

ارزیابی آثار آتشفشان بر تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل سازی کمی و کیفی آبخوان خاش

هادی عاقبت‌بخیر^۱، مهدی سرائی تبریزی^{۲*} و حمید کاردان مقدم^۳

چکیده

کیفیت منابع آب زیرزمینی، با توجه به لزوم بهره‌برداری و نوع مصرف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آبخوان‌هایی که در مجاورت آتشفشان‌ها واقع شده‌اند، تحت تأثیر این منابع، رفتارهای مختلفی از خود نشان می‌دهند. این نوع آبخوان‌ها بسیار آسیب‌پذیر هستند و کیفیت آب آن‌ها، تحت تأثیر منابع آلاینده‌های آتشفشانی قرار دارد. در این پژوهش وضعیت کیفی آبخوان خاش تحت‌تأثیر کوه آتشفشان تفتان، در بخش جنوبی مورد تحلیل کیفی شده است. بدین منظور با استفاده از نمونه‌برداری کیفی از چاه‌های منتخب منطقه از مدل MT3D برای شبیه‌سازی کیفی آبخوان در طول یک دوره ۵ ساله برای دو پارامتر کیفی TDS و سولفات استفاده شد. بررسی نتایج مدل آبخوان نشان داد که بخش جنوبی آبخوان تحت‌تأثیر جریان‌های تغذیه‌کننده زیرزمینی از بخش شمالی بوده که از ارتفاعات تفتان سرچشمه می‌گیرد. این جریان‌های تغذیه‌کننده زیرزمینی باعث انتقال املاح و افزایش غلظت دو پارامتر کیفی TDS و سولفات می‌شود که در مدل کیفی، MT3D نیز حاکی از این موضوع است. نتایج شبیه‌سازی کیفی نشان داد که در بخش جنوبی آبخوان غلظت TDS بیش از ۱۲٪ و غلظت سولفات ۳۰٪ افزایش داشت. این افزایش علاوه بر عدم مدیریت بهره‌برداری، وجود جریان‌های زیرزمینی را نیز نشان می‌دهد که باعث تشدید وضعیت دخالت انسانی شد. بررسی‌ها نشان داد که میزان گاز در منابع آب زیرزمینی در بخش شمالی آبخوان بالا و این افزایش سبب اسیدی شدن منابع آب زیرزمینی منطقه نیز شد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های لایه آبدار، اسیدی، سولفات، MT3D، TDS.

ارجاع: عاقبت‌بخیر ه. سرائی تبریزی م. و کاردان مقدم ح. ۱۳۹۹. ارزیابی آثار آتشفشان بر تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل سازی کمی و کیفی آبخوان خاش. مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۱۴۱-۱۵۲.

1- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

2- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

3- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: m.sarai@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: 1399/02/08

تاریخ دریافت: 1398/12/15

مقدمه

در کشور ایران علی‌رغم داشتن سواحل شمالی و بخش‌های غربی که میزان نزولات جوی مناسبی دارد، در بیشتر مناطق کشور پراکنش مناسب زمانی و مکانی بارش وجود ندارد. این موضوع باعث شده تا حجم وسیعی از کشور از منابع آب زیرزمینی برای بهره‌برداری در مصارف شرب، کشاورزی و صنعت استفاده کنند. این موضوع در کنار توسعه‌های صورت گرفته، سبب شده است تا میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی رشد بدون مدیریتی داشته باشد و سبب کمبود کمی و کیفی در آبخوان‌ها شود. مطالعات USGS برای ارزیابی منابع آلاینده در منابع آب، نشان می‌دهد مشکلات کیفی آبخوان‌ها ناشی از دو دسته عوامل طبیعی و عوامل ناشی از فعالیت‌های انسانی طبقه‌بندی می‌شود. در بسیاری از موارد، عوامل انسانی باعث تشدید مشکلات کیفی ناشی از عوامل طبیعی می‌شود. تبادل شیمیایی آرسنیک و کروم در آبخوان، تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف دریا و مناطق شور، آثار کیفی وقایع طبیعی مثل آتشفشان، تغییرات حرکت زمین در اثر زلزله و غیره، از جمله عوامل طبیعی هستند که در برخی از این موارد فعالیت‌های بشر نیز باعث تشدید وضعیت کیفی می‌شود. اضافه برداشت از آبخوان‌ها باعث افت آبخوان، کاهش گرادیان هیدرولیکی و در برخی مواقع معکوس شدن جریان آب زیرزمینی می‌شود. این موضوع به‌خصوص در آبخوان‌هایی که منتهی به یک منبع آلاینده مثل آب دریا یا کویر است، باعث هجوم جبهه‌های آب شور و شورشدن آبخوان می‌شود. بر این اساس مطالعات مختلفی برای بررسی وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی با توجه به منابع آلاینده در مناطق مختلف انجام شده است. رهنما و زمزم (۲۰۱۳) به ارزیابی پارامترهای کیفی آبخوان رفسنجان، رحیمزاده و همکاران (۱۳۹۵) ارزیابی و پیش‌بینی غلظت نیترات را در آبخوان بیرجند، کاردان‌مقدم و بنی‌حبیب (۱۳۹۶) ارزیابی غلظت TDS را در آبخوان سرایان، گیو و همکاران (۲۰۱۹) ارزیابی وضعیت کیفی یک سایت آلوده را در فرودگاه بین‌المللی توسان با استفاده از دو مدل MT3DMS و RWHEAT، جوادی و همکاران (۲۰۱۸) ارزیابی غلظت کلراید را در آبخوان اردستان و یوسفی و همکاران (۱۳۹۸) ارزیابی کیفی ناحیه اختلاط بین آب سطحی و زیرزمینی را در آبخوان فومنات بررسی کردند. همچنین الترابیلی و

همکاران (۲۰۱۷) به شبیه‌سازی میزان تأثیر کودهای ازته ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و آلودگی آن بر آبخوان پرداختند. نتایج نشان داد تأثیر کودهای ازته در آبخوان‌های کم‌عمق، بیشتر است. بررسی‌های کیفی منابع آب زیرزمینی نشان داده است که علاوه بر اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی وجود یک منبع در افزایش غلظت آلاینده تأثیرگذار بوده است. تأثیر فاضلاب شهری، روستایی و پساب کشاورزی بر کیفیت آبخوان، اضافه برداشت از آبخوان و کاهش نسبت غلظت نمک به حجم آب، نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه، تهاجم آب شور از طرف دریا، تهاجم آب شور از بخش کویری خروجی آبخوان از جمله منابعی که در غلظت آبخوان تأثیرگذار بوده است. بررسی جامع این مطالعات نشان می‌دهد در اکثر موارد نقش انسان بسیار پررنگ بوده و فرآیندهای طبیعی کمتر در تغییرات کیفی آبخوان دخالت داشته است.

