بررسی تغییرات کمی و کیفی آینده آبخوان آبرفتی خاش از طریق مدلسازی عددی جریان و انتقال جرم

عطاءاله جودوی[۱] میثم مجیدی خلیل آباد[۲] ناهید مجیدی[۳] زهرا رجبیان مقدم[۴]
۱و ۲- استادیار گروه مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر
۳و۴- کارشناسی ارشد، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق (EWERI)، مشهد
تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲

چکیده

آبخوان آبرفتی خاش در استان سیستان و بلوچستان، تامین کننده آب مورد نیاز برای کشاورزی، شرب و صنعت در این محدوده می‌باشد. به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب در صورت ادامه روند کنونی و یافتن راه حل‌های مدیریت آبخوان، جریان و انتقال جرم به صورت محلول در آبخوان خاش با استفاده از کدهای MODFLOW و MT3DMS مدلسازی شد. به منظور ایجاد مدل از نرم افزار GMS نسخه ۱۰/۳ استفاده شد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل جریان در دو دوره به ترتیب هفت و سه ساله نشان داد مدل عملکرد مناسبی از نظر شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای دارد به طوری که مقدار RMSE برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۷ و ۰/۹۶ متر محاسبه گردید. سپس مدل انتقال جرم در آبخوان بر پایه مدل جریان واسنجی ایجاد و بر اساس داده‌های مشاهده‌ای غلظت کلر در هشت چاه بهره‌برداری مربوط به دوره ۱۰ ساله از مهر ماه ۱۳۸۶ تا شهریور ماه ۱۳۹۶ واسنجی شد. مدل‌های واسنجی شده برای ارزیابی دو سناریو در دوره پیش‌بینی (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۶) به کار گرفته شد. در سناریوی اول پیش‌بینی، با فرض اینکه میزان تغذیه و تخلیه از آبخوان مشابه شرایط فعلی باشد، مشخص شد که افت قابل توجهی در سطح آب اغلب نقاط آبخوان به خصوص جنوب و جنوب شرق آبخوان رخ خواهد داد. به طوری که میانگین سطح آب بیش از سه و نیم متر در طی ۱۰ سال کاهش خواهد یافت و به تبع آن یون کلر و شوری آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. همچنین در سناریوی دیگر که با هدف تعیین مقدار برداشت مطمئن از آبخوان خاش تعریف شد مشخص گردید برای رسیدن به حالت تعادل و جلوگیری از افزایش شوری، نیاز است تا برداشت از چاه‌ها به اندازه ۵۰ درصد کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی جریان و انتقال جرم به‌صورت محلول در آبخوان، شوری آب زیرزمینی، MODFLOW، MT3DMS، GMS

مقدمه

در اکثر مناطق ایران با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک آن، نیازهای آبی از جمله نیاز آب شرب و بهداشت از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. یکی از مسائل مدیریت منابع آب در ایران، اضافه برداشت از آبخوان‌ها می‌باشد که موجب بروز آثار منفی همچون تخریب کیفیت آب زیرزمینی، نشست زمین و معضلات بوم شناختی شده که به مرور تبدیل به یک معضل اجتماعی شده است (فرزانه و همکاران، ۱۳۹۵). تا کنون تجربیات مختلفی در داخل و خارج از ایران در زمینه به کارگیری مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان و فرایندهای انتقال جرم در آبخوان وجود دارد که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. جودوی و زارع (۱۳۸۸) به منظور مدیریت آبخوان فیض‌آباد (خراسان رضوی) چهار سیاست مدیریتی برای برداشت از آب زیرزمینی را به وسیله مدل ریاضی ایجاد شده بر اساس کد MODELOW مورد بررسی قرار دادند. بر پایه نتایج مدل، مشخص شد برای متوقف کردن افت سطح آب زیرزمینی در این آبخوان بحرانی لازم است میزان برداشت

[1] نویسنده مسئول: دکتر عطاءاله جودوی atajoodavi@kashmar.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

