مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۱۴۲-۱۲۹

شبیه‌سازی سه بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور در آبخوان‌های کویری با استفاده از مدل SEAWAT

سامان جوادی[1*]، حمید کاردان مقدم[2]
۱. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.
۲. کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلات کیفی در بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی، هجوم جبهه‌های آب شور از بخش خروجی آبخوان‌ها است که به‌تدریج با حرکت افقی و عمودی سبب شورشدن بخش خروجی آبخوان می‌شود. در این مطالعه، جهت بررسی تهاجم جبهه‌های آب شور از بخش خروجی آبخوان کویری از شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان با استفاده از مدل‌های MODFLOW، MT3D و SEAWAT استفاده شد. تحلیل نتایج کمی آبخوان نشان داد که روند افت آب زیرزمینی ادامه داشته و در بخش‌های خروجی آبخوان جهت جریان آب زیرزمینی با توجه به کاهش گرادیان هیدرولیکی و افت شدید، معکوس شده است. این تغییر جهت جریان سبب ورود آب با املاح بالا به آبخوان شده که بر این اساس شبیه‌سازی سه بعدی کیفی آبخوان جهت تهاجم جبهه‌های آب شور از سطح آبخوان با استفاده از مدل MT3D انجام شد. نتایج این مدل نشان داد که در بخش خروجی آبخوان غلظت کلراید، افزایش چشم‌گیری داشته و تا ۷۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز می‌رسد. هم‌چنین نتایج تهاجم جبهه‌های آب شور در عمق (بعد سوم) آبخوان با استفاده از مدل SEAWAT نشان داد که میزان تهاجم حداقل ۱۰۰ متر در کف آبخوان بیش‌تر از سطح آبخوان است. پس از شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان، پیش‌بینی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور در شرایط نرمال انجام شد که نتایج نشان داد که که طول پیشروی جبهه‌های آب شور ۴۰۰ متر افزایش داشته و با ادامه روند فعلی بهره‌برداری این روند افزایش و سبب معکوس شدن جریان در سایر جبهه‌های خروجی نیز خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: تهاجم آب شور، جهت جریان آب زیرزمینی، غلظت کلراید، مدل‌سازی آب زیرزمینی.

Utilizing 3-D simulation of saltwater intrusion in desert aquifer by SEAWAT model

Saman Javadi[1], Hamid Kardan Moghaddam[2]
1. Assistant Professor, Department of irrigation and drainage, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran.
2. Researcher, Water Research Insstitute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran.
Received: October 10, 2019 Accepted: December 01, 2019

Abstract
Saltwater intrusion is in the bottom of aquifer with gradually horizontal and vertical moving shortcoming of the most important quality issue especially in desert area. In this study the 3-D simulation of saltwater intrusion carried out by MODFLOW, MT3D and SEAWAT models. The results of flow modelling show that the decreasing in water table has been continued, in order to the hydraulic gradient in bottom of aquifer is reversed. . Considering the trend of groundwater direction indicated a huge volume of saltwater with high concentration moved to the aquifer. For 3-D simulation of quality flow MT3D model have been used. The results of this study show that the chloride concentration considerably increased due to 7000 ppm in the bottom of aquifer. Moreover, the saltwater intrusion moved about 100 meters to the aquifer in interface area. Consequently, the prediction of saltwater intrusion reaches to 400 meters in near future.

Keywords: Chloride concentration, Groundwater direction, Groundwater modelling, Saltwater intrusion.

