



مقاله پژوهشی:

شبیه‌سازی غلظت کلسیم در منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند)

حمید کاردان مقدم^{۱*}، مینا نصیری^۲

۱- دکتری منابع آب دانشگاه تهران- کارشناس پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

۲- دانش آموخته مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

* نویسنده مسئول: hkardan@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

چکیده

آب به عنوان یک منبع طبیعی اصلی، نیاز اساسی بشر و یک دارایی ارزشمند است که در غیاب آن هیچ فعالیتی جهت توسعه اقتصادی- اجتماعی پایدار نخواهد بود. در مناطق خشک، منابع آب زیرزمینی با توجه به عدم وجود منابع آب سطحی از اهمیت و اولویت بیشتری برخوردار است. علاوه بر اهمیت کمیت آب زیرزمینی، کیفیت آن بسیار مهم بوده و تابع مستقیمی از فعالیت‌های انسانی است. آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط انواع مختلف مواد آلی و ترکیبات معدنی یکی از شایع‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در عصر حاضر است. این آلاینده‌ها همراه با آب زیرزمینی حرکت کرده و در نتیجه منجر به آلودگی منابع آب زیرزمینی خواهند شد. بنابراین آلودگی آب زیرزمینی یک تهدید شایع به دلیل نابودی کیفیت آب زیرزمینی و سمی کردن آب مورد استفاده بشر است. در مطالعه حاضر به منظور شبیه‌سازی کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان بیرجند، مدل عددی MT3D به کار گرفته شدند. واسنجی مدل برای غلظت کلسیم در ۵ سال از مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۹۱ صورت پذیرفته است. در مرحله واسنجی مقادیر خطای ME، MAE و RMSE به ترتیب برابر ۲/۱۴۷-، ۶/۵۵۶ و ۹/۳۰۴ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد. مدل واسنجی‌شده با استفاده از اطلاعات در دسترس برای ۵ سال آینده صحت‌سنجی گردیده است. نتایج مدل کیفی حاکی از تطابق مناسب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی غلظت کلسیم بود.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان بیرجند، مدل کیفی، MT3D.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به دلیل استعداد آلودگی کمتر و همچنین ظرفیت ذخیره زیاد نسبت به آب‌های سطحی به‌عنوان یک منبع مهم در تأمین آب کشاورزی، شرب و مصارف صنعتی منابع آب به شمار می‌روند (Samani et al., 2021). مکانیسم‌ها و شرایط مختلف موثر بر سفره‌های آب زیرزمینی، تغییراتی در حجم و کیفیت و سطح آب ذخایر مذکور به‌وجود می‌آورد که جهت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح و توسعه کامل، می‌بایست تحت کنترل دقیق و پیش‌بینی‌های به‌موقع قرار گیرد (Moghaddam et al., 2021). مدل وسیله‌ای است که می‌تواند این‌گونه تغییرات را مورد بررسی قرار بدهد و وضعیت آینده سفره را پیش‌بینی نماید.

مدل ابزاری مهم برای ساده‌سازی سیستم طبیعی است که به‌صورت حل مجموعه‌ای از معادلات جبری (مدل استاتیک) یا یکپارچه‌سازی معادلات دیفرانسیل بر یک دامنه مکانی-زمانی (مدل دینامیک) می‌باشد. متغیر ورودی، هر مؤلفه که قبل از اجرای مدل قابل تغییر باشد و خروجی، متغیری است که بعد از اجرای مدل به دست می‌آید (Hamraz et al., 2017). یک مدل، خواص مکانی و زمانی یک سیستم یا بخش‌هایی از آن را به‌صورت فیزیکی یا ریاضی شبیه‌سازی می‌کند (Pianosi et al., 2016). مدل‌های آب زیرزمینی را می‌توان به‌طور کلی به دو گروه مدل‌های جریان آب زیرزمینی (مدل کمی) و مدل‌های انتقال آب زیرزمینی (مدل کیفی) تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های جریان آب زیرزمینی، توزیع بار هیدرولیکی در سیستم را مشخص نموده و مدل‌های انتقال، غلظت ماده محلول را که تحت تأثیر فرارفت، پخشیدگی و واکنش‌های شیمیایی می‌باشد، تعیین می‌نمایند. تغییر در کیفیت آب‌های زیرزمینی که معمولاً بر اثر مدیریت غلط بهره‌برداری از آب زیرزمینی رخ می‌دهد، مقدمه‌ای بر تخریب سایر منابع چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیرمستقیم است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که وابستگی به این منابع بیشتر است، اثر تخریبی به علت ضعف طبیعی در منابع آب و خاک شدت بیشتری خواهد داشت (Zehtabian et al., 2010; Sheikh Goodarzi et al., 2012). از این رو مدل‌سازی انتقال و سرانجام آلودگی هایمختل در آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در اثر همین افزایش

توجه، مدل‌های عددی مختلفی برای تحلیل چگونگی حرکت آلودگی در آب‌های زیرزمینی توسعه یافته است (Banejad et al., 2013).

در مطالعه احتشامی و شریفی (۲۰۰۶) نیترات به عنوان بهترین شاخص برای نشان دادن آلودگی آب زیرزمینی در آبخوان شهر ری با دو نرم افزار PMWIN و MT3D مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل نشان‌دهنده آن است که به علت فقدان شبکه جمع‌آوری فاضلاب در مرکز شهر ری میزان نیترات زیاد خواهد بود و در مناطق غرب و جنوب غربی شهر به علت تأثیر شبکه فاضلاب به کمتر از ۳۰ میلی گرم در روز کاهش پیدا خواهد کرد (Ehteshami and Sharifi, 2006). رجانی و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه خود با به‌کارگیری یک مدل جریان و انتقال دوبعدی Visual MODFLOW به بررسی پاسخ آبخوان babasore در هند تحت پنج استراتژی مختلف پمپاژ پرداختند. بر اساس نتایج مدل‌سازی، استراتژی‌های مدیریت برای پایداری درازمدت منابع آب زیرزمینی حیاتی در حوضه آبخیز babasore پیشنهاد شده است. رضایت‌بخش‌ترین راهبرد مدیریت برای حوضه babasore می‌تواند کاهش پمپاژ به میزان ۵۰٪ در منطقه پایین دست و افزایش پمپاژ به میزان ۱۵۰٪ در نقاط بالقوه باشد (Rejani et al., 2008). چیتراکار و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل جریان آب زیرزمینی و مدل انتقال شوری به بررسی الگوی نفوذ آب دریا در دشت ساحلی AlBatinah در عمان پرداختند. مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی دو سناریو برای کاهش نفوذ آب شور استفاده شد: (۱) کاهش میزان پمپاژ؛ و (۲) تغذیه مصنوعی با پمپاژ ثابت. پیش‌بینی‌های مدل نشان می‌دهد که بهینه‌سازی نرخ پمپاژ و تغذیه مصنوعی باعث کاهش نفوذ آب دریا در دشت ساحلی AlBatinah می‌شود (Chitrakaret al., 2015). صابری مهر و همکاران (۲۰۱۷) برای مدیریت بهتر و یکپارچه آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی دشت شبستر از مدل GMS در تهیه مدل کمی و کیفی منطقه برای بیلان آبی سال ۹۲-۱۳۹۱ استفاده کردند. طبق محاسبات مدل، در دو قسمت مرکزی و شمال غربی دشت بیشترین افت سطح آب زیرزمینی مشاهده شده است. با افزایش نرخ برداشت آب زیرزمینی در اثر تشکیل افت آب زیرزمینی در این مناطق،