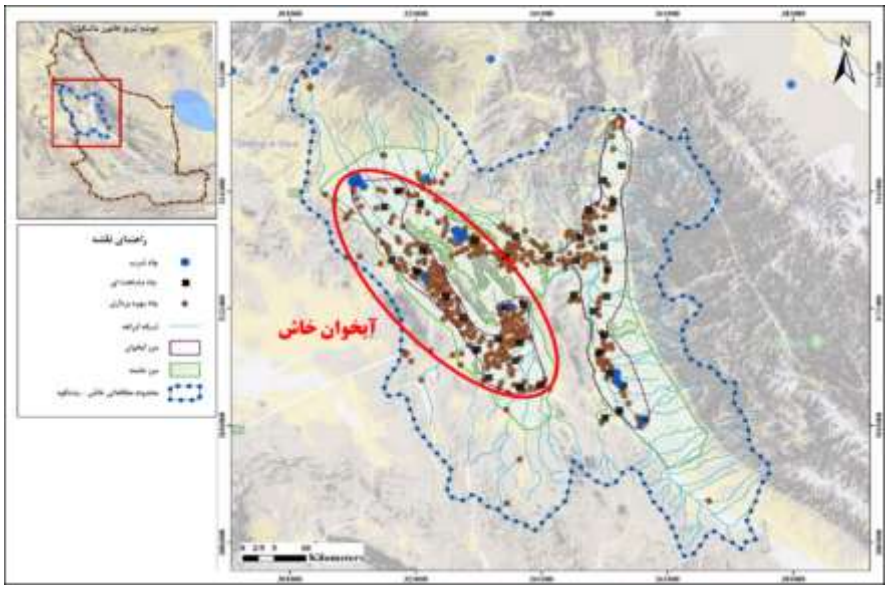
ماهانه از چاه‌ها به میزان ۴۰٪ کاهش یابد و در فصل زمستان برخلاف شرایط کنونی بهره‌برداری از آب زیرزمینی صورت نگیرد. مشهدی و باغ وند (۱۳۸۹) آلودگی ناشی از زباله‌های محل دفن بر آبخوان امان آباد اراک را با استفاده از کد MODFLOW انجام دادند. در این تحقیق مسیر حرکت آلودگی روند یابی گردید که نتایج حاصل از مدل‌سازی کیفی نشان می‌دهد که با توجه به نزدیک بودن فاصله محل قرارگیری چاه‌های آب شرب و مسیرهای حرکت آلودگی نهایتاً حرکت آلاینده‌ها به چاه‌های آب شرب منتهی می‌شود و در آینده‌ای نه چندان دور به تمام چاه‌ها می‌رسد. لذا حریم چاه‌های آب شرب نیازمند حفاظت و پایش منظم می‌باشد. چیت سازان و همکاران (۱۳۹۱) غلظت نیترات بر اثر فعالیت‌های کشاورزی در دشت رامهرمز (استان خوزستان) را با استفاده از کدهای MODFLOW و MT3DMS شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه، مدل انتقال آلودگی نیترات با استفاده از داده‌های شش ماهه از خرداد ۱۳۸۹ تا آبان ۱۳۸۹ واسنجی و طی یک دوره دو ماهه در مهر و آبان ۱۳۸۹ صحت‌سنجی شده است. نتایج حاصل از مدل نشان داد که از نظر کیفیت، با ادامه روند کنونی به زودی بیش از ۵۰ درصد آبخوان آلوده خواهد شد اما با برنامه‌ریزی مناسب می‌توان طی طولانی مدت آبخوان را پاکسازی کرد. زمزم و رهنما (۱۳۹۱) با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و MT3DMS به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت رفسنجان پرداختند. در این مطالعه پس تهیه مدل کمّی و کیفی آبخوان با انجام عملیات واسنجی مدل با استفاده از نتایج آنالیز کیفی ۶۲ حلقه چاه کشاورزی واسنجی و صحت سنجی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد پارامترهای مختلف کیفی در آب زیرزمینی منطقه خصوصاً کلر و EC در آینده روند افزایشی داشته و در طی سال‌های آتی از حد مجاز خواهد گذشت و حتی کشت و آبیاری درختان مقاوم به شوری را با مشکل مواجه خواهد نمود. قبادیان و بهرامی (۱۳۹۵) از مدل ریاضی برای شبیه سازی انتشار آلودگی چاه‌های فاضلاب در دشت خزل واقع در استان همدان استفاده کردند. در این تحقیق، مدل جریان آب زیرزمینی با کد MODFLOW در دو حالت جریان ماندگار و جریان غیر-ماندگار واسنجی و صحت‌سنجی شده است. مدل واسنجی شده برای بررسی تأثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی، آبخوان به مدت ۵ ماه پس از دوره شبیه سازی (توسط ۳۱ چاه تزریق) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آنها نشان داده است که با اجرای طرح تغذیه مصنوعی، حداکثر میزان بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی دشت به مقدار ۱۹ سانتی‌متر خواهد بود. همچنین مدل کیفی آبخوان با کد MT3DMS تهیه و برای همان دوره‌ی شبیه‌سازی جریان، با تغییر مقادیر ضریب پراکندگی طولی مواد آبخوان و ضریب توزیع (به روش سعی و خطا) واسنجی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که شعاع تأثیر چاه‌های فاضلاب در نقاط مختلف حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر می‌باشد. از دیگر مطالعات می‌توان به مطالعات مدیریت برداشت از آب زیرزمینی دشت شبستر در سمت شمال‌شرقی دریاچه ارومیه به منظور جلوگیری از پیشرفت جبهه آب شور توسط مدل کمّی و کیفی دشت با استفاده از نرم‌افزار GMS اشاره کرد (صابری مهر و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج مدل واسنجی شده نشان داد که در دو منطقه از دشت یکی در قسمت جنوبی و دیگری در قسمت شمال‌غربی دشت بعلت وجود تراکم چاه‌ها افت شدید تراز آب ملاحظه خواهد گردید. برای تخمین مسیر حرکت جبهه آب شور از کد عددی MT3DMS استفاده گردیده است که این مدل نشان داد نفوذ جبهه آب شور در قسمت جنوبی و در منطقه‌ای که افت تراز آب ایجاد شده بود، اجتناب ناپذیر است. در تعداد زیادی مطالعات در دیگر کشورها نیز از مدل‌های ریاضی بهره گرفته شده است. Baiwei و Zhonghua (2008) اثر ۳۷۲ لندفیل در استان چه‌جیانگ کشور چین بر کاهش تدریجی کیفیت آب زیرزمینی بررسی کرده‌اند. آن‌ها از کدهای MT3DMS و MODFLOW برای شبیه‌سازی مدل جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان دهنده این موضوع بود که نشت از لندفیل‌ها تأثیر بسیار زیادی بر کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه دارد. Mukhopadhyay و همکاران (2008) اثر پساب مخازن نفتی بر آلودگی آب زیرزمینی در شمال کویت را بررسی نمودند. به این منظور چهار چاه مشاهده‌ای در اطراف میدان‌های نفتی که محل دفع پساب بود حفر شد. غلظت TDS در چاه‌های مشاهده‌ای در حدود ۵۷۰۰۰ میلی گرم در لیتر بود. آنها از روش تفاضل محدود و نرم افزار visual MODFLOW برای مدلسازی جریان آب زیرزمینی و برای مدلسازی روند انتقال آلودگی (مواد شیمیایی) از MT3DMS استفاده نمودند. مدل عددی ساخته شده نشان داد آلودگی ایجاد شده توسط پساب نشتی از مخازن نفتی پس

