فصلنامهٔ کواترنری ایران (علمی- پژوهشی)، دورهٔ ۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹٦
ص ٤١-٥٠

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت شبستر با استفاده از نرم‌افزار GMS

صادق صابری‌مهر*؛ دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
اصغر اصغری‌مقدم؛ استاد، گرایش هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
عطاءالله ندیری؛ استادیار، گرایش هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۳۱

چکیده

دشت شبستر در شمال‌شرقی دریاچهٔ ارومیه یکی از دشت‌های حاصلخیز کشور است که سالیانه کشاورزی به‌وسعت بسیار زیاد در آن انجام می‌پذیرد. علاوه‌بر آب‌های سطحی که بخش کمی از آب‌های مورد نیاز کشاورزی منطقه را تأمین می‌کند، به‌طور کلی کشاورزی منطقه به آب زیرزمینی دشت وابسته است و حجم زیادی از آب زیرزمینی هر ساله به‌همین منظور استخراج می‌شود. دشت شبستر طی سالیان گذشته تحت تأثیر نفوذ پیش‌روندهٔ آب شور قرارگرفته است. منبع و علت شوری آن شورابه‌های به‌دام‌افتاده در رسوبات انتهای دشت است. مدل کمّی و کیفی دشت با استفاده از نرم‌افزار GMS در مدیریت صحیح برداشت از آب زیرزمینی منطقه و جلوگیری از پیشرفت جبههٔ آب شور در این پژوهش انجام شده است. تغییرات سطح آب با استفاده از آمار سطح ایستابی ٢٤ حلقه چاه پیزومتری موجود در محدودهٔ مطالعاتی ارزیابی شد و پس از تعیین پارامترهای آبخوان در اثنای واسنجی مدل و اطمینان از منطقی‌بودن جواب‌ها و پس از طی مرحلهٔ صحت‌سنجی، وضعیت هیدرولیکی آبخوان بررسی و تحلیل شد. در دو منطقه از دشت، یکی در قسمت جنوبی و دیگری در قسمت شمال‌غربی دشت، به‌علت وجود تراکم چاه‌ها، افت شدید تراز آب مشاهده شد. در نهایت، از کد عددی MT3DMS مدل انتقال توده‌ای ذرات شبیه‌سازی و برای تخمین مسیر حرکت جبههٔ آب شور استفاده شد. نتایج نشان داد نفوذ جبههٔ آب شور در قسمت جنوبی و در منطقه‌ای اتفاق می‌افتد که افت تراز آب ایجاد شده بود.

کلیدواژه‌ها: آبخوان ساحلی شبستر، آب زیرزمینی، جبههٔ آب شور، شبیه‌سازی، GMS، MT3DMS.

مقدمه

در سه دههٔ گذشته، توسعهٔ اجتماعی و اقتصادی و متعاقب آن افزایش روند تقاضا برای مصرف آب، اغلب آبخوان‌های مهم کشور را در معرض زوال قرار داده است، به‌نحوی که اکثر دشت‌های کشور به‌دلیل افت ادامه‌دار سطح آب زیرزمینی در شرایط ممنوعه یا ممنوعهٔ بحرانی با شوری مواجه است. مخازن آب زیرزمینی همواره یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین و در دسترس شناخته می‌شود. از آنجا که این مخازن در زیرزمین و دور از دید مستقیم قراردارند، شناخت و پایش کامل آن‌ها از نظر کمّی و کیفی به سادگی امکان‌پذیر نیست و در عمل به صرف وقت و هزینه‌های زیادی نیاز دارد. لذا، به‌علت ماهیت پیچیدهٔ آبخوان‌ها، مدل ریاضی آبخوان روش بسیار خوبی برای شبیه‌سازی و بررسی ویژگی‌های مختلف آن است که تقریبی از شرایط محیط واقعی را منعکس می‌کند (Anderson & Woessner, 1992). به‌طور کلی، مدل آب زیرزمینی بیان رایانه‌ای پدیده‌های سیستم هیدروژئولوژی است که از قوانین علمی و روابط ریاضی برای بیان این

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۹۱۷۳۲۹۳۹۶۴ Email: sadegh.saberimehr@gmail.com

سیستم استفاده می‌کند. این فرمول‌ها شامل معادلات دیفرانسیل لازم و شرایط مرزی و اولیهٔ مرتبط با آن است (Hill & Tiedemen, 2007). در صورتی که آمار خوبی از برداشت‌ها، انواع تغذیه و تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه به‌صورت دوره‌ای در دسترس باشد، می‌توان مدل کمّی و کیفی آبخوان را در مدیریت صحیح آبخوان در آینده تهیه کرد.

فینی و همکاران (۱۹۹۲) مدلی بهینه‌سازی برای کنترل نفوذ آب شور در حوضهٔ جاکارتا در اندونزی تهیه کردند. هدف مشخص‌کردن نرخ‌های پمپاژ و تغذیه به‌منظور کمینه‌کردن حجم آب شور نفوذی در منطقه بود. غربی و پرالتا (۱۹۹۴) روش مدل بهینه‌سازی را برای مدیریت کمّی و کیفی آبخوان پیچیده و چندلایهٔ غیرخطی در درهٔ دریاچهٔ نمک در یوتا[1] (ایالات متحده) به‌کار گرفتند. نیشیکاوا (۱۹۹۸) مدلی شبیه‌سازی/ بهینه‌سازی برای مدیریت بهینهٔ منابع آب شهر سانتا باربارا (کالیفرنیا، ایالات متحده) در طول خشکسالی تهیه کرد. مدل عددی به‌کاررفته مدل MODFLOW[2] و هدف کمینه‌کردن هزینهٔ تأمین آب با توجه به قیود تقاضای آب و بار هیدرولیکی در کنترل نفوذ آب شور بود. کاهش تراز آب زیرزمینی در دو دههٔ گذشته به‌علت پمپاژ بی‌رویهٔ آب زیرزمینی در ایالت متحدهٔ عربی باعث نفوذ آب شور دریا به دو آبخوان کالبها[3] و فوجیره[4] شده است که شریف و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار مادفلو بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که کاهش برداشت آب زیرزمینی از میدان چاه کالبها به کاهش نفوذ آب دریا در قست جنوب‌شرقی دشت کمک می‌کند. اما، تحت شرایط فعلی، نفوذ آب شور به درون آبخوان همچنان ادامه خواهد یافت.