با ضخامت حدود ۱۵۰ متر که توسط رودخانه شاهرود و سر شاخه‌های آن حمل شده، پوشیده شده است. در این قسمت ضخامت لایه اشباع زیاد بوده و مناسب‌ترین قسمت آبخوان دشت را تشکیل می‌دهد. ضخامت آبرفت به سمت شمال کاهش یافته و به کمتر از ۵۰ متر رسیده و فاقد لایه اشباع است. در زیر حوضه مرک ضخامت آبرفت به بیش از ۲۵۰ متر می‌رسد. سطح ایستابی در گستره آبخوان بین حداکثر ۱۰۰ متر در نواحی شمالی تا حداقل ۱۳ متر در جنوب تغییر می‌کند. میانگین سطح ایستابی حدود ۴۸ متر برآورد می‌گردد. ضریب ذخیره متوسط آبخوان حدود ۵ درصد برآورد شده است. بالاترین رقوم سطح ایستابی در آبخوان حدود ۱۳۵۰ متر در شمال و پایین‌ترین رقوم حدود ۱۱۵۰ متر در جنوب می‌باشد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی به جز منحنی‌های بسته موضعی، از شمال به طرف جنوب است (Moghaddam et al., 2019). میانگین ضخامت اشباع آبخوان حدود ۲۵ متر برآورد شده است. در شکل (۱) موقعیت آبخوان بیرجند نشان داده شده است.

معرفی مدل MT3D

یک برنامه سه‌بعدی مدولار برای شبیه‌سازی پخش، انتقال، انتشار مولکولی، واکنش‌های شیمیایی و جذب آلودگی‌های محلول در آب زیرزمینی می‌باشد که در سال ۱۹۹۰ توسط Zheng نوشته شد. این برنامه قادر است انواع واکنش‌های شیمیایی، جذب و تجزیه را در آبخوان‌های محصور، نیمه محصور و آزاد مدل کند (Moghaddam et al., 2020). همچنین می‌توان شرایط مرزی با غلظت ثابت و یا شار ثابت را اعمال کرد. این نرم‌افزار یک روش اولر- لاگرانژ را برای حل معادلات سه‌بعدی حاکم بر انتقال آلودگی به کار می‌برد. این روش‌ها و ترکیب آن‌ها این امکان را فراهم می‌آورد که بهترین روش را برای حل انواع مشکلات انتقال آلودگی با کارایی و دقت زیادی به کار برده شود. این برنامه بر این اساس است که تغییرات در غلظت اثری بر روی جریان نخواهد داشت. این خاصیت این امکان را می‌دهد تا یک مدل جریان و انتقال آلودگی را به‌طور جداگانه ایجاد و کالیبره نماید (Zheng and Wang, 1999). MT3D می‌تواند برای هر مدل جریان تفاضل محدود مرکز بلوکی مانند MODFLOW استفاده شود و بر این فرض استوار است

شورابه‌های ذخیره‌شده در میان رسوبات انتهایی دشت در نتیجه حرکت ملکولی، انتقال و پخشیدگی به سمت چاه‌ها جریان یافت و باعث شور شدن این مناطق شده است (Saberi mehretal., 2017).

هدف از مطالعه حاضر بررسی وضعیت کیفی آب زیرزمینی منطقه بیرجند و شناسایی پتانسیل دشت و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب جهت استفاده بهینه از منابع آب می‌باشد. بدین منظور در این بخش اقدام به مطالعه معادلات حاکم بر انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی، مدل ریاضی و در نهایت مدل کیفی (MT3D) جهت شبیه‌سازی کلسیم در این آبخوان پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

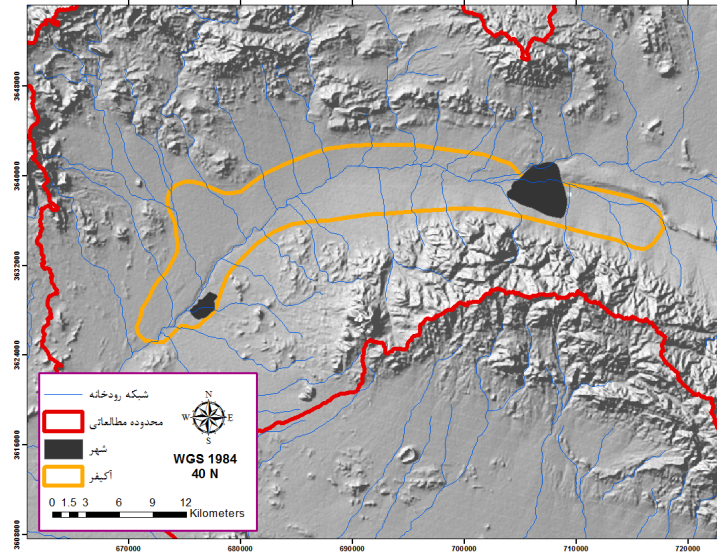
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیرجند از حوضه آبریز کویر لوت بین طول جغرافیایی ۴۳° تا ۵۸° و ۵۹°۴۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲°۳۴' تا ۳۳°۰۸' شمالی با وسعت ۳۴۵۵ کیلومتر مربع، که ۱۰۴۵ کیلومتر دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. آبخوان بیرجند از نوع آزاد با ضخامت رسوبات آبرفتی بین حداکثر ۲۲۵ و حداقل ۵ متر براساس چاه‌های حفاری شده می‌باشد. میانگین ضخامت رسوبات حدود ۸۷ متر برآورد می‌گردد. آبخوان از نواحی شمالی تغذیه و در بخش غربی تخلیه محدوده صورت می‌گردد.

