



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عددی مسیر جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان-بهار

مریم بیات ورکشی^{۱*}، روژین فصیحی^۱، حمید زارع ایبانه^۲

۱- گروه علوم و مهندسی خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

اطلاعات مقاله:

چکیده

زمینه و هدف: آب زیرزمینی جز منابع بسیار مهم برای ادامه حیات موجودات زنده است. از این رو مدل‌سازی آب زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای در مدیریت و برنامه‌ریزی هر منطقه دارد. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، به شبیه‌سازی عددی مسیر جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان - بهار با استفاده از نرم‌افزار GMS پرداخته شد.

روش بررسی: در این بررسی، ابتدا مدل سه‌بعدی هیدرولوژیکی دشت همدان - بهار تهیه و سپس جریان در دشت با کد عددی MODFLOW شبیه‌سازی گردید. پس از شبیه‌سازی جریان، کالیبره کردن مدل به روش سعی و خطا انجام گرفت. تخمین مسیر جریان آب زیرزمینی نیز با استفاده از کد عددی MODPATH صورت گرفت. نهایتاً مناطق تسخیر چاه‌های مورد مطالعه و جهت حرکت آب زیرزمینی با زمان حرکت‌های مختلف ترسیم گردید.

یافته‌ها: اختلاف سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در محدوده مجاز ± 35 m به‌عنوان دامنه مطلوب بود. تخمین مسیر جریان آب زیرزمینی با کد عددی MODPATH نشان داد که در حرکت رو به جلو، طولانی‌ترین مسیر انتقال جریان 43400 m و در حرکت رو به عقب $8270/674$ m به‌عنوان طولانی‌ترین مسیر انتقال جریان مشخص گردید. نتایج شبیه‌سازی انتقال مسیر جریان آب زیرزمینی گویای این واقعیت بود که انتقال جریان از مرز آبخوان به سمت مرکز و خروجی آبخوان همسو با گرادیان هیدرولیکی بود.

نتیجه‌گیری: در مجموع می‌توان اظهار داشت، ادامه روند فعلی جریان آب زیرزمینی، افزایش سطح آلودگی آبخوان را در پی خواهد داشت که خسارت‌های جبران‌ناپذیری به سفره آب زیرزمینی وارد خواهد نمود.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۳۰

تاریخ ویرایش: ۹۷/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۲۹

تاریخ انتشار: ۹۷/۰۳/۳۰

واژگان کلیدی: آلودگی آبخوان، گرادیان

هیدرولیکی، جریان آب زیرزمینی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

m.bayat.v@malayeru.ac.ir

مقدمه

در مطالعات هیدروژئولوژی مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی یکی از روش‌های پیش‌بینی رفتار سیستم آب‌های زیرزمینی است. استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی و تکنیک‌های شبیه‌سازی به‌عنوان یکی از راه‌های نظارت، کنترل و اعمال مدیریت منابع آب است (۱). به‌علاوه مدل‌ها می‌توانند برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی و پیش‌بینی رفتار یک آبخوان در مقابل تغییرات آب و هوایی و پمپاژ استفاده شوند (۲). فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری علاوه بر افت شدید سطح آب آبخوان‌ها، آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها وارد می‌نمایند (۳). ارائه راهکارهای موثر مدیریتی و حفاظتی برای جلوگیری از کاهش کیفی آب‌های زیرزمینی، ضروری بنظر می‌رسد (۴). مدل‌سازی انتقال آلودگی آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و در همین راستا مدل‌های عددی مختلفی برای تحلیل آلودگی توسعه یافته است (۵). در مطالعه Ziaei و همکاران (۶) در دشت بجنورد به کمک نرم‌افزار GMS نشان دادند با کامل نشدن شبکه فاضلاب شهری سطح آب زیرزمینی در چند سال آینده بالا آمده و بخش وسیعی از شهر مستغرق می‌شود. Ghobadian و همکاران (۷) شبیه‌سازی آبخوان دشت میان‌در بند کرمانشاه در شرایط غیرماندگار را به کمک نرم‌افزار GMS ۶.۵ انجام دادند. نتایج آنان نشان داد اجرای شبکه آبیاری و زهکشی سد گاوشان موجب کاهش برداشت از چاه‌های آب و به‌تبع افزایش سطح آب آبخوان شد. Banejad و همکاران (۸) با شبیه‌سازی آبخوان دشت نهاوند به‌صورت سه بعدی در محیط نرم‌افزار GMS ۷.۱ اظهار داشتند که جهت حرکت آلودگی از اطراف دشت به سمت مرکز دشت است. Tandiseh و همکاران (۳) با بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی شهر مشهد و تاثیر اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی با روش عددی تفاضلات محدود در نرم‌افزار GMS ۷.۱ نشان دادند سطح آب زیرزمینی پس از اجرای طرح کاهش یافته است. Eftekhari و همکاران (۹) با شبیه‌سازی آبخوان دشت نیریز استان فارس در نرم‌افزار GMS ۷.۱ نشان دادند دو مولفه

برداشت از چاه‌ها و هدایت هیدرولیکی بیشترین تاثیر را بر هیدرولیک آب زیرزمینی دارند. در مطالعه‌ای دیگر، شبیه‌سازی آبخوان دشت قوچان به کمک تحلیل حساسیت در نرم‌افزار GMS ۷.۱ نشان داد مدل طراحی شده بیشترین حساسیت را به هدایت هیدرولیکی آبخوان و جنس سنگ کف داشت (۱۰). نتایج مطالعات سطح ایستابی دشت بیرجند (۱۱)، دشت بزمان - سردگان (۱۲) و دشت مختاران بیرجند (۱۳) با استفاده از کد عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS نشان‌دهنده افت شدید سطح ایستابی به دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است. نتایج پژوهش Yari و همکاران (۱۴) در بررسی اثر تخلیه و تغذیه شبکه آبیاری و زهکشی دشت زرينه‌رود بر سیستم آب زیرزمینی با مدل MODFLOW نشان داد که در شرایط کنونی اختلاف زیادی بین تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی وجود ندارد. Marofi و همکاران (۱۵) با بررسی کاربرد ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری طرح تغذیه مصنوعی در آبخوان دشت همدان - بهار، اظهار داشتند منطق بولین و اپراتور ضرب جبری فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی رتبه مناسبی در اجرای تغذیه مصنوعی آبخوان دارا است. Jabbari و همکاران (۱۶) آبخوان دشت ساری - نکا را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی نمودند، نتایج آنها نشان داد که قسمت‌های جنوبی دشت تغذیه کننده و قسمت‌های شمالی دشت تخلیه کننده جریان است. Qiu و همکاران (۱۷) با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی حوضه دره رودخانه جیلین در چین در محیط نرم‌افزار GMS دریافتند مقدار برداشت از منطقه بیش از تغذیه است. بررسی رفتار آبخوان غیرمحصور بو - آرگ در کشور مراکش با مدل MODFLOW نشان داد نوسانات سطح آب زیرزمینی به تغییرات فصلی تغذیه از بارش و آبیاری بستگی دارد (۱۸). مطالعه Wang و همکاران (۱۹) در تلفیق مدل MODFLOW و برنامه سامانه اطلاعات جغرافیایی در آبخوانی از شمال چین، گویای بحرانی بودن وضعیت منابع آب زیرزمینی به‌واسطه برداشت بی‌رویه است. Herzog (۲۰) با استفاده از کد عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS تاثیر سیستم تخلیه فاضلاب شهری بر آب‌های