نفوذ آب شور دریا در شهر سمارانگ[5] اندونزی را رحماواتی و همکاران (۲۰۱۳) بررسی کردند. در ساحل این شهر نفوذ آب شور دریا به‌علت نشست زمین، افزایش سطح آب دریا و استخراج آب زیرزمینی تشدید شده است. هدف این تحقیق این بود که نفوذ آب شور از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۸ بر اساس لاگ چاه‌ها و مدل مادفلو بررسی شود. نتایج نشان داد که نفوذ آب شور از طرف دریا به سمت ساحل از سال ۲۰۱۸ تا ۲۱۰۸ در زون‌های با هدایت هیدرولیکی بالا حرکت خواهد کرد.

مدلسازی کیفی نیترات چاه‌های آب شرب شهرری با استفاده از نرم‌افزار MT3DMS[6] را احتشامی و شریفی (۱۳۸۷) انجام گرفت. زمزم و رهنما (۱۳۹۱) در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان، مدل کمّی و کیفی دشت را با استفاده از مدل‌های MODFLOW و MT3DMS تهیه کردند. دشت مشهد طی سال‌های اخیر با افت سطح ایستابی و کاهش حجم ذخیره مواجه بوده و گاه نیز در معرض آلودگی انواع آلاینده‌ها قرارگرفته است. لذا، مدل ریاضی کمّی و کیفی آبخوان دشت مشهد در همین جهت تهیه شد و نتایج نشان داد آلودگی نیترات در بخش‌های عمده‌ای از مرکز و شرق دشت کماکان پابرجاست و غلظت آلایندهٔ نیترات در این مناطق بیش از حد مجاز (۴۵ میلی‌گرم در لیتر) است (وثوق و همکاران، ۱۳۸۸).

دشت شبستر یکی از دشت‌های ساحلی کشور است که در استان آذربایجان‌شرقی و در شرق و شمال‌شرق دریاچهٔ ارومیه واقع شده است. در چند سال اخیر، به‌علت برداشت بی‌رویهٔ آب زیرزمینی از این دشت، تعداد زیادی از چاه‌های پمپاژ منطقه شور شده است که منبع و علت شوری آن شورابه‌های به‌تله‌افتاده در رسوبات انتهایی یا جنوب دشت است. به‌طور کلی، هدف از این پژوهش تهیهٔ مدل کمّی و کیفی در جهت مدیریت بهره‌وری مناسب از آن در آینده است تا بتوان مانع از گسترش ابر آلودگی شوری در منطقه شد.

منطقهٔ مورد مطالعه

دشت شبستر– صوفیان یکی از زیرحوضه‌های ۲۵گانهٔ حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه است که در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان تبریز قراردارد. مهم‌ترین مناطق مسکونی آن شهرهای شبستر، صوفیان، خامنه، سیس، کوزه‌کنان و شندآباد است. دشت شبستر– صوفیان از شمال به محدودهٔ مطالعاتی مرند، از شرق به محدودهٔ مطالعاتی تبریز، از غرب به محدودهٔ

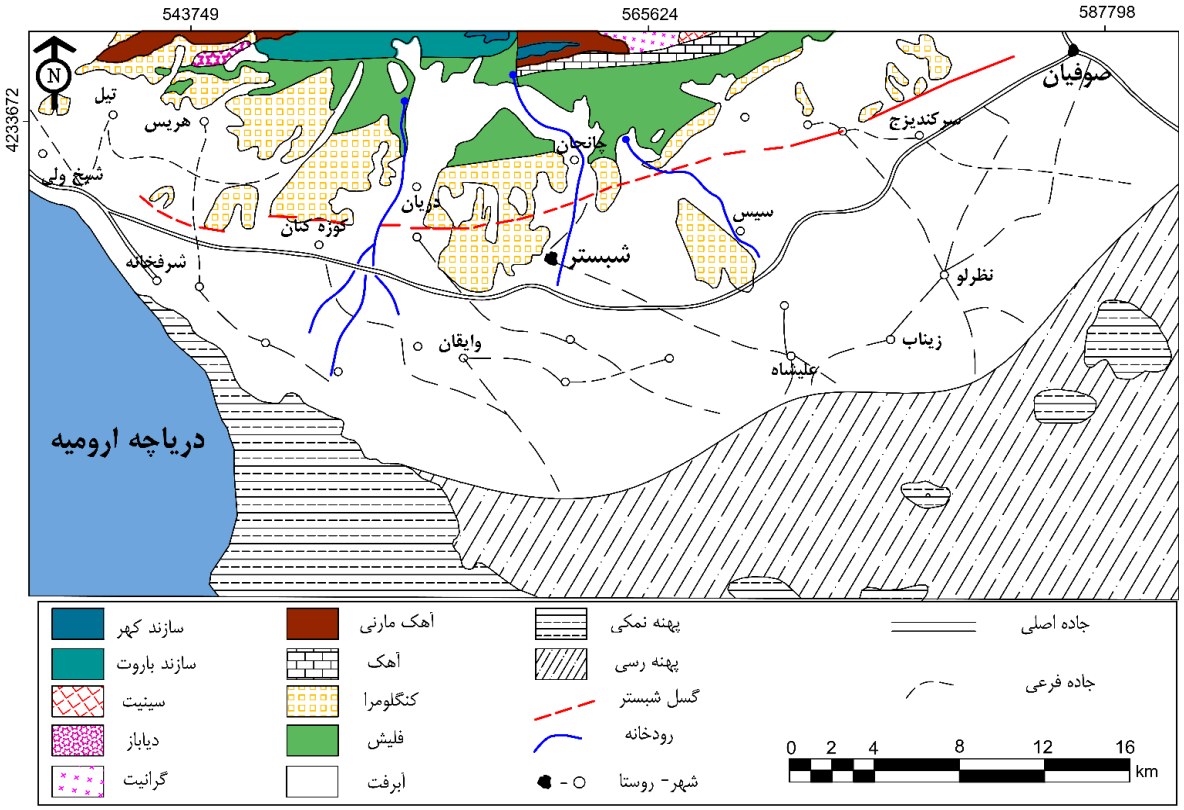
1. Salt Lake Valley, Utah
2. Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model
3. Kalbha
4. Fujairah
5. Semarang
6. Mass-Transport 3D Multi-Species

مطالعاتی تسوج و از جنوب به دریاچهٔ ارومیه و شوره‌زارهای خاوری آن می‌رسد. وسعت کل محدودهٔ مطالعاتی شبستر- صوفیان ۱۳۰۰ کیلومترمربع است که حدود ۸۰۰ کیلومتر آن را دشت شبستر- صوفیان تشکیل می‌دهد. مرتفع‌ترین نقطهٔ این محدوده در بلندی‌های میشو با بیشترین ارتفاع ۳۱۲۰ متر (در ارتفاعات کوه فلخ) و پست‌ترین بخش آن در شوره‌زارهای کنار دریاچهٔ ارومیه با تراز حدود ۱۲۷۷ متر قراردارد (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۶).