از عواملی که نقش مهمی در کیفیت منابع آب زیرزمینی دارد کوه‌های آتشفشانی است که در این زمینه مطالعات مختلفی بر تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی انجام شده، اما نقش جریان‌های زیرزمینی و انتقال آلاینده‌ها بررسی شده است. مطالعات انجام شده اکثر روی نقش سازندهای آتشفشانی بوده و اثر جریان‌های تغذیه‌کننده آبخوان ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی به‌خصوص در یک آتشفشان نیمه فعال بررسی شده است. برزگر و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی عوامل طبیعی مؤثر بر کیفیت آب رودخانه آجی‌چای پرداختند و نتایج آنان نشان داد که بخشی از حوزه آبریز رودخانه از نظر کیفی تحت تأثیر هوازدگی سازندهای آتشفشانی قرار داشته است. این موضوع بر اساس تحلیل کیفی با استفاده از نمودار پایپر ارزیابی شد. ارتورک و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبریز دریاچه اگدیریر که بخشی از آن سازندهای آتشفشانی است، پرداختند و غلظت بالای فلوراید در آب دریاچه را ناشی از هوازدگی و عبوری از این سازندها بیان داشتند. دی‌الساندرو و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی انتخابی در حوزه کوه آتشفشان متانا در یکی از جزایر یونان پرداختند. تحلیل کیفی منابع آب منطقه نشان داد تنها شوری آب نسبت به سایر پارامترها بالا بوده است که بخشی از آن ناشی از آب شور دریا و بخشی دیگر مربوط

کیلومترمربع شامل دو دشت یکپارچه به نام‌های دشت خاش و دشت پشتکوه است که حوضه خاش درون این دشت واقع شده است. مساحت آبخوان خاش ۴۷۱/۲۷ کیلومترمربع بوده و این آبخوان فاقد مرز فیزیکی و تنها دارای مرز هیدرولیکی است که شامل ۳ جبهه ورودی و یک جبهه خروجی آب زیرزمینی به صورت زهکش است. تعداد ۱۸ حلقه چاه مشاهده‌ای جهت ارزیابی تغییرات تراز آب زیرزمینی و افت آبخوان به صورت ماهانه اندازه‌گیری می‌شوند. ۲۳۱ حلقه چاه بهره‌بردار، ۱۶ رشته قنات و یک دهنه چشمه در محدوده آبخوان واقع شده و میزان کل تخلیه از این منابع برابر ۷۸/۲۶ میلیون مترمکعب است (گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی خاش، ۱۳۹۶). شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی خاش در حوضه هامون تشکیل را نشان می‌دهد.

آب مصرفی شرب اهالی شهرستان خاش از طریق منابع آب زیرزمینی (چاه) تأمین می‌شود. بر اساس مطالعات بیلان منابع آب منطقه، بیش‌ترین حجم آب وارده به آبخوان خاش از دامنه جنوبی آتشفشان تفتان تغذیه می‌شود. حجم آب ورودی از این ناحیه که از حاشیه جنوبی ارتفاعات تفتان جریان می‌یابد، با توجه به بیلان آبخوان حدود ۲۳ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده است. همچنین دره‌های سمت شرقی و مسیل‌های ورودی قسمت غربی دشت نیز در تغذیه سفره آب زیرزمینی خاش بی‌تأثیر نیستند. بر اساس آخرین گزارش بیلان منابع آب منطقه، این آبخوان با کسری مخزن نزدیک به ۲۰ میلیون مترمکعب در سال مواجه است (آمار اطلاعات پایه این پژوهش برای مدل‌سازی، بر اساس بازدیدهای محلی، مذاکرات حضوری با کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان و آخرین گزارش بیلان منابع آب به روزرسانی شده در سال ۹۶ شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان است).

متدولوژی پژوهش

پس از بررسی نقشه‌های هوایی حوضه خاش و شناسایی این آبخوان از نظر ساختار زمین‌شناسی و دوره‌های زمین‌شناسی، برای تعیین اثر فعالیت‌های آتشفشان بر کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی، دوازده حلقه چاه نمونه‌برداری که پراکنش مکانی مناسبی در سطح آبخوان داشته باشند، انتخاب شدند. در شکل ۲ موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده نمایش داده شده است.

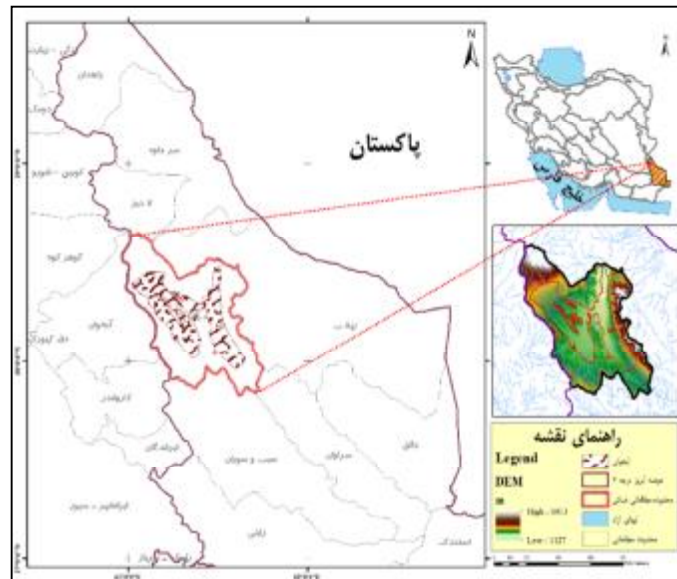
به فعالیت‌های آتشفشانی و انحلال در جریانات زیرزمینی تغذیه‌کننده منطقه است.

این مطالعه با محوریت نقش آتشفشان‌ها و انتخاب آتشفشان نیمه‌فعال تفتان بر کیفیت منابع آب زیرزمینی پایین‌دست تحت تأثیر جریانات زیرزمینی تغذیه‌کننده انجام شده است. این کوه آتشفشانی، مهم‌ترین کوه آتشفشانی کشور است که در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه منابع انرژی زمین‌گرمایی و کانی‌سازی آتشفشان تفتان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب (بومری، ۱۳۸۴)، زمین‌آب شیمی و زمین‌دماسنجی چشمه‌های آب گرم و معدنی دامنه جنوبی و جنوب غربی تفتان (شاکری، ۱۳۸۴)، بررسی پتانسیل آلودگی آبخوان خاش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی پژوهش‌هایی صورت گرفته است (احمدی و آبرومند، ۱۳۸۸). با توجه به پتانسیل این منطقه از نظر بهره‌برداری، لزوم ارزیابی کیفیت منابع آب و نقش عوامل مختلف در شناسایی منابع آلاینده بسیار حائز اهمیت است. مطالعات مختلف انجام شده نشان داده که کیفیت منابع آب زیرزمینی تحت‌تأثیر منابع آتشفشانی است و این منابع می‌تواند تأثیر بسزایی بر کیفیت آبخوان داشته باشد. هدف این مطالعه ارزیابی وضعیت کمی و کیفی آبخوان، ارزیابی شیوه تغذیه آبخوان ناشی از جریانات زیرزمینی جریان یافته از منطقه آتشفشانی و پیش‌بینی وضعیت آبی کیفیت آبخوان است. نتایج این مطالعه می‌تواند به شناسایی شیوه پخش و انتقال آلودگی در آبخوان کمک کند و بر اساس این نتایج، راهکارهای عملی را برای تعدیل جریانات زیرزمینی با کیفیت نامناسب پیشنهاد کرد.

