های مختلف دوره‌ی واسنجی ناپایدار را نمایش می‌دهد. مقادیر آبدهی ویژه، در پایان واسنجی مدل (حالت ناپایدار) بهینه گردیده است؛ این مقادیر را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. جدول ۵، مقایسه به روش محاسبات آماری (با استفاده از معیار RMS)، در اولین اجرای مدل و نیز در مدل واسنجی شده نهایی را نشان می‌دهد. با توجه به مقدار خطای RMS در جدول مذکور، مشاهده می‌شود که مقدار RMS در پایان واسنجی به مقدار ۲/۱۴۵ متر رسیده و کاهش یافته است.

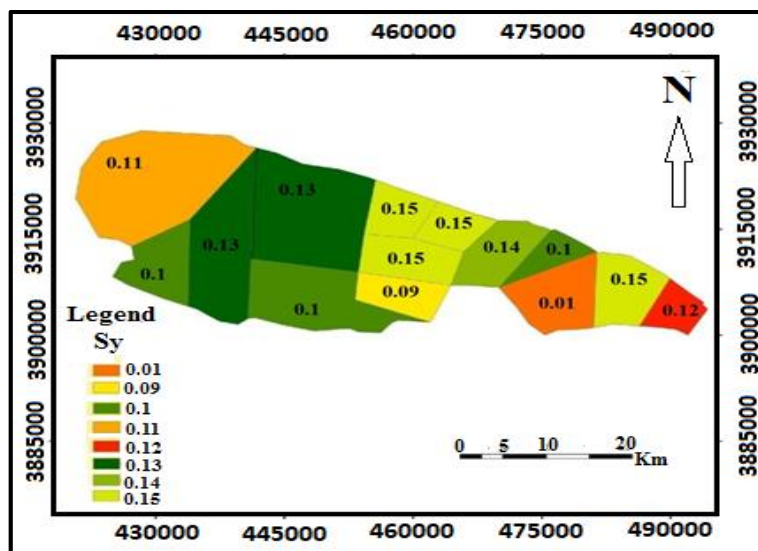
پس از ورود داده‌ها به مدل مفهومی در حالت ناپایدار، مدل جهت بررسی صحت داده‌ها برای اولین بار اجرا گردید. برای رفع خطای ایجادشده، مدل مورد واسنجی قرار گرفت. برای واسنجی مدل از هر دو روش دستی (سعی و خطا) و اتوماتیک (توسط کد PEST) استفاده گردید. با توجه به اینکه طی واسنجی مدل در حالت پایدار، پارامتر هدایت هیدرولیکی بهینه می‌گردد؛ در طی واسنجی حالت ناپایدار مقدار این پارامتر ثابت بوده و دچار تغییر نمی‌گردد. مهم‌ترین پارامتری که طی واسنجی مدل در حالت ناپایدار بهینه می‌شود؛ آبدهی ویژه آبخوان است. در پایان واسنجی مدل در حالت ناپایدار



شکل ۵- نتیجه نهایی واسنجی مدل در حالت ناپایدار (اولین گام زمانی دوره تنش).



شکل ۶- نمودار خلاصه مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در ماه‌های مختلف دوره واسنجی ناپایدار.



شکل ۷- مقادیر آبدهی ویژه بهینه‌شده در انتهای واسنجی ناپایدار.

جدول ۵- مقایسه نتایج واسنجی مدل در حالت پایدار به روش محاسبات آماری (روش آماری RMS).