آبخوان اصلی بیرجند در بخش مرکزی و نیمه‌جنوبی محدوده مطالعاتی قرار داشته و با مساحت حدود ۳۵۴۸ کیلومترمربع از مجموع پهنه ۱۳۸۳ کیلومترمربعی تحت پوشش رسوبات آبرفتی در محدوده بیرجند را شامل می‌شود. آبخوان از نواحی شمالی تغذیه و در جنوب تخلیه محدوده می‌گردد. آبخوان محدوده بیرجند از نوع غیر محصور است (Kayhomayoon et al., 2021). سفره آب زیرزمینی دشت بیرجند به صورت یکپارچه و از نوع آزاد و ناهمگن می‌باشد. ضخامت آبرفت در بخش شرقی حدود ۱۰۰ متر بوده، ولی به علت بالا آمدن سنگ کف و شیب زیاد آن لایه آبدار تشکیل نشده است. نتایج حاصل از حفاری انجام شده این موضوع را تایید می‌کند، به عنوان مثال، در شمال شرقی رکات چاه‌های حفر شده در عمق کمتر از ۱۰۰ متر به سنگ کف (توف و مارن پالئوژن) برخورد نموده است. در قسمت مرکزی دشت سنگ کف عمق بیشتری داشته و توسط رسوبات آبرفتی دانه درشت

که تغییرات غلظت ماده بر روی جهت جریان تأثیرگذار نیست. این فرض به کاربر این اختیار را می‌دهد که به‌طور مستقل یک مدل جریان را کالیبره و تصحیح نماید. MT3D بار هیدرولیکی و سایر پارامترهای جریان و source/sink ذخیره شده توسط مدل جریان را شناسایی و بازیافت می‌کند و به‌طور خودکار شرایط مرزی را ثبت می‌کند (Yaghtin, 2013).

که تغییرات غلظت ماده بر روی جهت جریان تأثیرگذار نیست. این فرض به کاربر این اختیار را می‌دهد که به‌طور مستقل یک مدل جریان را کالیبره و تصحیح نماید. MT3D بار هیدرولیکی و سایر پارامترهای جریان و



شکل ۱- نقشه منطقه مطالعاتی

Fig1-Map of the study area

جانبی افقی (m^2/s) و ضریب پراکندگی جانبی عمودی (m^2/s) بوده و با فرض یک بعدی بودن جریان از معادلات (۳) تا (۵) محاسبه می‌شوند:

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d \quad (2)$$

که در آن، k_d ضریب جذب (kg/m^3)، ρ_b چگالی ظاهری محیط آبخوان (kg/m^3) و n تخلخل می‌باشد.

$$D_x = a_L u + D^* \quad (3)$$

$$D_y = a_{TH} u + D^* \quad (4)$$

$$D_z = a_{TV} u + D^* \quad (5)$$

که در آن‌ها، a_L پراکندگی طولی (m)، a_{TH} پراکندگی جانبی افقی (m)، a_{TV} پراکندگی جانبی عمودی (m)، u سرعت واقعی در جهت x (m/s) و D^* ضریب پخشیدگی مولکولی است (Shooshtari, 2010; Ghobadian and Bahrami, 2017).

حل عددی معادلات انتقال جرم در آبخوان

فرآیندهای حاکم بر انتقال آلودگی در آبخوان

انتقال ماده را همراه با حرکت آب زیرزمینی که تابع قانون دارسی است، انتقال همرفتی یا جابجایی می‌نامند و پراکندگی هیدرودینامیکی نتیجه پراکندگی مکانیکی یا هیدرولیکی (اختلاط مکانیکی) و پخشیدگی مولکولی است (Nasiriet al, 2021). با استفاده از معادله پیوستگی جرم و با در نظر گرفتن شرایط جذب و دفع سطحی، معادل انتشار آلودگی (شار آلودگی در اثر انتقال و پراکندگی) به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - I R_d C = R_d \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ ، $\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$ و $\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ ترم‌های پراکندگی مربوط به ماده حل شده و $\frac{\partial C}{\partial x}$ ترم جابجایی است، C غلظت آلاینده (kg/m^3)، I ثابت واپاشی ($1/s$)، R_d عامل کند سازی یا تأخیر (رابطه ۲) و D_x ، D_y و D_z به ترتیب ضریب پراکندگی طولی (m^2/s)، ضریب پراکندگی

مدل کیفی آب زیرزمینی

به‌منظور تهیه یک مدل مفهومی و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی در آبخوان بیرجند با استفاده از مدل غیرماندگار در مدل کمی، اقدام به ساخت لایه‌ای برای پارامتر کیفی کلسیم شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن گام زمانی ۶ ماهه برای نمونه‌های کیفی آب، طی یک دوره ۵ ساله (سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ تا ۹۱-۱۳۹۰) شبیه‌سازی مدل کیفی صورت گرفته است. با توجه به محدود بودن داده‌های کیفی در محدوده مورد مطالعه، بعد از آنالیز دقت داده‌ها تعداد ۳۱ چاه که نتایج کیفی آن‌ها موجود بود برای تعریف در مدل MT3D تعریف گردید که مختصات و غلظت اولیه این چاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

پهنه‌بندی کیفی کلسیم

به‌منظور شناسایی داده‌های کیفی اعمالی به مدل MT3D، تعیین پارامترهای ورودی جهت آنالیز و شبیه‌سازی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به حساسیت مدل در پذیرش داده‌های اولیه مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار، اقدام به پهنه‌بندی کیفی پارامتر کلسیم در سطح آبخوان بیرجند شده است. جهت ارائه یک مدل مناسب جهت پهنه‌بندی کلسیم تحلیل واریوگرام این پارامتر بسیار مهم می‌باشد. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار GS+ برازش واریوگرام انجام گرفته است. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی کلسیم مطابق شکل (۲) ارائه شده است. داده‌ها به‌منظور تعیین شرایط اولیه مدل MT3D استخراج و وارد نرم‌افزار GMS گردید.