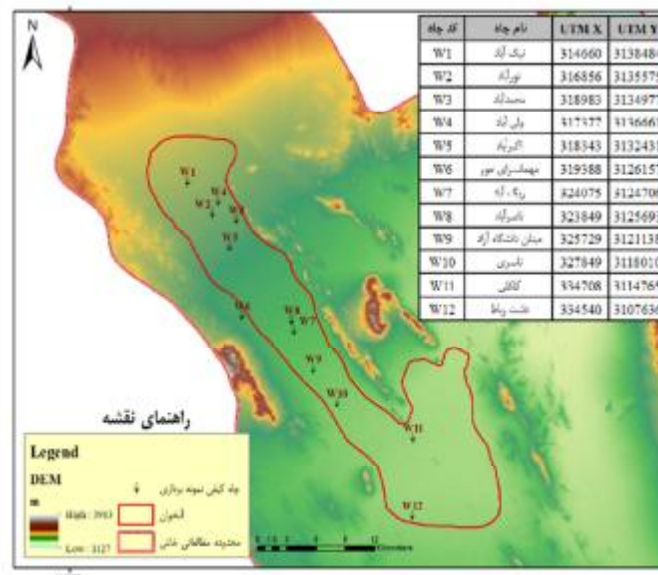
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخوان خاش در پایین‌دست کوه تفتان در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. منبع اصلی تأمین آب در این آبخوان، از منابع آب زیرزمینی برای تأمین مصارف است. امتداد و شیب این آبخوان از شمال غربی به جنوب شرقی و طول تقریبی ۵۰ کیلومتر و عرض متوسط ۵ تا ۹ کیلومتر توسط ارتفاعات احاطه شده است. آبخوان خاش در دامنه جنوبی قلّه تفتان بین طول‌های ۶۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۶۲ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۷ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و تقریباً در مرکز این دشت قرار دارد. مساحت این محدوده ۳۶۹۴



شکل ۱- موقعیت آبخوان خاش در محدوده حوضه آبریز و محدوده مطالعاتی هامون مشکیل



شکل ۲- موقعیت چاه‌های نمونه برداری شده در سطح آبخوان خاش

مرجع شرکت آب و فاضلاب استان تهران انتقال و اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج اندازه‌گیری شده، برای تحلیل مدل کیفی آبخوان از مدل MT3DMS در نرم‌افزار GIS استفاده شد. با توجه به بررسی روند تغییرات برای شبیه‌سازی در مدل کیفی، یک دوره ۵ ساله از ابتدای سال آبی ۱۳۹۰ انتخاب و داده‌های کیفی نیز به صورت شش ماهه اخذ شد. برای شبیه‌سازی کیفی و نقش آتشفشان در جریان‌ات تغذیه‌کننده آبخوان و پیش‌بینی وضعیت آبی، دو پارامتر سولفات و کل جامدات محلول انتخاب شد.

برای ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی این آبخوان تعداد دوازده حلقه چاه بهره‌برداری برای نمونه‌برداری انتخاب شد. با توجه به آمار ثبت شده در آرشیو آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان، نمونه‌برداری در دو فصل تر (آبان) و فصل خشک (اردیبهشت) انجام شد. پارامترهای pH، کدورت، دما، TDS در محل و توسط دستگاه پرتابل WTW انجام شد. برای اندازه‌گیری سایر خواص شیمیایی و فیزیکی، کاتیون‌ها، آنیون‌ها و فلزات سنگین، نمونه‌گیری در ظروف مخصوص برداشت و توسط اسید نیتریک ثابت شده و سپس در سریع‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه

شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان

مهم‌ترین هدف شبیه‌سازی کیفی یک آبخوان، دستیابی به نتایجی برای مدیریت و پایش آب زیرزمینی است. بر این اساس پیش‌بینی وضعیت آتی کیفیت آبخوان در اثر برداشت آب، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و بررسی وضعیت پیشروی جبهه‌های آب شور به‌عنوان اهداف اصلی شبیه‌سازی کیفی مطرح هستند. مدل انتقال آلودگی در آبخوان تحت مکانیزم‌های تبادل^۱ و پراکندگی^۲ با فرض همگن بودن، ایزوتروپ بودن و اشباع بودن محیط، شبیه‌سازی را انجام می‌دهد. با توجه به قانون دارسی و در نظر گرفتن موازنه جرمی^۳ روی یک حجم کنترل، در نهایت معادله زیر حاصل می‌شود (انگ و همکاران، ۲۰۱۲):

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (V_m \cdot V) + \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z \cdot C) \right] = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

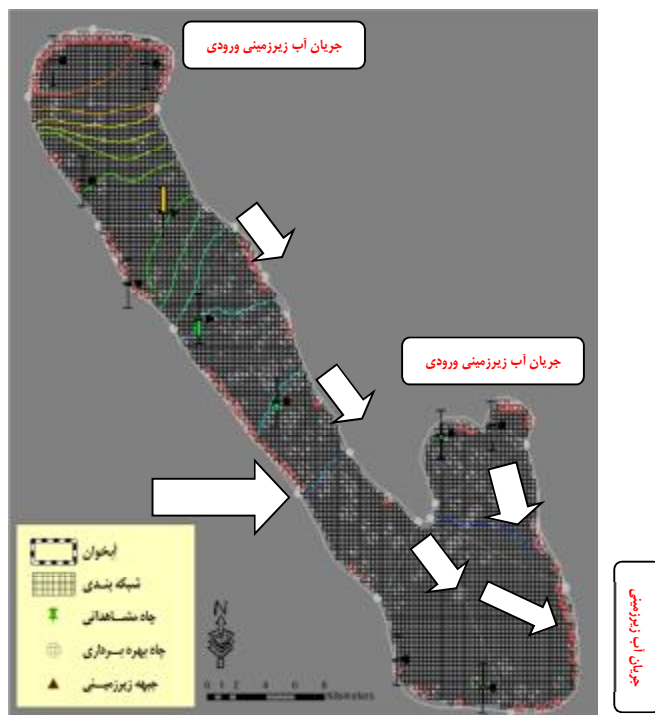
معادله فوق یک معادله سه بعدی انتقال جرم برای یک مادهٔ محلول پایدار است.