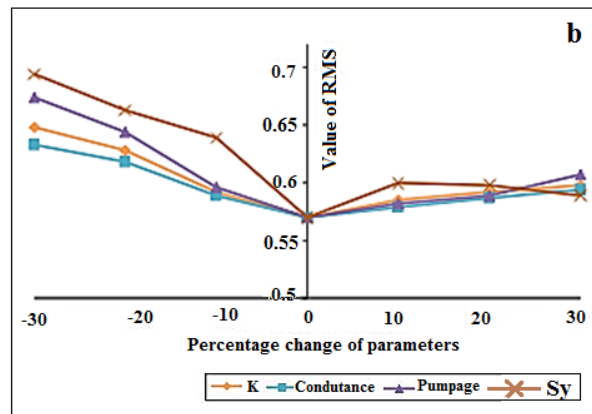
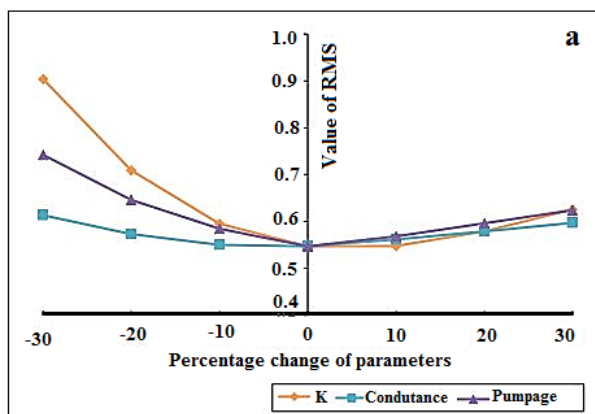
مقدار RMS	دوره واسنجی
۵۹/۸۱۸	اولین اجرا
۱/۲۶۵	پایان واسنجی (آخرین دوره)

آنالیز حساسیت پارامترهای مدل

نسبت به تغییرات نرخ پمپاژ چاه‌ها، ضریب آبگذری مرزها، به ترتیب در مراحل بعدی میزان حساسیت قرار دارند. بیشترین مقدار خطای RMS ثبت شده در این مرحله، مربوط به افزایش مقادیر هدایت هیدرولیکی است. همچنین در حالت ناپایدار بیشترین حساسیت مدل به پارامتر آبدهی ویژه می‌باشد و نرخ پمپاژ از چاه‌های بهره‌بردار، هدایت هیدرولیکی و ضریب آبگذری مرزها، به ترتیب در مراحل بعدی میزان حساسیت قرار دارند. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد که نقطه صفر تغییرات برای پارامترهای مذکور بهترین حالت اجرای مدل می‌باشد چون در این حالت میزان خطای RMS محاسبه‌ای دارای کمترین مقدار است. مدل واسنجی شده، کمترین میزان خطای RMS را نشان می‌دهد و به‌نوعی می‌توان گفت صحت آن نیز قابل تأیید می‌باشد.

منظور از انجام آنالیز حساسیت، تشخیص میزان تأثیرپذیری خروجی‌های مدل، در اثر تغییر ورودی‌های آن است. در این تحقیق، آنالیز حساسیت مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، نسبت به پارامترهایی که قطعیت کمتری دارند؛ انجام گرفت است. در حالت پایدار، پارامترهای هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب آبگذری مرزها (C) و میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌بردار (Q)، به میزان ۲۰، ۱۰ و ۳۰ درصد به دو صورت کاهش و افزایشی تغییر داده شد؛ و در حالت ناپایدار، علاوه بر پارامترهای حالت پایدار، پارامتر آبدهی ویژه (Sy) نیز به مشابه حالت پایدار تغییر داده شدند؛ و برای تمامی این حالات، مدل اجرا گردید. در نهایت، نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۸ آورده شده است.

با توجه به شکل ۸ در حالت پایدار مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی بیشترین حساسیت را دارد و پس‌از آن



شکل ۸- نتایج آنالیز حساسیت در حالت پایدار (a) و ناپایدار (b).