* نویسنده مسئول Email: javadis@ut.ac.ir

مقدمه

امروزه مدیریت صحیح در بهره‌برداری از منابع آب یکی از مهم‌ترین اصول چالشی در مدیریت یکپارچه منابع آب جهت رسیدن به توسعه پایدار است (۴ و ۹). تعارضات متعدد در بهره‌برداری، با توجه به محدودیت‌های منابع آب باعث شده تا علاوه بر مشکلات کمی منابع آب زیرزمینی، مشکلات کیفی و نامطلوب‌شدن کیفیت آب جهت بهره‌برداری را در برداشته باشد (۶ و ۱۵). افت شدید سطح آب زیرزمینی در کنار کاهش تغذیه آبخوان‌ها در بسیاری از مناطق، منجر به افزایش غلظت املاح در منابع آب زیرزمینی شده است (۱ و ۱۴). این افزایش غلظت املاح در آبخوان‌های ساحلی که حجم آب قابل‌توجه شوری را دارا است با توجه به افزایش بهره‌برداری سبب تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف دریا به ساحل نیز می‌گردد. این تهاجم باعث افزایش غلظت در بخش خروجی و در صورت استمرار اضافه برداشت سبب انتقال املاح شور به بخش‌های میانی آبخوان نیز می‌گردد. افزایش بیش از توان اکولوژیک آبخوان، سبب کاهش و در ادامه باعث تغییر در گرادیان هیدرولیکی شده و جهت جریان آب زیرزمینی در بخش‌های خروجی از آبخوان معکوس گردد (۲). این برگشت آب که همراه با حجم زیاد املاح است، باعث تغییرات کیفیت در آبخوان و شورشدن می‌شود. تهاجم جبهه‌های آب شور سبب انتقال شوری به داخل آبخوان و شورشدن چاه‌های برداشت آب می‌شود. شورشدن آب چاه‌ها باعث کاهش بازدهی محصولات کشاورزی، حاصلخیزی خاک‌های زراعی و قابلیت استفاده آب در شرب و صنعت می‌شود (۱۷). این پدیده در آبخوان‌های ساحلی که پتانسیل بهره‌برداری بالایی دارند بسیار مشهود است.

نکته حائز اهمیت در تهاجم جبهه‌های آب شور از دریا به ساحل وجود یک بخش شور در خروجی آبخوان است که علاوه بر حجم بالا از نظر کمی و غلظت بالای املاح، دارای چگالی بیش‌تر از آب شیرین بوده و این پتانسیل را ایجاد می‌کند که با افت آبخوان جهت جریان آب زیرزمینی تغییر و هجوم آب شور شروع شود (۷). با توجه به فیزیک مناطق کویری، به‌خصوص حوضه‌های آبریزی منتهی به بخش شور این پدیده دور از ذهن به‌نظر نمی‌آید. عدم بهره‌برداری مناسب در آبخوان‌های کویری که با تنش‌های اقلیمی و عدم دسترسی به منابع آب سطحی مواجهند باعث می‌شود که جریانات خروجی از آبخوان چه به‌صورت سطحی و چه زیرسطحی تحت تأثیر قرار گیرد. بر این اساس احتمال رخداد پدیده تهاجم جبهه‌های آب شور کویری به داخل آبخوان، در صورت افت تراز آب زیرزمینی و تغییر گرادیان هیدرولیکی انجام می‌گیرد. از سوی دیگر در اکثر آبخوان‌ها بخش خروجی، تحت تأثیر سازندهای شور زمین‌شناسی قرار داشته و از نظر مرفولوژیکی نیز خاک منطقه ریزدانه با ظرفیت بالای تبادل کاتیونی است. لذا برگشت آب از بخش انتهایی آبخوان در اثر تهاجم جبهه‌های آب شور کویری سبب تخریب کیفیت آب و خاک می‌گردد. کاردان مقدم و بنی‌حبیب (۲)، تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت سرایان را با استفاده از مدل کیفی MT3D برای شبیه‌سازی غلظت TDS مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت کل املاح محلول در آب در بخش خروجی آبخوان افزایش قابل‌توجهی داشته که این افزایش تنها ناشی از انتقال املاح از بالادست و آبشویی املاح ناشی از فعالیت‌های کشاورزی نمی‌تواند باشد. بررسی مدل کمی آبخوان نیز نشان داد که با توجه به روند بهره‌برداری از آبخوان و افت محسوس در بخش خروجی آبخوان، بخشی از جبهه‌های آب زیرزمینی خروجی تغییر جهت جریان داده و باعث حرکت آب و املاح به داخل آبخوان شده است. هم‌چنین در آبخوان‌هایی که با عدم