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

از یک دوره ۵ ساله، ۸۰ تا ۸۵ متر در جهت شمال شرقی حرکت کرده و آلودگی را منتقل می‌کند. در نهایت پیشنهاد شد که محل‌های دفع پساب موجود در منطقه و یا نزدیکی آن تعطیل شده و مکان‌های جدید خارج از محدوده کنونی ایجاد گردد. Guo و همکاران (2019) از کد MT3DMS برای شبیه سازی یک برنامه پاکسازی آبخوان بهره گرفتند. همچنین Jarraya و همکاران (2020) برای ارزیابی اثر اجرای یک طرح تغذیه مصنوعی با پساب شهری بر تراز و شوری آب زیرزمینی در یک آبخوان ساحلی در کشور تونس از MT3DMS و MODFLOW استفاده کردند. آنها مدل خود را برای یک دوره ۳۱ ساله واسنجی کردند و پیش بینی‌ها توسط مدل نشان داد که با اجرای تغذیه مصنوعی، سطح آب زیرزمینی بالا آمده و از نفوذ آب شور دریا جلوگیری خواهد کرد. در نتیجه شوری آب به تدریج کمتر خواهد شد. در این مقاله با استفاده از مدل‌های ریاضی MODFLOW و MT3DMS، چگونگی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در دشت خاش بررسی شده است. پیش‌بینی تغییرات کمّی و کیفی آب زیرزمینی در آینده تحت سناریوهای مختلف توسط مدل‌های ریاضی یکی از ابزارهای مدیریت منابع آب بوده و از اهداف این تحقیق، به شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی خاش-پشتکوه در غرب استان سیستان و بلوچستان بین طول‌های ´۵۷°۶۰ تا ´۴۷°۶۱ شرقی و عرض‌های ´۴۸°۲۷ تا ´۴۰°۲۸ شمالی واقع شده است. مساحت کل محدوده مطالعاتی برابر با ۳۶۵۵/۲ کیلومتر مربع بوده است که نواحی دشتی در حدود ۱۱۷۰/۷۶ کیلومتر مربع مساحت دارد. این محدوده مطالعاتی دارای دو دشت مجزا تحت عناوین دشت خاش و دشت پشتکوه است. دشت خاش دارای آبخوان آبرفتی از نوع آزاد با وسعت در حدود ۲۸۰ کیلومتر مربع می‌باشد که در غرب محدوده مطالعاتی واقع شده است (شکل ۱). جهت جریان عمومی آب زیرزمینی در آبخوان خاش از شمال غرب به سمت جنوب شرق و شرق آبخوان می‌باشد. در این آبخوان، ۲۱۹ حلقه چاه با تخلیه ۴۳/۶ میلیون متر مکعب و دو رشته قنات با تخلیه ۰/۷ میلیون متر مکعب وجود دارد. همچنین سطح آب در ۱۵ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال اندازه‌گیری می‌شود (آبخیز گستر شرق، ۱۳۹۷).



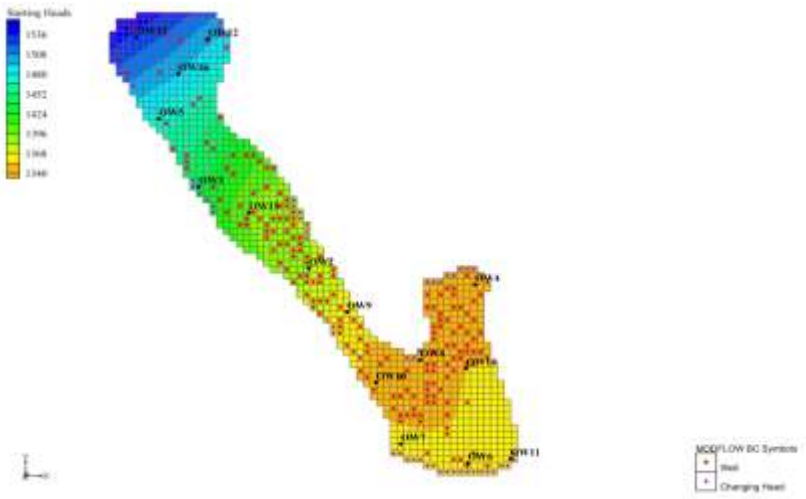
شکل (۱): موقعیت آبخوان آبرفتی خاش در محدوده مطالعاتی خاش-پشتکوه

به منظور مدلسازی جریان و تغییرات شوری آب زیرزمینی در آبخوان خاش، ابتدا مدل مفهومی کمّی و کیفی سامانه آب زیرزمینی دشت خاش تهیه گردید. هدف از تهیه‌ی مدل مفهومی، ساده‌سازی محدوده‌ی مطالعاتی و سازماندهی آمار و