به‌علت فصلی‌بودن رودخانه‌های این منطقه، قسمت عمدهٔ نیاز آبی این دشت در بخش کشاورزی و شرب از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. کاهش بارندگی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، باعث افت شدید سطح آب آن و کاهش کیفیت و نفوذ آب شور به آبخوان این دشت و شوری بعضی چاه‌های این منطقه شده است. ترس از ادامهٔ این روند نگرانی زیادی را برای مصرف‌کنندگان و سازمان‌های مربوط به‌وجود آورده است. به‌این ترتیب، لزوم مطالعات علمی، اصولی و هدف‌مند منابع آب زیرزمینی به‌منظور مدیریت کمّی و کیفی این منابع در منطقهٔ مورد مطالعه ضرورت پیدامی‌کند.

زمین‌شناسی منطقه

دشت شبستر از شمال به میکاشیست‌های پرکامبرین (سازند کهر)، آهک‌های خاکستری تا سفید، شیل‌های میکادار، دولومیت، چرت (سازند باروت)، مارن قرمز، دیاباز، آمفیبولیت، تراس‌های رودخانه‌ای و رسوبات کنگلومرایی محدود شده است. جزئیات لیتولوژی این سازندها را جیمز و وایند (۱۹۶۵) و اشتوکلین (۱۹۷۱) شرح داده‌اند. همچنین، این آبخوان از جنوب به پهنه‌های رسی و نمکی و از غرب و شمال‌غرب به شوره‌زارها و دریاچهٔ ارومیه متصل شده است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ مورد مطالعه

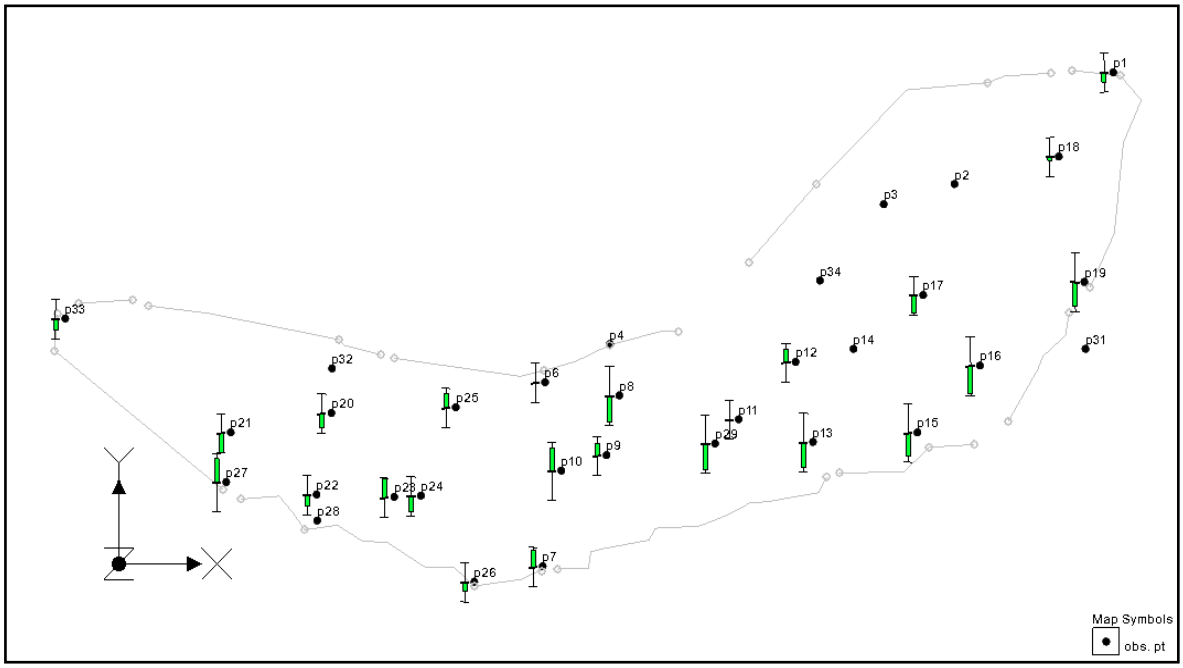
مواد و روش‌ها

از بین مدل‌های مختلف آب زیرزمینی، مدل GMS[1] مدلی توان‌مند، عمومی، و جامع برای مدلسازی آب زیرزمینی است. این نرم‌افزار رابط گرافیکی و پیش‌پرداز و پس‌پرداز برای ده نوع مدل آب زیرزمینی است که عمدتاً به روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود، به شبیه‌سازی کمّی و کیفی آب زیرزمینی می‌پردازد. این مدل را نخست دانشگاه بریگم یانگ آمریکا در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ تهیه کرد (Owen et al., 1996). MT3DMS مدل انتقال سه‌بعدی برای شبیه‌سازی فرایندهای فرارفت، پراکندگی و واکنش‌های شیمیایی سادهٔ اجزای حل‌شده در سیستم آب زیرزمینی است. این مدل را نخست ژنگ در شرکت پاپادولوس و شرکا در سال ۱۹۹۰ به‌کار گرفت (Zheng & Wang, 1999). شبیه‌سازی کیفی با مدل MT3DMS همانند مدل کمّی به دو روش شبکه و مدل مفهومی انجام می‌شود.

در این تحقیق، نخست مدل کمّی آب زیرزمینی برای آبخوان اصلی دشت شبستر– صوفیان تهیه شد. مساحت محدودهٔ مدل‌سازی ۶۲۴ کیلومترمربع است. اندازهٔ سلول‌ها در شبکه‌بندی مدل ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. داده‌های مورد استفاده نظیر تعداد، موقعیت و تراز آب پیزومترها (شکل ۲)، هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، مقدار بارش، تعداد و موقعیت چاه‌های شرب و کشاورزی (شکل ۳) و دیگر خصوصیات فیزیکی آبخوان (مانند سنگ کف آبخوان) را شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی تهیه کرده بود و در این تحقیق استفاده شد.