مدیریت عرضه و تقاضا مواجه هستند، بررسی جبهه‌های آب ورودی و خروجی نشان داد که مسیر جبهه خروجی آب زیرزمینی با افت آبخوان تغییر کرده و تبدیل به جریان آب زیرزمینی ورودی می‌شوند (۱۱). بر این اساس حفظ ابخوان‌ها در مقابل مسائل زیست‌محیطی مثل تهاجم جبهه‌های آب شور یکی از مهم‌ترین بحث‌های حفاظت منابع آب زیرزمینی است که در این تحقیق شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور و پیش‌بینی هجوم آب شور در طول سال‌های آتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از این‌رو، در این تحقیق برای نخستین‌بار شبیه‌سازی سه بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور از ناحیه کویری در آبخوان اردستان استان اصفهان صورت می‌پذیرد. به‌عبارت دیگر علاوه بر سطح آبخوان میزان تهاجم در عمق آبخوان به‌صورت حد ایترفاز مشخص می‌گردد.

مواد و روش‌ها

تهاجم جبهه‌های آب شور

برداشت بی‌رویه از منابع آب شیرین در آبخوان‌ها سبب افت شدید و در پی آن کاهش گرادیان هیدرولیکی شده و تداوم آن سبب تهاجم آب شور به سمت بالا می‌شود (۱۲). تهاجم[1] این پدیده به شکل گوه[2] است و فصل مشترک آب شور- شیرین می‌تواند چند متر تا چندین متر ضخامت داشته باشد. تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف یک محدوده شور به طرف یک محدوده شیرین براساس گرادیان هیدرولیکی تابع انتقال حرارت و چگالی است که به‌صورت همزمان انجام می‌گیرد. یکی از عوامل مؤثر در تغییرات چگالی مایع، دما است که تغییرات آن مورد بررسی قرار گیرد. با درنظرگرفتن تغییرات دما و غلظت به‌عنوان متغیر معادله انتقال به‌صورت (۱) ارائه می‌شود (۸ و ۱۰). این معادله که در آن اثر تغییرات حرارت و جرم به‌صورت همزمان شبیه‌سازی شده است.

$$\rho(C,T) = \rho f + \frac{\partial \rho}{\partial C} C + \frac{\partial \rho}{\partial T} T \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله ρf چگالی آب شیرین، تغییرات چگالی نسبت به غلظت و دما $\frac{\partial \rho}{\partial C}, \frac{\partial \rho}{\partial T}$، C غلظت محلول (جرم محلول به جرم کل سیال Ms/M) و T دما است. مقادیر T و C متغیرهای ورودی هستند که باید توسط کاربر وارد مدل شوند.

به‌منظور شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور از مدل عددی SEAWAT استفاده می‌شود. این مدل عددی یک کد محاسباتی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی سه بعدی تغییر چگالی در جریان آب زیرزمینی است که با توجه به تغییر غلظت و حرارت شبیه‌سازی را انجام می‌دهد (۱۳). این برنامه برای شبیه‌سازی انتقال آب شور در سفره‌های آب‌زیرزمینی و ورود آب شور به آبخوان‌های ساحلی به‌کار برده می‌شود. این مدل شبیه‌سازی را براساس فشار استاتیک آب شیرین، ارتفاع، شتاب گرانشی و غیره مطابق رابطه (۲) شبیه‌سازی می‌کند (۸ و ۱۰).

