

مدلسازی هجوم آب شور و تعیین حد اینترفاز در آبخوان کویری دشت سرایان

سامان جوادی^{۱*}، حمید کاردان مقدم^۲، علی محمدی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۳- دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: javadis@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

چکیده

پیشروی آب شور در سفره‌های آب شیرین، تنها به جزایر و سواحل اقیانوس‌ها محدود نمی‌شود، بلکه امکان دارد آبخوان‌ها، از طریق پیشروی آب شور کویرها، باتلاق‌ها و چاله‌های آب شور غیر قابل استفاده شوند. در این مطالعه وضعیت بهره‌برداری از دشت سرایان در اثر پیشروی آب شور از کویر از نظر کمی و کیفی با ارائه سناریوهای مدیریتی مورد بررسی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی قرار گرفته است. بدین منظور برای شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان از مدل MODFLOW استفاده شد. سپس با استفاده از بسته MT3DMS مدل کیفی تهاجم آب شور و با استفاده از مدل SEAWAT شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد که بیشترین تهاجم آب شور به میزان ۷۵۰ متر در طول آبخوان در منطقه جنوب شرقی آبخوان سرایان اتفاق می‌افتد و غلظت نمک در چاه‌های بهره‌برداری به میزان متوسط ۱۶۰ میلی گرم در لیتر افزایش خواهد داشت. نتایج سناریوهای بهره‌برداری نشان داد که با کاهش پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری به میزان ۵ درصد، باعث کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور به میزان ۷۰۰ متر، کاهش روند پیشروی آب شور در آبخوان دشت به میزان ۱۲۰۰ متر و افزایش غلظت نمک به میزان ۴۶۴ میلی گرم در لیتر خواهد شد که در مقایسه با فرض ادامه روند کنونی، ۱۰ درصد کمتر است. از سوی دیگر، با کاهش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به میزان ۱۵ درصد، مقدار افت سطح آب آبخوان کاهش یافته و از متوسط غلظت نمک نیز به میزان ۸۲ میلی گرم در لیتر کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، سناریوی مدیریتی، غلظت نمک، مدل SEAWAT، هیدروژئولوژی.

مقدمه

منجر به کاهش حجم این منابع شده است (Braca et al., 2020; Venegas-Quiñones et al., 2019). بنابراین، به دلیل مصون بودن این منابع نسبت به نرخ بالای تبخیر و همچنین دسترسی، منابع آب زیرزمینی به منابع ارزشمندی برای انواع مصارف تبدیل شده‌اند. بیش از ۱/۵ میلیارد نفر در سراسر جهان، به طور مستقیم و غیر مستقیم، برای مصارف مختلف (به‌ویژه آب آشامیدنی)، به تامین آب از منابع زیرزمینی وابسته

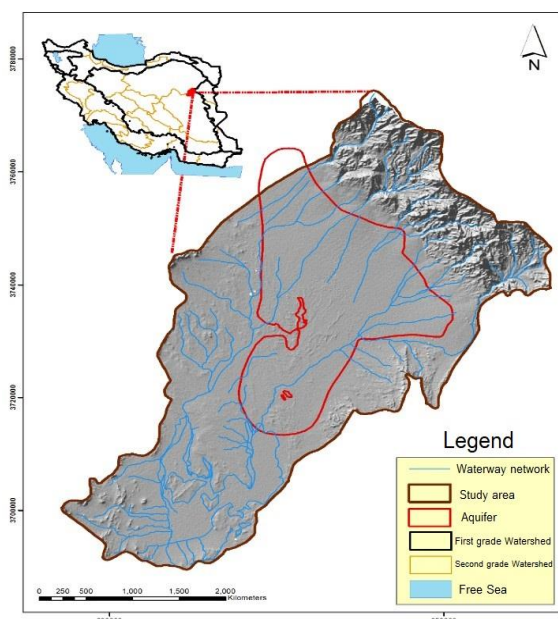
منابع آب زیرزمینی برای نیازهای ضروری انسان اهمیت بسیاری دارند. ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی همانند بررسی کمیت آن، می‌تواند نتایج و رویکردهای ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی استفاده صحیح این نوع منابع آب فراهم سازد (سامانی و همکاران، ۱۳۹۹). افزایش دمای زمین، کاهش بارندگی و تبخیر آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها

کاردان مقدم و بنی حبیب (۱۳۹۶)، تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت سرایان را با استفاده از مدل کیفی MT3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدیریت برداشت از آب زیرزمینی با استفاده از سناریو مدیریتی کاهش برداشت آب از منابع زیرزمینی به منظور بهبود کیفیت آب آبخوان‌های کویری و ممانعت تهاجم آب شور کویری به آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. کمالی و نیک سخن (۱۳۹۶)، وضعیت پایداری آبخوان را با استفاده از مدل ترکیبی که شامل مدل هیدروژئویکی SWAT، مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل انتقال آلاینده MT3DMS است را در حوضه مطالعاتی اصفهان- برخوار شبیه‌سازی کردند. خروجی مدل SWAT به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW و خروجی مدل MODFLOW به‌عنوان ورودی مدل MT3DMS استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد با کاهش ۳۰ درصدی بهره‌برداری از آبخوان، شاخص پایداری کمی و کیفی آبخوان در بیشتر نقاط به‌طور شایان توجهی بهبود خواهد یافت. جواد و کاردان مقدم (۱۳۹۸) با شبیه‌سازی سه‌بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور در آبخوان‌های کویری با استفاده از مدل SEAWAT نشان دادند که در آبخوان اردستان تغییر جهت جریان سبب ورود آب با املاح بالا به آبخوان شده و نتایج مدل حاکی از آن است که میزان تهاجم حداقل ۱۰۰ متر در کف آبخوان بیشتر از سطح آبخوان است. Gomia et al., (2021) نفوذ جریان آب دریا را تحت سناریوهای مختلف در آبخوانی واقع در مصر مورد مدلسازی و ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش از مدول SEAWAT و یک مدل سه‌بعدی تفاضل محدود استفاده شد. نتایج حاکی از تأثیر جریان و کیفیت آب آبخوان بوده و اینکه افزایش پنج برابری نرخ پمپاژ سبب افزایش شوری آب بین ۴ تا ۲۶/۸ درصد می‌شود. در پژوهش Nasiri et al., (2021) از مدل‌های MODFLOW، MT3DMS و SEAWAT به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، انتقال محلول و نفوذ آب شور دریا استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی افزایش مقدار تجاوز آب شور به آبخوان را نشان داد و در ادامه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره راه‌حل‌های بهبود شرایط آبخوان ارائه شد. بررسی پیشینه تحقیقات ذکر شده حاکی از آن است که افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی سبب پیشروی آب شور به طرف سفره‌های آب شیرین شده که در نتیجه برداشت

هستند (Grönwall and Danert, 2020). با این حال، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی منجر به تخریب کیفیت آب در مناطق مختلف شده و استفاده از آن را برای اهداف مختلف، به ویژه آب آشامیدنی، محدود کرده است (Mohammadi Arasteh and Shoaee, 2020; Swain et al., 2022). یکی از پایه‌های اساسی برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع آب، کیفیت آب در دسترس است که فعالیت‌های کنترل نشده انسانی سلامت آن را تهدید می‌کند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ پارسا صدر و همکاران، ۱۴۰۱). علاوه بر این، عوامل طبیعی مانند تغییرات عوامل هیدروژئویکی می‌توانند سبب حل شدن برخی رسوبات ریزدانه در آبخوان‌ها و کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی شوند (Adimalla et al., 2020). به منظور مدیریت مؤثر کیفیت آب‌های زیرزمینی، نیاز است تا از برهم‌کنش‌های شیمیایی و مکانیسم‌هایی که کیفیت آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند آگاهی حاصل شود (Rao et al., 2020).

شوری یک چرخه طولانی مدت و یکی از عوامل تأثیرگذار اصلی بر کاهش کیفیت آب‌های زیر زمینی است. یکی از مهم‌ترین مسائل در تعیین کیفیت آب زیرزمینی، تعیین شوری آب با اندازه‌گیری پارامترهای کیفی و شاخص‌های تحلیلی است. سطح بالای شوری در منابع آب زیرزمینی منجر به چند چالش برای محیط‌زیست و سلامتی انسان در سطح جهانی شده است (Li et al., 2020). بنابراین کنترل و ممانعت از شور شدن آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک موضوع حیاتی مطرح شده که در نتیجه طیف وسیعی از راهبردهای مدیریتی از طریق روش‌های آماری و مدل‌های شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مشکل شوری به‌طور بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شود (Aboelsoud et al., 2023). زیرا دسترسی به منابع آب پاک دشوار است و بنابراین تقاضا برای استخراج آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش شوری و خرابی آب می‌شود. لذا شناخت تغییرات شرایط کیفی آبخوان می‌تواند سبب اتخاذ رویکرد مدیریتی کارآمد برای دسترسی پایدار به این منابع ارزشمند شود. بررسی کیفی آبخوان‌ها با توجه به افزایش بی‌رویه برداشت از منابع آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آب مورد استحصال، مورد توجه بسیاری از محققان بوده است.