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

اطلاعات موجود در آن است به طوری که بتوان سیستم منابع آب (سطحی و زیرزمینی) را به آسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد (Izady et al., 2013). به منظور تهیه مدل مفهومی، نتایج مطالعات ژئوفیزیکی، حفاری‌های اکتشافی، حفاری پیزومتر و آزمایش‌های پمپاژ جهت شناسایی شکل هندسی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در بخش‌های شمالی دشت خاش، شیب سنگ کف و تغییرات آن نسبتاً زیاد است. در بخش‌های مرکزی دشت به علت بالا آمدن سنگ‌کف ضخامت آبرفت کاهش یافته است؛ به طوری که حداقل ضخامت آبرفت دشت را در این ناحیه داریم. ولی در بخش‌های جنوبی دشت به تدریج ضخامت آبرفت زیاد می‌گردد؛ به طوری که در بعضی مناطق ضخامت آبرفت به بیش از ۸۰ متر می‌رسد. میزان قابلیت انتقال در دشت خاش بین ۷۰ تا ۲۳۰۰ متر مربع در روز تغییر می‌کند. به طوری که در بخش غربی این دشت میزان قابلیت انتقال از شمال به جنوب (بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر مربع در روز) افزایش یافته است. به دلیل عدم وجود داده‌های خام آزمایش‌های پمپاژ انجام شده در گذشته در گستره مورد مطالعه و همچنین عدم قطعیت داده‌های موجود در گزارش‌های پیشین، لاگ چاه‌های اکتشافی و پیزومتری در منطقه مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روابط تجربی و جداول شاخص موجود در این زمینه، تخمین‌های اولیه برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی آبخوان به دست آمده و در تهیه مدل آب زیرزمینی مورد استفاده واقع شدند.

پس از کسب شناخت از آبخوان آبرفتی دشت خاش (تهیه مدل مفهومی) در گام بعدی، به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در این آبخوان از کد MODFLOW استفاده گردید. برای محدوده مورد مطالعه، شبکه‌ای با سلول‌هایی به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ متر شامل ۳۸۴ سلول فعال و در یک لایه در محیط نرم افزار GMS (Groundwater Modeling System) نسخه 10.3 طراحی شد. پس از ایجاد شبکه، اطلاعات توپوگرافی سطح زمین و سنگ‌کف به مدل وارد شد و شرایط مرزی، سطح آب اولیه، مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان و مولفه‌های تغذیه (بارش و آب برگشتی کشاورزی) و تخلیه (چاه و قنات) در مدل تعریف شد.

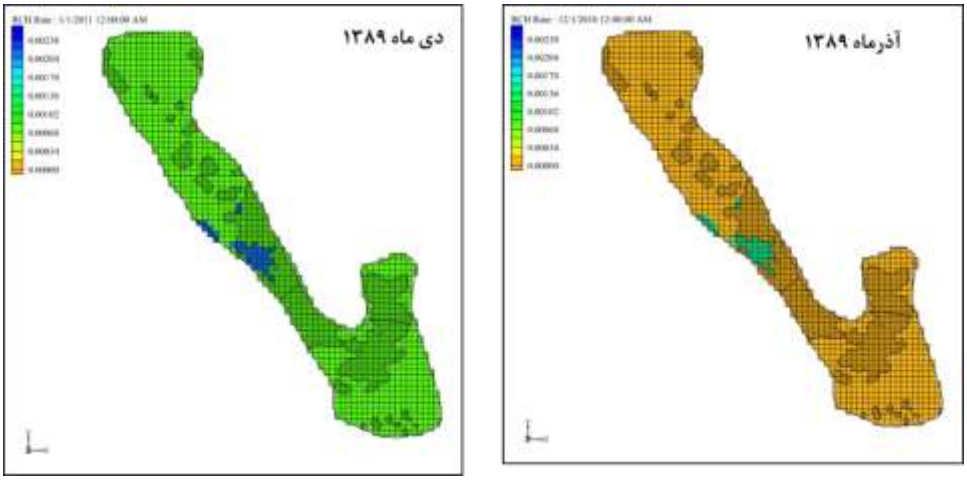


شکل (۲): شرایط مرزی و سطح آب اولیه در مدل عددی جریان آب زیرزمینی دشت خاش

برای اجرای مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی، با توجه به داده‌های موجود، گام‌های زمانی ماهانه برای ۱۰ سال (از مهرماه ۱۳۸۶ تا شهریورماه ۱۳۹۶) در نظر گرفته شد. بر این اساس مولفه‌های وابسته زمان مانند پمپاژ و تغذیه سطحی برای هر ماه تعیین و به مدل اعمال شد. لایه تغذیه در مدل حاوی مقادیر تغذیه صورت گرفته از طریق بارش‌های جوی و آب برگشتی کشاورزی می‌باشد. لازم به ذکر است در آبخوان دشت خاش سری زمانی تغذیه سطحی از بارش توسط بیلان آب-خاک محاسبه شده و برای برآورد آب بازگشتی کشاورزی ضریب ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای نمونه مقادیر تغذیه سطحی از بارش در طی دو ماه متوالی که بارش قابل توجه رخ داده است (آذر ماه و دی ماه ۱۳۸۹) در شکل (۳) نمایش داده شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