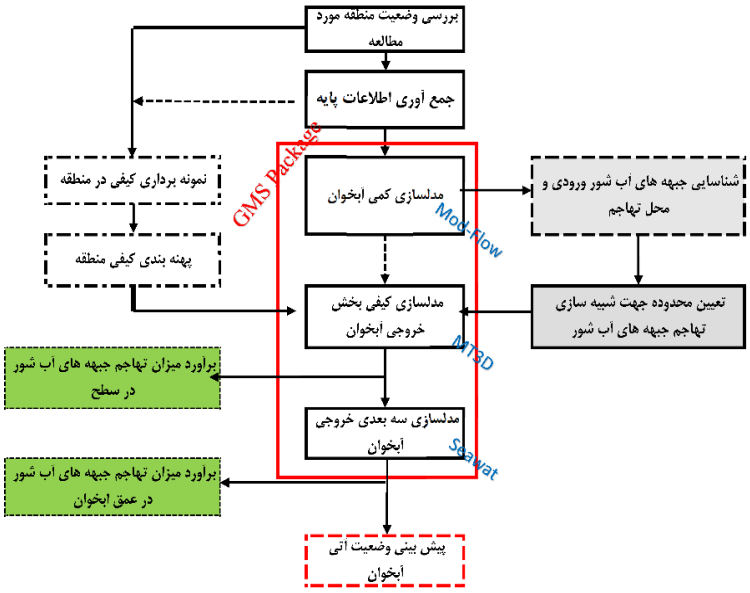
$$Z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، ρ_f چگالی آب شیرین، ρ_s چگالی آب شور می‌باشد.

روش تحقیق

مطالعات مختلفی در زمینه تهاجم جبهه‌های آب شور از بخش دریا به آبخوان انجام گرفته اما با توجه به حجم بالای آب شور در خروجی آبخوان‌های کویری و شباهت آن با دریا، تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف دریا به داخل آبخوان و پیش‌بینی میزان تهاجم به‌عنوان هدف این مطالعه است. بر این اساس روش تحقیق مطابق شکل (۱) تدوین شده است.

1. Intrusion
2. Wedge



شکل ۱. متدولوژی تحقیق

به این منظور شبیه‌سازی وضعیت کمی و کیفی آبخوان اردستان که بخش خروجی آن به دق سرخ که محدوده‌ای کویری است مورد بررسی قرار گرفت. این آبخوان آبرفتی با مساحت ۱۱۷۹ کیلومترمربع دارای بیش از ۳۰۰ حلقه چاه بهره‌برداری است که سالانه بیش از ۱۵۰ میلیون مترمکعب آب جهت مصارف کشاورزی و شرب برداشت می‌شود. بیش‌تر حجم آب مصرفی برای مصارف کشاورزی و حدود ۴ میلیون مترمکعب برای مصارف شرب و صنعت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد (۵). بررسی بیلان درازمدت در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این آبخوان با کسری مخزن بیش از ۴۰ میلیون مترمکعب در سال مواجه است.

مدل‌سازی کمی آبخوان

تبیین ابعاد مدل‌سازی و ایجاد یک مدل مفهومی مناسب براساس معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی می‌تواند اهداف یک مدل‌سازی را به‌خوبی نشان دهد (۳). در مدل مفهومی کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر بیلان منابع آب یک منطقه شامل منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان و هم‌چنین ساختار آبخوان تشریح می‌شود (۴). پس از تهیه مدل مفهومی، شبکه‌بندی آبخوان به‌منظور حل معادلات دیفرانسیل به‌روش تفاضل محدود ضروری است که از شبکه‌بندی ۵۰۰×۵۰۰ متر استفاده گردید. شبیه‌سازی به‌مدت ۶ سال آبی از ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۵-۱۳۹۴ با گام زمانی ماهانه انجام گرفت. با توجه به کم‌ترین تغییرات تراز آب، کم‌ترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده‌های موجود، ماه مهر ۱۳۸۹ به‌عنوان شروع دوره مدل‌سازی در حالت ماندگار انتخاب گردید. ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای که دارای دقت مناسب در اندازه-گیری سطح آب زیرزمینی است جهت شبیه‌سازی انتخاب شد. پس از تکمیل پارامترهای مدل‌سازی، مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی براساس صفربودن اختلاف میزان ورودی و خروجی اجرا گردید. پس از واسنجی پارامتر

هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار جریان، در طول دوره آماری ۴ ساله شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار انجام و پارامتر آبدهی ویژه واسنجی شد. پس از دقت مناسب مدل در حالت واسنجی، صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان برای مدت دو سال انجام گرفت.