شبیه‌سازی آبخوان شامل دو مرحله شبیه‌سازی کمی آبخوان که با مدل MODFLOW و شبیه‌سازی کیفی آبخوان با مدل MT3D با استفاده از نرم‌افزار GMS10.4 انجام گرفت. بر این اساس مدل مفهومی آبخوان تهیه و بر اساس آن از هفت لایه اطلاعاتی برای ورود داده‌های مرز آبخوان، چاه مشاهده‌ای، چاه‌ها، تغذیه سطحی، زهکش، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره وارد شد. برای اعمال مقادیر هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب ذخیره (S_y)، سطح دشت بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اطلاعات آزمون پمپاژ به بخش‌های مختلف تقسیم و مقادیر اولیه به‌صورت تخمینی به آن‌ها اختصاص داده شد. برای شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی شبکه‌بندی آبخوان به‌صورت شبکه ۲۵۰*۲۵۰ متر وارد مدل MODFLOW شد. گام زمانی شبیه‌سازی کمی آبخوان با توجه به آمار تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده به‌صورت ماهانه و از مهرماه ۱۳۹۰ شبیه‌سازی آغاز شد. در دوره غیرماندگار نیز شبیه‌سازی تا شهریور ۱۳۹۵ به مدت ۶۰ گام زمانی انجام گرفت. در مدل مفهومی آبخوان، جبهه‌های زیرزمینی ورودی و خروجی بر اساس

نقشه‌های تراز آب زیرزمینی در اولین گام زمانی مدل، وارد شد. هجده حلقه چاه مشاهده‌ای نیز به‌عنوان نقاط کنترل شبیه‌سازی در مدل کمی و دوازده حلقه چاه بهره‌برداری کیفی نیز به‌عنوان نقاط کنترل شبیه‌سازی در مدل کیفی وارد شد. در نقاط کنترل تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده یا غلظت شبیه‌سازی شده با تراز آب زیرزمینی مشاهداتی یا غلظت مشاهداتی ارزیابی آماری می‌شود. چاه‌های بهره‌برداری موجود در آبخوان نیز با تخلیه ماهانه در نظر گرفته شده در مدل مفهومی اعمال شد. تراز آب زیرزمینی در مهر ۱۳۹۰، توپوگرافی آبخوان و سنگ بستر آبخوان به‌عنوان وضعیت اولیه و ساختار آبخوان تعریف شد. برای جریان آب زیرزمینی از بخش شمالی به طرف جنوب و جنوب شرق آبخوان در جریان است. میزان تغذیه آبخوان نیز با توجه به منحنی‌های همباران منطقه، میزان رواناب محاسباتی در مسیر شبکه آبراهه و آب برگشتی از فعالیت‌های کشاورزی و شرب برای هر ماه محاسبه و در مدل مفهومی وارد شد. پارامترهای محاسباتی با توجه به نتایج بیان آبخوان نیز تدقیق شد. شکل ۳ نمای مدل مفهومی آبخوان خاش را در حالت کمی نشان می‌دهد. از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل جهت به دست آوردن نتایج بهینه است. با توجه به اجرای مدل و آنالیز حساسیت مدل، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی ویژه به‌عنوان عوامل حساس در مدل ماندگار و غیرماندگار مشخص شد. بر اساس این دو عامل، مدل به‌صورت دستی و با استفاده از الگوریتم PEST واسنجی و پس از واسنجی مدل کمی آبخوان، مدل‌سازی کیفی آبخوان با استفاده از ابزار MT3D انجام شد. برای شبیه‌سازی کیفی و بحث اثر آتشفشان بر کیفیت آب زیرزمینی، دو پارامتر کیفی TDS و سولفات شبیه‌سازی شد. دو فرآیند همرفت و پخشیدگی در آبخوان به‌عنوان اجزای اصلی شبیه‌سازی کیفی در مدل وارد شد. برای شبیه‌سازی کیفی آبخوان، گام زمانی به‌صورت شش ماهه و از مهر ۱۳۹۰ تا شهریور ۱۳۹۵ شامل ده گام زمانی شبیه‌سازی انجام شد. مدل کیفی آبخوان بر اساس مدل کمی آبخوان استوار بوده و غلظت اولیه سولفات و TDS در سطح آبخوان به‌عنوان شرایط اولیه شبیه‌سازی کیفی در نظر گرفته شد. برای تعریف وضعیت اولیه با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده غلظت سولفات و TDS در مهر ۱۳۹۰ از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. در

1- Advection
2- Dispersion
3- Mass Balance

جدول ۱ میانگین پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده آبخوان در طول دوره آماری ۵ ساله (۹۱-۱۳۹۰) لغایت ۹۵-۱۳۹۴) ارائه شده است.



شکل ۳- مدل مفهومی آبخوان خاش

جدول ۱- میانگین پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در آبخوان خاش در طول دوره آماری ۵ ساله

نام چاه	TDS-ppm	pH	سولفات-ppm	نام چاه	TDS-ppm	pH	سولفات-ppm
نیک‌آباد	۸۸۲	۶/۳۰	۲۷۶	ریگ‌آباد	۲۰۶۳	۶/۸۷	۸۱۶
نورآباد	۳۴۰	۶/۶۰	۲۶۹	ناصرآباد	۱۶۰۸	۵/۸۵	۵۱۶
محمدآباد	۱۳۵۵	۶/۰۷	۳۴۰	میدان دانشگاه	۲۶۵۴	۷/۲۵	۱۱۰۶
ولی‌آباد	۸۸۲	۶/۷	۳۰۵	ناصری	۲۴۸۶	۷/۳۰	۹۳۰
اکبرآباد	۱۰۰۸	۶/۳۵	۴۴۷	کلکلی	۴۶۳۷	۶/۹۰	۱۶۶۰
مهمانسرای امورآب	۷۸۰	۶/۹	۲۱۴	دشت رباط	۳۰۳۴	۸/۰۷	۱۰۸۵

غلظت جریان آب برگشتی به‌عنوان ورودی به مدل کیفی و غلظت خروجی جریان آب زیرزمینی از آبخوان به‌عنوان غلظت خروجی در مدل مفهومی اعمال شد.

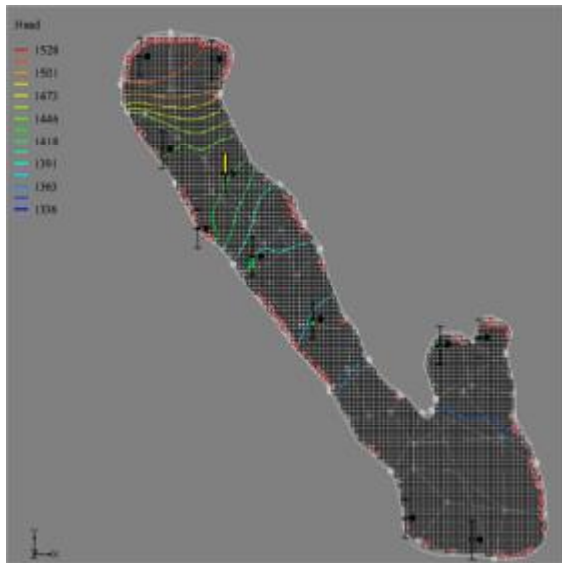
نتایج و بحث

ارزیابی مدل کمی آبخوان

پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان، شبیه‌سازی مدل کمی با استفاده از مدل MODFLOW برای دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار انجام شد. بر این اساس پس از شبیه‌سازی اولیه جریان در حالت ماندگار، واسنجی مدل در این حالت با تغییر پارامترها انجام که پارامتر هدایت هیدرولیکی به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر شناسایی و

پس از تهیه مدل مفهومی در حالت کیفی، شبیه‌سازی با استفاده از مدل MT3D انجام گرفت. بر این اساس جبهه‌های زیرزمینی ورودی و خروجی به‌عنوان مرزهای کیفی و وضعیت مرز مدل کیفی در نظر گرفته شد. برای بررسی فرآیند همرفت در معادله آلودگی از روش ULTIMATE در مدل کیفی استفاده شد. از پارامترهای مهم در انتقال آلودگی، پخشیدگی آلودگی در جریان آب زیرزمینی است. ضریب پخشیدگی در آبخوان شامل ضرایب نسبت پخشیدگی افقی به پخش طولی (TRPT)، نسبت پخش عمودی به پخش طولی (TRPV)، ضریب پخش مولکولی مؤثر (DMCOEF) و پهنه توزیعی ضریب پخشیدگی آبخوان است. میزان غلظت جریان ورودی و

تطبيق نتایج استفاده شد. شکل ۴ وضعیت نهایی مدل کمی آبخوان را نشان می‌دهد. در شکل ۵ نمایی از نقشه‌های واسنجی شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شده در آبخوان ارائه شده است.