بیرجند منتهی می‌شود (شکل ۱). این دشت تقریباً لوزی شکل بوده و دارای طول تقریبی متوسط ۶۲ کیلومتر و عرض متوسط ۳۲ کیلومتر می‌باشد. مساحت دشت در این محدوده ۲۷۱۰ کیلومتر مربع و محیط آن ۱۷۲/۳ کیلومتر می‌باشد. این حوضه فاقد رودخانه دائمی بوده ولی تعدادی مسیل از ارتفاعات شمالی و شرقی به سمت جنوب در جریان است که مهم‌ترین آن‌ها کال شور قاسم آباد می‌باشد که از اتصال آن با چند مسیل دیگر نظیر سرند، آیسک، کرکند و دره باز بوجود آمده و به کویر قاسم آباد می‌ریزد و در جنوب نقش زهکش را دارد.



شکل ۱- موقعیت آبخوان سرایان در محدوده مطالعاتی.

Figure 1- Location of Sarayan Aquifer in the study area.

روش تحقیق

به منظور انجام پژوهش ابتداء شناسایی منطقه و شرایط موجود در سطح آبخوان (شرایط اقلیمی و ...) انجام شد. با توجه به مطالعات پایه انجام گرفته، شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان جهت ارزیابی وضعیت کنونی و پیش‌بینی وضعیت آتی برای ارائه راهکار انجام و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، پیش‌بینی وضعیت کمی و کیفی آبخوان برای یک دوره زمانی ۱۰ ساله انجام شد. میزان حد اینترفاز آب شور و شیرین با استفاده از بسته SEAWAT شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ مراحل انجام این پژوهش نشان داده شده است.

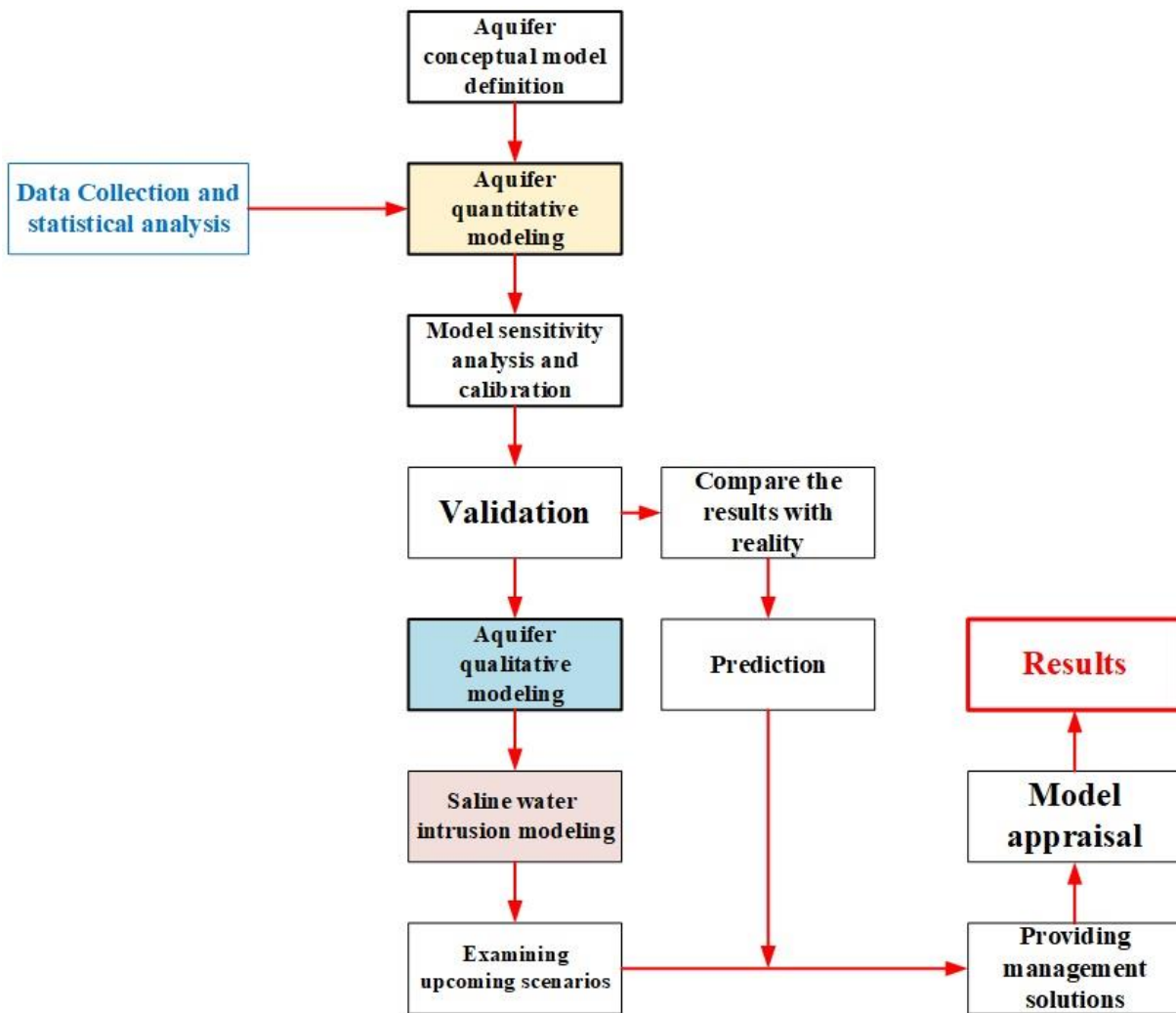
بیش از توان آبخوان‌ها است. بنابراین شناخت شرایط آبخوان برای مدیریت مطلوب برداشت‌ها خصوصاً در مناطق گرم و خشک ضروری است.

در مناطق شرقی ایران، در طول دهه‌های گذشته، فعالیت‌های توسعه، هم در بخش‌های شهری و کشاورزی، اغلب بدون برنامه‌ریزی کافی به سرعت افزایش یافته است. فشار انسانی افزایش یافته همراه با بهبود استانداردهای زندگی، تقاضای چشمگیری برای آب ایجاد کرده است. عواقب آن افزایش بیشتری در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بوده است، که تنها منبع موجود در این منطقه برای مصارف آبی، کشاورزی و صنعتی است. اهمیت آب‌های زیرزمینی در این منطقه نباید دست‌کم گرفته شود زیرا آن‌ها تنها منبع آب برای مصارف نوشیدنی و کشاورزی نه تنها برای مردمی که در این منطقه زندگی می‌کنند بلکه برای کسانی که در مناطق اطراف زندگی می‌کنند نیز می‌باشد. با وجود کمبود منابع آب جایگزین، هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی منطقه هنوز به خوبی درک نشده است. شوری و کاهش سطح آب نیاز به درک جامعی از سیستم آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد که به مدیریت بهتری از منابع منجر خواهد شد. هدف اصلی این پژوهش ارائه یک چارچوب کاربردی به منظور شناخت حد اینترفاز آب شور و شیرین و ارائه راهکار عملی جهت کاهش میزان پیشروی آب شور به داخل آبخوان آب شیرین است. لذا در این پژوهش نوآوری در شبیه‌سازی سه بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور کویری در آبخوان سرایان (واقع در شمال استان خراسان جنوبی) و ارائه راهکار مدیریتی جهت کاهش غلظت نمک گنجانده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی سرایان از محدوده‌های کویر لوت ایران و با کد ۴۶۰۱ در شمال غربی استان خراسان جنوبی از طول ۵۸° تا ۴۵° و ۵۸° طول شرقی و عرض ۳۳° و ۳۴° عرض شمالی واقع شده است. از شمال به گناباد و فردوس، از شرق آن به قائن و خضری، از غرب به سرایان و دیهوک و از جنوب به



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش.
Figure 2- Research Flowchart.