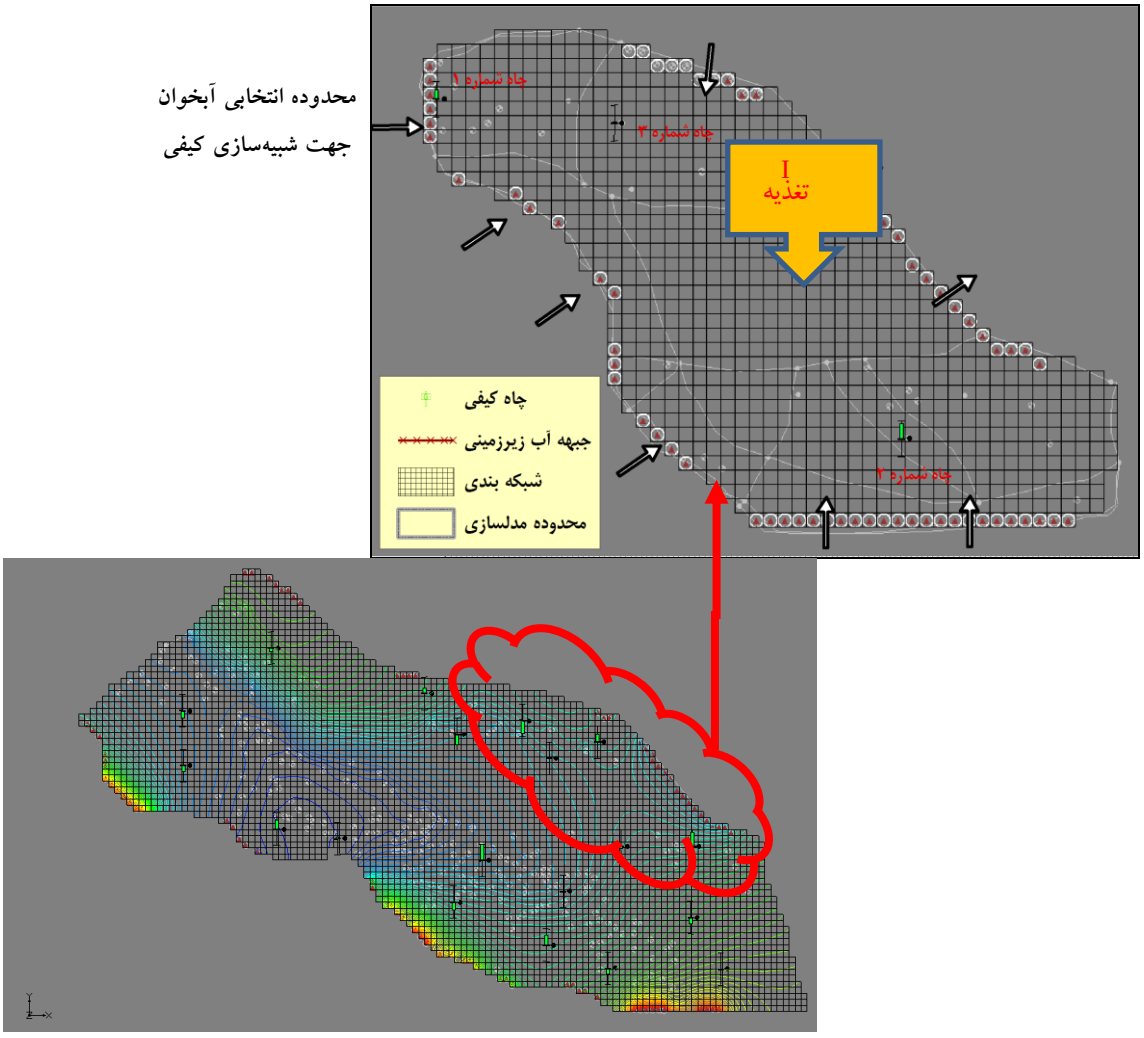
مدل‌سازی کیفی آبخوان

تهاجم آب شور و آب شیرین از دیدگاه هیدروژئوشیمی دارای دو ساختار متفاوت نسبت به هم هستند. اگر غلظت سدیم و کلراید تقریباً ۸۴ درصد غلظت املاح آب را تشکیل داده باشد این آب ناشی از تهاجم آب شور بوده و در صورتی که غلظت کلسیم و بی‌کربنات غالب باشد آب محدوده آب شیرین تلقی می‌شود (۱۶). ترکیب این آب‌ها سبب افزایش غلظت کلر در آبخوان می‌شود. تعیین مرز محدوده شبیه‌سازی کیفی آبخوان با توجه به فرض هجوم جبهه‌های آب شور در بخش خروجی بسیار مهم و حائز اهمیت است. بر این اساس تعداد ۳۰ حلقه چاه بهره‌برداری در منطقه نمونه‌برداری و غلظت TDS و کلراید سنجش شد. با توجه به نتایج استخراجی از وضعیت کیفی آبخوان در بخش خروجی مشخص می‌شود که با توجه به بالابودن غلظت کلراید آب زیرزمینی از نوع شوری بالا است. هم‌چنین غلظت TDS در این بخش از آبخوان حاکی از آب زیرزمینی با شوری متوسط را نشان می‌دهد. این تفاوت در نوع انتقال شوری به آبخوان است. بر این اساس مشخص می‌شود که کلراید به‌عنوان پارامتر مهم در انتقال املاح از جبهه‌های آب خروجی به داخل آبخوان است. بر این اساس پارامتر مهم جهت ارزیابی وضعیت کیفی و شبیه‌سازی آن، غلظت کلراید در این بخش از آبخوان است. پس از مشخص‌شدن نوع پارامتر جهت شبیه‌سازی کیفیت آب، با توجه