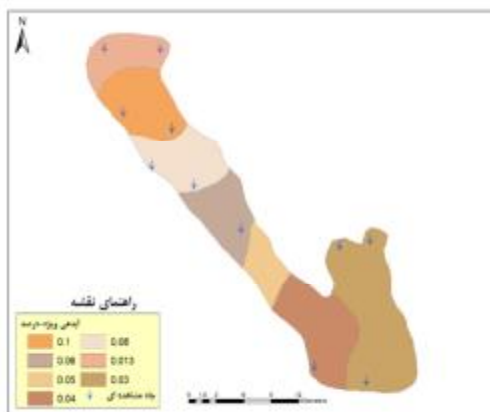


شکل ۴- مدل نهایی کمی آبخوان خاش

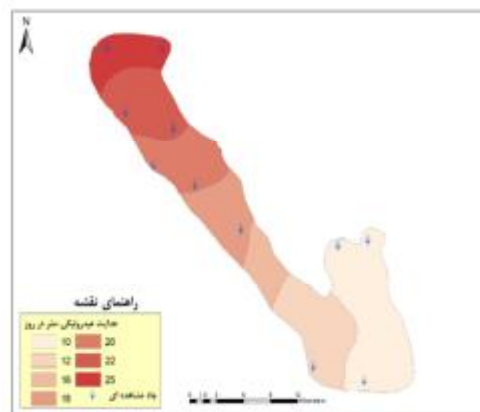
واسنجی شد (مقدم و همکاران، ۲۰۱۹). پس از تأیید مدل ماندگار جریان، مدل غیرماندگار برای دوره چهار ساله شبیه‌سازی شد که در این حالت پارامتر آبدهی ویژه آبخوان به‌عنوان پارامتر حساس شناسایی و واسنجی برای این دوره انجام گرفت. پس از تأیید مدل در این حالت، مدل برای مدت یکسال انتهایی صحت‌سنجی شد. نتایج حاصل از واسنجی در حالت‌های ماندگار، غیرماندگار و اعتبارسنجی مدل حاکی از دقت مناسب شبیه‌سازی بود که نتایج آنالیز خطا در جدول ۲ ارائه شده است. واسنجی مدل آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر پارامترهای حساس به‌گونه‌ای انجام شد که حداقل خطای ممکن بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برقرار باشد. مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی اختلاف کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی برای هر چاه مشاهده‌ای است که نتایج شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی کمتر از ۱٪ است (کاردان‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه از لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایش‌های پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال، نوع سازندهای زمین‌شناسی و مطالعات پیشین نیز جهت

جدول ۲- آنالیز خطای شبیه‌سازی مدل

پارامتر خطا	مدل کمی - متر	
	مدل غیرماندگار	مدل ماندگار
میانگین خطا	۰/۳۷	۰/۲۱
میانگین مطلق خطا	۰/۵۸	۰/۳۷
میانگین مجذور خطا	۰/۷۷	۰/۴۸
صحت‌سنجی	۰/۴۴	۰/۶۶
	۰/۹۱	



ب- ضرب آبدهی ویژه (%)

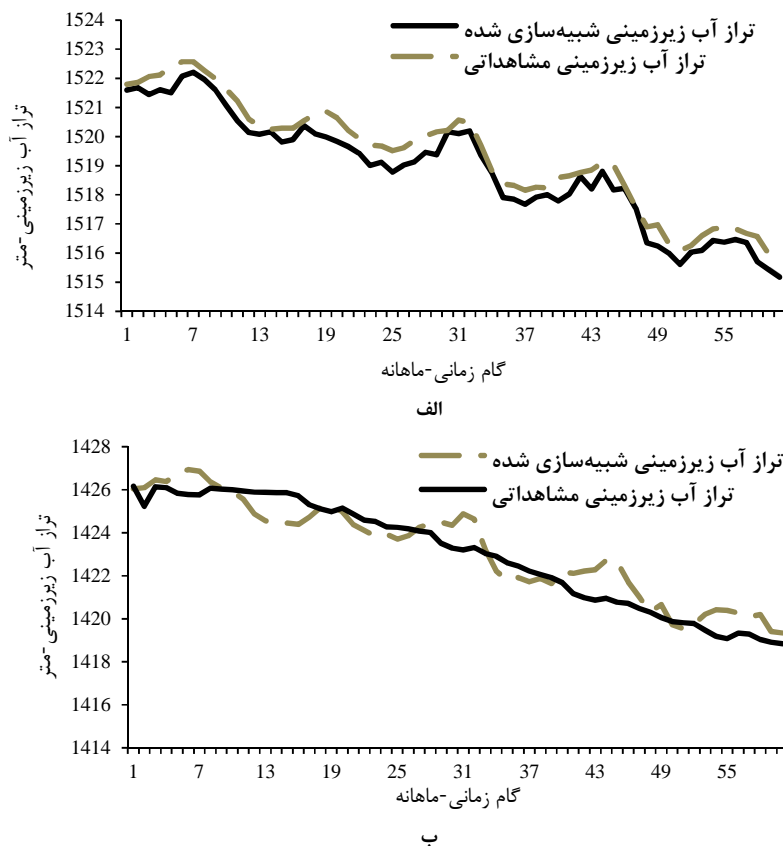


الف- هدایت هیدرولیکی (متر در روز)

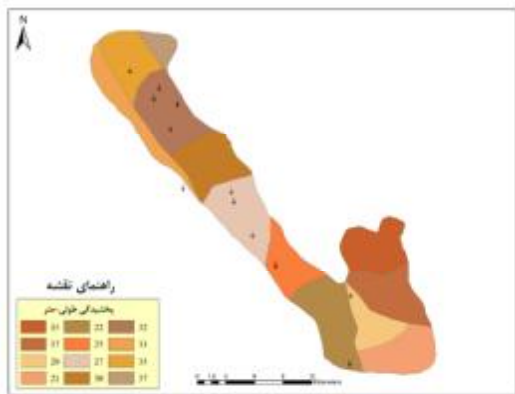
شکل ۵- پارامترهای واسنجی شده در مدل کمی آبخوان خاش

نتایج تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حاکی از دقت مناسب مدل برای شبیه‌سازی در طول ۶۰ گام زمانی ماهانه است. نتایج در سایر چاه‌های مشاهده‌ای نیز حاکی از دقت مناسب مدل برای تحلیل تراز آب زیرزمینی است.