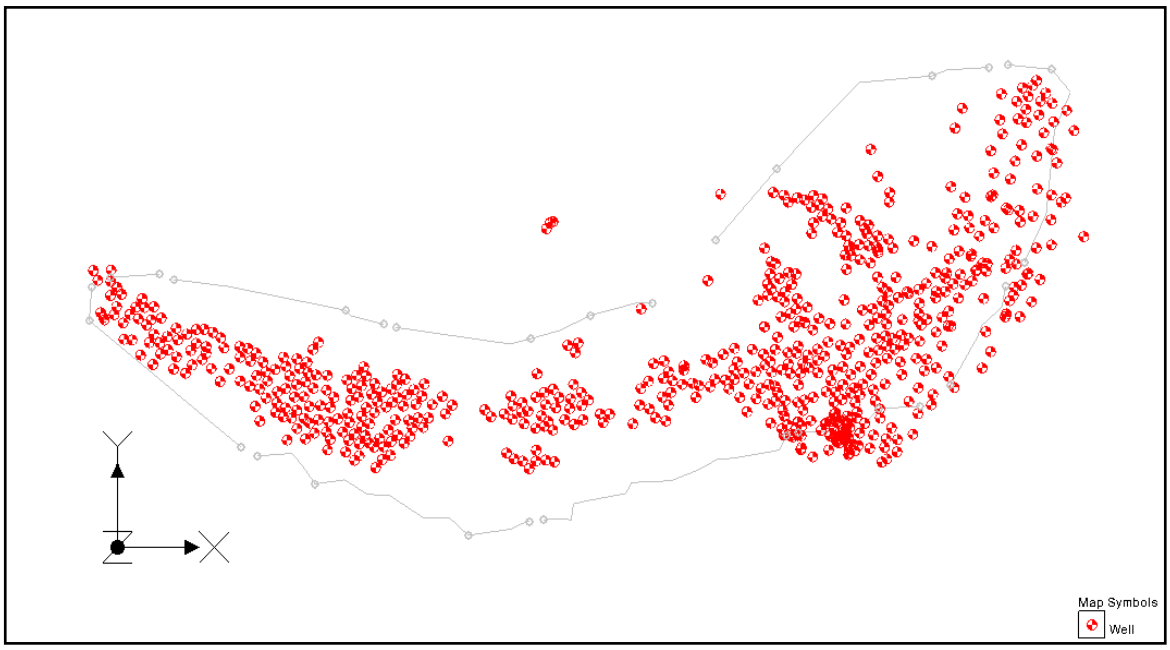
بحث

حل معادلات دیفرانسیل جزئی آب‌های زیرزمینی از طریق عددی مستلزم تعیین شرایط مرزی از نظر هیدرولیکی و استفاده از اطلاعات موجود در این مرزهاست. براساس نتایج مطالعات آب زیرزمینی، مرزهای ورودی و خروجی به مدل مشخص شد (شکل ۴). در این محدوده، مقاطع تغذیه‌کنندهٔ جانبی آبخوان در قسمت شمالی و مقاطع تخلیه‌کنندهٔ زیرزمینی در ضلع جنوبی دشت قراردارند که به‌صورت مرز با بار مشخص برای مدل تعیین شد. بازهٔ زمانی انتخابی برای مدلسازی سال آبی ۹۲–۱۳۹۱ است. از داده‌های آبان ماه به‌علت ثابت‌بودن تراز آب گمانه‌ها در این ماه (تقریباً هیچ‌گونه تغذیه یا تخلیه‌ای از آبخوان منطقه، در این ماه از سال صورت نمی‌گیرد) برای شرایط ماندگار و از مقادیر ماهانهٔ آن سال