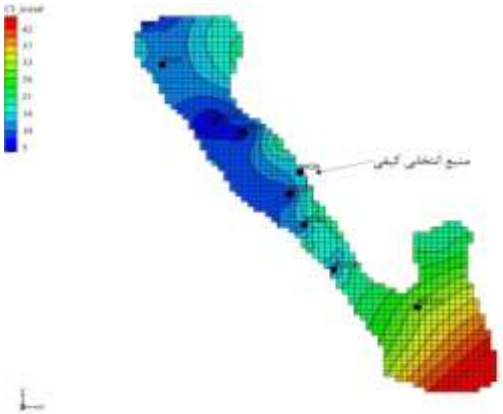
پس از اجرای اولیه مدل، مدل جریان با استفاده از اطلاعات سطح آب ۸ حلقه چاه مشاهده‌ای با تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به روش دستی (سعی و خطا) و اتوماتیک (توسط کد PEST) واسنجی شد. هدف از واسنجی بدست آوردن کمترین اختلاف بین تراز آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهده‌ای با استفاده از معیار ریشه میانگین مربعات خطای شبیه‌سازی (RMSE) در نظر گرفته شد.



شکل (۳): مقدار تغذیه ناشی از بارندگی در آبخوان خاش در دو ماه انتخابی

در این پژوهش، برای شبیه سازی انتقال جرم به صورت محلول در آبخوان (تغییرات کیفیت آب زیرزمینی) یون کلر به عنوان نماینده شوری آب زیرزمینی و یک آلاینده پایدار در آبخوان در نظر گرفته شد. مقدار یون کلر به همراه دیگر عناصر اصلی و EC و pH آب هر شش ماه یکبار در هشت حلقه چاه (منابع انتخابی کیفی) توسط شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان اندازه گیری می‌شود.

به منظور شبیه سازی تغییرات شوری، از کد MT3DMS استفاده شد که حرکت مواد محلول را با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی (بر اساس قانون بقای جرم) و با استفاده از فرآیندهای انتقال (همرفت) و پخش هیدرودینامیکی شبیه‌سازی می‌نماید (نظری و جودوی، ۱۳۹۳). میزان غلظت کلر در مهرماه ۱۳۸۶ به عنوان شرایط اولیه در حل مدل عددی به مدل اعمال شد (شکل ۴).



شکل (۴): نقشه غلظت اولیه کلر در مدل MT3DMS در مدل آب زیرزمینی خاش (یکا: میلی‌گرم در لیتر)

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

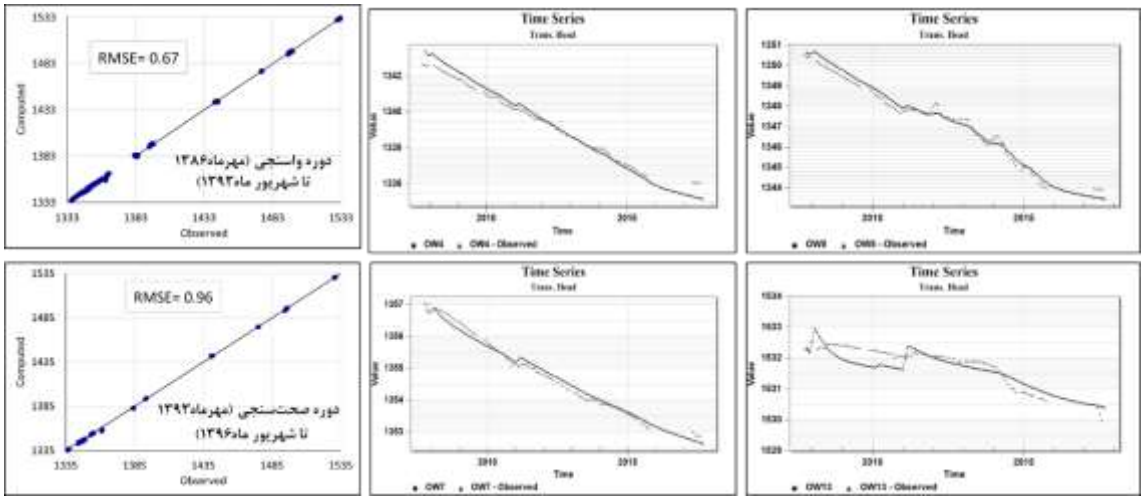
برای واسنجی مدل، سری زمانی یون کلر در ایستگاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی (منابع انتخابی کیفی) از مهر ماه ۱۳۸۶ تا شهریور ماه ۱۳۹۶ (مشابه دوره شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی) به عنوان داده مشاهده‌ای به مدل کیفی وارد شد.

پس از واسنجی مدل‌های جریان و انتقال جرم در آبخوان خاش، دو سناریو مدیریتی تعریف و اثرات آن بر آب زیرزمینی دشت خاش توسط مدل ارزیابی شد.