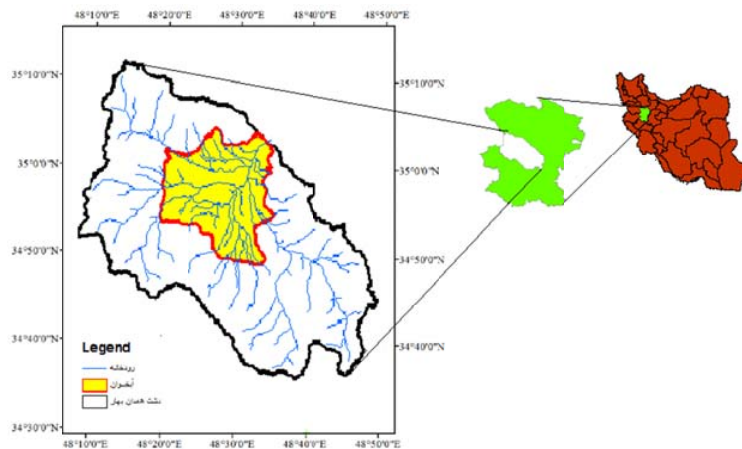
منابع آب سطحی با افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی مواجه شده است. افزایش بی‌رویه برداشت و کاهش حجم مخازن آب زیرزمینی به‌موازات استفاده از نهاده‌های کود و سم کشاورزی، کاهش کیفیت آب را نیز به دنبال داشته است. در حالی که تغییرات کمی و کیفی آب این دشت در بخش‌های کشاورزی و شرب منطقه و از دیدگاه زیست‌محیطی اهمیت به‌سزایی دارد. بنابراین با شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت می‌توان پیچیدگی‌های دشت را جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌صورت ساده بیان نمود. هدف از این پژوهش مشخص نمودن نحوه گسترش جریان آب زیرزمینی طی گام‌های زمانی متفاوت و یافتن مکان‌های در معرض آلودگی در ادوار آینده از طریق شبیه‌سازی آبخوان است.

مواد و روش‌ها

– موقعیت منطقه مورد مطالعه

دشت همدان – بهار با وسعت 880 km^2 بین طول شرقی $48^{\circ}17'$ تا $48^{\circ}33'$ و $34^{\circ}49'$ تا $35^{\circ}02'$ عرض شمالی در ارتفاع 1700 m – 1800 m از سطح دریا قرار دارد. حوضه آبریز این دشت موسوم به سیمینه‌رود با وسعت 2459 km^2 در دامنه شمالی ارتفاعات الوند واقع هستند. گسترش سطحی آبخوان اصلی دشت 468 km^2 و وسعت ارتفاعات 1579 km^2 است. خروجی حوضه در اراضی کوشک‌آباد از ناحیه شمالی قرار دارد و سفره آب زیرزمینی با دشت‌های کبودرآهنگ و

زیرزمینی منطقه شهری کامپالا در اگاندا را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که در طول فصول مختلف، جریان آب زیرزمینی تغییر می‌کند. Laronne و همکاران (۲۱) تاثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان صحرای جودین در فلسطین را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه نحوه جریان آب‌های زیرزمینی و نفوذ آن از یک آبخوان به آبخوان دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. Kim و همکار (۲۲) تاثیر شبکه نوین آبیاری بر لایه آبدار نوبیان کشور مصر و پیش‌بینی روند بالا آمدن سطح ایستابی را با مدل MODFLOW بررسی نمودند. Pourhaghi و همکاران (۲۳) با کاربرد مدل MODFLOW در شبیه‌سازی آبخوان دشت لرستان – دلفان اظهار داشتند که مقدار افت سطح آب زیرزمینی طی ۱۰ سال آینده، با کاهش ۲۰ درصدی آبدهی چاه‌های بهره‌برداری، به‌طور چشمگیری بهبود پیدا خواهد نمود. نتایج مطالعه Saeedi و همکاران (۲۴) با بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان در محیط نرم افزار GMS نشان داد که گرادیان غلظت هدایت الکتریکی در چاه‌های منتخب، در صورت اعمال سیاست برداشت بهینه نسبت به عدم اجرای این سیاست، به میزان ۱۲ درصد کاهش خواهد داشت. در این مطالعه با توجه به ضرورت مدل‌سازی آبخوان به‌منظور مدیریت بهینه منابع آبی، آبخوان دشت همدان – بهار مورد توجه قرار گرفت. دشت همدان – بهار به‌عنوان یکی از مهمترین دشت‌های استان همدان، طی سال‌های اخیر به‌دلیل کمبود



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

قه‌اوند ارتباط هیدروژئولوژیکی دارد. شکل ۱ موقعیت دشت مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

- اطلاعات مورد استفاده

به‌منظور انجام این مطالعه مجموعه‌ای از اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی آبخوان دشت همدان - بهار مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات متغیرهای مورد استفاده، توصیف و منبع تهیه هر یک از آنها را نشان می‌دهد. داده‌های روزانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی مریانج، سد اکباتان، صالح آباد و کوشک آباد واقع در سطح دشت طی سال‌های ۱۳۹۴ - ۱۳۷۰ برای محاسبه میزان تغذیه آب زیرزمینی از سازمان هواشناسی استان همدان تهیه و استفاده گردید. نمودار ۱ میانگین بارش هر یک از ایستگاه‌ها را طی سال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. کمترین بارش ثبت شده طی دوره مورد مطالعه برابر ۱۵۱/۵ mm در ایستگاه کوشک‌آباد و بیشترین آن معادل ۷۳۵ mm در ایستگاه مریانج به ثبت رسیده است. میانگین

بارش ثبت شده در هر یک از ایستگاه‌های مریانج، سد اکباتان، صالح آباد و کوشک آباد نیز به‌ترتیب برابر ۴۶۵/۶۱، ۳۵۵/۷۱، ۳۱۸ و ۲۴۷/۸۸ mm است.