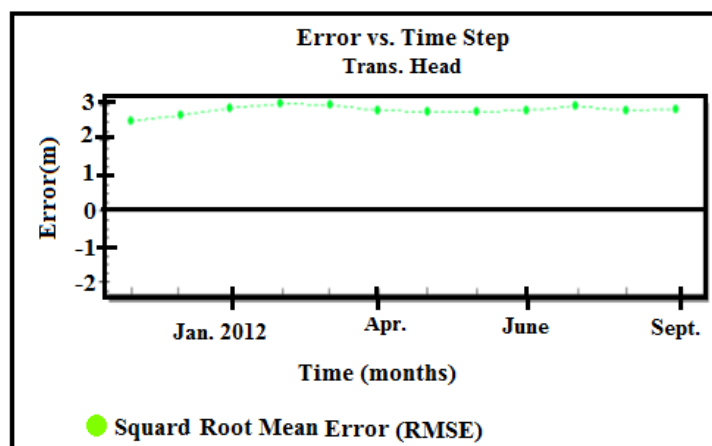
شرایط مرزی، ثابت در نظر گرفته شده است؛ در واقع، از همان مقادیر دوره واسنجی ناپایدار استفاده گردید. پارامترهایی مانند تغذیه از بارندگی، تخلیه از چاه‌های بهره‌بردار و مقادیر سطح آب چاه‌های پیژومتری، با توجه به آمارهای موجود، متغیر می‌باشند؛ مطابق با دوره آماری صحت سنجی وارد مدل گردید.

صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز

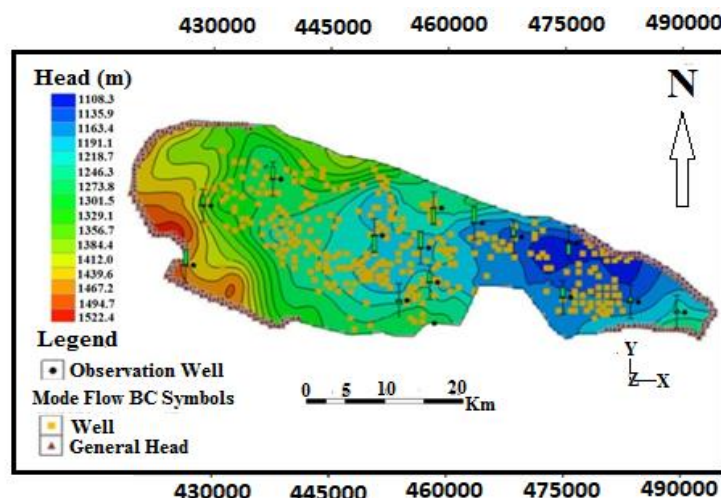
در این تحقیق، به منظور آزمون صحت عملکرد، مدل برای یک دوره زمانی ۱۲ ماهه از آبان ۱۳۹۰ تا پایان مهر ۱۳۹۱، متفاوت از دوره زمانی واسنجی اجرا گردیده است. لازم به ذکر است که پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و

شکل ۹، خلاصه‌ای از مقادیر خطاهای رخ داده در دوره صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده‌شده؛ مدل به‌خوبی توانسته است؛ شرایط موجود در این دوره (دوره صحت‌سنجی) را شبیه‌سازی کند؛ بنابراین با این اوصاف می‌توان گفت که مدل شبیه‌سازی‌شده، قابلیت و توانایی پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان را دارد.

در نهایت مدل برای صحت‌سنجی اجرا گردید. در این مرحله نیز معیار خطا، ریشه میانگین مربعات خطا و میزان خطای مجاز جهت تأیید صحت مدل، $\pm 2/5$ متر در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه‌شده و مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار ریشه میانگین مربعات خطاهای شبیه‌سازی در پایان صحت‌سنجی برابر با $2/46$ برآورد شد؛



شکل ۹- نمودار مقادیر خطاهای (RMS) ایجادشده در طول دوره صحت‌سنجی.



شکل ۱۰- نتیجه صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی‌شده.