نتایج و بحث

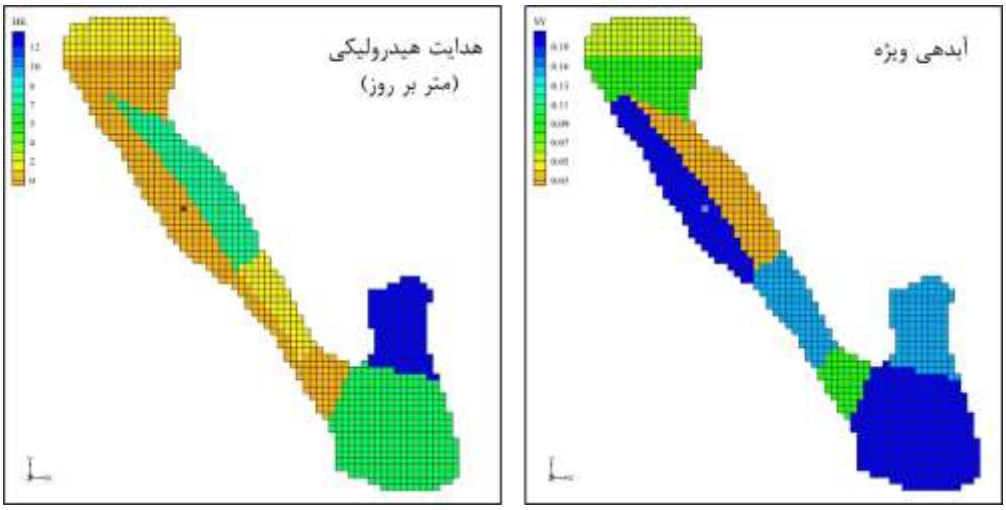
در ساخت هر مدلی، معمولا نتایج حاصل از اولین اجرا با مشاهدات اختلاف داشته و میزان این اختلاف اغلب در حد قابل قبولی نمی‌باشد؛ لذا به منظور کاهش این اختلاف، کالیبراسیون یا واسنجی مدل صورت می‌گیرد. در طی واسنجی، پارامترها و عناصر مدل مفهومی برای رسیدن به بهترین انطباق (کمترین اختلاف) بین مقادیر سطح آب مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل، تغییر داده می‌شوند. با توجه به اینکه شرایط حاکم بر آبخوان خاش طوری است که مولفه‌های جریان آب زیرزمینی وابسته به زمان هستند، واسنجی مدل ریاضی جریان در این مطالعه تنها در حالت ناپایدار برای یک دوره ۷ ساله از مهر ماه ۱۳۸۶ تا شهریور ماه ۱۳۹۳ (شامل ۸۴ دوره تنش) صورت گرفته است. واسنجی مدل ابتدا به روش دستی (سعی و خطا) و سپس به صورت اتوماتیک (توسط کد PEST) انجام گرفت تا اینکه کمترین اختلاف بین تراز آب محاسباتی و مشاهده‌ای حاصل گردد و ریشه میانگین مربعات خطای شبیه‌سازی (RMSE) به حداقل برسد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود RMSE در طی دوره واسنجی معادل ۰/۶۷ متر به دست آمده است. در نتیجه واسنجی مدل، مقادیر بهینه پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان بدست آمدند که در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند.

پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، باید نسبت به صحت و قابلیت مدل در پیش‌بینی شرایط آینده، اطمینان حاصل نمود. برای این منظور مدل باید تحت تنش و داده‌های یک دوره زمانی متفاوت از دوره واسنجی، اجرا گردد تا صحّت آن مورد تایید قرار گیرد. در این مطالعه، دوره صحت سنجی از مهر ماه ۱۳۹۳ تا شهریور ماه ۱۳۹۶ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، ضریب ذخیره و شرایط مرزی، ثابت در نظر گرفته شده؛ در واقع از همان مقادیر دوره واسنجی ناپایدار استفاده گردید. مقدار ریشه میانگین مربعات خطاهای شبیه‌سازی شده در پایان دوره صحت‌سنجی برابر با ۰/۹۶ به دست آمد (شکل ۵).



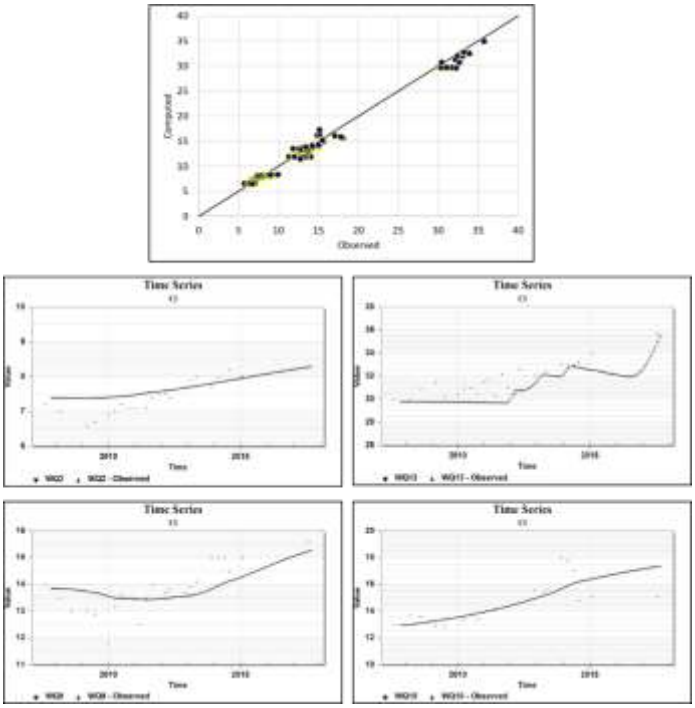
شکل (۵): مقایسه مقادیر تراز سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی در طی دوره واسنجی و صحت سنجی مدل جریان آب زیرزمینی خاش

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]