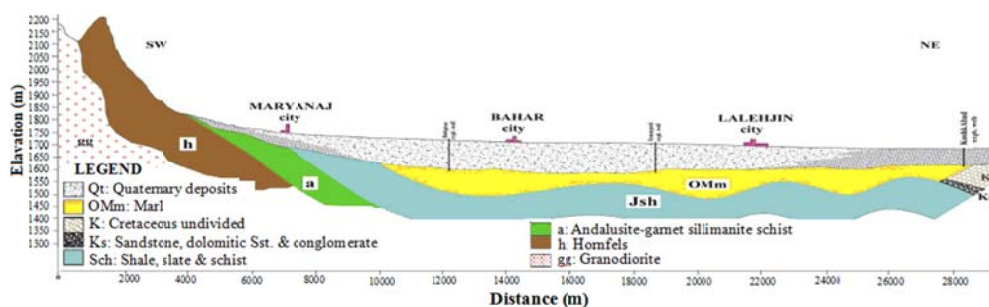
جنس خاک‌های دشت عمدتاً رس، شن، ماسه، سیلت، شیست، اسلیت، مارن و فیلیپ است که حاصل سازندهای آبرفتی و شیست‌های همدان در دوره‌های کواترنری و ژوراسیک است (۲۵). برای ساخت مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی از اطلاعات هیدروژئولوژیکی لاگ ۹ گمانه اکتشافی در محدوده مطالعاتی استفاده شد. اطلاعات هر لاگ شامل مختصات جغرافیایی، جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده چاه است. برای تعیین جنس سنگ کف از اطلاعات زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور مربوط به دشت استفاده گردید. براین اساس جنس سنگ کف شیست تعیین گردید که در ۴۰۰ متری سطح زمین قرار دارد. بنابراین ضخامت لایه آبخوان تشکیل‌دهنده مدل، ۴۰۰ m در نظر گرفته شد. شکل ۲ مقطعی از لایه‌های تشکیل‌دهنده محدوده دشت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات متغیرهای مورد استفاده

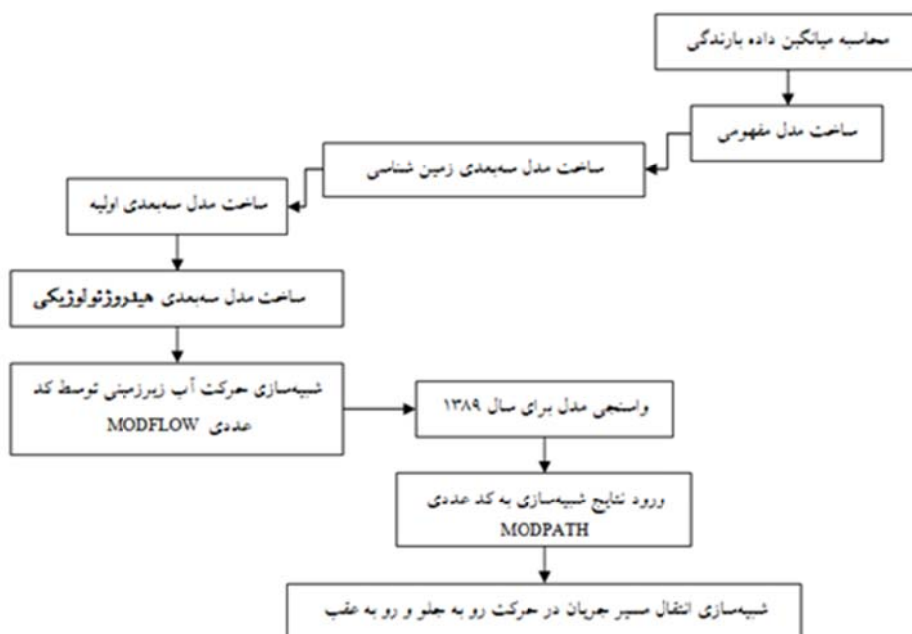
متغیر مورد استفاده	توضیحات	منبع
بارندگی	متوسط داده‌های بارندگی روزانه جهت بررسی رواناب و ذخیره به‌عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفت.	سازمان هواشناسی استان همدان
شماره منحنی (CN)	به‌منظور محاسبه رواناب از نقشه‌های کاربری اراضی منطقه و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در منطقه به‌دست آمد.	محاسباتی
هدایت هیدرولیکی	مقادیر هدایت هیدرولیکی برای دو نوع خاک شن و ماسه، سیلت و رس وارد مدل گردید.	آب منطقه‌ای استان همدان
هیدروژئولوژیکی	به‌منظور ساخت مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی از اطلاعات لاگ ۹ گمانه اکتشافی که شامل مختصات جغرافیایی، جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده چاه است، استفاده شد.	آب منطقه‌ای استان همدان
زمین‌شناسی	به‌منظور تعیین جنس سنگ کف و ضخامت آبخوان از اطلاعات زمین‌شناسی استفاده شد.	سازمان زمین‌شناسی کشور
سطح آب زیرزمینی	اطلاعات سطح آب ۱۵ چاه مشاهداتی به‌منظور کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت.	آب منطقه‌ای استان همدان



نمودار ۱- میانگین بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره ۱۳۹۴ - ۱۳۷۰



شکل ۲- نیمرخ محدوده آبخوان آبرفتی دشت همدان - بهار (۲۶)