برای حل معادلات انتقال جرم، روش‌های گوناگون تحلیلی و عددی وجود دارند. اکثر روش‌های عددی حل معادلات انتقال را می‌توان در سه گروه اویلری^۱، لاگرانژی^۲ و روش‌های تلفیقی اویلری-لاگرانژی طبقه‌بندی کرد. در گروه اویلری معادله انتقال مشابه حالت استاندارد روش‌های عددی (تفاضل محدود یا المان محدود) حل می‌گردد؛ که در آن‌ها شبکه سلول‌ها ثابت است. در مسائلی که اثر فرآیندهای پراکندگی و واکنش‌های شیمیایی بر فرارفت غالب است، این روش پاسخ‌های خوبی ارائه می‌دهد؛ اما برای مسائلی که فرارفت غالب است، کاربرد این روش‌ها با خطاهایی از قبیل محاسبه بیش‌ازحد پراکندگی و انتشار همراه می‌باشد. می‌توان برای کم کردن این گونه خطاها ابعاد سلول‌ها و یا گام‌های زمانی را کوچک‌تر انتخاب کرد. در گروه لاگرانژی، موقعیت اولیه یک ذره شناسایی و با گذشت زمان مسیر حرکت آن تعقیب می‌شود. در این فرآیند خود ذرات هستند که گروه‌های شبکه را تشکیل می‌دهند، در نتیجه با حرکت آن‌ها شکل و موقعیت شبکه نیز تغییر کرده که به آن شبکه تغییر شکل یافته^۳ و یا سیستم مختصات لاگرانژی گفته می‌شود. روش‌های لاگرانژی برای حل مسائلی که فرارفت غالب است بسیار مؤثر می‌باشد؛ اما به دلیل نبود شبکه یا سیستم مختصات ثابت (برخلاف روش اویلری)، این روش‌ها ممکن است با مشکلاتی مانند ناپایداری در حل عددی به‌ویژه زمانی که محدوده مدل‌سازی غیریکنواخت است و ورودی و خروجی‌های مختلف و شرایط مرزی پیچیده وجود دارد، روبرو گردند. در روش‌های تلفیقی اویلری-لاگرانژی، سعی شده با به‌کارگیری هم‌زمان مزایای دو نگرش، یک روش حل مؤثر با حداقل خطای محاسباتی به وجود آید. در روش تلفیقی، ترم فرارفت معادله‌ی انتقال با استفاده از نگرش لاگرانژی و ترم پراکنش و واکنش‌ها با نگرش اویلری حل می‌شود. روش‌های عددی گوناگونی مانند روش گام‌های تصادفی و روش خطوط مشخصه با نگرش تلفیقی ارائه شده‌اند (Zheng and Wang, 1999; Nazari and Joodavi, 2014).

¹ Eulerian

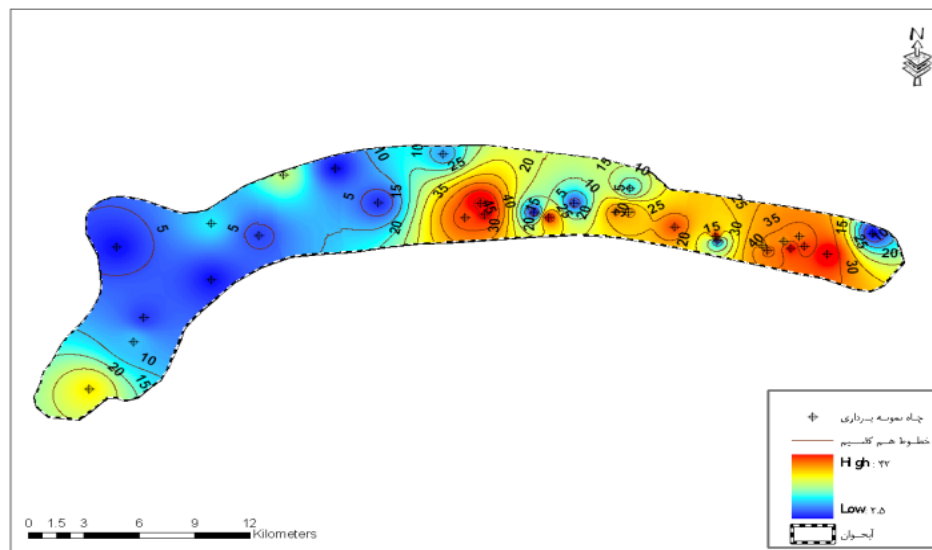
² Lagrangian

³ Deforming grid

جدول ۱- موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری در محدوده آبخوان بیرجند