برای ارزیابی و صحت نتایج به دست آمده، تحلیل سری زمانی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دو چاه مشاهداتی در شمال آبخوان (چاه مشاهده‌ای شماره ۱- الف) و مرکز آبخوان (چاه مشاهده‌ای شماره ۵- ب) ترسیم شده است.



شکل ۶- تحلیل تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در چاه مشاهده‌ای

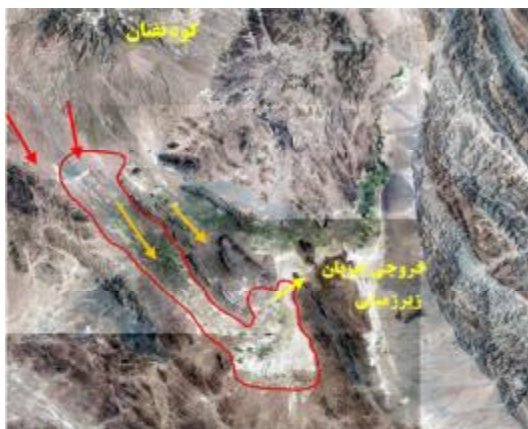


شکل ۷- پارامتر پخشیدگی طولی واسنجی شده در مدل کیفی آبخوان خاش

ارزیابی مدل کیفی آبخوان

پس از ارزیابی و تأیید مدل در حالت کمی، شبیه‌سازی کیفی آبخوان مطابق وضعیت مدل کمی انجام شد. در این حالت نیز مشابه حالت کمی، واسنجی و اعتبارسنجی انجام گرفت. بر این اساس ضریب پخشیدگی طولی (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۲) به‌عنوان پارامتر حساس واسنجی شد. پارامترهای واسنجی شده مدل کیفی و مقادیر اختصاص داده شده در جدول ۳ و مقدار ضریب پخشیدگی طولی نیز در شکل ۷ ارائه شده است. این مقادیر در واسنجی مدل با روش سعی و خطا محاسبه شد. هدف واسنجی به‌حداقل رساندن اختلاف بین غلظت مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سولفات و TDS است.

از کوه تفتان و وجود منابع آب زیرزمینی این منطقه این فرضیه را محتمل کرده است. در شکل ۶ تصویر ماهواره‌ای از وضعیت کوه تفتان و آبخوان نمایش داده شده است. فلش زرد رنگ مسیر جریان خروجی زیرزمینی منطقه را نشان می‌دهد که آب را از این محدوده خارج می‌کند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد با توجه به مسیر جریان زیرزمینی، این بخش از آبخوان دارای شیب کم هیدرولیکی و گرادیان هیدرولیکی است که باعث می‌شود جریان‌های زیرزمینی در این بخش متمرکز شود.



شکل ۸- تصویر ماهواره‌ای از آبخوان خاش و مسیر جریان زیرزمینی

همچنین بررسی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان خاش و نتایج این پژوهش نشان می‌دهد این حوضه به‌صورت حوضه‌های بزرگ و کشیده است؛ لذا مدت زمان لازم برای خروج رواناب‌ها از نقطه تمرکز افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش فرآیند انحلال‌پذیری آب‌های سطحی و رواناب‌ها می‌شود. بخش قابل توجهی از خاک‌های مناطق اطراف آبخوان خاش به‌خصوص بخش‌های شمالی آن از خاک‌های آتشفشانی تشکیل شده است. این خاک‌ها دارای جذب سطحی بالا و نفوذپذیری بالایی هستند. بررسی‌های هیدروژئولوژیکی این منطقه نیز نشان می‌دهد امکان تشکیل آبخوان‌های تحت فشار متحمل نیست و آبخوان آزاد این منطقه در مسیر جریان سطحی و زیرزمینی کلیه منابع آب منطقه است. بر این اساس حد تقریبی آبخوان از دامنه ارتفاعات شمالی (بالادست سد مهران) تا دامنه ارتفاعات بین محدوده‌های پشتکوه و خاش گسترش دارد. از رودخانه‌های مهم محدوده مطالعاتی خاش، رودخانه گرو ست که کلیه جریان‌های سطحی و

جدول ۳- ضرایب واسنجی شده مدل کیفی

ردیف	نام پارامتر	میزان
۱	TRPT (نسبت پخش افقی به پخش طولی)	۰/۳
۲	TRPV (نسبت پخش عمودی به پخش طولی)	۰/۵
۳	DMCOEF (ضریب پخش مولکولی مؤثر)	۱ متر

پس از واسنجی مدل کیفی، تحلیل آنالیز خطا نیز انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- آنالیز خطای شبیه‌سازی مدل

پارامتر خطا	مدل کیفی -ppm
میانگین خطا	۳/۴
میانگین مطلق خطا	۶/۷
میانگین مجذور خطا	۷/۷

ارزیابی جریان آب زیرزمینی ورودی و خروجی آبخوان

پس از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان خاش با استفاده از مدل، بررسی جریان ورودی و خروجی به آبخوان برای تحلیل جریان عبوری متأثر از آتشفشان تفتان آنالیز شد. با توجه به ارتفاعات در بخش شمالی آبخوان خاش بیشترین حجم نزولات جوی در این بخش بوده است و سبب انتقال جریان زیرزمینی به‌عنوان یکی از اجزای تغذیه آبخوان می‌شود. براین اساس نتایج خطوط تراز آب زیرزمینی، ترسیم شده جهت عمومی جریان آب زیرزمینی شمالی جنوبی است. این جریان از بخش شمال شرقی آبخوان وارد و با عبور از بخش ابرفتی آبخوان، از بخش جنوب شرقی آبخوان خارج می‌شود. تحلیل وضعیت جریان نشان می‌دهد حجم عمده جریان زیرزمینی از بخش شمالی وارد می‌شود (شکل ۶ فلش قرمز). این جریان ورودی با توجه به نتایج نمونه‌برداری کیفی انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی کیفی آبخوان حاوی غلظت سولفات و TDS است؛ اما با توجه به خاصیت خودپالایی خاک، عبور از محیط متخلخل ابرفت منطقه و بهره‌برداری در طول آبخوان، مقدار آن در بخش شمالی آبخوان کم است و هرچه به بخش انتهایی آبخوان نزدیک می‌شویم؛ افزایش دارد. همچنین تحلیل وضعیت جریان ورودی نشان می‌دهد غلظت املاح در بخش خروجی بسیار بالاست که این موضوع فرضیه وجود جبهه آب زیرزمینی از بخش خروجی آبخوان را مشهود می‌کند (شکل ۶ فلش آبی رنگ). بررسی جریان آب سطحی منشعب گرفته شده

طعم آب را نیز تغییر داده است. ارزیابی مطالعات مختلف انجام شده نشان می‌دهد که یک فعالیت زمین‌شناسی نقش مهمی در ایجاد گاز در منابع آب زیرزمینی دارد. بر این اساس فرضیه وجود گاز ناشی از فعالیت آتشفشان نیمه‌فعال کوه تفتان به واقعیت نزدیک‌تر می‌رسد که بخشی از این فعالیت در منابع آب زیرزمینی حل می‌شوند. بر اساس نظر گیگینباخ (۱۹۷۹) گازهای آزاد شده از ماگمای بازالتی و آندزیتی دارای بخار آب است که یک تا دو درصد گازهای H_2S ، HCL و H_2SO هستند. البته جریان آب زیرزمینی هرچه سمت جنوب حرکت می‌کند از گاز موجود در آبکاسته و این جریان پس از دره خاش و پیوستن مقداری تغذیه از کوه‌های شرقی و غربی آن به دشت جنوبی می‌رسد.