شکل ۳- مراحل انجام مطالعه

تراز ثابت، در نظر گرفته شد. مدل با در نظر گرفتن اطلاعات توپوگرافی منطقه و تراز اولیه آب‌های زیرزمینی اجرا گردید (۲۸). در نهایت از بسته LPF در کد عددی MODFLOW، برای حل جریان آب زیرزمینی و تخمین سطح آب، استفاده شد. این بسته، هر ساختار هیدرولوژیکی را جداگانه شبیه‌سازی و جریان در هر سلول را محاسبه و در سطح آبخوان تعیین می‌نماید (۲۹). مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی افقی برای شن و ماسه، و برای سیلت و رس 3 m/day در نظر گرفته شد (۳۰). به منظور تهیه مدل سه بعدی هیدروژئولوژیکی، شبکه سه بعدی اولیه در جهت X و Y و Z تهیه گردید. شبکه ساخته شده شامل 150 سلول در جهت افقی X و 150 سلول در جهت افقی Y و پنج لایه در جهت عمودی Z است. شکل ۴، مراحل ساخت مدل سه بعدی را از مدل زمین شناسی تا تصحیح لایه سطحی با اطلاعات ارتفاعی نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی حرکت آب زیرزمینی توسط کد عددی MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS، صورت گرفت. این کد عددی، مدل تفاضل محدود است که توانایی شبیه‌سازی سه بعدی جریان در حالت پایدار را دارد (۱۸). در این پژوهش از نرم‌افزار GMS ۷.۱ با قابلیت گرافیکی بالا، به منظور شبیه‌سازی سه بعدی جریان در حالت پایدار، استفاده شد. در این نرم‌افزار کاربر می‌تواند با ساخت مدل مفهومی، شبکه‌بندی و حل معادله جریان، نتایج را مشاهده کند (۳۱). نتایج مدل واسنجی شده به‌عنوان داده اولیه وارد کد عددی MODPATH گردید. این کد توسط Pollock در سال ۱۹۹۴ (۳۲) ارائه شده که قادر به نمایش حرکت رو به جلو و رو به عقب (منشا آلودگی) ذرات است. در این مطالعه مسیرهای جریان آب زیرزمینی محاسبه و نهایتاً مناطق تسخیر چاه‌های مورد مطالعه (حرکت رو به عقب) و جهت حرکت آلاینده (حرکت رو به جلو) با زمان حرکت‌های مختلف ترسیم گردید. روش ردیابی ذرات شکلی از مدل‌سازی حرکت آلاینده است که در آن حرکت جرمی آب زیرزمینی بررسی می‌شود. برای این منظور، برنامه مذکور یک ذره فرضی مانند یک مولکول آب را در نظر می‌گیرد که از یک نقطه مشخص، مطابق با سرعت محاسبه شده جریان

پس از جمع‌آوری اطلاعات، صحت همگنی داده‌ها با آزمون ران تست (Run-Test) و کنترل نرمال بودن آنها با آزمون کولموگروف اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) انجام شد. در گام بعد اقدام به تهیه مدل آبخوان گردید. شکل ۳ مراحل انجام مطالعه را نشان می‌دهد.

پس از تعیین محدوده مطالعاتی، از مدل مفهومی به‌منظور تعیین سرچشمه‌های رودخانه سیمینه‌رود و میزان تغذیه آن استفاده گردید. استفاده از مدل مفهومی جهت تعریف شرایط هیدرولیکی، تغذیه، خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه مانند محل چاه‌ها و رودخانه‌ها است. در مدل مفهومی، جهت ورود اطلاعات به مدل هیدروژئولوژیکی از دو پوشش مجزا شامل پوشش تغذیه (میزان آب ورودی به آبخوان) و اطلاعات سطح آب ۱۵ چاه مشاهداتی استفاده گردید. برای محاسبه تغذیه از روش بیلان آب استفاده شد. برای این منظور، مقدار تغذیه از طریق محاسبه رواناب حاصل از بارش و تفاضل آن از مقدار بارش محاسبه گردید (۷). برای محاسبه رواناب از روش شماره منحنی (CN) استفاده گردید. با فرض اینکه تمام بارش در سطح یک حوضه تبدیل به رواناب می‌گردد، مقدار رواناب طبق معادلات ۱ و ۲ محاسبه شد (۲۷):

$$Q = \frac{P^2}{S + P} \quad (1)$$

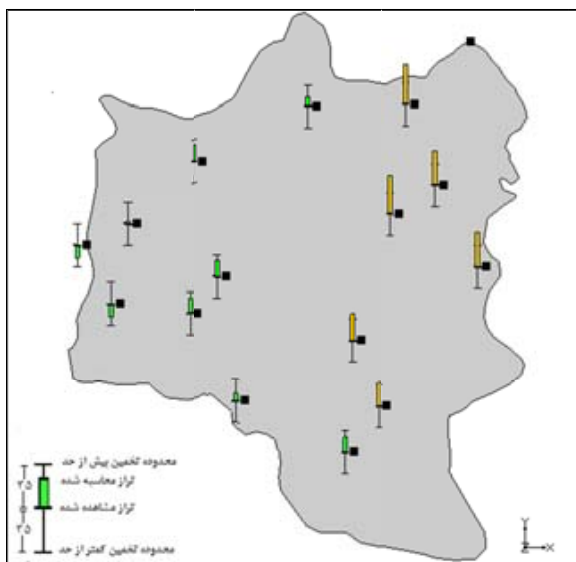
$$S = \frac{25400}{CN} - 2 \quad (2)$$

که در آن: Q مقدار رواناب سالانه بر حسب P, mm بارش سالانه بر حسب S, mm ضریب نگهداشت خاک است. مقدار CN از نقشه‌های کاربری اراضی منطقه و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در دامنه ۶۹ تا ۸۱ به‌دست آمد.

خصوصیات هیدرولوژیکی مدل باید با شرایط مرزی نمایش داده شوند. بدین منظور، خطوط مرزی دشت، به‌صورت مرزهای بدون جریان و محل ورود رودخانه به مدل به‌صورت مرز با

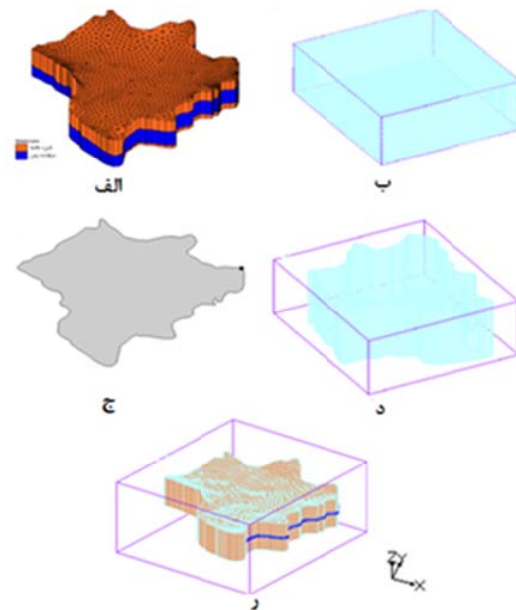
یافته‌ها

براساس داده‌های موجود، متوسط بارش رسیده به آبخوان طی دوره ۲۴ ساله، $0/95 \text{ mm/day}$ به‌دست آمد. با اعمال معادله ۱، مقدار رواناب نیز $0/460 \text{ mm/day} - 0/498$ محاسبه گردید. بنابراین مقدار تغذیه با کسر بارش از رواناب، $0/487 \text{ mm/day} - 0/449$ معادل $177/75 \text{ mm/year}$ - $163/88$ برآورد شد که به‌عنوان ورودی تغذیه در شبیه‌سازی استفاده گردید. همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، به‌منظور کالیبره کردن مدل از اطلاعات چاه‌های مشاهداتی در سال ۱۳۸۹ استفاده شد. بعد از اتمام فرایند کالیبراسیون مقدار تغذیه $0/6 \text{ mm/day}$ و مقدار هدایت هیدرولیکی شن و ماسه، سیلت و رس به ترتیب 35 m/day و 7 به‌دست آمد. شکل ۵ مقایسه سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در پی‌زومترها در پایان فرایند واسنجی در شرایط پایدار را نشان می‌دهد. پس از اجرای مدل، در صورتی که تمام اطلاعات صحیح وارد شده باشد، سطح آب شبیه‌سازی شده در محدوده خطای کم ($\pm 35 \text{ m}$) خواهد بود که به رنگ سبز قابل نمایش است. اگر میزان اختلاف سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده



شکل ۵- مقایسه بین سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده

آب زیرزمینی و در یک دوره زمانی معین شروع به حرکت می‌کند (۳۳). از طریق انتخاب و تعیین تعدادی از ذرات آب در اطراف یک چاه و ردیابی معکوس، مرز خارجی منطقه تسخیر (حریم حفاظتی) مشخص می‌گردد. در نهایت، برای کالیبره کردن مدل، از روش سعی و خطا به‌عنوان روشی متداول جهت متعادل ساختن پارامترهای مدل از یک شبیه‌سازی به شبیه‌سازی دیگر استفاده شد. عمل کالیبراسیون برای سال ۱۳۸۹ در حالت پایدار و با تغییر در مقادیر تغذیه آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی افقی تا رسیدن به بهترین انطباق برای مدل ادامه یافت. بدین منظور از اطلاعات سطح آب چاه‌های منطقه در سال ۱۳۸۹ به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. دقت کالیبراسیون با پارامترهای آماری ریشه میانگین مربع خطای نرمال (NRMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطا (ME) و ضریب همبستگی (r) بررسی شد.



شکل ۴- مراحل ساخت مدل سه بعدی هیدروژئولوژیکی (الف: مدل سه بعدی زمین‌شناسی، ب: شبکه سه بعدی اولیه، ج: مرز منطقه مورد مطالعه، د: محدود شدن شبکه سه بعدی به مرز منطقه، ر: وارد شدن نقشه زمین‌شناسی سه بعدی به شبکه سه بعدی و تصحیح لایه سطحی با اطلاعات ارتفاعی)

بین $35 \pm$ تا $70 \pm$ m باشد در محدوده خطای متوسط با رنگ زرد است. رنگ قرمز نیز بیان‌گر خطای بیش از $70 \pm$ m است. براساس نتایج شکل ۵، اختلاف سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در ۶۰ درصد از چاه‌ها در دامنه خطای کم و در ۴۰ درصد چاه‌ها در محدوده خطای متوسط قرار دارند. در مجموع می‌توان اظهار داشت، کالیبراسیون مدل در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه در محدوده قابل قبول است. مقادیر آماره‌های خطاسنجی ME ، MAE ، $NRMSE$ و ضریب همبستگی (R) در مرحله کالیبراسیون به ترتیب $2/2$ درصد، $33/30$ m، $27/78$ m و $0/904$ به دست آمد.

مقدار جریان ورودی و خروجی به آبخوان در سال ۱۳۸۹، در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر مثبت و منفی به ترتیب بیان‌گر میزان آب ورودی و خروجی از آبخوان است.

حالت پایدار بیان‌گر آن است که جریان ورودی با جریان خروجی آبخوان در یک سطح باشد. بنابراین، همان‌گونه که از جدول ۲ مشاهده می‌گردد، درصد تفاضل جریان ورودی و خروجی آبخوان ناچیز و نزدیک به صفر ($-1/06$ درصد) است که با فرض حالت پایدار مطابقت دارد. شکل ۶، شبیه‌سازی مسیر جریان آب زیرزمینی توسط ردیابی ذرات در محدوده آبخوان با زمان انتقال ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، جهت حرکت جریان نیز همسو با گرادیان آب‌های زیرزمینی به سمت شمال شرقی در حرکت است. دلیل این امر تفاوت ارتفاعی در مرزها و مرکز است که باعث ایجاد گرادیان و هدایت ذرات به مرکز دشت می‌شود. از طرفی، شکل ۶ بیان‌گر آن است که با گذشت زمان، حرکت آلاینده افزایش یافته و سطح بیشتری از دشت را تحت تاثیر قرار خواهد داد. براساس نتایج شکل ۶، طولانی‌ترین مسیر طی شده در زمان انتقال ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب $6009/81$ ، $14747/6$ و 43400 m خواهد بود.

به‌منظور تشخیص مبدا جریان از تکنیک شبیه‌سازی روبه عقب حرکت ذرات استفاده شد. بدین منظور ۹ چاه انتخابی در محدوده آبخوان قرار گرفت و برای بازه زمانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله شبیه‌سازی شد. به دلیل عدم تاثیر تغییرات ماهانه

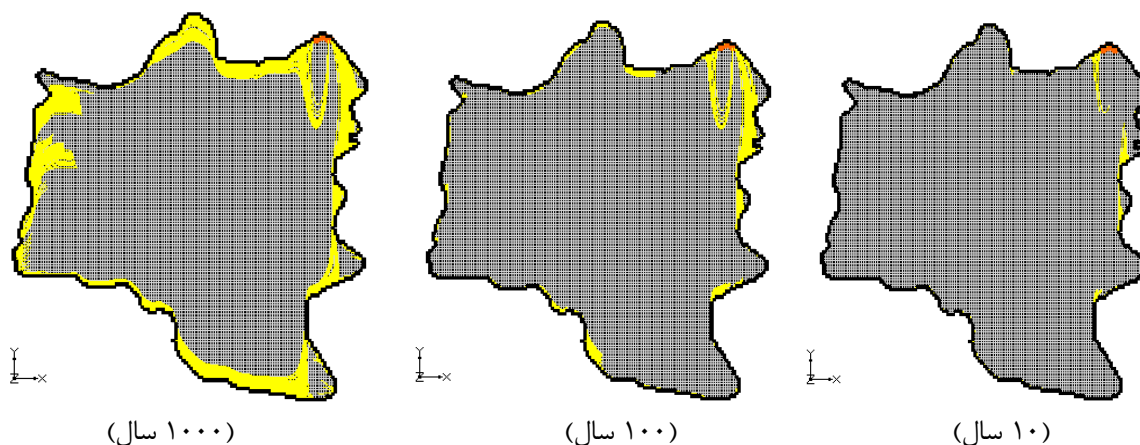
سطح و گرادیان آب بر روی حرکت افقی ذرات که طی ده‌ها سال انجام می‌شود، این شبیه‌سازی نیز برای حالت پایدار و برای سال ۱۳۸۹ انجام گرفت. مشابه حرکت رو به جلو ذرات، در حرکت رو به عقب نیز با گذشت زمان مسافت بیشتری از دشت متاثر از آلودگی خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی رو به عقب ذرات نشان می‌دهد که طولانی‌ترین مسیر حرکت ذرات آلاینده از مرکز هر چاه به سمت مبدا جریان است که طی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سال آینده به ترتیب $1267/83$ ، $2099/93$ و $8270/m674$ خواهد بود (شکل ۷).