به این‌که در بخش خروجی آبخوان ورود آب شور پیش‌بینی می‌شود و ازآنجایی‌که به مدل‌سازی کیفی تمام آبخوان نیازی نمی‌باشد، از این‌رو، تنها در بخش خروجی آبخوان که متأثر از جبهه‌های خروجی شور است شبیه‌سازی کیفی آبخوان انجام می‌شود. مرزبندی و شرایط اولیه شبیه‌سازی دقیقاً مشابه مدل کمّی اجراشده در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس در بخش خروجی آبخوان شبکه‌بندی به‌صورت شکل (۲) جهت شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. به‌منظور تعیین مرز مناسب جهت شبیه‌سازی کیفی آبخوان از تحلیل کیفی غلظت کلراید در طول دوره‌ی نمونه‌برداری استفاده می‌شود. این مرز براساس غلظت کلراید و محدوده جبهه‌های آب خروجی آبخوان تعیین شد.

پس از مشخص‌شدن مرزبندی و شرایط مدل‌سازی، مدل مفهومی کیفی آبخوان بر اساس غلظت ورودی از آبخوان به‌عنوان آب برگشتی به‌صورت لایه تغذیه از سطح آبخوان، غلظت ورودی از جبهه‌های خروجی آبخوان به‌صورت لایه مرز خروجی آبخوان GHB و غلظت انتقالی از جریان آب زیرزمینی در منطقه اشباع آبخوان به‌صورت لایه مرز ورودی به آبخوان GHB به‌عنوان مناطق ورودی غلظت کلراید و جبهه آب زیرزمینی خروجی آبخوان به‌عنوان منبع خروجی غلطت کلراید در آبخوان معرفی می‌شود. در شکل (۲) مدل مفهومی بخش خروجی آبخوان جهت شبیه‌سازی کیفی را نشان می‌دهد.