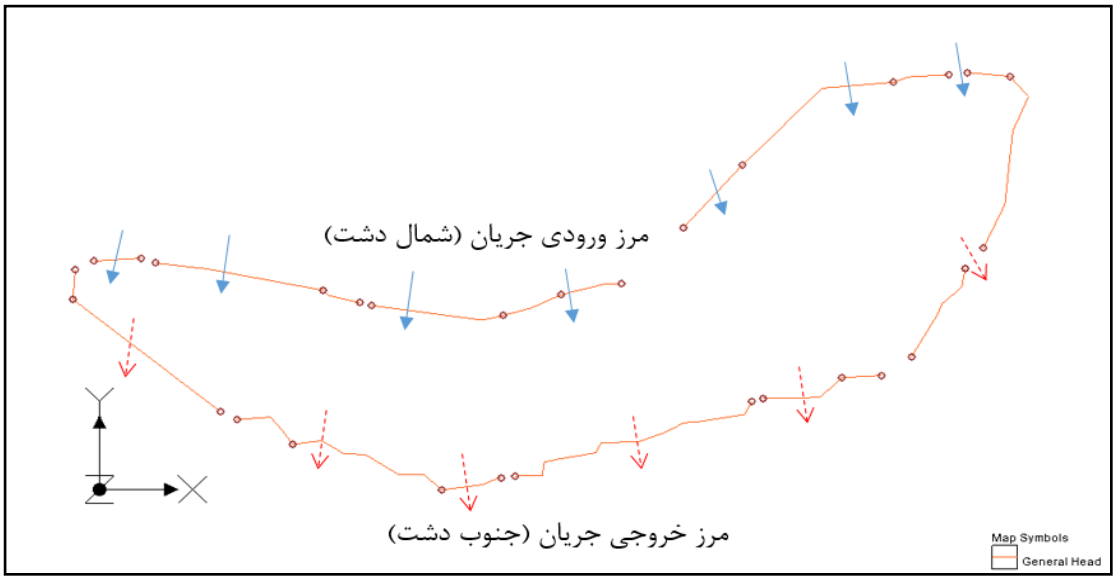


شکل ۲. توزیع چاه‌های مشاهده‌ای در سطح دشت

1. Groundwater Modeling System



شکل ۳. پراکندگی چاه‌های کشاورزی در سطح منطقهٔ مورد مطالعه



شکل ٤. مرزهای ورودی و خروجی جریان در مدل منطقه

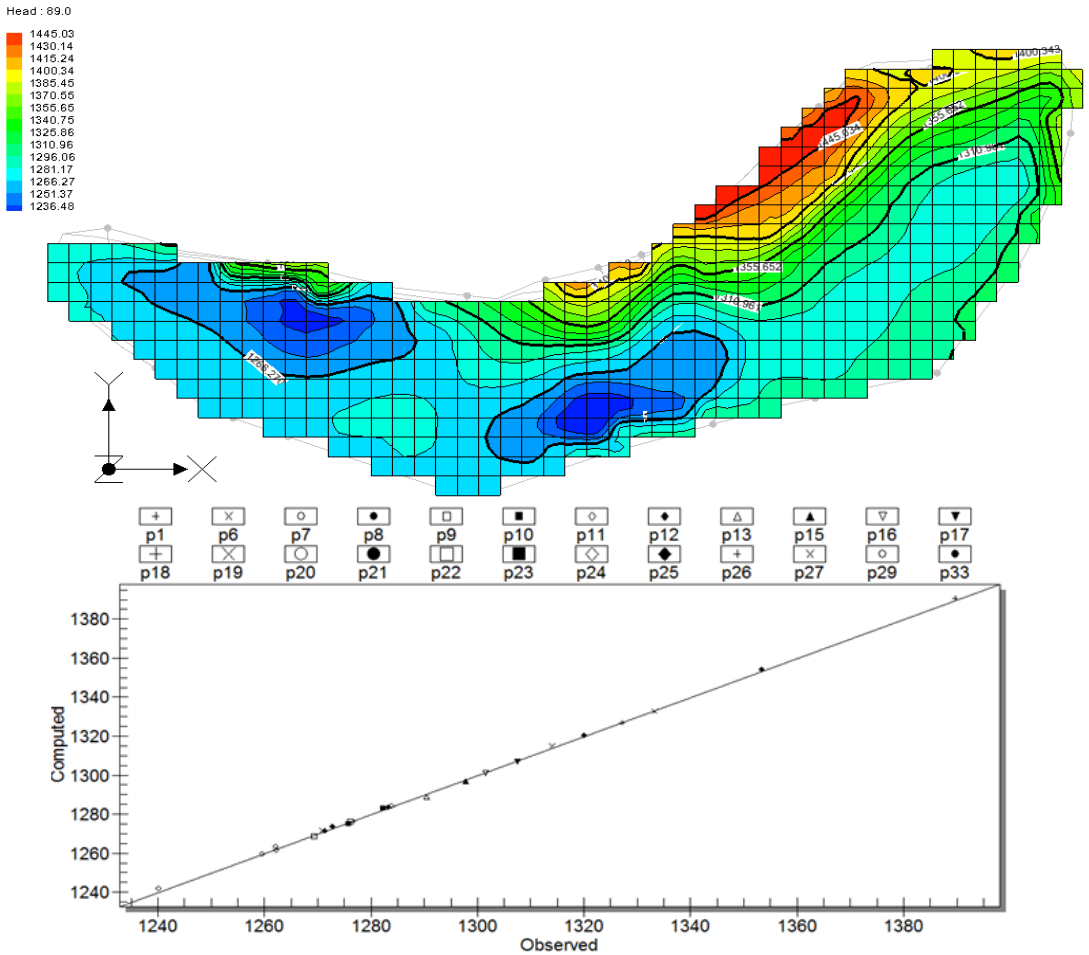
برای شرایط غیرماندگار استفاده شد. در تهیهٔ مدل کمّی دشت شبستر در حالت ماندگار از کالیبره‌کردن به‌روش سعی و خطا استفاده شد و در نهایت اوتومات پلیگونی با PEST[1] انجام گرفت.

برای شبیه‌سازی بلندمدت آبخوان در حالت غیرماندگار[2]، نیاز است تا مدل غیرماندگار به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ماهانهٔ آبخوان در محدودهٔ مطالعاتی تهیه شود. برای این منظور، مدل غیرماندگار برای سال بیلان (سال آبی ۹۲-۱۳۹۱) تهیه و کالیبره شد. برای تعیین مقادیر مرزی برای دوازده ماه سال بیلان، مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی در پیزومترهای سطح دشت برای این دوازده ماه استخراج شد و در مدل GMS براساس این مقادیر، توزیع تراز سطح آب در

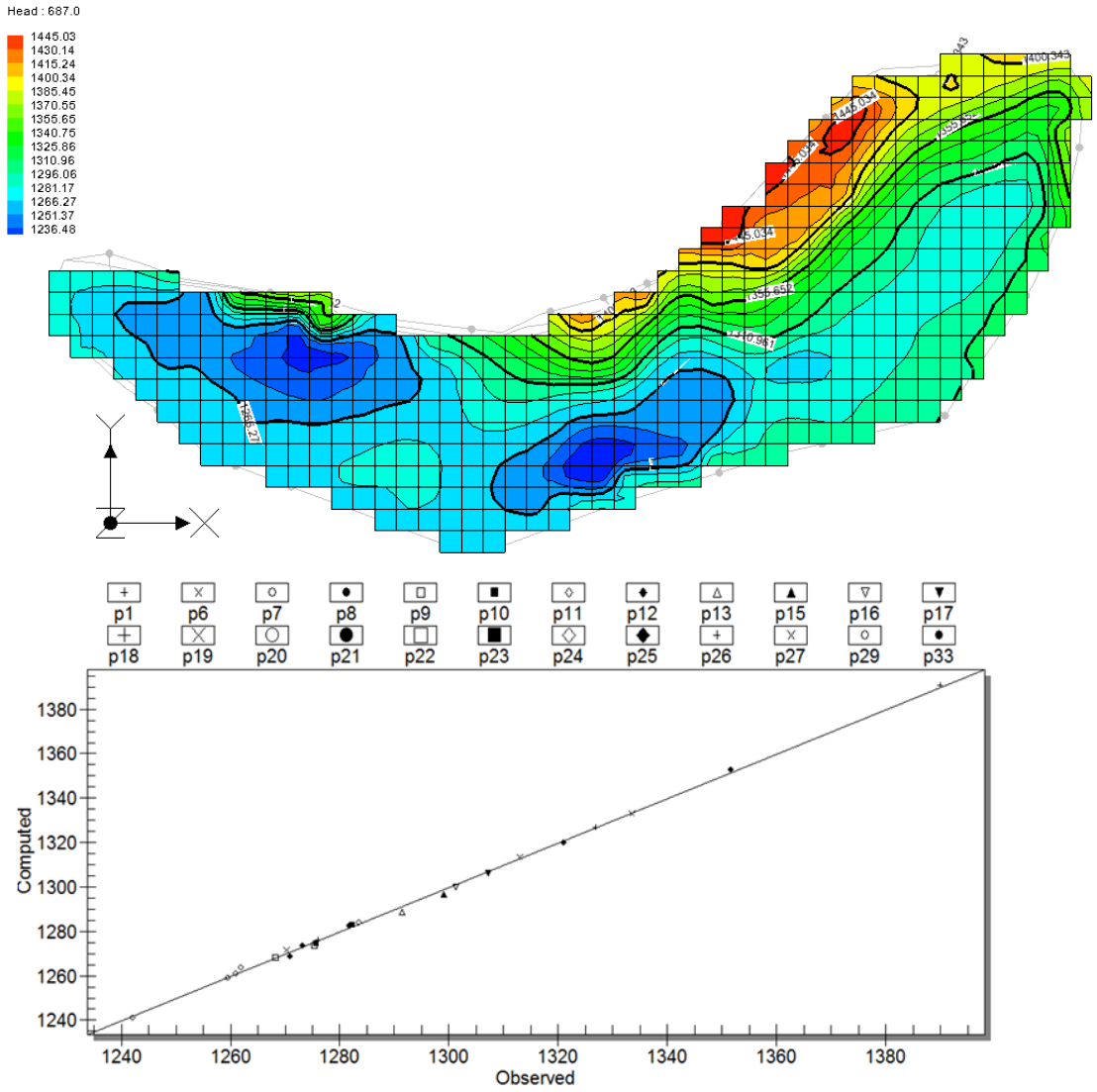
1. politic economy society trade
2. unsteady state

سطح دشت برای هر ماه تهیه و سپس مقادیر تغذیه از مرزها بر این اساس توزیع شد. توزیع ماهانهٔ برداشت‌های چاه‌ها، قنوات، مقادیر تغذیه از سطح و مقادیر آب برگشتی نیز تعیین و به مدل داده شد. با بهره‌گیری از نقشه‌های هم‌ضخامت لایهٔ آبدار سطحی و هم‌قابلیت انتقال آبخوان مقدار K تعیین شد. برای تدقیق ضرایب هدایت هیدرولیکی در مدل، از قابلیت‌های نرم‌افزار PEST استفاده شد. با استفاده از این نرم‌افزار، مقدار کالیبره‌شده ضریب هدایت هیدرولیکی در سطح مدل به‌دست آمد. مقدار آبدهی ویژهٔ آبخوان در نیمهٔ شمالی دشت ۵ تا ۸ درصد و در بخش‌های جنوبی دشت ۲ تا ۳ درصد برآورد شده است (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۶).