می‌باشد. از جمله ویژگی‌های دیگر MODFLOW می‌توان به ساختار ماژولی آن اشاره کرد. بدین ترتیب که می‌توان برای فرآیندهای خاص هیدرولوژیکی ماژول خاصی را فعال یا غیرفعال نمود. همچنین مدول‌های جدیدی برای مسایل مربوط به جریان (مثل اندرکنش جریان رودخانه با آبخوان) یا روش-های عددی جدید را توسعه داد. این دلایل سبب شده تا کد MODFLOW از سوی بسیاری از سازمان‌ها به‌عنوان نرم‌افزار برتر مورد استفاده قرار گیرد. یکی از محیط‌های نرم‌افزاری که شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی را با استفاده از این کد تسهیل بخشیده است نرم‌افزار GMS است.

به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW مراحل زیر می‌بایست انجام گیرد:

- تعیین مرز آبخوان

مدلسازی کمی و کیفی آبخوان

مدل عددی MODFLOW

از جمله کدهایی که کاربردهای گسترده‌ای در مدلسازی آب زیرزمینی داشته و از مقبولیت بالایی نزد هیدروژئولوژیست‌ها برخوردار است کد MODFLOW می‌باشد که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ارائه شده است. رابط‌های گرافیکی گوناگونی برای این کد تهیه شده‌اند. دلیل اصلی مقبولیت این کد (هر چند نمی‌توان آن را برای همه موارد تخصصی مطالعه مدل پیشنهاد نمود) این است که برای راه‌حل‌های تحلیلی گوناگونی ارزیابی و کنترل شده و سامانه-های هیدروژئولوژیکی مختلفی در سراسر جهان را شبیه‌سازی نموده است (Langevin et al., 2024; Barbieri et al., 2022). همچنین نرم‌افزارهای مختلف آن ارزان و در دسترس همگان

مدل تهاجم جبهه‌های آب شور

در مناطق تحت تأثیر آب شور پتانسیل تغییر جهت جریان آب از طرف آبخوان شیرین به طرف آبخوان شور وجود دارد. این تغییر جهت جریان همراه با چگالی بیشتر آب شور نسبت به آب شیرین، سبب معکوس شدن جریان و تهاجم جبهه‌های آب شور می‌گردد. در بین آب شور و شیرین، منطقه‌ای وجود دارد که در آن غلظت نمک بین غلظت نمک در آب شیرین و غلظت نمک در آب شور، متغیر می‌باشد. این منطقه را منطقه بینابین یا منطقهٔ پخشیدگی^۱ می‌نامند. منطقهٔ بینابین ناحیهٔ باریکی است که عرض آن از ۱ متر تا بیش از ۱۰۰ متر متغیر است. توزیع شوری در منطقهٔ بینابین به علت پراکندگی املاح در اثر جریان آب شیرین، پخشیدگی و جابجایی ناپایدار، پمپاژ چاه‌ها و یا تغذیهٔ آبخوان می‌باشد. در پاره‌ای موارد، منطقهٔ بینابین مشخص و معین است، به‌طوری که می‌توان آن را با یک مرز مشترک مشخص و قاطع بین دو سیال (آب شور و آب شیرین) بیان کرد. البته نشان دادن منطقهٔ بینابین بصورت یک مرز مشترک مشخص، یک فرض تقریبی است. در چنین حالتی فرض بر این است که سامانهٔ آبخوان از دو سیال مخلوط نشدنی که به وسیلهٔ یک مرز مشخص و دقیق از هم جدا شده‌اند تشکیل شده است. مرز مشترک بین دو سیال را فصل مشترک یا سطح حدفاصل^۲ نیز می‌نامند. بدیهی است که با انتخاب فصل مشترک مشخص، سادگی قابل ملاحظه‌ای جهت تحلیل مسائل حاصل می‌شود. در مدل تهاجم جبهه‌های آب شور هدف تعیین موقعیت فصل مشترک آب شور و آب شیرین و پیش‌بینی تغییرات سطح آب و غلظت نمک، می‌باشد.

مدل SEAWAT

مدل SEAWAT یک کد محاسباتی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی سه بعدی تغییر چگالی جریان آب زیرزمینی با توجه به تغییر غلظت و حرارت است. این برنامه برای طیف وسیعی از مطالعات آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود که در برگرنده انتقال آب شور در سفره‌های آب زیرزمینی و ورود آب شور به آبخوان‌های ساحلی است (Abd-Elaty and Polemio, 2023; Sharan et al., 2024). همچنین این مدل با قابلیت شبیه‌سازی

- تعیین دقیق شرایط مرزی (وجود رودها، زهکش‌ها، سطوح عمومی، ثابت و...)
- تدقیق مقادیر قابلیت انتقال و سطح آب و بستر شبکه آبراهه‌ای
- داده‌های تغذیه سطحی (بارش متوسط، تبخیر، رواناب‌های بازگشتی از کشاورزی، صنعت و شرب، و...)
- تعداد متناسبی نقاط Scatter جهت میان‌یابی و یا فایل Grid سنگ کف آبخوان، سطح زمین و تراز آب زیرزمینی اولیه
- داده‌های چاه‌های مشاهداتی
- پهنه‌بندی قابلیت انتقال و یا تخمین هدایت هیدرولیکی در سطح حوضه
- تخمین ضریب ذخیره آبخوان محصور SS
- تخمین آبدهی ویژه آبخوان آزاد SY
- محل مخازن و یا حوضچه‌های تغذیه
- موقعیت دقیق گسل‌های منطقه
- داده‌های کیفی بسته به روند پژوهش

مدل MT3D

به منظور شبیه‌سازی کیفی آبخوان می‌بایست مدل‌سازی کمی آبخوان انجام گیرد. لذا بدین منظور پس از شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW محاسبات و شبیه‌سازی کیفی توسط مدل MT3DMS انجام می‌گیرد. از مدل MT3DMS می‌توان برای شبیه‌سازی کیفی آلودگی‌های موضعی، نظیر نشت از مخازن و یا نشت از محل تهاجم آب شور و غیره به سمت آب زیرزمینی استفاده کرد. در واقع مدل MT3DMS یک ابزار شبیه‌سازی انتقال املاح می‌باشد که جهت تصویرسازی عددی و بصری مقادیر گسترش ابر آلودگی‌های موضعی در آبخوان بکار می‌رود. به منظور توسعه مدل مفهومی MT3DMS لازم است تا برخی از پارامترهای مهم آبخوان، نظیر ضریب پخشیدگی و تخلخل و... در اختیار باشد. اهمیت این مدل به دنبال دقت محاسبات کمی حاصل می‌گردد. بنابراین جهت مدل‌سازی انتشار آلودگی ناشی از تهاجم آب شور لازم است تا مدل به درستی واسنجی گردد.

² Interface

¹ Diffusion Zone

گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به سبک بودن آب شیرین نسبت به آب شور، آب شیرین روی آب شور بصورت شناور قرار دارد. همچنین تغذیه ناشی از بارندگی سبب پایین افتادن آب شور شده و مرز بین آب شور و شیرین به-عنوان یک مرز قابل تشخیص مشخص نیست.

جهت شبیه‌سازی پدیده تداخل آب شور و شیرین و اثرات آن از مدل SEAWAT استفاده می‌شود. مدل SEAWAT براساس چگالی آب شور و آب شیرین بصورت سه‌بعدی می‌باشد. این مدل در نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS بصورت یکی از ماژول‌های نرم‌افزار بوده و قابلیت شبیه‌سازی را با استفاده از مدل MODFLOW و MT3D دارد. این مدل شبیه‌سازی را براساس فشار استاتیک آب شیرین، ارتفاع، شتاب گرانشی و... مطابق رابطه ۱ را انجام می‌دهد (McDonald and Harbaugh, 1988).

$$H = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \cdot x = 40xh \quad (1)$$

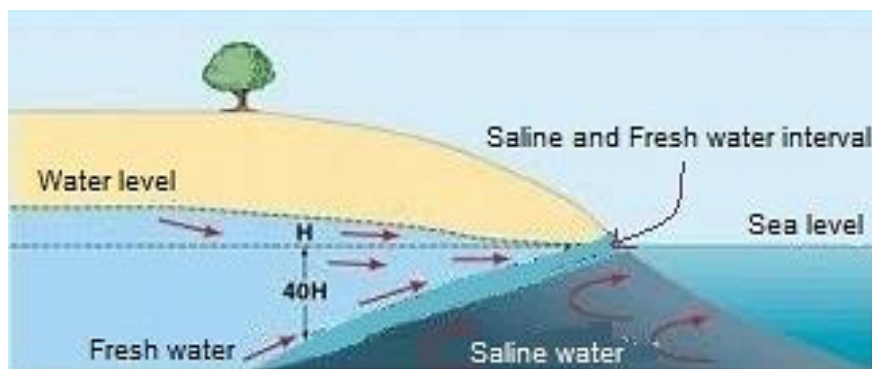
همزمان انرژی و انتقال املاح و درنظرگیری اثر لزجت در انتقال کاربردهای زیر را دارد:

- مدل‌سازی تاثیر غلظت و دما بر چگالی مایع
- شبیه‌سازی تعادل گرمایی بین جامد (آبخوان) و مایع
- مدل‌سازی انتقال حرارت
- شبیه‌سازی مرز انتقال حرارت

شبیه‌سازی اثر غلظت و درجه حرارت بر ویسکوزیته مایع

شبیه‌سازی اثر فشار بر چگالی مایع

یکی از معادلات اساسی در تهاجم آب شور و شیرین توسط Hazen و Gelberg ارائه شد. این رابطه (رابطه ۱) براساس چگالی آب شور و شیرین و ضخامت هر محدوده استوار است (شکل ۳). در این روابط چگالی آب شیرین با ρ_f و چگالی آب شور با ρ_s ارائه می‌شود. معمولاً چگالی آب شیرین یک گرم بر سانتیمتر مکعب و چگالی آب شور متغیر و بصورت کلی ۱/۰۲۵



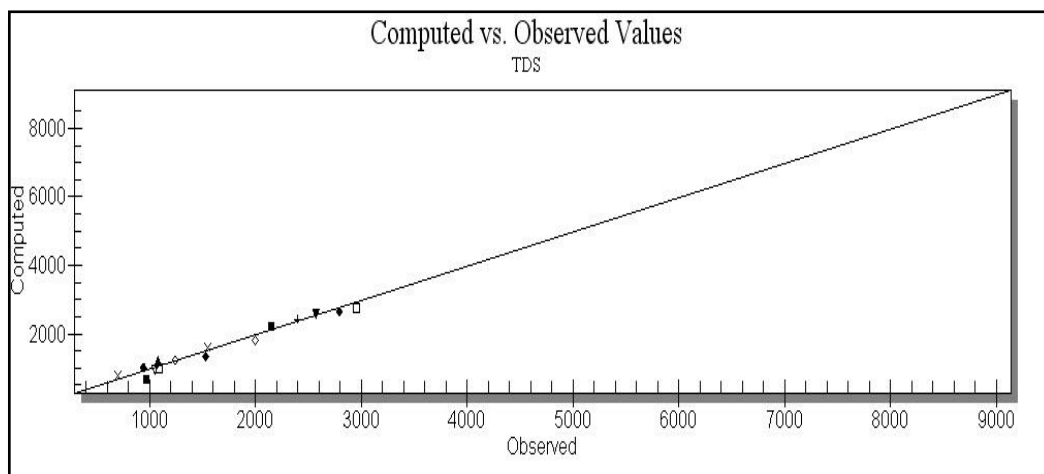
شکل ۳- تصویر شماتیک رابطه Hazen و Gelberg.

Figure 3- Schematic representation of the Hazen and Gelberg relationship.

دوره شبیه‌سازی برای صحت‌سنجی مدل کیفی انتخاب گردید و ارزیابی غلظت مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در طی سال انتهایی در دو دوره شش ماهه بصورت شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است که نتایج حاکی از همبستگی مناسب بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای است.

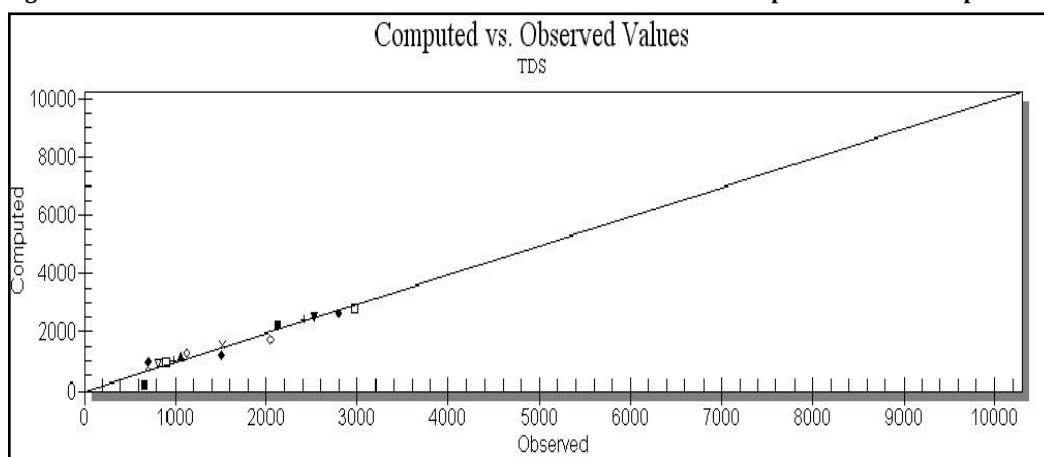
نتایج و بحث

یکی از مراحل مدل‌سازی کیفی، تطبیق مدل با واقعیت است. هدف از انجام این مرحله بدست آوردن اعتماد بیشتر به نتایج مدل کیفی و کارایی آن جهت پیش‌بینی وضعیت آتی در آبخوان است. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر مدل کیفی نسبت به زمان دارد، با توجه به مدل کمی، سال انتهای



شکل ۴- همبستگی مقادیر TDS مشاهده‌ای و محاسباتی در گام اول دوره صحت‌سنجی.

Figure 4- Correlation of observed and calculated TDS values in the first step of the validation period.



شکل ۵- همبستگی مقادیر TDS مشاهده‌ای و محاسباتی در گام انتهایی دوره صحت‌سنجی.

Figure 5- Correlation of observed and calculated TDS values at the final step of the validation period.

۱۰ ساله پیش‌بینی است. روند تغییرات پارامتر TDS در آبخوان سرایان حاکی از افزایش غلظت TDS می‌باشد. با توجه به ادامه روند بهره‌برداری کنونی و همچنین افزایش غلظت ناشی از تهاجم جبهه‌های آب شور در بخش جنوبی آبخوان است. با توجه به اینکه در مدلسازی کیفی جنوب آبخوان به‌عنوان مرز جبهه خروجی با غلظت TDS بالا در نظر گرفته شده است لذا برگشت آب و انتقال املاح بطرف آبخوان دور از ذهن نیست. در عمل نیز نتایج نشان می‌دهد که در چاه‌های نمونه‌برداری نزدیک خروجی روند افزایشی غلظت TDS بسیار شدید است. همچنین در مناطقی که میزان افت بیشتر است گرادیان هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی معکوس شده و جهت جریان آب زیرزمینی از خارج از آبخوان به داخل آبخوان تبدیل شده است. این معکوس شدن جریان سبب انتقال آب با املاح بالا و

با شبیه‌سازی پارامتر TDS در آبخوان سرایان و ارزیابی مناسب دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی، پیش‌بینی وضعیت تغییرات کیفیت آب زیرزمینی آبخوان با استفاده از مدل MT3D در شرایط نرمال اقلیمی در طی ۱۰ سال بصورت گام زمانی شش- ماهه انجام گرفت. بررسی اولیه نشان داد که غلظت TDS در ابتدای آبخوان (بخش شمالی آبخوان) مناسب و هرچه به طرف خروجی آبخوان حرکت کنیم غلظت TDS افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج استخراجی از مدل کمی که حاکی از افت سطح آب زیرزمینی با ادامه روند برداشت کنونی است، میزان غلظت TDS با این روند نیز دارای همبستگی معنی‌داری است.

نتایج ارائه شده حاکی از افزایش میزان غلظت TDS به مقدار متوسط ۵۴۰ میلی‌گرم در لیتر در ۲۰ چاه کیفی در طی دوره

غلظت TDS در دوره‌های زمانی آینده است و شرایط کیفی آب بدلیل پمپاژ بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر، با کاهش روبرو بوده است (نخعی نژادفرد و همکاران، ۱۳۹۶؛ شریفان و خزیمه‌نژاد، ۱۳۹۸). لذا اهمیت تدوین سناریوهای مدیریتی برداشت از چاه‌ها در مورد این آبخوان بیش از پیش مطرح می‌شود. لذا بخش دیگر این پژوهش که به تدوین سناریوهایی کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور به منظور افزایش کیفیت آب این آبخوان پرداخته است، سبب پررنگ‌تر شدن اهمیت انجام این پژوهش و کاربردی شدن آن شده است.