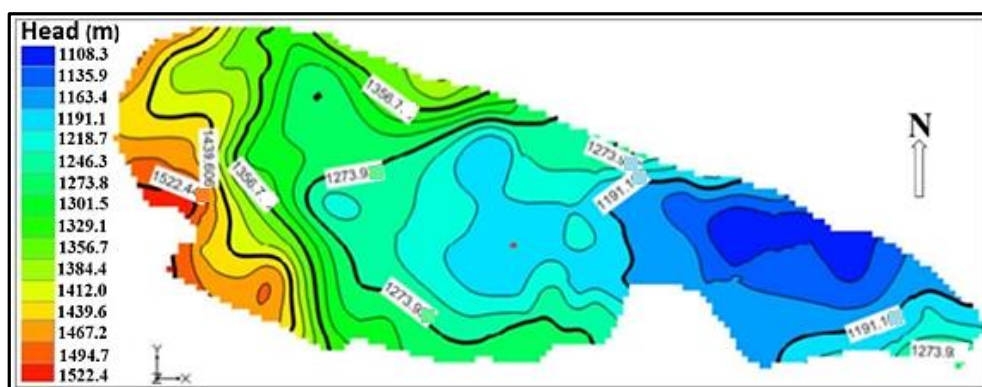
موردپژوهش و به‌منظور به‌دست آوردن بارش احتمالی در هرماه از سال در دوره پیش‌بینی، از میانگین ۱۵ ساله بارش استفاده‌شده است. پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و شرایط مرزی، ثابت بوده و همانند مرحله صحت‌سنجی به مدل وارد شدند. لازم به ذکر است که به دلیل ممنوعیت برداشت در این دشت؛ اضافه برداشتی در چاه‌ها

پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان

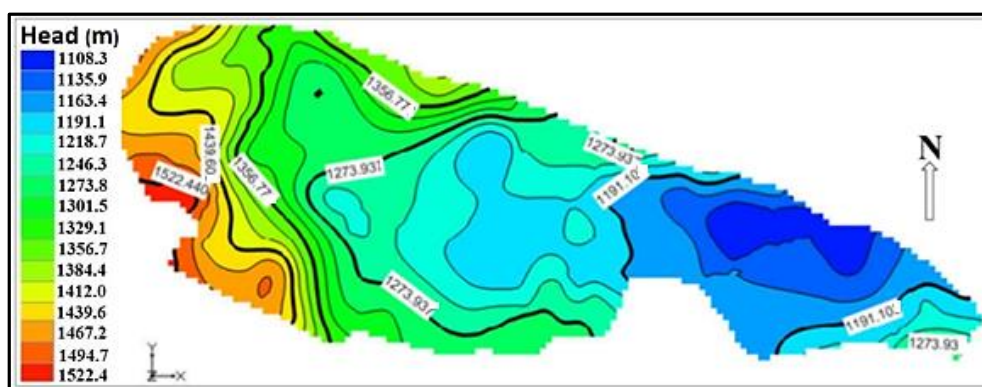
یکی از اهداف مهم در این پژوهش، پیش‌بینی وضعیت آبخوان در برابر تنش‌های هیدرولیکی وارده است. بدین منظور، پس از مرحله صحت‌سنجی و کسب اطمینان نسبی از درستی مدل ساخته‌شده؛ اقدام به پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان به مدت ۳ سال، از مهر ۱۳۹۸ تا مهر ۱۴۰۱ شد. با نگرش به عدم اطلاع از استرس‌های احتمالی آبی حاکم بر آبخوان

محدوده مورد پژوهش به مرور از ابتدای دوره تا انتهای دوره پیش‌بینی شاهد افت سطح آب زیرزمینی بیشتری خواهیم بود؛ این افزایش افت در نواحی مرکزی و نزدیک به غرب آبخوان (که محدوده با تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد) و به‌خصوص محدوده جغرافیایی غرب و شمال غرب روستای حسین‌آباد بیشتر و مشهودتر است.