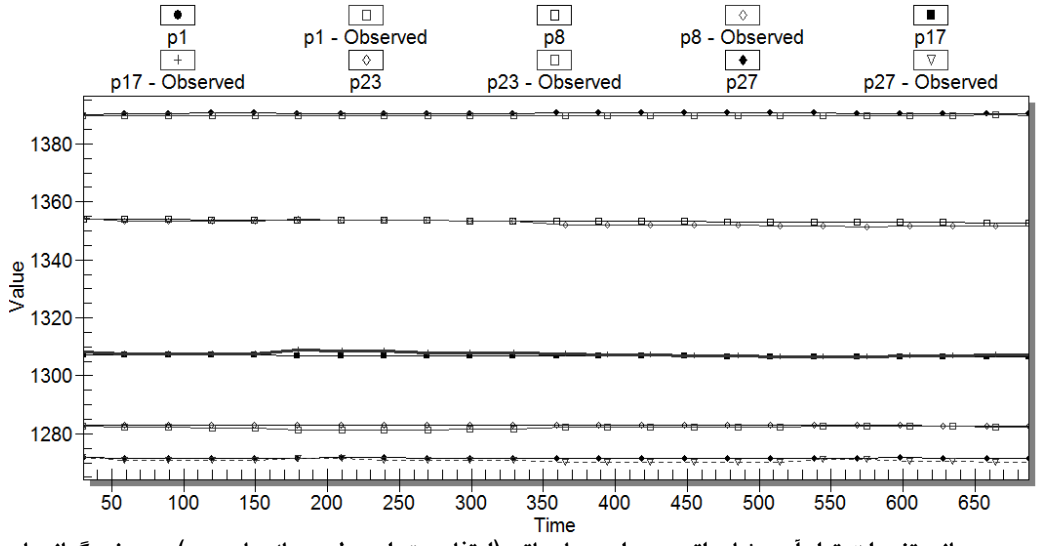
صحت مدل را می‌توان برای دورهٔ تنشی متفاوت، برای مثال دو یا سه ساله یا بیشتر از آن، آزمود. بر همین اساس داده‌های ورودی و خروجی دشت شبستر تا ۲۴ ماه (۹۳-۱۳۹۱) برای واسنجی به مدل داده شد. مقایسهٔ هیدروگراف تراز آب مشاهداتی و محاسباتی تمامی گمانه‌ها در شکل ۵ و ۶ و سری زمانی تغییرات تراز آب برخی گمانه‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج بین روند تغییرات محاسبه‌شده در مدل و تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای همخوانی قابل‌قبولی نشان داد. تراز آب پیزومترها در همهٔ موارد به‌صورت مناسبی با مدل شبیه‌سازی شده است و در هیچ مورد خطای شبیه‌سازی مدل بیش از ±۲ متر نیست (شکل ۸). بدین‌ترتیب، می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل شبیه‌سازی‌شده نمایانگر سیستم آب زیرزمینی دشت شبستر- صوفیان است و قادر خواهد بود واکنش‌های تغییرات تغذیه یا بهره‌برداری از آبخوان، همچنین اثر دوره‌های مختلف هیدرولوژیکی در نوسانات سطح آب زیرزمینی را پیش‌بینی کند. یکی دیگر از موارد کنترل صحت مدل، بررسی بیلان آب است (شکل ۹). صحت مدل با تحلیل نتایج بیلان محاسباتی، همچنین با اعمال دورهٔ تنشی متفاوت از دورهٔ تنش مرحلهٔ کالیبره‌کردن بررسی و تأیید می‌شود.



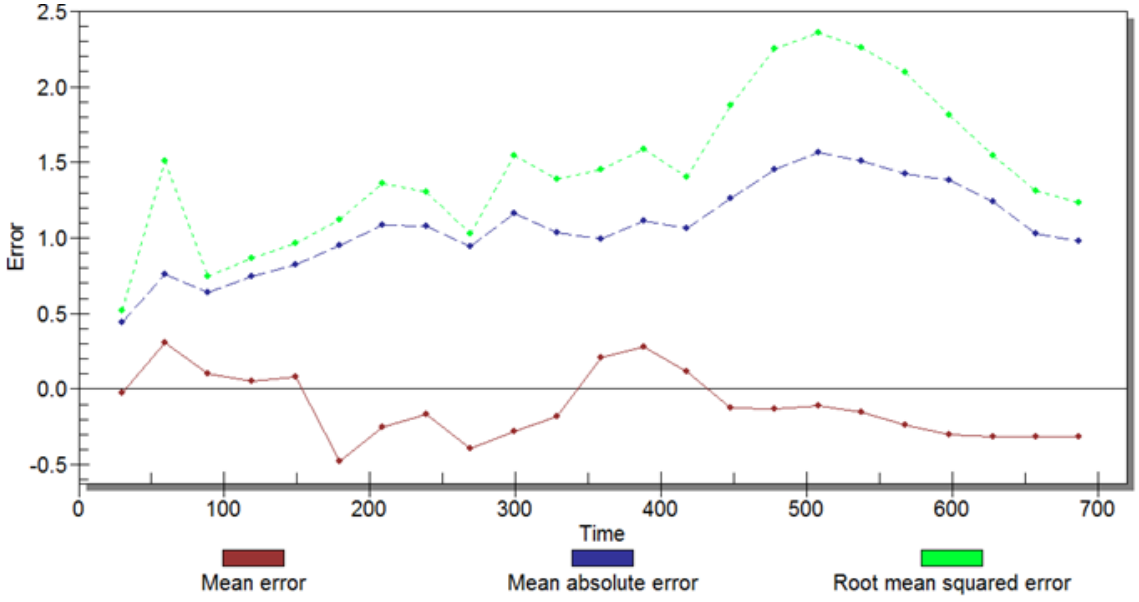
شکل ۵. تراز آب زیرزمینی محاسباتی منطقه بر حسب متر (شکل بالایی) و نمودار توزیع مقادیر محاسباتی در برابر مشاهداتی در دورهٔ تنش اول (۹۰ روز) (دورهٔ صحت‌سنجی)