بالتبع آن افزایش مقدار شوری یا TDS شده است. جدول ۱ تحلیل پارامتر کیفی TDS را در آبخوان بصورت غلظت اولیه TDS در مدلسازی، غلظت TDS در انتهای دوره پیش‌بینی و تغییرات غلظت TDS را نشان می‌دهد. چاه نمونه‌برداری W7 با افزایش ۹۴۳۹ میلی‌گرم برلیتر بیشترین میزان افزایش غلظت و منطقه مرکزی آبخوان در چاه نمونه‌برداری کیفی W19 با ۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر کمترین افزایش غلظت TDS در طی ۱۰ سال را داشته‌اند. بررسی یافته‌های سایر پژوهش‌های انجام شده در مورد کیفیت آب آبخوان کویری سرایان مانند (کاردان مقدم و بنی‌حبیب، ۱۳۹۶)، با نتایج بدست آمده از این تحقیق حاکی از صحت نتایج مبنی بر پیش‌بینی افزایش

جدول ۱- تغییرات غلظت TDS در مدلسازی و پیش‌بینی (میلی‌گرم بر لیتر).

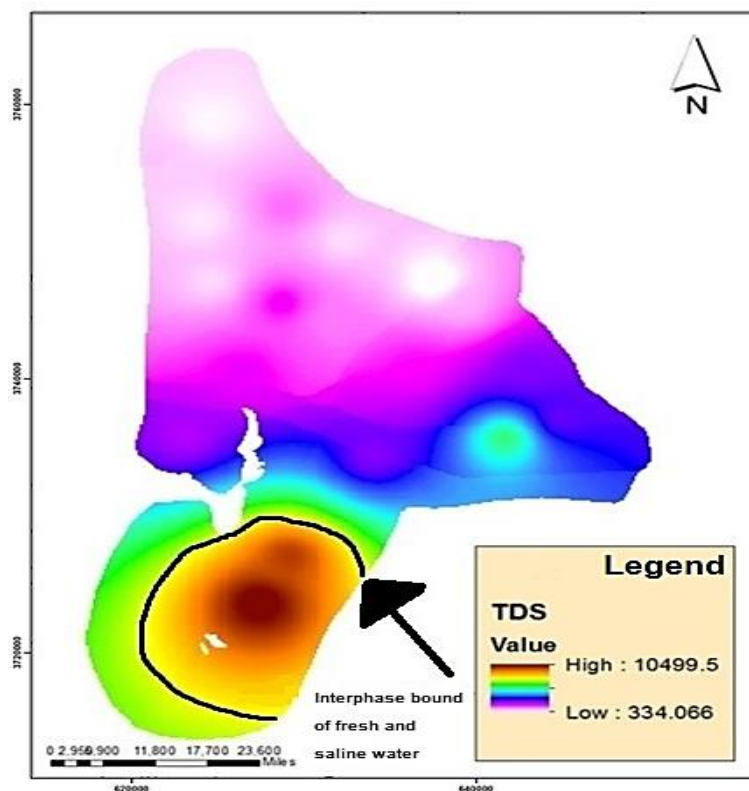
Table 1 - Changes in TDS concentration in modeling and prediction (mg/l).

Well code	UTM X	UTM Y	Initial concentration	Concentration at the end of the forecast period	TDS changes
W1	623322	3756138	990	2700	1710
W2	624926	3753765	7183	11740	4557
W3	625804	3751482	760	1386	626
W4	626280	3758726	650	1357	707
W5	626337	3747011	864	1248	384
W6	628154	3740149	2130	3858	1728
W7	629140	3723525	10500	19939	9439
W8	630376	3745436	2100	11457	9357
W9	630592	3752474	1583	10091	8508
W10	630788	3726898	9580	13901	4321
W11	633203	3744084	1500	1695	195
W12	633794	3750014	840	1675	835
W13	635557	3734156	2800	3590	790
W14	637901	3740684	2000	3301	1301
W15	639052	3747023	333	3359	3026
W16	639589	3749448	2500	2569	6
W17	640659	3745370	1135	1913	778
W18	643041	3735458	5500	6630	1130
W19	644402	3740512	2832	3000	168
W20	646184	3736983	3002	3500	498

آب شور از زیرآب شیرین در این منطقه نیز می‌تواند صحیح باشد که با توجه به عدم داشتن داده‌های کیفی، لوگ حفاری، پروفیل‌های ژئوفیزیک، مقاطع زمین‌شناسی و حفاری به همراه آزمایش کیفی در منطقه اشباع نمی‌توان این سناریو را مدل یا مستندسازی کرد.

با توجه به نتایج بدست آمده مرز جبهه آب شور و شیرین در بخش جنوبی آبخوان بصورت شکل ۶ برآورد می‌شود. این محدوده با توجه به نتایج غلظت TDS در آبخوان و نتایج مدلسازی کیفی با استفاده از مدل MT3D بدست آمده است.

تحلیل غلظت TDS در انتهای دوره پیش‌بینی و تغییرات TDS در طی مدلسازی نشان می‌دهد که جنوب شرقی آبخوان سرایان یکی از مناطقی است که دارای غلظت بالای TDS بوده و تغییرات این منطقه نیز حاکی از روند سریع افزایشی غلظت است. بررسی تغییرات غلظت TDS نشان داد که در دو منطقه در شمال آبخوان نیز شاهد تغییرات و افزایش TDS هستیم که بررسی کاربری اراضی نشان داد که منطقه شمال غربی در پایین‌دست اراضی با کاربری مسکونی و منطقه شمال شرق اراضی با کاربری کشاورزی قرار دارد. البته سناریوی بالازدگی



شکل ۶- مرزبندی آب شور و شیرین در آبخوان سرایان.

Figure 6- Boundary between saltwater and freshwater in the Sarayan aquifer.

کیلوگرم در هر مترمکعب تعیین گردید. بر این اساس مقدار پارامتر DRHODC براساس رابطه ۲ بدست می‌آید.

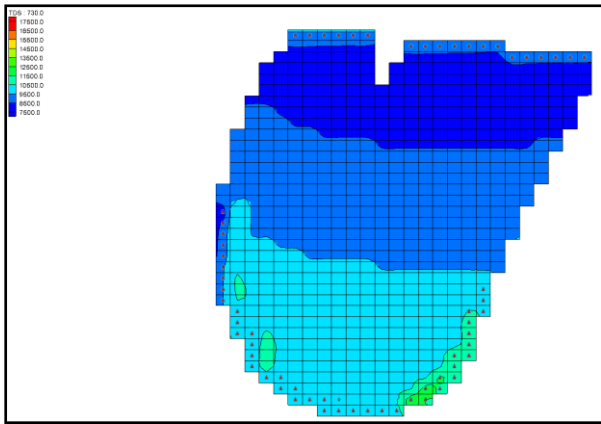
Density/concentration.slop(DRHODG): (۲)

$$\frac{1024(\text{kg/m}^3)-1000(\text{kg/m}^3)}{35(\text{kg/m}^3)-0(\text{kg/m}^3)}=0.7$$

پس از ورود متغیرهای ورودی به مدل شبیه‌سازی اولیه انجام شد. دوره شبیه‌سازی جهت تعیین عمق پیشروی آب شور مشابه مدل کمی MODFLOW و مدل کیفی MT3D دوره چهارساله انتخاب شد. در شکل‌های ۷ ((۷-الف) تا (۷-د)) میزان پیشروی آب شور در چهارسال دوره شبیه‌سازی بصورت سالانه را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پیشروی در سال اول حدود ۱۲۰۰ متر، در سال دوم ۱۲۱۲ متر، در سال سوم ۱۲۱۸ متر و در سال چهارم ۱۲۲۱ متر رسیده است. تغییرات غلظت TDS در ناحیه جنوب شرقی آبخوان بیشترین میزان تغییر را داشته است که برابر با ۴۳۲۰/۵۵ میلی گرم بر لیتر می‌باشد.