بحث

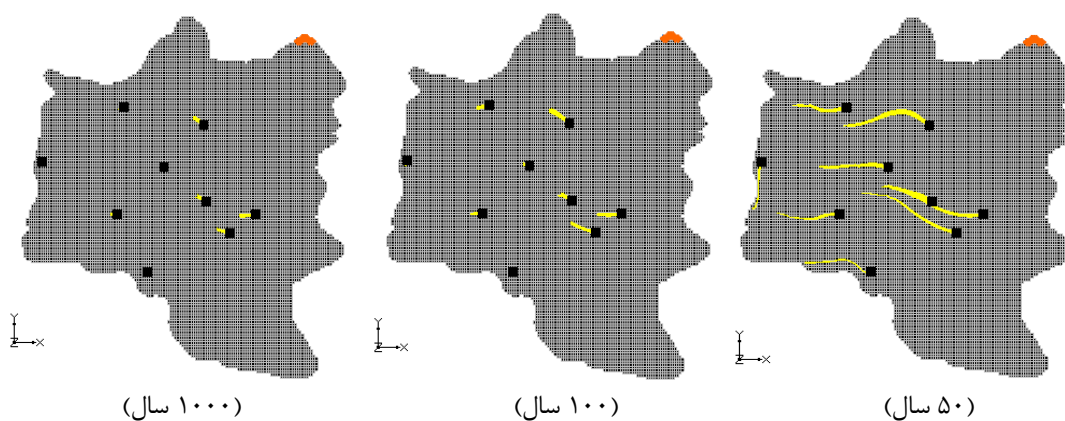
مقدار تغذیه حاصل از کالیبراسیون در راستای مطالعه Yaouti و همکاران (۱۸) در آبخوان بو - آرگ مراکش با بافت مشابه است. آنان مقدار تغذیه آبخوان در شبیه‌سازی جریان را $0/5$ mm/day گزارش نمودند. Herzog (۲۰) نیز مقدار هدایت هیدرولیکی منطقه شهری کامپالا در اگاندا با بافت رس را پس از کالیبراسیون مدل، بین 5 تا 10 m/day گزارش کرد که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. آماره‌های خطاسنجی مرحله کالیبراسیون در مطالعه حاضر بیان‌گر عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی آبخوان دشت همدان - بهار است. Ziaei و همکاران (۶) درصد خطای نرم‌افزار GMS در شبیه‌سازی حوضه آبریز بجنورد را ۱۴ درصد گزارش نمودند. Jabbari و همکاران (۱۶) با $3/5$ درصد خطا، مقادیر سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت ساری را با کد عددی MODFLOW شبیه‌سازی نمودند. با توجه به سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در شکل ۵، مدل تمایل به تخمین بیشتر از حد سطح آب دارد. این نتیجه در راستای مطالعه Banejad و همکاران (۸) مبنی بر بیش برآورد سطح آب در نرم‌افزار GMS دارد. درصد تفاضل جریان ورودی و خروجی آبخوان ناچیز و نزدیک به صفر بود. این نتیجه در راستای گزارش Yang و همکاران (۲۹) و Banejad و همکاران (۸) مبنی بر اختلاف ناچیز مقادیر ورودی و خروجی آبخوان در حالت پایدار دارد. Yaouti و همکاران (۱۸) نیز با اجرای نرم‌افزار GMS در

جدول ۲- مقادیر آب ورودی و خروجی به آبخوان در سال ۱۳۸۹ (m^3/day)

ورودی	خروجی
تراز ثابت	تراز ثابت
۵۸۷۷۳۱/۴۰۸	۸۹۴۸۰۳/۲۳۹-
تغذیه	تغذیه
۲۹۷۶۲۷/۷۱۵	۰
کل ورودی	کل خروجی
۸۸۵۳۵۹/۱۲۴	۸۹۴۸۰۳/۲۳۹-



شکل ۶- شبیه‌سازی مسیر جریان ذرات انتخابی قرار گرفته در اطراف دشت به صورت حرکت روبه جلو برای شرایط پایدار



شکل ۷- شبیه‌سازی مسیر جریان ذرات قرار گرفته در مرکز ۹ چاه انتخابی به صورت حرکت روبه عقب برای شرایط پایدار

از دلایل آلودگی آبخوان می‌توان به مصرف بالای کودهای شیمیایی و حیوانی در محدوده آبخوان به دلیل کشت محصولات سیب‌زمینی، یونجه، گندم و جو اشاره نمود. از

حالت پایدار، درصد تفاضل ورودی و خروجی آبخوان بو - آرگ در مراکش را پس از کالیبره نمودن مدل، ۴/۶۵ درصد گزارش نمودند که همسو با نتایج این مطالعه است.

به سمت غرب آبخوان است. از آنجا که کشتارگاه صنعتی همدان و بندسوم بهار که به ترتیب نقش مهمی در تخریب و بهبود کیفیت آب زیرزمینی دشت مذکور دارند (۳۵)، به ترتیب در غرب و شمال غرب محدوده مطالعاتی قرار دارند، این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین با اتخاذ سیاست‌های مدیریت مناسب می‌توان از پیشروی آلودگی در سطح آبخوان جلوگیری به عمل آورد. Gorgani و همکاران (۱) نیز بهترین روش کنترل آلودگی آبخوان را شناسایی منابع آلاینده و مناطق آسیب‌پذیر دانستند.

لازم به ذکر است در این مطالعه جریان آب زیرزمینی صرفاً بر مبنای مدل عددی انجام شده است. حال اینکه به‌منظور بررسی انطباق نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی، در صورت تزریق مواد شیمیایی با نیمه عمر پایین در محل چاه‌ها و پایش مقدار آنها در چاه‌های بعدی، امکان مقایسه نتایج واقعی با نتایج مدل فراهم می‌شود. لیکن به دلیل وجود محدودیت‌ها، امکان بررسی در شرایط واقعی میسر نیست. ضمن آنکه با افزایش تعداد چاه‌های مورد بررسی، دقت شبیه‌سازی افزایش خواهد یافت که این امر مستلزم مساعدت همه جانبه سازمان‌های مربوطه است.

نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم‌افزار GMS مدل شبیه‌سازی شده آبخوان دشت همدان - بهار در حالت پایدار تهیه شد. نتایج شبیه‌سازی جریان آبخوان نشان داد که اختلاف بین سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای اغلب نقاط در بازه قابل قبول بود. نتایج شبیه‌سازی مسیر جریان آب زیرزمینی گویای این واقعیت بود که انتقال جریان از مرز آبخوان به سمت مرکز و خروجی آبخوان است. حرکت منشأ آلودگی برای چند چاه مدنظر مشخص‌کننده زمان و نحوه انتقال جریان به سطح چاه‌های مطالعاتی بود. همچنین بررسی وضعیت آبخوان نشان داد ادامه روند فعلی، افزایش سطح آلودگی آبخوان را در پی خواهد داشت که خسارت‌های جبران ناپذیری را به سفره آب زیرزمینی وارد خواهد نمود.

طرفی عبور فاضلاب شهری، تجمع مراکز صنعتی و مراکز دامپروری، تشدیدکننده آلودگی هستند (۳۴). Bahmani و همکاران (۳۵) مهمترین عوامل موثر بر آلودگی حاشیه جنوبی آبخوان همدان - بهار را کشاورزی سنگین و استفاده بی‌رویه از کودهای مرغی و شیمیایی، فاضلاب شهرهای همدان و بهار، کشتارگاه صنعتی و واحدهای صنعتی واقع در حاشیه جنوبی آبخوان دانستند. پیش‌بینی مسیر حرکت جریان آب زیرزمینی بیان‌گر آن است که با استمرار شرایط موجود، وضعیت آبخوان از نظر آلودگی در وضعیت بحرانی خواهد بود. همان‌گونه که Nassery و همکار (۳۶) اظهار داشتند میزان آلودگی دشت همدان - بهار، بیشتر مربوط به استفاده از کودهای شیمیایی و همچنین ضخامت کم آبرفت و وجود رسوبات ریزدانه (سیلت و رس) است. بنابراین مدیریت آبخوان می‌بایست براساس مصرف کشاورزی استوار گردد. این نتیجه در مطالعه Bahmani و همکاران (۳۵) نیز گزارش شده است. اگرچه Mohebbi و همکاران (۳۷) میانگین کیفیت آب زیرزمینی استان همدان را در وضعیت خوب گزارش نمودند، لیکن ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که عدم توجه و سوء مدیریت منابع آب فعلی، می‌تواند خسارات جبران ناپذیری به منابع آب زیرزمینی طی سال‌های آینده وارد نماید. در مجموع با اطلاع از مسیر حرکت آلودگی و شناسایی مکان‌های آلوده می‌توان با اقدامات مدیریتی از انتقال آن به نقاط دیگر دشت جلوگیری نمود. به دلیل تاثیر آلودگی کود شیمیایی و کودهای حیوانی بر روی کیفیت آب زیرزمینی و سطحی، کاهش میزان کود مصرفی توسط کشاورزان در واحد سطح در کاهش میزان این آلودگی‌ها می‌تواند موثر باشد. Nozari و همکار (۳۸) اصلاح الگوی کشت منطقه را راهکاری مناسب برای کاهش برداشت آب زیرزمینی و آلودگی آن دانستند. به اعتقاد Barikani و همکاران (۳۹) و با توجه به محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی، لازم است تا تغییری در الگوی کشت منطقه صورت پذیرد. مسیر جریان آب زیرزمینی اکثر چاه‌های انتخابی، از مرکز

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه با عنوان "شبیه‌سازی انتقال آلودگی در آبخوان دشت همدان - بهار با استفاده از نرم افزار GMS ۷.۱" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۶ است که با حمایت دانشگاه ملایر اجرا شده است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

References

1. Gorgani S, Bafkar A, Fatemi S. Prediction of groundwater pollution potential using the DRASTIC index and annual time series analysis (case study: Plain Mahidasht, Kermanshah). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2017;10(3):317-28 (in Persian).
2. Regli C, Rauber M, Huggenberger P. Analysis of aquifer heterogeneity within a well capture zone, comparison of model data with field experiments: A case study from the river Wiese, Switzerland. *Aquatic Sciences*. 2003;65(2):111-28.
3. Tandiseh Z, Hafezi Moghaddas N, Karami G, Jafari H. Prediction of wastewater plan effect of groundwater table (Case study: Mashhad Aquifer). 9th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment; 2013; Mashhad, Ferdosi University (in Persian).
4. Dutton AR, Harden B, Nicot J-P, O'Rourke D, Harden B, O'Rourke D, et al. Groundwater availability model for the central part of the Carrizo-Wilcox aquifer in Texas. Austin, Texas: Texas Water Development Board, TWDB; 2003.
5. Harbaugh AW. MODFLOW-2005, the US geological survey modular ground-water model: The ground-water flow process. USA: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston; 2005.
6. Ziaei AN, Mohammadi A, JM. The study of the impact of water conveyed from Maneh Basin on Bojnourd Aquifer by using GMS model. *International Bulletin of Water Resources & Development*. 2016;1(13):205-17.
7. Ghobadian R, Fatahi A, Zare M. Studying the effects of Gavoshan Dam's irrigation and drainage network on groundwater of miandarband plain using GMS 6.5 Model. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*. 2014;2(4):759-72 (in Persian).
8. Banejad H, Mohebzadeh H, Ghobadi AG, Heydari M. Numerical simulation of the flow and contaminant transport in groundwater, case study: Nahavand plain aquifer. *Journal of Water and Soil Science*. 2012;23(2):43-57 (in Persian).
9. Eftekhar M, Rakhshandeh G, Mirarabi A. Modeling and sensitive analysis on groundwater of Tabriz plain using GMS. 32th National and 1st International Geosciences Congress; 2013; Tehran (in Persian).
10. Mazadeh Y. Quantity model of groundwater using GMS (Case study, Ghoochan Plain) [dissertation]. Mashhad: Ferdousi University; 2013 (in Persian).
11. Mohtasham M, Deghani A, Akbarpoor A, Meftah M, Etebari B. Prediction of groundwater in aquifer by GMS. 4th Congress of Water Resources Management; 2011; Tehran (in Persian).
12. Mahdavi G. Study of Optimized exploration of Bezman plain aquifer using MODFLOW [dissertation]. Zahedan: Sistan and Balouchestan University; 2011 (in Persian).
13. Akbarpour A, Azizi M, Shirazi M. Exploration management of groundwater of Mokhtaran plain using GMS. 9th Iranian Hydraulic Congress; 2010 Tehran (in Persian).
14. Yari A, Shaeri S, Dadmehr R. Reaction of groundwater resource system model of Zarrineh roud plain to charge and discharge factors. 4th Congress of Water Resources Management; 2011; Tehran (in Persian).
15. Maroufi S, Toranjeyan A, Zare AH. Evaluation of geostatistical methods for estimating electrical conductivity and pH of stream drained water in Hamedan-Bahar Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2009;16(2):169-86 (in Persian).
16. Jabbari P, Ghanbarpour M R, Ashbeh A. Parameter optimization of Sari Neka unconfined aquifer using mathematical model. 5th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering of