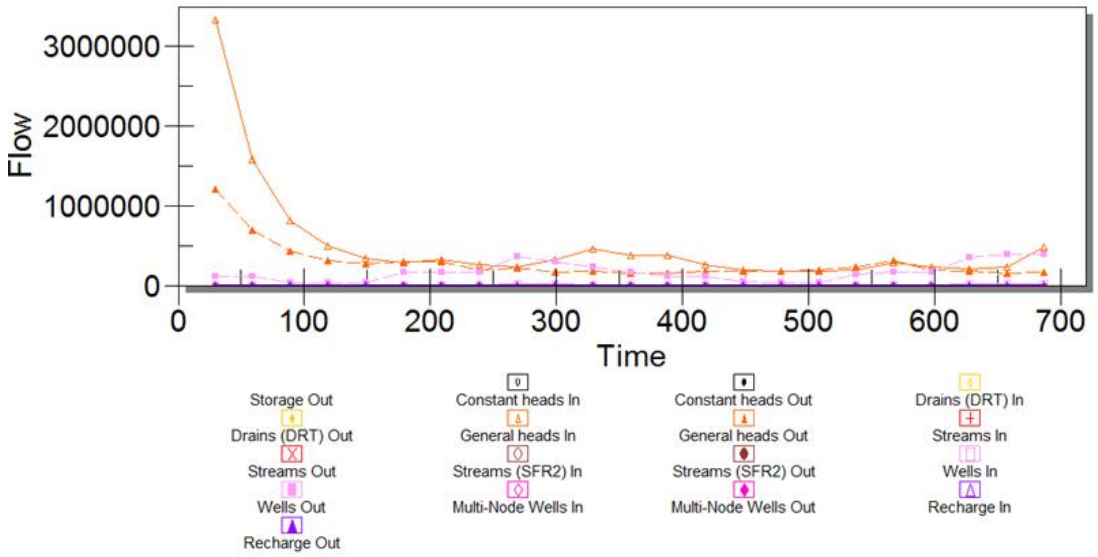
شکل ٦. تراز سطح آب زیرزمینی منطقه بر حسب متر (شکل بالایی) و نمودار توزیع مقادیر محاسباتی در برابر مشاهداتی در دورهٔ تنش هفتم (٦٩٠ روز) (دورهٔ صحت‌سنجی)



شکل ۷. سری زمانی تغییرات تراز آب مشاهداتی در برابر محاسباتی (ارتفاع: متر از سطح دریا؛ زمان: روز) در برخی گمانه‌ها

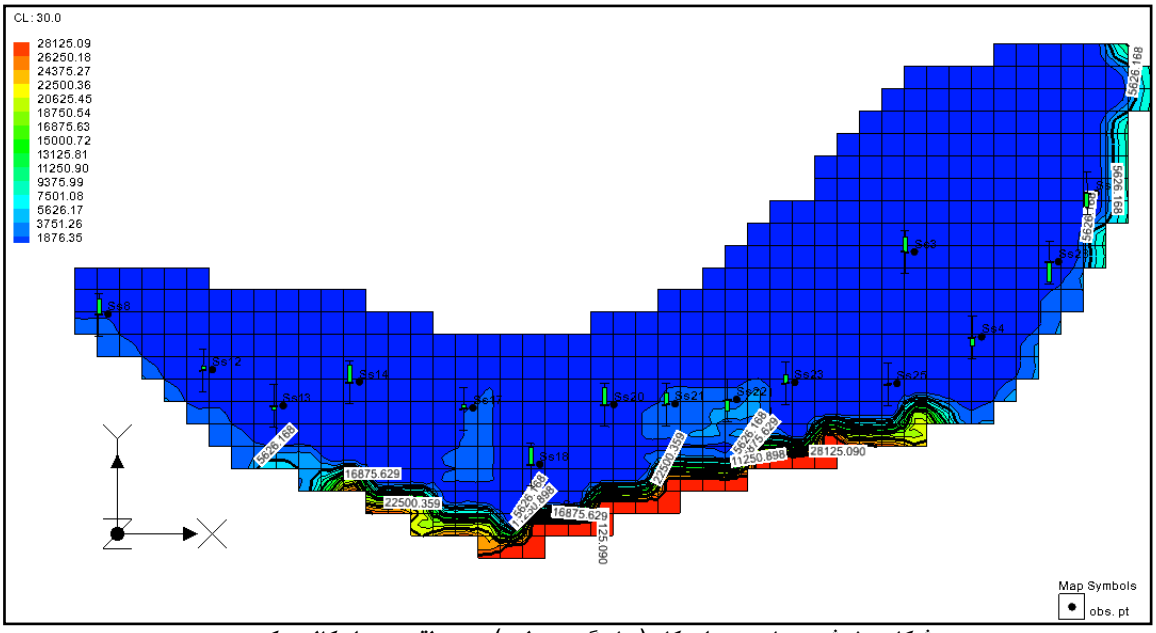


شکل ۸. میزان خطای مدل در دورهٔ کالیبره‌کردن (حالت ناپایدار) و صحت‌سنجی

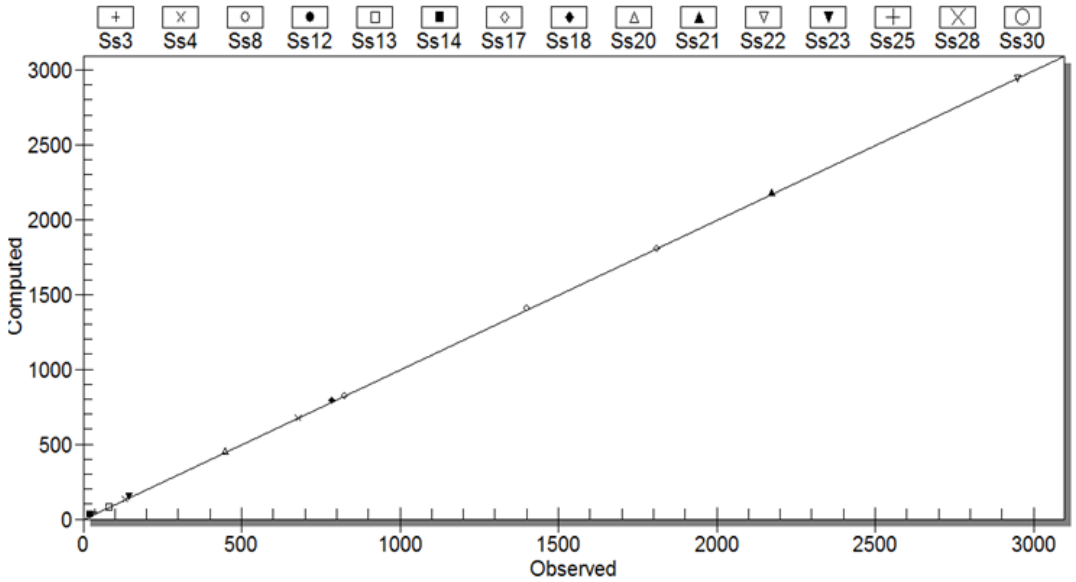


شکل ۹. نتایج بیلان محاسباتی مدل برای حالت ناپایدار بر حسب مترمکعب بر روز (کالیبره‌کردن و صحت‌سنجی)