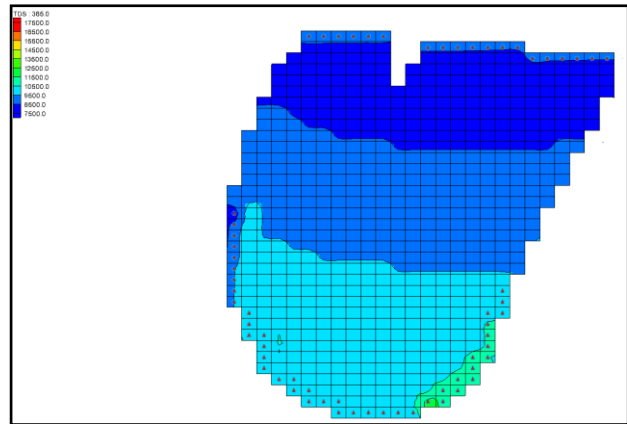
پیش بینی مدل کیفی SEAWAT

پس از تعیین مرز جبهه‌های آب شور، لب‌شور و شیرین با استفاده از تحلیل مدل کیفی MT3D براساس غلظت TDS در آبخوان سرایان، به منظور شبیه‌سازی اثر تهاجم جبهه‌های آب شور در بخش جنوب شرق آبخوان از مدل SEAWAT استفاده و شبیه‌سازی انجام گرفت. بدین منظور با تعریف شبکه‌بندی ۵۰۰×۵۰۰ متری مشابه مدل کمی در بخش شور آبخوان و در نظر گرفتن شبکه جریان در عمق شبیه‌سازی انجام گرفت. پس از معرفی خصوصیات استراگرافی آبخوان، معرفی پکیج VDF در مدل SEAWAT با توجه به غلظت اولیه TDS در آبخوان، غلظت TDS در آب شور و چگالی آب شور و شیرین انجام گرفت. دو پارامتر DENSREF و MT3DRHOFLG به ترتیب مربوط به چگالی آب شیرین در آبخوان و غلظت نمک در آبخوان در مدل وارد شد. با توجه به مطالعات انجام شده و اندازه‌گیری متوسط چگالی آب شور در جنوب آبخوان سرایان مقدار ۱۰۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان غلظت نمک ۳۵



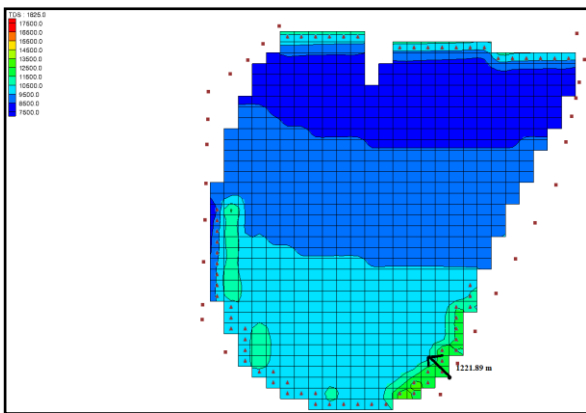
شکل ۷ب- نمای پیشروی آب شور در سال دوم.

Figure 7b- View of saline water intrusion in the 2nd year.



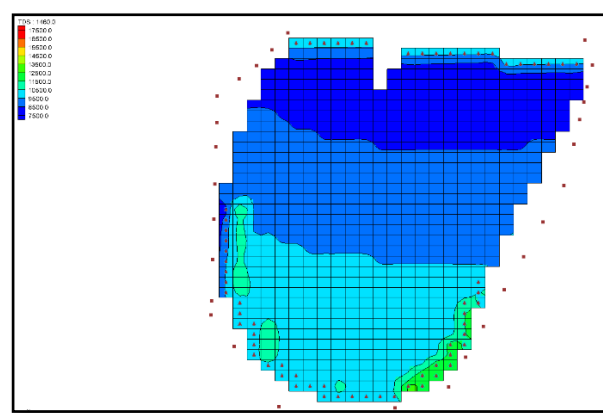
شکل ۷الف- نمای پیشروی آب شور در سال اول.

Figure 7a- View of saline water intrusion in the 1st year.



شکل ۷د- نمای پیشروی آب شور در سال چهارم.

Figure 7d- View of saline water intrusion in the 4th year.



شکل ۷ج- نمای پیشروی آب شور در سال سوم.

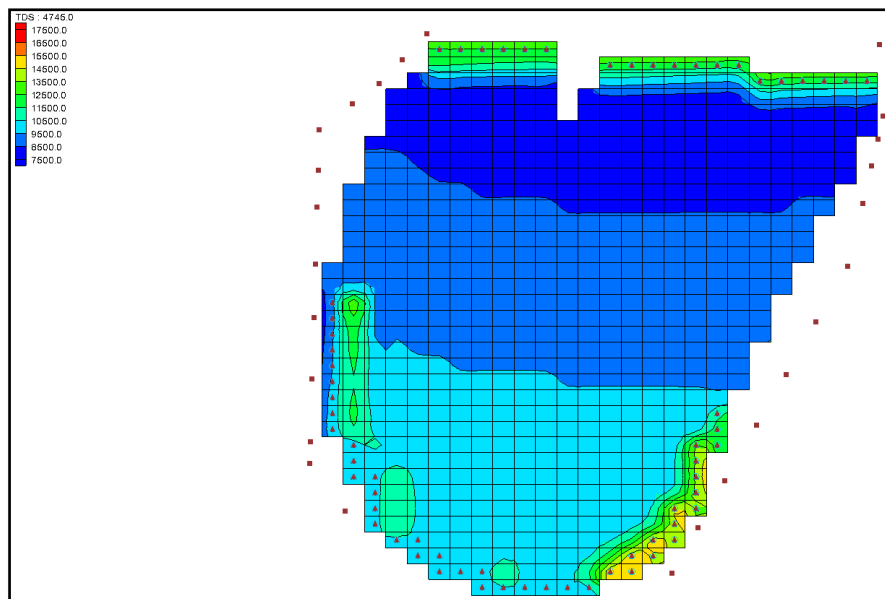
Figure 7c- View of saline water intrusion in the 3rd year.

شکل ۷- پروفیل مرزبندی آب شور و شیرین.

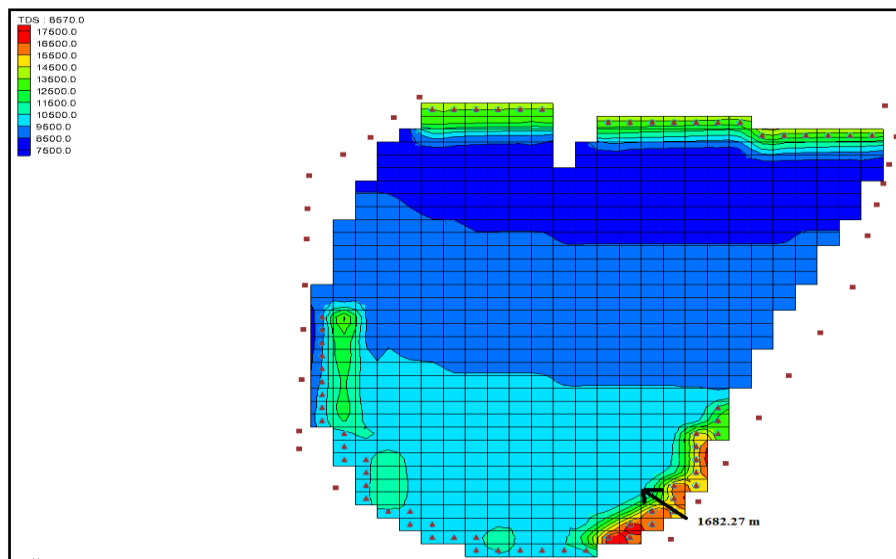
Figure 7- Saline and Freshwater Boundary Profile.

استفاده از مدل SEAWAT استفاده شد. در شکل ۱۰ نمایی سه‌بعدی از آبخوان سرایان در سال آخر پیش‌بینی قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این شکل هجوم آب شور مقداری از سمت جنوب غربی آبخوان نیز می‌باشد که به دلیل وجود سطح تبخیر در این ناحیه است. مقداری هم از سمت شمال بوده که به دلیل کاربری کشاورزی در این نواحی و برداشت بی‌رویه و وارد شدن آلاینده‌ها می‌باشد.