Table 1- Location of sampling wells in Birjand aquifer

غلظت کلسیم	UTM X	UTM Y	نام چاه	غلظت کلسیم	UTM X	UTM Y	نام چاه
Ca concentration (PPM)			Name of ObservationWell	Ca concentration (PPM)			Name of ObservationWell
۲۵	۶۷۳۶۳۱	۳۶۲۷۰۹۷	کلاته قاضی چاه امامداد	۴۵.۲	۷۱۰۴۴۶	۳۶۳۶۰۹۹	چاه ۶ علی آباد
۳	۶۷۵۱۲۶	۳۶۳۶۳۰۷	شاهزیله چاه دباغی	۳۳.۲	۷۱۰۱۹۶	۳۶۳۶۳۹۱	چاه ۷ علی آباد
۷.۵	۶۷۶۰۴۱	۳۶۳۰۱۵۲	نصرآباد چاه عباسعلی ضابطی	۳۷.۷۲	۷۱۲۱۵۳	۳۶۳۷۰۲۵	چاه ۸ علی آباد
۵.۲	۶۷۶۵۸۳	۳۶۳۱۷۲۹	مهدیه چاه ابراهیم جعفری	۳۹.۲۳	۷۱۲۴۵۱	۳۶۳۶۳۵۹	چاه ۱۱ علی آباد
۷	۶۸۰۲۳۲	۳۶۳۷۸۲۷	تقاب چاه ولی خدادادی	۳۶.۲	۷۱۱۳۴۵	۳۶۳۶۶۸۸	چاه ۱۲ علی آباد
۵.۵	۶۸۰۲۵۹	۳۶۳۴۱۹۱	معصوم آباد چاه علی شرفی	۳۰.۱۶	۷۱۳۶۸۵	۳۶۳۵۸۵۵	چاه ۱۴ علی آباد
۴.۵	۶۸۲۸۲۱	۳۶۳۷۰۵۷	سیوجان چاه خراسی	۴۶.۷۶	۶۹۵۰۸۰	۳۶۳۸۴۶۹	چاه ۸ رکات
۹.۵	۶۸۴۱۷۲	۳۶۴۰۹۷۵	سیوجان چاه محمدپور	۲۷.۱۶	۷۰۲۲۲۲	۳۶۳۸۵۷۱	چاه ۹ رکات
۶	۶۸۷۰۱۴	۳۶۴۱۴۰۹	سیوجان چاه خوشرو	۳۱.۶۸	۷۰۲۹۱۶	۳۶۳۸۵۷۱	چاه ۱۰ رکات
۱.۵	۶۸۹۳۳۰	۳۶۳۹۱۸۹	محمدیه چاه آموزشکده کشاورزی	۲۷.۱۶	۷۰۷۶۵۸	۳۶۳۷۰۲۶	چاه ۴ شهرک
۷.۵	۶۹۲۸۵۰	۳۶۴۲۳۲۱	شمال رکات چاه سالاری	۴۶.۷۶	۶۹۴۸۶۳	۳۶۳۹۱۴۱	چاه ۵ رکات
۲	۶۹۷۷۹۶	۳۶۳۸۵۵۱	شمس آباد محمدپور شمسین	۴۲.۲۴	۶۹۴۰۴۷	۳۶۳۸۲۰۸	چاه ۶ رکات
۳.۳	۶۹۹۹۵۴	۳۶۳۹۱۶۳	قنات امیرآباد شور	۱.۳۰	۷۱۱۷۲۳	۳۶۳۶۲۳۱	چاه ۱۳ علی آباد
۴.۳	۷۰۲۹۸۹	۳۶۴۰۱۰۵	قنات حاجی آباد	۱۶.۲۷	۷۰۵۴۲۳	۳۶۳۷۶۳۴	چاه ۱۱ رکات
۲.۱	۷۰۷۷۱۲	۳۶۳۶۷۴۴	آبفا	۲۷	۶۹۸۵۷۲	۳۶۳۸۲۲۸	چاه ۲ رکات
				۱	۷۱۶۱۷۶	۳۶۳۷۲۱۰	شوکت آباد چاه دانشگاه آزاد



شکل ۲- پهنه‌بندی کلسیم در محدوده آبخوان بیرجند- میلی‌گرم در لیتر
Fig 2- Zoning of Calcium Concentration in Birjand aquifer-ppm

اولیه کیفی و شرایط اولیه تعریف شده در مدل کمی ساختار شبیه‌سازی را برای مدل MT3D تعریف شده است. جدول (۲) نحوه ورود داده‌ها و حالت‌های تعریف شده مدل را بیان می‌نماید.

مدل‌سازی در آبخوان بیرجند براین پایه طرح‌ریزی گردید، تا شرایط به‌کار رفته شده در محدوده به‌گونه‌ای باشد که غلظت آغشته‌کننده به میزانی برسد که آب را به لحاظ کیفی غیرقابل شرب نماید. براین اساس با ورود شرایط

جدول ۲- چگونگی تهیه داده‌های لازم برای مدل کیفی
Table2- Preparing the necessary data for the qualitative model

روش انتقال به مدل کیفی ریاضی Method of transfer to mathematical qualitative model	مدل مفهومی کیفی Conceptual of qualitative model
پس از میان‌یابی غلظت کلسیم در محیط GIS، لایه مزبور با استفاده از ماژول GIS در نرم‌افزار GMS فراخوانی شده و در انتها بصورت غلظت اولیه در مدل وارد می‌شود.	لایه کلسیم
استفاده از یکی از روش‌های MOC، HMOC، MMOC و ULTIMATE تعریف ضرایب انتشار و نسبت پخشیدگی طولی به عرضی	فرارفت
به دلیل عدم وجود اندازه‌گیری صحرایی استفاده از جداول کتاب Spitz & Moreno استفاده گردید. نبود داده کافی در این بخش بر روی نتایج مدل تأثیر منفی خواهد داشت.	پراکندگی
چون در طی وارد کردن داده‌ها احتمال خطای انسانی وجود داشت، برای تمامی داده‌ها منحنی‌های مربوطه به کمک ترسیم کنتور نرم‌افزار GMS کنترل و داده‌های غلط اصلاح گردید.	بررسی صحت و سقم داده‌های آماد ه شده

آنالیز حساسیت و واسنجی مدل

طرح و حجم بالا و زمانبر مدل کیفی، ثانیاً اینکه آبخوان بیرجند فاقد منحنی‌های هم دیسپرسیویتی انجام آزمایش ردیابی در آبخوان به علل مختلف می‌باشد

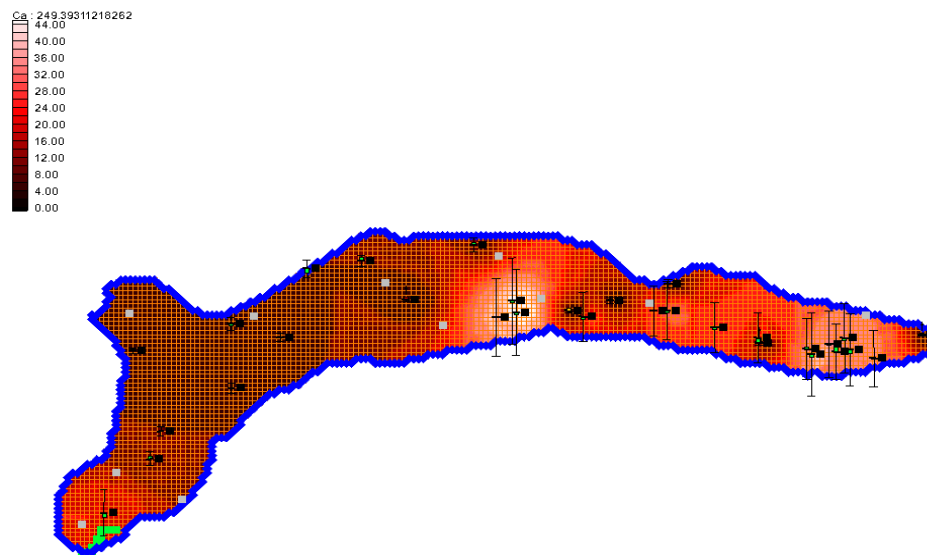
نتایج و بحث

در مدل کیفی ابتدا سعی شده با روش مستقیم به واسنجی پرداخته شود ولی اولاً با توجه به زمان محدود^۱ برای انجام مدل کیفی می‌باشد که آن هم به علت عدم