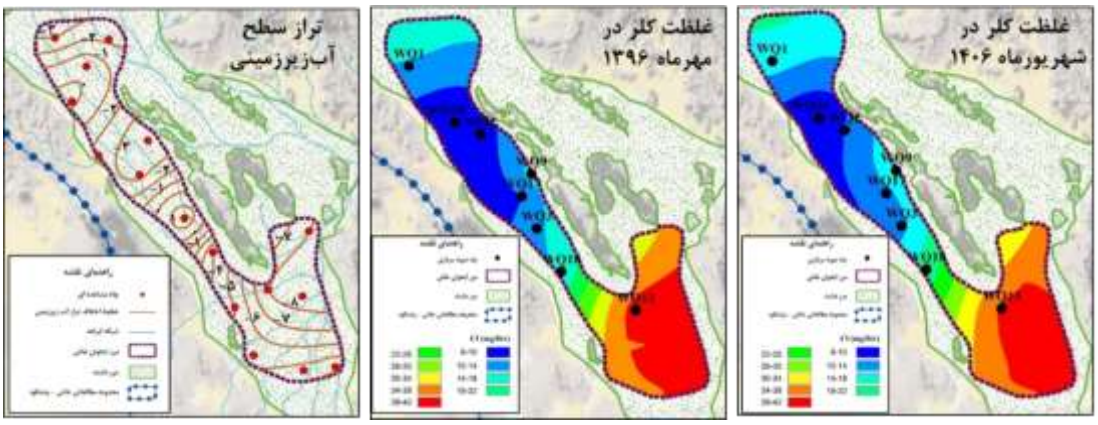
شکل (۶): مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بدست آمده از واسنجی مدل جریان آب زیرزمینی خاش

پس از اجرا و واسنجی مدل جریان آب زیرزمینی، مدل انتقال جرم به صورت محلول در آبخوان با استفاده از کد MT3DMS اجرا و واسنجی شد. با توجه به عدم وجود داده‌های مربوط به پخش (شامل پخش طولی و عرضی) در محدوده آبخوان، مقدار اولیه این پارامترها با توجه به نوع دانه‌بندی رسوبات آبخوان و استفاده از مراجع معتبر موجود به صورت اولیه برای محدوده مدلسازی تعریف گردید. در این مطالعه، غلظت کلر آب به عنوان معیار اصلی واسنجی انتخاب شده و تخلخل و پخش طولی واسنجی شد. طول دوره واسنجی در مدل کیفی متناسب با کل دوره‌ی شبیه‌سازی، ۱۲۰ دوره تنش (از مهر ماه ۱۳۸۶ تا شهریور ماه ۱۳۹۶) لحاظ شده است. واسنجی مدل ابتدا به روش دستی (سعی و خطا) و سپس به صورت اتوماتیک (توسط کد PEST) انجام گرفت تا اینکه کمترین اختلاف بین غلظت کلر مشاهده شده و غلظت محاسباتی توسط مدل به حداقل برسد. نمودار شکل (۷) نشان می‌دهد مدل توانسته نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیت را ارائه دهد به طوری که خطای محاسبه شده (برحسب RMSE) در حدود ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد.



شکل (۷): مقایسه مقادیر غلظت کلر محاسباتی و مشاهده‌ای در مدل آب زیرزمینی خاش (یکا: میلی‌گرم در لیتر)

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]



شکل (۸): تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و غلظت یون کلر در آبخوان خاش در دوره پیش‌بینی (مهر ۱۳۹۶ تا شهریور ۱۴۰۶) در سناریوی اول (ادامه روند کنونی)

با توجه به افت سطح آب زیرزمینی و افزایش شوری آبخوان در بعضی نقاط، سناریو کاهش برداشت از آبخوان به منظور رسیدن به بهره‌برداری پایدار با کاهش تخلیه چاه‌های بهره‌برداری به میزان ۵۰ درصد در مدل اعمال شد. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه گردید که مقدار افت سطح آب زیرزمینی در اثر کاهش ۵۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، کنترل شده و وضعیت آبخوان به طور نسبی به سمت پایداری خواهد رفت (شکل ۹).

شکل (۹): مقایسه تأثیر سناریو ادامه روند کنونی و کاهش ۵۰ درصد برداشت چاه‌ها (سناریوی دوم) در مقدار متوسط سطح آب زیرزمینی آبخوان خاش در دوره پیش‌بینی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط کد MODFLOW و انتقال جرم به صورت محلول برای یون کلر توسط کد MT3DMS در آبخوان خاش نشان داد که ادامه روند کنونی در برداشت از آبخوان، باعث تداوم افت سطح آب زیرزمینی در آینده خواهد شد، به طوری که میانگین سطح آب زیرزمینی در این آبخوان بیش از سه و نیم متر در طی ۱۰ سال کاهش خواهد یافت. با بررسی نتایج مدل ملاحظه شد، در آبخوان خاش افزایش غلظت کلر متناسب با افت سطح آب زیرزمینی بوده و هر چه میزان افت بیشتر شده، غلظت کلر نیز در این آبخوان افزایش می‌یابد. همچنین بررسی‌ها مشخص کرد برای رسیدن به تعادل میان عوامل تغذیه و تخلیه کننده آبخوان، نیاز است تا مقدار برداشت از چاه‌ها در حدود ۵۰

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

درصد کاهش یابد. طبق این سناریو، افت سطح آب زیرزمینی متوقف شده و وضعیت آبخوان به طور نسبی به سمت پایداری خواهد رفت.

علاوه بر این، این مطالعات نشان داد که به منظور تکمّیل/تدقیق داده و اطلاعات مورد نیاز برای مطالعات هیدروژئولوژی و مدلسازی لازم است چاه‌های اکتشافی در محدوده دشت حفر و اطلاعات مربوطه برای شناخت خصوصیات هیدرولیکی و هندسی آبخوان (اعم از موقعیت سنگ کف، هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، تخلخل و ...) از آنها کسب شود.