منظور نشده و با فرض تداوم روند فعلی، برداشت مرحله پیش‌نگری، ثابت در نظر گرفته شده است. بعد از وارد کردن پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند پیش‌بینی، مدل اجرا شده و سپس نتایج آن، به صورت منحنی‌های هم‌پتانسیل آب زیرزمینی ارائه شده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در ابتدا و آخرین دوره پیش‌بینی را نشان می‌دهد؛ که نتایج نشان می‌دهد که با ادامه روند کنونی برداشت از آب‌های زیرزمینی در



شکل ۱۱- نقشه تراز آب زیرزمینی آبخوان مورد پژوهش در ابتدای دوره‌ی پیش‌بینی (مهر ۱۳۹۸).



شکل ۱۲- نقشه تراز آب زیرزمینی آبخوان مورد پژوهش در ابتدای دوره‌ی پیش‌بینی (مهر ۱۴۰۱).

داده کاهشی بوده است. برای جلوگیری از این امر، راهکارهای مدیریتی مانند کاهش میزان برداشت از آبخوان و تعدیل آن متناسب با بیلان دشت سفارش می‌شود. هم‌چنین می‌توان با استفاده از طرح پروژه‌های تغذیه مصنوعی، در فصول بارش جهت جلوگیری از هدر رفت نزولات جوی اقداماتی انجام نمود. هم‌چنین می‌توان برای کاهش برداشت از آبخوان، طرح پروژه استفاده از پساب (تصفیه فاضلاب) را اجرا نمود. از راه‌های پیشنهادی دیگر؛ بهبود الگوی کشت جهت کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی است. برای جلوگیری از افت بیشتر آبخوان

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی وضعیت آبخوان برای سه سال آتی با استفاده از مدل طراحی شده، نشان می‌دهد که با ادامه روند فعلی برداشت از آب زیرزمینی، آبخوان مورد پژوهش در قسمت‌های مرکز و نزدیک به غرب دچار افت بیشتری خواهد شد و روند ممنوعیت دشت ادامه پیدا خواهد کرد؛ هم‌چنین میزان نشست زمین افزایش می‌یابد. در تحقیقات اصغری و همکاران (۱۳۸۴)، کاظمی آذر (۱۳۸۵) و آقاجانی و همکاران (۱۳۹۵) نیز سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف مورد بررسی قرار

کارشناسی ارشد، دانشکده آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

کرد، م.، اصغری مقدم، ا.، نخعی، م.، ۱۳۹۸، مدل سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه سازی برداشت آب زیرزمینی، مجله هیدروژئولوژی، ۱۶۷-۱۵۳: (۱)۴.

گلایی، م.ر.، زینعلی، م.، نیکسخن، م.ح.، آذری، ا.، ۱۳۹۷. بررسی عملکرد مدل مفهومی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن در مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان (مطالعه موردی: دشت لور-اندیمشک). مجله هیدروژئولوژی، ۳(۲): ۴۵-۳۳.

زمزم، ع.، و رهنما، م.، ۱۳۹۱. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی MT3DMS (مطالعه موردی: دشت رفسنجان). مجله پژوهش آب ایران، ۶(۱۰): ۲۰۷-۲۰۳.

وزارت نیرو، ۱۳۸۴. پیش نویس راهنمای تهیه مدل ریاضی آب های زیرزمینی. معاونت امور آب و آبفا. دفتر مهندسی و معیارهای فنی، نشریه شماره ۳۳۷.

شفیعی مطلق، خ.، ۱۳۸۴. کاربرد مدل ریاضی آب زیرزمینی در مدیریت آبخوان دشت حصاروئیه. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

دهقانی قهفرخی، ا.، ۱۳۸۱. مطالعه هیدروژئولوژی و مدیریت آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از مدل شبیه سازی جریان آب زیرزمینی. پایان نامه کارشناسی ارشد، زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

جعفری، ع.م.، ۱۳۹۷. مطالعه و بررسی کمی و کیفی آب زیرزمینی شهرستان سپیدان با استفاده از نرم افزار GMS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت دانشکده فنی و مهندسی.