¹Iso dispersivity

ماندگار و ضریب ذخیره ویژه در حالت ناماندگار واسنجی گردید، در طی مدل کیفی اینمراحل بر روی ضرایب معادله پخشیدگی صورت پذیرفت. با توجه به واکنش آبخوان و عدم حساسیت آبخوان به کلیه پارامترهای کیفی تنها واسنجی بر روی ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی در محدوده آبخوان متمرکز گردید. شکل (۳) وضعیت واسنجی شده نهایی آبخوان را در مدل کیفی MT3D نشان می‌دهد.

که این پارامتر برآورد صحرایی نشده است. در نتیجه برخلاف مدل کمی که داده صحرایی بیشتری برای هرگونه مطالعات بعدی وجود دارد (ضریب ذخیره، آزمایش پمپاژ و محاسبه T و K، متاسفانه مدل کیفی با نبود داده‌های موردنیاز همراه بود و این امر سبب می‌شود که نتایج مدل کیفی بر خلاف مدل کمی با خطای بیشتری مواجه شود. در این مدل، واسنجیه روش مستقیم (آزمون و خطا) انجام شده است. با توجه به اینکه مدل در حالت کمی، پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت



شکل ۳- پهنه‌بندی نهایی غلظت کلسیم بعد از واسنجی مدل در آبخوان بیرجند
Fig 3- Final Zoning of Calcium Concentration after calibration model in Birjand aquifer

بیشتر به نتایج مدل کیفی و کارایی آن می‌باشد. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر مدل کیفی نسبت به زمان دارد، لذا صحت‌سنجی مدل کیفی طی ۵ سال و در ۱۰ دوره شش ماهه صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در پایان سال پنجم در شکل (۴) که همبستگی بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد، ارائه شده است.

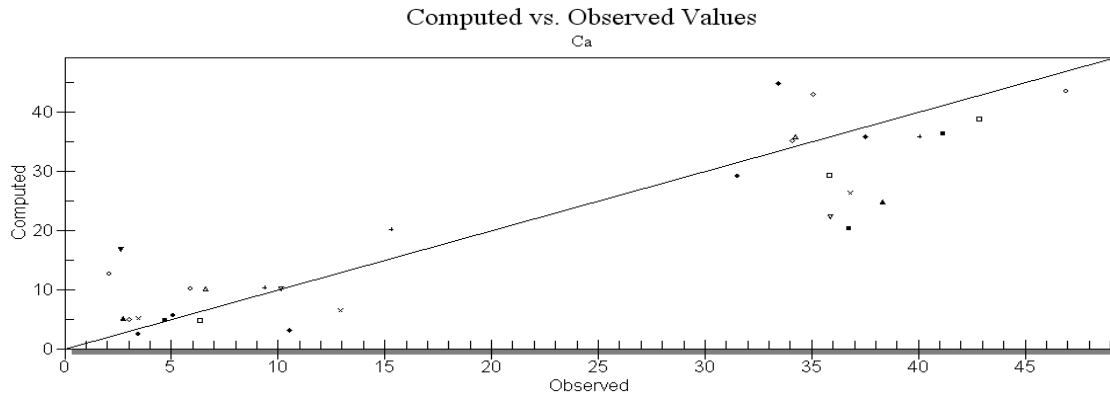
همچنین جدول آنالیز خطای مدل نیز در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج خطای مدل کیفی در مرحله واسنجی حاکی از دقت قابل قبول مدل است.

صحت‌سنجی مدل

یکی از مراحل مدل کیفی تطبیق مدل کیفی با واقعیت می‌باشد. هدف از انجام این مرحله به‌دست آوردن اعتماد

جدول ۳- میزان خطای مدل کیفی (ppm)
Table3- Error in the qualitative model (ppm)

شرایط غیرماندگار	نام پارامتر
-۲.۱۴۷	میانگین خطا- Mean Error
۶.۵۵۶	میانگین مطلق خطا- MeanAbsError
۹.۳۰۴	میانگین مجذور خطا- RMSE

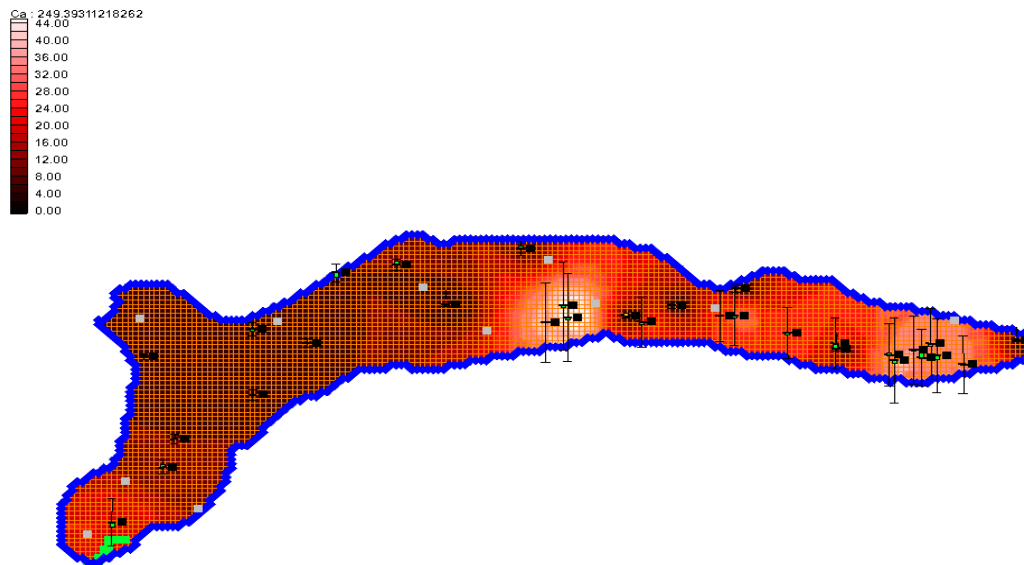


شکل ۴- مقایسه غلظت مشاهداتی و محاسباتی کلسیم در پایان سال پنجم

Fig 4-Comparison of observed and calculated Calcium Concentration At the end of the fifth year