منابع

۱- آبخیز گستر شرق (۱۳۹۷). مطالعات مدیریت حفاظت کیفی منابع آب و مطالعات مدل‌های کمّی وکیفی و مدیریت آبخوان‌ها در محدوده خاش-پشتکوه، شرکت آب منطقه ای سیستان و بلوچستان.

۲- جودوی، ع. و م. زارع (۱۳۸۸). برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی در شرایط "groundwater mining" مطالعه موردی: دشت فیض آباد، اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۳- چیت سازان، م.، موسوی، ف.، میرزائی، ی. و س. رستگار زاده (۱۳۹۱). مدیریت کمّی و کیفی آبخوان دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی در MODFLOW و MD3DMS. زمین شناسی کاربردی پیشرفته. ۲.۵: ۱-۸.

۴- زمزم ع.، و م.ب. رهنما (۱۳۹۱). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی MT3DMS (مطالعه موردی دشت رفسنجان). نشریه پژوهش آب ایران، دوره ۶، شماره ۱۰.

۵- صابری مهر ص.، اصغری مقدم ا. و ع. ندیری (۱۳۹۶). شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت شبستر با استفاده از نرم‌افزار GMS. فصلنامه کواترنری ایران. ۳. ۱ :۴۱ -۵۱.

۶- فرزانه، م.، ع. باقری و م. رمضانی قوام آبادی (۱۳۹۵). بنیان‌های نهادی بحران در مدیریت منابع آب زیرزمینی ایران. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، ۶۴: ۹۴-۵۷.

۷- قبادیان، ر. و ز. بهرامی (۱۳۹۵). بررسی عددی اعمال سناریوهای کمّی و کیفی بر آبخوان دشت خزل استان همدان با مدل‌های MODFLOW و MT3DMS . مرتع و آبخیزداری، (4)69: 1062-1043.

۸- مشهدی میقانی، ل. و ا. باغوند (۱۳۸۹). بررسی و مدلسازی آلودگی ناشی از زباله‌های محل دفن بر آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان امان آباد). چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

۹- نظری، ر. و ع. جودوی (۱۳۹۳). مدل‌سازی کاربردی جریان و انتقال آلاینده در آبخوان. چاپ اول، نشر آفتاب عالمتاب، مشهد، ۲۴۰ صفحه.

10- Baiwei L. and Zhonghua T. *(2008). Investigation and Modeling of the Environment Impact of Landfill Leachate on Groundwater Quality at Jiaxing, Southern China*. Journal of Environmental Technology and Engineering.

11- Guo Zh., Fogg G., Brusseau, M., Labolle E. and Lopez J. *(2019). Modeling groundwater contaminant transport in the presence of large heterogeneity: A case study comparing MT3D and RWhet*. Hydrogeology Journal. 27. 10.1007/s10040-019-01938-9.

12- Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ziaei A.N., Alipoor A., Joodavi A. and Brusseau M.L. *(2013). A framework toward developing a groundwater conceptual model*. Arabian Journal of Geosciences.

13- Jarraya-Horriche F., Benabdallah S. *(2020). Assessing Aquifer Water Level and Salinity for a Managed Artificial Recharge Site Using Reclaimed Water*. Water. 12. 341. 10.3390/w12020341.

14- Mukhopadhyay A., Al-Sulaimi J. and Marie Barrat J. *(1994). Numerical Modeling of Groundwater Resource Management Option in Kuwait*, Journal of groundwater, 32.6.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]

Investigating future changes in groundwater quantity and quality in the Khash alluvial aquifer through numerical groundwater flow and solute transport modeling

Ata Joodavi[1] Maysam Majidi[2] Nahid Majidi[3] Zahra Rajabian[4]
[1&2] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran
[3&4] Department of Hydroinformatics, East Water and Environmental Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran

Received: 2020/02
Accepted: 2020/05

Abstract

The Khash alluvial aquifer, in Sistan and Baluchestan Province, supplies the water needed for agriculture, drinking, and industry in the Khash area. In order to predict the future status of groundwater level and water quality, and to find aquifer management solutions, groundwater flow and solute transport models were developed using MODFLOW and MT3DMS. GMS 10.3 was used to develop the model. Calibration and validation of the model were performed using a seven-year period and a three-year period, respectively. The results showed that the flow model has a good performance in simulating groundwater levels when compared to observational data. The RMSE values for calibration and validation periods were 0.67 m and 0.96 m, respectively. The solute transport model was established based on the groundwater flow model and was calibrated based on observational data of Cl^- concentration in eight wells over a 10-year period from October 2007 to September 2016. The calibrated models were used to evaluate two scenarios in the forecast period (2016-2026). In the first prediction scenario, assuming the aquifer recharge and discharge rates are similar to the current condition, it was found that a significant drawdown in water levels will occur in most parts of the aquifer, especially south and southeast of the aquifer. As a result, the average water level will drop by more than 1.5 meters over 10 years, and consequently, Cl^- concentration and groundwater salinity will increase. In the other scenario, which was defined to determine the safe yield of groundwater, it was found that to reach equilibrium and prevent increases in salinity, groundwater withdrawals from wells should be reduced by 50%.

Keywords: Groundwater flow and solute transport modeling, groundwater salinity, MODFLOW, MT3DMS, GMS

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.6.0]