جمعه نیا، ج.، ۱۳۸۸. تهیه مدل جریان آب زیرزمینی دشت حصاروئیه و مکان یابی طرح تغذیه مصنوعی به کمک مدل ریاضی و GIS. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

و نشست زمین، استفاده از روش های نوین آبیاری مثل آبیاری قطره ای و بهینه سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، افزایش راندمان کاربرد و انتقال آب و جلوگیری از حفر چاه های جدید پیشنهاد می شود. بدر خاتمه، پایش دقیق تغییرات کمی و کیفی آبخوان با افزایش تعداد پیزومترها و نمونه برداری منظم از آب آبخوان سفارش می شود.

منابع

آقاجانی، م.، ۱۳۹۵. بررسی کمی منابع آب زیرزمینی دشت میانه با استفاده از نرم افزار GMS، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز.

آریایی مهر، ج.، ۱۳۹۶. پسابازینی مدل ریاضی کمی آبخوان دشت همدان-بهار، استان همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

آذری بخشی، ط.، سامانی، ن.، ۱۳۸۹. ارزیابی هیدرودینامیکی و بیلان آبی دشت ساری نکا با استفاده از کد کامپیوتری MODFLOW، بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، دانشگاه ارومیه.

اصغری، ک.، سوری نژاد، ج.، ذوالانوار، ع.، ۱۳۸۴. پیش بینی عملکرد بهینه آبخوان دشت برخوردار به روش شبیه سازی-بهینه سازی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳-۲۴: (۳)۹.

قدرتی، م.، ۱۳۹۱. مدل های ریاضی آب های زیرزمینی، آموزش کاربردی مدل GMS. انتشارات سیمای دانش.

شرکت سهامی آب منطقه ای استان مرکزی، ۱۳۹۱، گزارش مطالعات و بررسی های ژئوالکتریکی دشت زرننده محدوده مطالعاتی ۴۱۰۲.

شرکت سهامی آب منطقه ای استان مرکزی، ۱۳۹۶، گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت توسعه بهره برداری از منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی زرننده.

کاظمی آذر، ف.، ۱۳۸۵. مدل سازی آب زیرزمینی دشت رفسنجان و بررسی اثرات استخراج آب زیرزمینی. پایان نامه

- بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین-شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- Anderson, M., Woessner, W., 1992. Applied groundwater modeling flow and adjective transport. Academic Press, San Diego, 381 p.
- Chenini, I., Benmammou, A., 2010. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. Computers & Geosciences, pp 801-817.
- Khadri, S.F.R., Pande, C., 2016. Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. Modeling Earth Systems and Environment, 2, 39.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 2nd edn, Springer, Dordrecht Heidelberg, London, New York.
- Yang, F.R., Lee, C.H., Kung, W.J., Yeh, H.F., 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. Engineering Geology, 103, 39-58.
- Yicheng, G., Ganming, L., Franklin, W., 2015. Quantifying the response time of a lake-groundwater interacting system to climatic perturbation. Water, 7(11): 6598- 6615.
- مهدی‌روست، م.، ۱۳۹۴. مدل‌سازی نوسانات آب زیرزمینی دشت قره شور با استفاده از مدل ریاضی GMS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- مهدوی، م.، فرخزاد، ب.، سلماحقه، ع.، ملکیان، ع.، سوری، م.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی آبخوان همدان-بهار و بررسی سناریوهای مدیریت با استفاده از PMWIN، تحقیقات آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۲۶(۱): ۱۰۸-۱۱۶.
- میرعباسی، ر.، رهنما، م.، ۱۳۸۶. شبیه‌سازی آبخوان دشت سیرجان با استفاده از مدل MODFLOW و بررسی اثرات احداث سد تنگ‌تویه بر آن. مجله پژوهش‌های آب ایران، ۱(۱): ۹-۱.
- ناصری، ح.، ۱۳۸۵. تهیه مدل ریاضی به‌منظور اعمال مدیریت کمی و کیفی آبخوان دشت نی‌ریز. بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- نخعی، م.، صابری نصر، ا.، ۱۳۸۹. پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قره شور با استفاده از شبکه عصبی-موجکی.