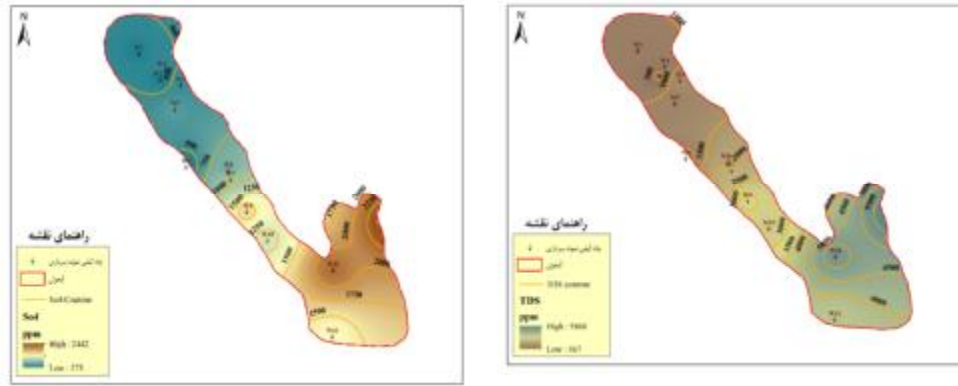
بررسی سایر پارامترهای کیفی در آب زیرزمینی منطقه نشان داد هرچه آب زیرزمینی مسیر بیش‌تری پیماید، مقدار املاح موجود در آن افزایش می‌یابد. افزایش غلظت TDS از نوع بارز این تغییرات است. نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل MT3D نیز حاکی از تأیید این روند تغییرات در آبخوان است. همچنین نتایج تحلیل کیفی pH در منابع آب زیرزمینی منطقه نشان داد در طول آبخوان، بیش‌تر چاه‌ها اسیدی و تنها چاه روستای دشت رباط دارای قلیابیت بالایی است. منشاء دیگر اسیدی شدن می‌تواند اکسایش سطحی گاز H_2S باشد که باعث تشدید انحلال سنگ می‌شود. این نوع آب‌ها دارای کلریدکم، ولی سولفات بالا هستند. میانگین غلظت سولفات در آبخوان نوسانات زیادی داشت؛ گونه‌ای که در روستای نیک‌آباد در ابتدای آبخوان در پایین‌دست سد تغذیه‌ای مهران با توجه به نزدیکی به دامنه تفتان، با توجه به انحلال گوگرد در آب‌های سطحی وارد به دشت، میزان سولفات، بالاترین رقم را داشته باشد. لیکن این برعکس تصورات است و هرچه به سمت جنوب آبخوان می‌رویم، چاه‌ها میزان سولفاتشان بیشتر می‌شود. گونه‌ای که روستای کلکی در انتهای آبخوان دارای بیشترین میزان سولفات ۱۶۶۰ میلی‌گرم در لیتر است. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی کیفی آبخوان، پیش‌بینی وضعیت کیفی آبخوان برای پارامتر TDS و سولفات برای یک دوره ۳ ساله آنالیز شد که در شکل ۷ افزایش غلظت هر دو پارامتر کیفی نشان داده شده است.

زیرزمینی دشت خاش از طریق سه تنگه خروجی به دشت پشتکوه در سمت شرق وارد می‌شود. مجموعه جریان‌های سطحی دو دشت خاش و پشتکوه، رودخانه گزو را تشکیل می‌دهد که از کنار آبادی گزو می‌گذرند و پس از عبور از تنگه‌ای که در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری شهرستان خاش قرار دارد، به حوضه تهلان و هامون تشکیل در خاک پاکستان سرازیر می‌شوند.

ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر جریان‌ات ورودی

با توجه به مسیر جریان ورودی زیرزمینی از انتهای آبخوان، تحلیل وضعیت کیفی و روند تغییرات کیفی آبخوان با استفاده از نتایج نمونه‌برداری کیفی، شبیه‌سازی عددی و تحلیل سازندهای زمین‌شناسی منطقه انجام شد. با توجه به مقادیر pH اندازه‌گیری شده، بیشترین فرآیند جذب سطحی مربوط به کائولینیت، کلسیت، اکسیدآلومینیوم و آهن موجود در رسوبات نشان داده شده است. بررسی اسیدیته کل آبخوان نیز نشان می‌دهد که با توجه به خروج گازهای گوگرد و دی‌اکسیدکربن از دهانه آتشفشان تفتان، رواناب حاصله در منطقه دارای خاصیت اسیدی است و این آب اسیدی، باعث تغذیه آبخوان می‌شود. بر همین اساس منابع آب منطقه دارای پتانسیل بالایی در حمل و انحلال مواد تشکیلات زمین‌شناسی و عناصر ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی تفتان است. در نمونه‌های تجزیه شده، غلظت گوگرد از ۲۷۶ تا ۱۰۸۵ میلی‌گرم در لیتر، سدیم از ۱۰۰ تا ۸۳۰ میلی‌گرم در لیتر، منیزیم از ۲۲ تا ۱۵۱ میلی‌گرم در لیتر و غلظت کلسیم از ۹۴ تا ۷۵۶ میلی‌گرم بر لیتر در تغییر بوده است. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌برداری از نقاط مختلف نشان می‌دهد مقادیر گوگرد در شمال آبخوان نسبتاً بالا است، لیکن در قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی آبخوان مقدار غلظت گوگرد از این نیز بالاتر می‌رود. با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد یک منبع گوگرد در سازندهای زمین‌شناسی سولفیدی بجز آتشفشان تفتان در زیر زمین وجود دارد که با نفوذ آب‌های سطحی باعث افزایش میزان گوگرد در آب زیرزمینی منطقه جنوب آبخوان خاش شده است.

همچنین بررسی چاه‌های بهره‌برداری در بخش شمالی نشان می‌دهد آب در این منابع دارای مقدار زیادی گاز و این مقدار گاز در بعضی نقاط به قدری زیاد است که حتی



شکل ۷- پیش‌بینی غلظت TDS و سولفات در آبخوان خاش (الف) غلظت TDS و (ب) غلظت سولفات

میزان غلظت TDS و سولفات افزایش قابل‌توجهی داشته باشد. بررسی‌های انجام گرفته نشان داد که سازندهای زمین‌شناسی این منطقه تحت‌تأثیر آتشفشان بوده و این موضوع باعث وجود گاز در منابع آب زیرزمینی و اسیدی شدن کیفیت آب شده است. همچنین برای درک صحیح از وضعیت کیفی منطقه، شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل MT3D در محیط نرم‌افزار GMS انجام شد که نتایج نشان داد در طی دوره ۳ آتی ۱۲٪ غلظت TDS و ۳۰٪ غلظت سولفات در بخش جنوبی افزایش خواهد داشت. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد با ادامه روند کنونی عدم مدیریت صحیح در بهره‌برداری، متولیان آب باید به دنبال راهکارهایی برای تعدیل میزان اسیدیته آب این منطقه باشند.