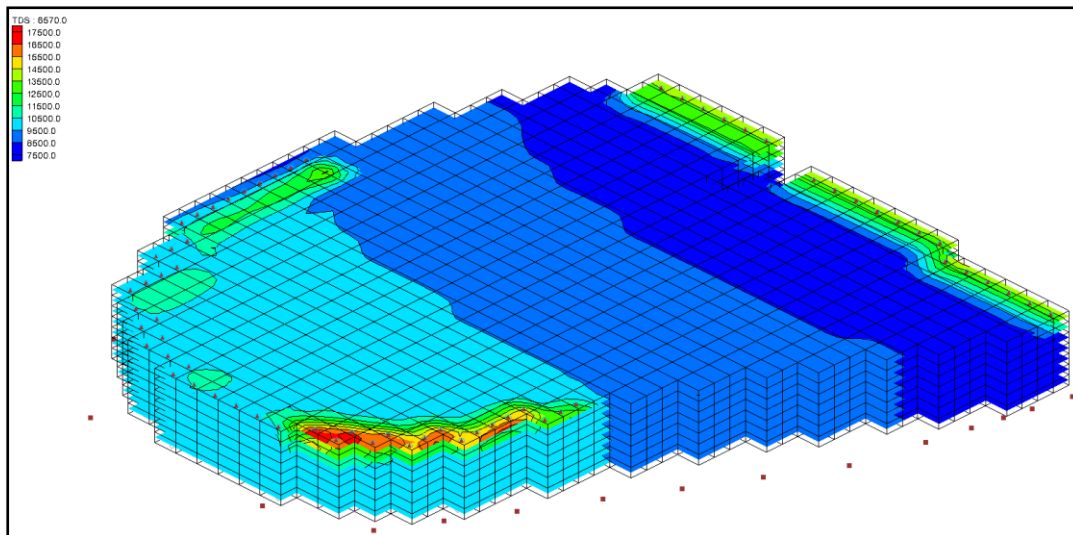
پس از شبیه‌سازی اولیه در طول دوره چهارساله، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان به منظور تعیین میزان تهاجم جبهه‌های آب شور به مدت ۱۰ سال انجام گرفت. در شکل ۸ نمایی از هجوم آب شور در سال ششم پیش‌بینی ارائه شده است که نشان می‌دهد که تهاجم جبهه‌های آب شور در طول ۱۴۴۰ متر افزایش داشته است. میزان تغییر غلظت TDS نیز به مقدار ۱۶۶۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. در شکل ۹ پیش‌بینی تهاجم آب شور در سال انتهایی شبیه‌سازی نشان داده شده است که به بیشترین مقدار خود و مقدار ۱۶۸۲ متر رسیده است. به منظور تعیین میزان بالادستی آب شور از کف آبخوان در نوار مرزی جنوب شرقی آبخوان از مدلسازی سه‌بعدی آبخوان با



شکل ۸- نمای پیشروی آب شور در سال ششم پیش بینی.
Figure 8- View of saline water intrusion in the sixth year of the prediction.

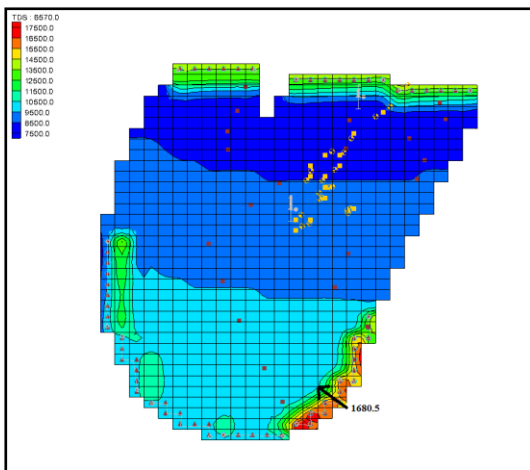


شکل ۹- نمای پیشروی آب شور در سال آخر پیش بینی.
Figure 9- View of saline water intrusion in the last year of the prediction.



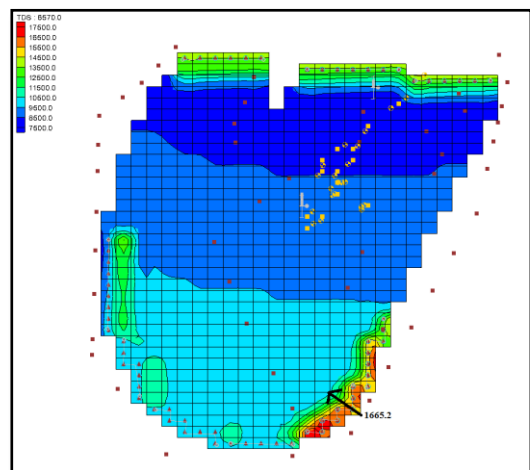
شکل ۱۰- تصویری از پیشروی آب شور از نمای سه بعدی در سال آخر پیش بینی.

Figure 10- A three-dimensional (3D) view of the saltwater intrusion in the last year of prediction.



شکل ۱۱ الف- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت ۳ درصدی.

Figure 11a - Boundary delineation of saltwater and freshwater intrusion fronts under a 3% reduction in extraction scenario.



تحلیل سناریوهای کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور

در سال‌های اخیر، توزیع غیریکنواخت منابع آب موجود و افزایش فزاینده تقاضای آب، همراه با استخراج بی‌رویه منابع آب، نیاز شدید به انتقال آب از حوضه‌های دارای منابع آب کافی به حوضه‌های مبتلا به کمبود آب را ایجاد کرده است. کاهش برداشت از منابع آب به منظور استفاده و بالابردن بهره‌وری استفاده از آب یکی از راهکارهای موثر در کاهش اثرات منفی افت و کاهش کیفیت آبخوان‌ها است. در این مطالعه به منظور ارائه راهکار و تصمیم‌گیری در خصوص عوامل موثر بر افزایش و کاهش پیشروی جبهه‌های آب شور کویری، از چهار راهکار کاهش برداشت به میزان ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به برداشت فعلی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. این کاهش برداشت می‌تواند از طریق پلمپ چاه‌های غیرمجاز، تغییر در پروانه چاه‌های مورد بهره‌برداری و تاکید روی عدم اضافه برداشت، کاهش سرتاسری چند درصد برداشت و غیره می‌تواند توسط شرکت‌های آب منطقه‌ای اعمال شود. براساس این چهار راهکار شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان انجام گرفت. در شکل- های ۱۱ (الف) تا (د-۱۱) نتایج نهایی در انتهای دوره پیش‌بینی با استفاده از مدل SEAWAT نشان داده شده است.

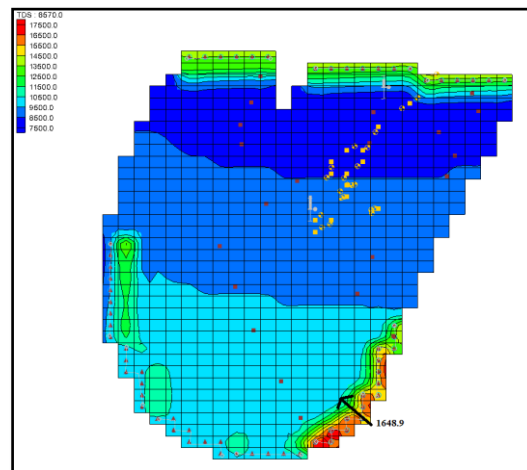
MT3D خیلی قابل مشاهده نبوده و این عدم تغییر حاکی از این موضوع است که با پیشروی آب شور به طرف آبخوان در قسمت خروجی برگشت آن زمان بر بوده و به سرعت قابل جبران نمی‌باشد. با توجه به راهکارهای پیشنهادی که کاهش برداشت نسبت به وضعیت فعلی است نتایج نشان داد که در راهکار کاهش ۳ درصد میزان تهاجم جبهه آب شور ۱۶۸۰ متر می‌باشد که این مقدار در راهکار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش برداشت آب به ترتیب ۱۶۴۵، ۱۶۴۸ و ۱۶۴۱ متر خواهد بود. تحلیل کلی نتایج کاهش برداشت آب نسبت به وضعیت فعلی نشان می‌دهد که میزان تهاجم آب شور نسبت به عقب‌زدگی آب شور تحت راهکارهای کاهش برداشت آب بسیار شدیدتر می‌باشد و اعمال راهکار کاهش برداشت اگرچه سبب عقب‌زدگی آب شور می‌شود اما زمان بر است.

نتیجه‌گیری

امروزه با رشد جمعیت و تکنولوژی میزان تقاضا برای آب رشد شایانی داشته است. با توجه به عدم پراکندگی مناسب زمانی و مکانی نزولات آسمانی سبب شده تا در مناطق خشک، نیاز برای تامین آب بیشتر از پیش باشد. منابع آب زیرزمینی تنها منبع تامین آب در مناطق خشک می‌باشد که صیانت از این منابع بسیار حائز اهمیت است. این تحقیق با هدف بررسی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور کویری به آبخوان و بررسی عمق شوری ورودی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت راهکارهای مختلف جهت تعادل‌بخشی و عقب‌زدگی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پس از بررسی داده‌ها و مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان مشخص گردید که غلظت TDS رابطه مستقیمی با افت سطح ایستابی در آبخوان داشته و بخش‌های جنوبی آبخوان با توجه به تحت تأثیر بیشتر نسبت به حجم منابع آب زیرزمینی سبب افزایش بیشتر غلظت TDS می‌شود. در بخش جنوبی آبخوان بیشترین افزایش غلظت مربوط به چاه W7 واقع در منطقه جنوب سه قلعه با افزایش غلظت ۹۴۳۹ میلی‌گرم بر لیتر در غلظت TDS را نشان داد. جبهه‌های آب شور با توجه به چگالی بیشتر نسبت به آب شیرین در زیر آبخوان می‌باشد و برداشت در کل آبخوان سبب پائین آمدن تراز آب در کل آبخوان شده است. این کاهش تراز و بالا آمدن اندک سطح آب شور سبب برهم خوردن

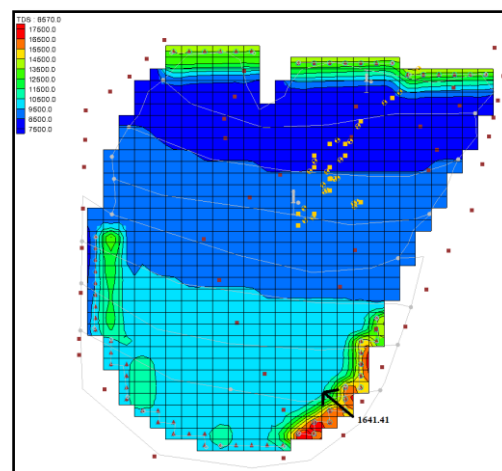
شکل ۱۱- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت ۵ درصدی.