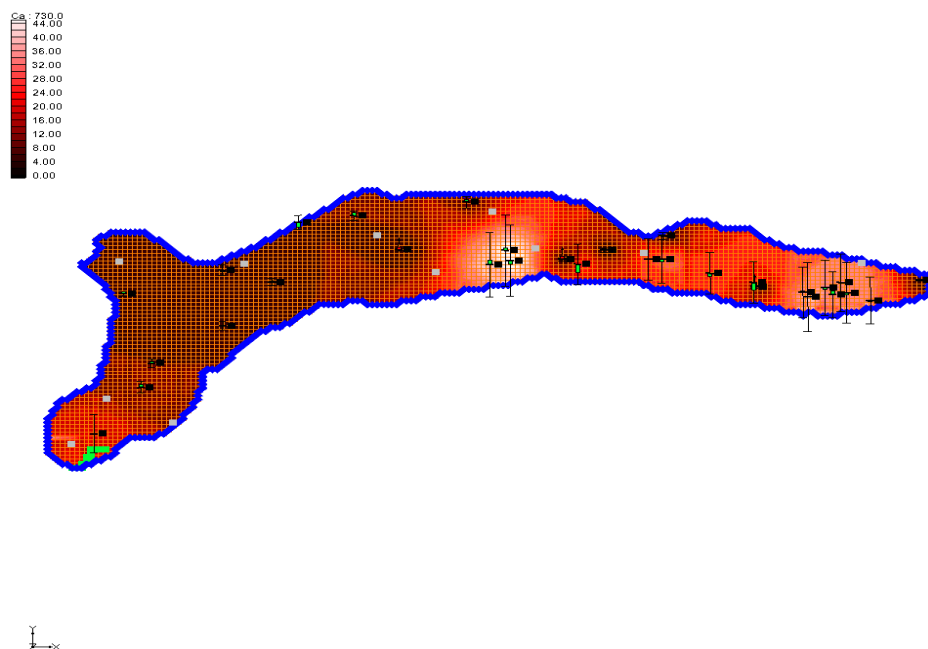
به دقت مناسب این مراحل انجام پذیرفت. بدین منظور در پایان سال اول، دوم و پنجم غلظت مدل‌سازی کلسیم در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج استخراجی از مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل کیفی MT3D در محدوده آبخوان بیرجند، شبیه‌سازی غلظت کلسیم در این آبخوان با توجه

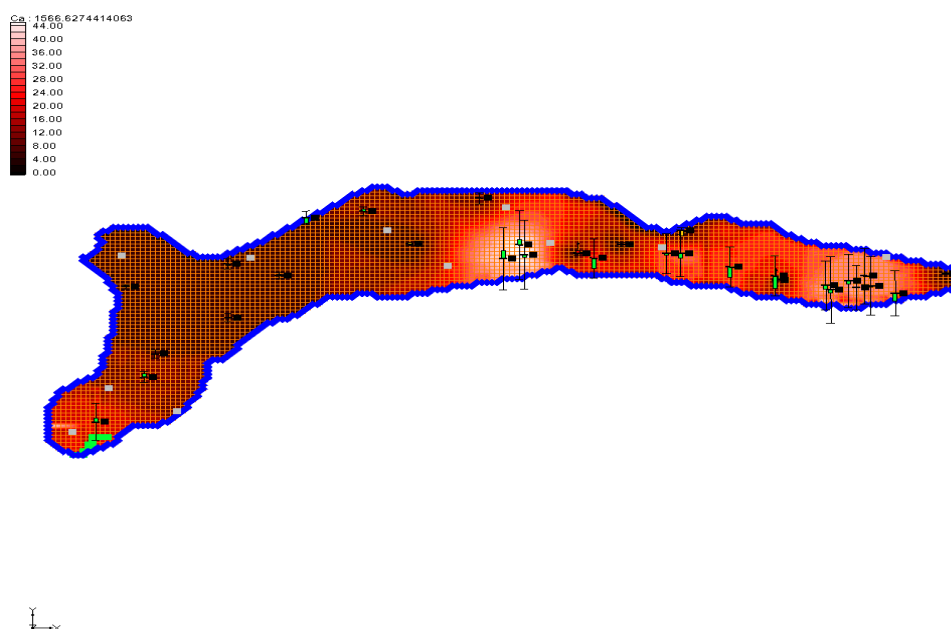


شکل ۵ - شبیه‌سازی غلظت کلسیم در پایان سال اول

Fig 5- Simulation of calcium concentration at the end of the first year



شکل ۶ - شبیه‌سازی غلظت کلسیم در پایان سال دوم
Fig 6- Simulation of calcium concentration at the end of the second year



شکل ۷ - شبیه‌سازی غلظت کلسیم در پایان سال پنجم
Fig 7- Simulation of calcium concentration at the end of the fifth year

نتیجه‌گیری

حفاظت از محیط‌زیست به منظور دستیابی به توسعه پایدار یکی از مباحث اصلی و اساسی است که با اجرای طرح‌های جامع اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی سرلوحه برنامه کشورهای مختلف جهان از جمله ایران قرار گرفته است. به هر حال وجود عوامل آلاینده به علت عمر بالایی که دارند می‌توانند به انسان ضرر برسانند و علاوه بر ایجاد عوارض زیست‌محیطی، ایجاد بیماری‌های مختلف و در نهایت کاهش طول عمر موجودات زنده را در پی داشته باشد. گسترش روز افزون استفاده از آب‌های زیرزمینی بخصوص در مناطق کویری که امکان استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی نمی‌باشد، باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی و نابودی کیفیت آب زیرزمینی شده است. شبیه‌سازی سیستم آب‌های زیرزمینی ابزار مناسبی جهت بررسی وضعیت کمی و کیفی آب زیرزمینی می‌باشد. در مطالعه حاضر آبخوان

بیرجند با استفاده از مدل عددی MT3D برای شبیه‌سازی کیفیت آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از جمع‌آوری پارامترهای مختلفی و تهیه مدل مفهومی، مدل کیفی آبخوان با استفاده از نرم‌افزار MT3D از مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۹۱ به مدت ۵ سال ساخته شد. مدل کیفی جهت کاهش خطای مدل با تغییر ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی واسنجی شد. به‌طور متوسط و برای کل آبخوان، مقادیر میانگین خطا برابر 2.147 PPM و مقدار خطای میانگین مطلق به میزان 9.304 PPM محاسبه شده است که دقت بالای این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در ادامه صحت‌سنجی مدل طی ۵ سال بعد از واسنجی صورت گرفته است. همبستگی بین غلظت کلسیم مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بیانگر دقت مدل ساخته شده بود.