منابع

۱. احمدی ع. و آبرومند م. ۱۳۸۸. بررسی پتانسیل آلودگی ابخوان خاش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی. ۵(۱): ۱۱-۱.
۲. بومری م. ۱۳۸۴. بررسی منابع زمین‌گرایی و کانی‌سازی تفتان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب. مجله جغرافیا و توسعه. ۳(۵): ۴۰-۲۵.
۳. رحیم زاده کیوی ز. کاردان‌مقدم ح. و بهبهانی م. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی و پیش‌بینی غلظت نیترات در آب زیرزمینی؛ مطالعه موردی خراسان جنوبی آبخوان بیرجند. فصلنامه علمی پژوهشی آبیاری و آب. ۲۴(۲): ۱۱۴.

بررسی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی غلظت TDS و سولفات با استفاده از مدل در آبخوان نشان داد روند افزایشی غلظت در بخش جنوبی بیشتر از بخش شمالی و میزان افزایش غلظت سولفات نسبت به TDS افزایش بیشتری داشته است. بررسی‌ها و نتایج مدل برای یک دوره پیش‌بینی ۳ ساله حاکی از افزایش ۱۲٪ غلظت TDS در بخش جنوبی آبخوان و ۳۰٪ افزایش سولفات در این بخش است. بر این اساس فرضیه وجود جبهه آب زیرزمینی در بخش جنوبی آبخوان معتبرتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نقش پارامترهای مختلف بر کیفیت منابع آب زیرزمینی لزوم ارزیابی و نقش این پارامترها بسیار حائز اهمیت است. آبخوان خاش در بخش جنوبی کوه تفتان واقع شده است و بررسی‌های انجام شده در این منطقه، نشان داده این آبخوان تحت تأثیر جریان‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت آتشفشان است. اصولاً هر آتشفشان، آثار زیست‌محیطی بر محیط پیرامون خود خواهد داشت، لیکن در ایران این مطالعات به‌صورت جدی، انجام نشده است. با وجود اهمیت غیرقابل انکار این منطقه در استان سیستان و بلوچستان، تحقیقات مدون و جامع به‌ویژه با موضوع تأثیر آتشفشان تفتان بر آب زیرزمینی آبخوان دشت خاش در این منطقه انجام نشده است. بدین منظور با استفاده از نمونه‌برداری میدانی و تحلیل وضعیت موجود در بازدیدهای میدانی، شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان خاش انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که یک جریان آب زیرزمینی در بخش جنوبی آبخوان از ارتفاعات وارد و باعث می‌شود تا

- with capillary electrophoresis for the investigation of public water system sources and quality. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 14(11): 2459-2470.
14. Giggenbach W. F. 1979. The application of mineral phase diagrams to geothermal corrosion. In *Proc. of New Zealand Geothermal Workshop*. pp. 217-226.
 15. Guo Z. Fogg G. E. Brusseau M. L. LaBolle E. M. and Lopez J. 2019. Modeling groundwater contaminant transport in the presence of large heterogeneity: a case study comparing MT3D and RWHEAT. *Hydrogeology journal*. 27(4): 1363-1371.
 16. Javadi S. Kardan Moghaddam H. and Neshat A. 2018. Evaluation and Simulation of Groundwater Flow in Aquifers Enclosed With Desert Saline Areas (Case Study: Isfahan Province-Ardestan Aquifer). *Water Harvesting Research*. 3(1): 15-27.
 17. Malton S. Kuys K. Parker I. and Vanderhoek N. 1997. The influence of fiber properties on the adsorption of cationic starch by eucalypt pulps. In *Proceedings of the 51st Appita Annual General Conference Melbourne, Australia*.
 18. 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. doi:10.1016/j.gsd.2019.100237.
 19. Rahnema M. B. and Zamzam A. 2013. Quantitative and qualitative simulation of groundwater by mathematical models in Rafsanjan aquifer using MODFLOW and MT3DMS. *Arabian Journal of Geosciences*. 6(3): 901-912.
 20. Zheng C. Hill M. C. Cao G. and Ma R. 2012. MT3DMS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*. 55(4): 1549-1559.
 ۴. شاکری ع. کمپانی م. و رئیسی ع. ۱۳۸۴. زمین آب شیمی و زمین دماسنجی چشمه‌های آب گرم و معدنی دامنه جنوبی و جنوب غربی تفتان. نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. هشتم شهریور، دانشگاه تربیت معلم، تهران. ۱۳ ص.
 ۵. کاردان مقدم ح. بنی حبیب م. ا. و جوادی س. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر تغذیه مصنوعی بر تعادل بخشی آبخوان با استفاده از شاخص پایداری، اکوهیدرولوژی. ۴(۴): ۱۲۵۳-۱۲۴۱.
 ۶. کاردان مقدم ح. و بنی حبیب م. ا. ۱۳۹۶. بررسی اثرات زیست‌محیطی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی- آبخوان سرایان). آب و خاک. ۳۱(۳): ۶۷۳-۶۸۸.
 ۷. وزارت صنایع سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کل کشور. ۱۳۹۳. نقشه‌های زمین‌شناسی ایران و منطقه بلوچستان.
 ۸. وزارت نیرو. ۱۳۹۶. شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان ۱۳۹۶ گزارش دفتر مطالعات پایه آب. ۲۲۳ ص.
 ۹. یوسفی ف. جنت‌رستمی س. و محمدی ک. ۱۳۹۸. مدل‌سازی ناحیه اختلاط آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل‌های MODFLOW، MT3D و RT3D. *مجله تحقیقات آب و خاک*. doi: 10.22059/ijswr.2020.285606.668264
 10. Barzegar R. Moghaddam A. A. and Tziritis E. 2016. Assessing the hydrogeochemistry and water quality of the Aji-Chay River, northwest of Iran. *Environmental Earth Sciences*. 75(23): 1486.
 11. D'Alessandro W. Bellomo S. Brusca L. Kyriakopoulos K. Calabrese S. and Daskalopoulou K. 2017. The impact of natural and anthropogenic factors on groundwater quality in an active volcanic/geothermal system under semi-arid climatic conditions: The case study of Methana peninsula (Greece). *Journal of geochemical exploration*. 175: 110-119.
 12. Eltarabily M. G. Negm A. M. Yoshimura C. and Saavedra O. C. 2017. Modeling the impact of nitrate fertilizers on groundwater quality in the southern part of the Nile Delta, Egypt. *Water Science and Technology: Water Supply*. 17(2): 561-570.
 13. Ertürk A. S. Göde F. and Bozdoğan A. E. 2017. Chemometric approach integrated