میزان آلاینده‌هایی مانند نیترات، کلر، شوری یا مشتقات نفتی و جزآن در آب زیرزمینی را می‌توان با مدل MT3DMS شبیه‌سازی کرد. قبل از شبیه‌سازی کیفی آب زیرزمینی باید مدل کمّی منطقه را تهیه، کالیبره و نهایی کرد. بر پایهٔ چنین مدلی می‌توان مدل کیفیت آبخوان را ساخت. چهارده نقطهٔ انتخابی کیفی از سطح دشت انتخاب و میزان کلر آن در دانشگاه تبریز به‌روش تیتراکردن اندازه‌گیری و به مدل وارد شد. با توجه به اینکه منشأ اصلی کلر دشت شبستر، قسمت‌های جنوبی دشت و حاشیهٔ دریاچهٔ ارومیه است، این محدوده منبع اصلی آلودگی در منطقه لحاظ شد. تخلخل، ضریب پخش طولی و نسبت پخش عرضی و عمودی به پخش طولی نیز به مدل وارد (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۶) و در نهایت مدل اجرا شد. مطابق شکل ۱۰، به‌علت مخروط افت‌های ایجادشده و ناشی از پمپاژ بی‌رویهٔ آب زیرزمینی (شکل ۵ و ۶)، نفوذ آب شور از قسمت‌های انتهایی و یا جنوبی دشت به سمت مرکز دشت اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰. شبیه‌سازی میزان کلر (میلی‌گرم بر لیتر) در منطقه پس از کالیبره‌کردن



شکل ۱۱. توزیع میزان کلر مشاهداتی (میلی‌گرم بر لیتر) در برابر محاسباتی دشت

نتیجه‌گیری

برای مدیریت بهتر و یکپارچهٔ آب زیرزمینی در منطقهٔ شبستر از مدل GMS در تهیهٔ مدل کمّی و کیفی منطقه برای بیلان آبی سال ۹۲-۱۳۹۱ استفاده شد. طبق محاسبات مدل، در دو قسمت مرکزی و شمال‌غربی دشت بیشترین افت سطح آب زیرزمینی مشاهده شده است. با افزایش نرخ برداشت آب زیرزمینی در اثر تشکیل well field در این مناطق، شورابه‌های ذخیره‌شده در میان رسوبات انتهایی دشت (immobile zone) در نتیجهٔ حرکت مولکولی، انتقال و پخشیدگی به‌سمت چاه‌ها جریان یافت و باعث شورشدن این مناطق شد. وسعت دقیق منطقهٔ شورشده در بررسی‌های صحرایی باید بررسی و با حفر چاه‌های اکتشافی مشخص شود تا بتوان گسترهٔ ابر آلودگی را تعیین کرد و سرانجام با مدیریت صحیح بتوان مانع از گسترش بیشتر شوری در منطقه شد، زیرا با تخریب کیفیت آب زیرزمینی، کشاورزی منطقه نیز رو به افول و نابودی خواهد رفت.

منابع

احتشامی، م. و شریفی، ع. (۱۳۸۷). ارائهٔ مدل اجزای محدود به‌منظور بررسی کمّی و کیفی آبخوان شهر ری. مجلهٔ پژوهش‌های خاک، ۲۲(۲): ۲۵۷-۲۷۰.

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

مهندسین مشاور یکم (۱۳۸۶). مطالعات آب زیرزمینی دشت شبستر-صوفیان. ۲۴۳ ص.

وثوق، ع.، باغوند، ا.، ابطحی، س. و قلی‌زاده، س. (۱۳۸۸). مدل ریاضی کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت مشهد. نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، بهبهان.

Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992). Applied groundwater modeling flow and advective transport. Academic press, Inc. 381 pp.

Ehteshami, M. and Sharifi, A. (2008). Providing the finite difference model for quantitative and qualitative study of Rey aquifer. Iranian Journal of Soil Researches, 22(2): 257-270. [in Persian]

Finney, B.A., Samsuhadi and Willis, R. (1992). Quasi three-dimensional optimization model of Jakarta basin. ASCE J. Water Resour. Plan. and Manag., 118(1): 18-31.

James, G. and Wynd, J. (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. AAPG bulletin, 49(12): 2182-2245.

Gharbi, A. and Peralta, R.C. (1994). Integrated embedding optimization applied to salt lake valley aquifers. Water Resources Research, 30(3): 817-832.

Hill, M.C. and Tiedeman, C.R. (2007). Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 455 pp.

Nishikawa, T. (1998). Water-resources optimization model for Santa Barbara, California. Journal of Water Resources Planning and Management, 124(5).

Owen, S.J., Jones, N.L. and Holland, J.P. (1996). A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport. Engineering with Computers, 12(3-4): 235-242.

Rahmawati, N., Vuillaume, J.F. and Purnama, I.L.S. (2013). Salt intrusion in coastal and lowland areas of Semarang City. Journal of Hydrology, 494: 146-159.

Sherif, M., et al. (2012). Modeling groundwater flow and seawater intrusion in the coastal aquifer of Wadi Ham, UAE. Water Resources Management, 26(3): 751-774.

Stöcklin, J. (1971). Stratigraphic lexicon of Iran: Central, North and East Iran. Geological Survey of Iran.

Vosoogh, A., Baghvand, A., Abtahi, S. and Gholizadeh, S. (2009). Quantitative and qualitative simulation of groundwater in Mashhad aquifer. The first global groundwater conference, Islamic Azad University, Behbahan. [in Persian]

Yekom Consulting Engineers (2007). Study of the underground water in the Shabestar-Soofian plain. 243 pp. [in Persian]

Zamzam, A. and Rahnama, M.B. (2012). Quality assessment of Rafsenjan aquifer using MT3DMS mathematical model. Iranian Water Research Journal, 6(10): 203-207. [in Persian]

Zheng, C.M. 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. Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Research and Development Center.