منابع

1. Banejad, H., Mohebzadeh, H., Ghobadi, M. H., Heidari, M., 2013. Numerical Simulation of the Flow and Contaminant Transport in Groundwater, Case Study: Nahavand Plain Aquifer, Water and Soil Science. 23 (2), 43-57. [in Persian With English Summary].
2. Chitrakar, P., Sana, A., 2015. Groundwater flow and solute transport simulation in Eastern Al Batinah coastal plain, Oman: case study. Journal of Hydrologic Engineering, 21(2): p. 05015020.
3. Ehteshami, M., Sharifi, A., 2007. Evaluation of the quality model of Rey city aquifer, Journal of Environmental Science and Technology. 8 (4), 1-10. [in Persian].
4. Ghobadian, R., Bahrami, Z., 2017. Numerical Analysis of Applying Quantitative and Qualitative Scenarios on Khezel Aquifer in Hamedan Province with MODFLOW & MT3DMS Models, Journal of Range and Watershed Management. 69 (4), 1043-1069. [in Persian With English Summary].
5. Hamraz, B., Akbarpour, A., Pourreza Bilondi, M., 2017. Sensitivity analysis of Groundwater model, Journal of aquifer and Qanat. 1 (1), 50-60. [in Persian With English Summary].
6. Javadi, S., Kardan Moghaddam, H. and Neshat, A., 2020. A new approach for vulnerability assessment of coastal aquifers using combined index. Geocarto International, pp. 1-23.
7. Kayhomayoon, Z., Ghordoyee Milan, S., Arya Azar, N. and Kardan Moghaddam, H., 2021. A new approach for regional groundwater

- level simulation: clustering, simulation, and optimization. *Natural Resources Research*, pp.1-21.
8. Mahmoodian Shooshtari, M., 2010. *Hydraulics of Groundwater*, University of Chamran press. [in Persian].
9. Moghaddam, H.K., Moghaddam, H.K., Kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M. and Alizadeh, M.J., 2019. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, p.100237.
10. Moghaddam, H.K., kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M. and Moghddam, H.K., 2020. Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International*, (just-accepted), pp.1-15.
11. Nasiri, M., Moghaddam, H.K. and Hamidi, M., 2021. Development of multi-criteria decision making methods for reduction of seawater intrusion in coastal aquifers using SEAWAT code. *Journal of Contaminant Hydrology*, p.103848.
12. Nazari, R., Joodavi, A., 2014. *Applied Flow and Contaminant Transport Modeling in Aquifers*. Aftab Alamtab Publication. 37 p. [in Persian].
13. Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., Wagener, T., 2016. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
14. Rejani, R., Jha, M. K., Panda, S. N., Mull, R., 2008. Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*. 22 (1), p. 23.
15. Saberimehr, S., Asghari moghaddam, A., Nadiri, A., 2017. Modeling groundwater flow and salinity intrusion at Shabestar plain aquifer using GMS software model, *Quaternary Journal of Iran*. 3 (1), 41-50. [in Persian With English Summary].
16. Samani, S., Moghaddam, H.K. and Zareian, M.J., 2021. Evaluating time series integrated groundwater sustainability: a case study in Salt Lake catchment, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), pp.1-13.
17. Sheikh Goodarzi, M., Mousavi, S. H., Khorasani, N., 2012. Simulating Spatial Changes in Groundwater Qualitative Factors Using Geostatistical Methods (Case Study: Tehran-Karaj Plain), *Journal of Natural Environment*. 65 (1), 83-93. [in Persian With English Summary].
18. Yaghtin, M., 2013. Quantitative and Qualitative modeling of Eij Aquifer using GMS. MSc Thesis, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Iran. [in Persian With English Summary].
19. Zehtabyan, Gh., Jaanfaza, A., Mohammad Asgari, H., Nematollahi, M.C., 2010. Modeling of spatial variations of some groundwater chemical properties (case study: Garmsar watershed). *Journal of Range and Desert Research of Iran.*, 17, 61-73.
20. Zheng, C., and Wang, P. P., 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Alabama UnivUniversity.



Original Article:

**Simulation of Calcium concentration in groundwater resources
(Case study: Birjand aquifer)**

Hamid Kardan Moghaddam^{1*}, Mina Nasiri²

1-Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Tehran, Iran

2- Water engineering and Hydraulic structure, Noshirvani University, Babol, Iran

*Corresponding Author Email: hkardan@ut.ac.ir

Received: 22-04-2020; Accepted: 08-11-2020

Abstract

Water, as a major natural resource, is a basic human need and a valuable asset in the absence of which no activity will be sustainable for socio-economic development. In arid areas, groundwater resources are more important and priority given the lack of surface water resources. In addition to the importance of groundwater quantity, its quality is very important and is a direct function of human activities. Groundwater pollution by various types of organic matter and mineral compounds is one of the most common environmental problems today. These pollutants travel with groundwater and will therefore contaminate groundwater resources. Therefore, groundwater pollution is a common threat due to the destruction of groundwater quality and the poisoning of water used by humans. In the present study, MT3D numerical model was used to simulate groundwater quality in Birjand aquifer. Modeling for calcium concentration has been done in 5 years from October 2007 to September 2012. In the calibration step, the error values ME, MAE and RMSE were obtained as 2.147, 6.556 and 9.304 mg / l, respectively. The measured model has been validated using the available information for the next 5 years. The results of the qualitative model showed the appropriate matching of the observational and computational values of calcium concentration.

Keywords: Groundwater, Birjand aquifer, Quantitative model, MT3D.