- Iran; 2009; Gorgan, Gorgan Unaversity (in Persian).
17. Qiu S, Liang X, Xiao C, Huang H, Fang Z, Lv F. Numerical simulation of groundwater flow in a river valley basin in Jilin urban area, China. *Water*. 2015;7(10):5768-87.
 18. El Yaouti F, El Mandour A, Khattach D, Kaufmann O. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*. 2008;2(3):192-209.
 19. Wang S, Shao J, Song X, Zhang Y, Huo Z, Zhou X. Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China. *Environmental Geology*. 2008;55(7):1449-62.
 20. Herzog A. Transient groundwater modelling in peri-urban Kampala, Uganda: Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, Kungliga Tekniska högskolan; 2007.
 21. Ben-Itzhak LL, Gvirtzman H. Groundwater flow along and across structural folding: an example from the Judean Desert, Israel. *Journal of Hydrology*. 2005;312(1-4):51-69.
 22. Kim J, Sultan M. Assessment of the long-term hydrologic impacts of Lake Nasser and related irrigation projects in Southwestern Egypt. *Journal of Hydrology*. 2002;262(1-4):68-83.
 23. Pourhaghi A, Radmanesh F, Maleki A. Simulation of Delfan-Lorestan aquifer and investigation of management scenarios by using MODFLOW model. *Journal of Water and Soil*. 2016;29(4):886-97 (in Persian).
 24. Saeedi H, Akbarpour A, Baghvand A, Niksokhan MH, Sadeghi Tabas S. Presetting a simulation-optimization quantitative and qualitative model operation of aquifer in order to adjust pollutant concentrations using Cuckoo algorithm. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2017;23(5):87-103 (in Persian).
 25. Gilan Regional Water Authority. Gilan: Gilan Regional Water Authority; 2016 [cited 2016 Jul 9]. Available from: <http://www.glrw.ir/>.
 26. Salami H, Nassery H, Massah BA. Probabilistic forecast of climate change effects on Hamadan-Bahar aquifer. *Journal of Water and Irrigation Management*. 2015;5(1):27-41 (in Persian).
 27. Patil J, Sarangi A, Singh A, Ahmad T. Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interface. *Biosystems Engineering*. 2008;100(1):137-46.
 28. Hubbert MK. The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology*. 1940;48(8, Part 1):785-944.
 29. Yang F-R, Lee C-H, Kung W-J, Yeh H-F. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. *Engineering Geology*. 2009;103(1-2):39-58.
 30. Mahmoudian M. *Groundwater Hydraulic*. 6th ed. Ahvaz: Shahid Chamran University; 2015 (in Persian).
 31. Froukh LJ. Groundwater modelling in aquifers with highly karstic and heterogeneous characteristics (KHC) in Palestine. *Water Resources Management*. 2002;16(5):369-79.
 32. Pollock DW. *User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A Particle Tracking Post-processing Package for MODFLOW*. USA: Geological Survey Finite-difference Ground-water Flow Model; 1994.
 33. Delkhahi B, Asadian F, Khodaei K. A comparison of calculated fixed radius and numerical model methods to delineate drinking water wellheads protection area in Yaft Abad district, Tehran. *Iranian Journal of Geology*. 2013;7(6):33-43 (in Persian).
 34. Ghasemi A, Zareabyaneh H, Shahsavari A, Yaghoobi B. Evaluation of quality and quantity changes of groundwater of Hamedan-Bahar plain. *Plant and Ecosystem*. 2010; 6(23):109-27.
 35. Bahmani B, Alemohammad S, Bahmani O. Evaluation of vulnerability of the nitrate pollution in aquifer of Hamedan-Bahar. *Quarterly Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*. 2015;3(22):387-96 (in Persian).
 36. Naseri Hr, Nadafian H. Transport modeling of ground water nitrate contaminant in Hamedan drinking water wells. *Iranian Journal of Geology*. 2008;2(6):87-98 (in Persian).
 37. Mohebbi M-R, Montazeri A, Abtahi M, Oktahi S, Gholamnia R, Aliasgari F, et al. Development of a modified drinking water quality index (MDWQI) and its application for assessing water quality in

- groundwater resources of Iran. Iranian Journal of Health and Environment. 2013;6(2):187-200 (in Persian).
38. Nozari H, Zali A. Investigating Groundwater Extraction from the Hamedan-Bahar Plain,s Aquifer. Journal of Water and Soil Science. 2013;23(4):277-90 (in Persian).
39. Barikani E, Ahmadian M, Khalilian S. Optimal Sustainable Use of groundwater in Agricultural sector: Case Study Subsector in Qazvin Basin. Journal of Economics and Agricultural Development. 2011;25(2):253-62 (in Persian).



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Numerical simulation of groundwater flow path in Hamedan-Bahar aquifer

M Bayatvarkeshi^{1,*}, R Fasihi¹, H Zareabyaneh²

1- Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Malayer University, Malayer, Iran

2- Department of Water Engineering, Agriculture Faculty, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 20 January 2018

Revised: 15 April 2018

Accepted: 18 April 2018

Published: 20 June 2018

Keywords: Aquifer pollution, Hydraulic gradient, Groundwater flow

***Corresponding Author:**

m.bayat.v@malayeru.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Groundwater resources are very important for the survival of living beings. Hence, groundwater modeling has a special importance in water management and planning of each region. In this study, numerical simulation of Hamedan-Bahar aquifer flow path was done by GMS software using geological, hydraulic and hydrologic information.

Materials and Methods: First, a 3D hydrogeological model of the aquifer was prepared and then the aquifer flow was simulated by MODFLOW numerical code. The model was calibrated using a trial and error method. Estimation of groundwater flow path was done with MODPATH numeric code. Finally, the capture area was studied and piezometers and direction of groundwater movement in different time were built.

Results: The results of calibration showed that the difference between observed head and computed head was in allowable range (± 35 m). Estimation of pollution with MODPATH numeric code indicated that in forward moving, the longest way of pollution transport was 43400 m and in backward moving, the longest way of flow transport was 8270.65 m. The results of the groundwater flow path indicated that the flow transport direction was from southwest to northeast in line with the hydraulic gradient.

Conclusion: It can be concluded that the current trend of groundwater flow will increase aquifer pollution level, which will damage groundwater aquifer.