Figure 11b - Boundary delineation of saltwater and freshwater intrusion fronts under a 5% reduction in extraction scenario.



شکل ۱۱ج- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت ۱۰ درصدی.

Figure 11c - Boundary delineation of saltwater and freshwater intrusion fronts under a 10% reduction in extraction scenario.



شکل ۱۱د- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت ۱۵ درصدی.

Figure 11d - Boundary delineation of saltwater and freshwater intrusion fronts under a 15% reduction in extraction scenario.

شکل ۱۱- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوهای مختلف.

Figure 11 - Boundary delineation of saltwater and freshwater intrusion fronts under different scenarios.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییرات تراز مرز جبهه آب شور در عمق با استفاده از مدل SEAWAT مشابه مدل کیفی

(مطالعه موردی: دشت سرایان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰(۲): ۱۴۶-۱۶۲.

کاردان مقدم، ح.، بنی حبیب، م. ا.، ۱۳۹۶. بررسی اثرات زیست محیطی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی- آبخوان سرایان). آب و خاک. ۳۱(۳): ۶۷۳-۶۸۸.

کمالی، ا.، نیک‌سخن، م. ح.، ۱۳۹۶. توسعه مدلی برای محاسبه شاخص پایداری کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی. اکوهیدرولوژی. ۴(۴): ۱۰۷۱-۱۰۸۷.

نخعی نژاد، س.، زهتابیان، غ.، ملکیان، آ.، خسروی، ح.، ۱۳۹۶. بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت سرایان در خراسان جنوبی. تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۲۴(۲): ۲۶۸-۲۷۹.

یوسفی، ح.، محمدی، ع.، نوراللهی، ی.، ۱۳۹۷. آنالیز کیفیت آب سد باباحیدر فارسان با استفاده از روش تحلیلی NSFQWI. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۹(۱۸): ۱-۱۱.

Abd-Elaty, I., Polemio, M., 2023. Saltwater intrusion management at different coastal aquifers bed slopes considering sea level rise and reduction in fresh groundwater storage. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37(6), 2083-2098.

Aboelsoud, H.M., Habib, A., Engel, B., Hashem, A.A., Abou El-Hassan, W., Govind, A., Elnashar, A., Eid, M. and Kheir, A.M., 2023. The combined impact of shallow groundwater and soil salinity on evapotranspiration using remote sensing in an agricultural alluvial setting. Journal of Hydrology: Regional Studies, 47, p.101372.

Adimalla, N., Dhakate, R., Kasarla, A. and Taloor, A.K., 2020. Appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in Central Telangana, India. Groundwater for Sustainable Development, 10, p.100334.

Barbieri, S., Antelmi, M., Panday, S., Baratto, M., Angelotti, A., and Alberti, L., 2022. Innovative numerical procedure for simulating borehole heat exchangers operation and interpreting thermal response test through MODFLOW-USG code. Journal of Hydrology, 614, 128556.

Braca, G., Bussettini, M., Ducci, D., Lastoria, B. and Mariani, S., 2019. Evaluation of national and

گرادیان هیدرولیکی بین دو طرف آب شور و آبخوان شیرین می‌شود. این تغییرات سبب انتقال آب شور به طرف آب شیرین می‌شود. بنابراین در بخش شمال غربی آبخوان تأثیر زیادی را در تهاجم جبهه‌های آب شور پذیرش می‌کند. بررسی کیفی چاه‌های اطراف این منطقه نیز این موضوع را تأیید می‌کند. وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور بطرف آبخوان در این منطقه حاکی از افزایش غلظت بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در طی دوره پیش‌بینی می‌باشد. نتایج سناریوی کاهش برداشت آب زیرزمینی نشان داد که با کاهش برداشت آب در سطح آبخوان میزان برداشت آب کاهش و در پی آن میزان افت در بخش‌های مختلف آبخوان روند نزولی را خواهد داشت. این کاهش افت آبخوان سبب بالا آمدن سطح آب و بالا رفتن پتانسیل هیدرولیکی در بخش آب شیرین می‌شود. در سناریوهای کاهش برداشت آب زیرزمینی مشاهده شد که هرچقدر درصد برداشت از چاه‌های بهره‌برداری کاهش یابد میزان عقب‌گرد آب شور بیشتر بوده و با هم رابطه عکس دارند. بنابراین کاهش برداشت در ناحیه آبخوان سرایان می‌تواند بهترین راه‌حل برای نجات آب زیرزمینی این منطقه مهم باشد.

منابع

پارسا صدر، ح.، ناصری، ح.، علیجانی، ف.، ۱۴۰۱. فرایندهای هیدروژئوشیمیایی و شیمی گازهای محلول در آبخوان گاریز، جنوب غرب استان یزد. هیدروژئولوژی. ۷(۲): ۱-۱۴.

جوادی، س.، کاردان مقدم، ح.، ۱۳۹۸. شبیه‌سازی سه بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور در آبخوان‌های کویری با استفاده از مدل SEAWAT. مدیریت آب و آبیاری. ۹(۱): ۱۲۹-۱۴۲.

سامانی، س.، بوستانی، ف.، ایرجی زاده، م.، ۱۳۹۹. استفاده از مدل ژئوشیمیایی معکوس و روش‌های هیدروژئوشیمی در جهت بررسی منشأ شوری آبخوان سروستان. هیدروژئولوژی. ۵(۱): ۳۳-۱۶.

شریفان، ف.، خزیمه‌نژاد، ح.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی و بررسی مخاطرات ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی

the Zanzan Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(23), p.523.

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*, 242, 103848.

Rao, N. S., Sunitha, B., Sun, L., Spandana, B. D., and Chaudhary, M., 2020. Mechanisms controlling groundwater chemistry and assessment of potential health risk: a case study from South India. *Geochemistry*, 80(4), 125568.

Sharan, A., Datta, B., Lal, A., and Kotra, K. K., 2024. Management of saltwater intrusion using 3D numerical modelling: a first for Pacific Island country of Vanuatu. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 120.

Swain, S., Sahoo, S. and Taloor, A.K., 2022. Groundwater quality assessment using geospatial and statistical approaches over Faridabad and Gurgaon districts of National Capital Region, India. *Applied water science*, 12(4), p.75.

Venegas-Quiñones, H.L., Thomasson, M. and Garcia-Chevesich, P.A., 2020. Water scarcity or drought? The cause and solution for the lack of water in Laguna de Aculeo. *Water Conserv. Manag*, 4, pp.42-50.

regional groundwater resources under climate change scenarios using a GIS-based water budget procedure. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 30, pp.109-123.

Gomaa, S. M., Hassan, T. M., and Helal, E., 2021. Assessment of seawater intrusion under different pumping scenarios in Moghra aquifer, Egypt. *Science of the Total Environment*, 781, 146710.

Grönwall, J., Danert, K., 2020. Regarding groundwater and drinking water access through a human rights lens: Self-supply as a norm. *Water*, 12(2), 419.

Langevin, C. D., Hughes, J. D., Provost, A. M., Russcher, M. J., and Panday, S., 2024. MODFLOW as a Configurable Multi-Model Hydrologic Simulator. *Groundwater*, 62(1), 111-123.

Li, C., Gao, X., Li, S., and Bundschuh, J., 2020. A review of the distribution, sources, genesis, and environmental concerns of salinity in groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 41157-41174.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. US Geological Survey. 588 p.

Mohammadi Arasteh, S., Shoaie, S.M., 2020. An assessment of the effects of excessive groundwater abstraction on the quality of groundwater resources of