به‌منظور شبیه‌سازی مدل MT3D از دو پارامتر همرفت (Advection) و پخشیدگی (Dispersion) جهت تحلیل معادله انتقال املاح استفاده گردید. در محدوده مدل‌سازی سه چاه نمونه‌برداری کیفی دارای سری زمانی ثبت شده غلظت کلراید است که به‌مدت شش سال در مدل مفهومی به‌کار برده شده است. از آمار ثبت‌شده این سه چاه جهت تطبیق و واسنجی ضرایب پخشیدگی استفاده شده است. اجرای اولیه مدل کیفی دارای اختلاف بین غلظت مشاهداتی و شبیه‌سازی است که می‌بایست مورد واسنجی

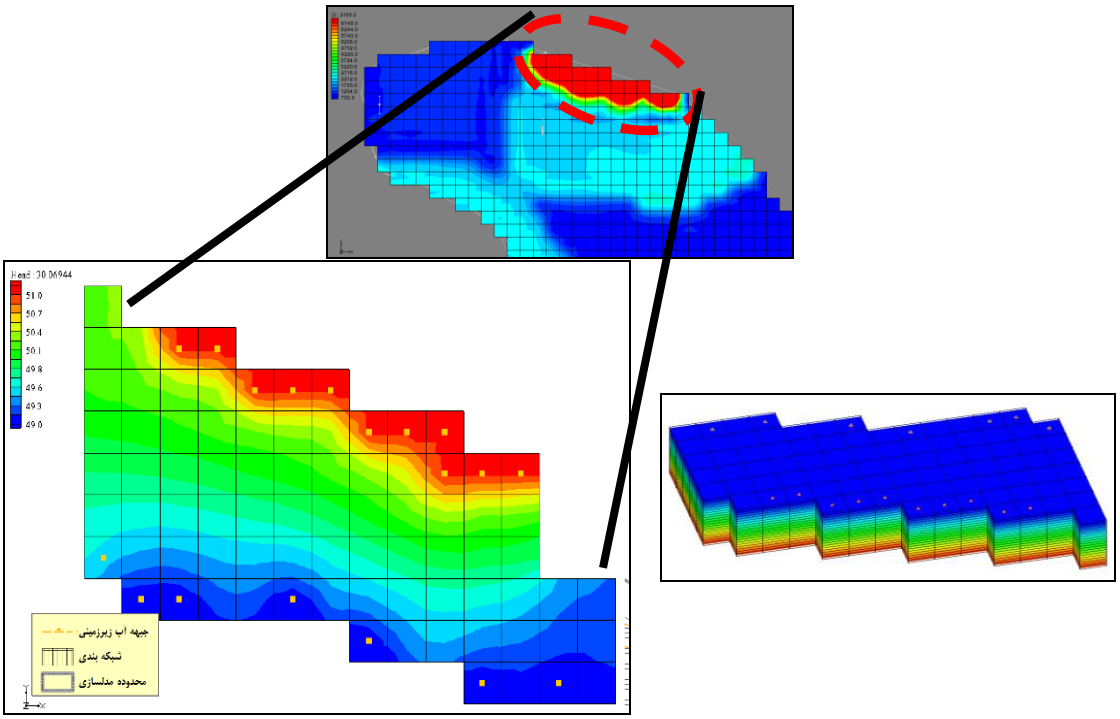
قرار گیرد. با توجه به مطالعات انجام‌شده و روابط حرکت آب در محیط متخلخل، پارامتر ضرایب پخشیدگی طولی (۱۸) در مدل کیفی جهت واسنجی انتخاب شد. در مدل کیفی با روش مستقیم (سعی و خطا) اقدام به واسنجی شد. هدف از واسنجی مدل کیفی به حداقل‌رساندن خطای ممکن بین غلظت داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. دوره واسنجی مدل کیفی مشابه مدل کمی آبخوان بازه ۶ ساله (۱۱-۲۰۱۰ تا ۱۶-۲۰۱۵) انتخاب شد. آنالیز خطای مدل‌سازی کیفی حاکی از میانگین خطای ۱۱/۱ میلیگرم در لیتر و میانگین مجذور خطای ۱۴/۸ میلیگرم در لیتر ثبت شد که مقدار خطای مناسب جهت شبیه‌سازی است. تحلیل نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل MT3D نشان می‌دهد که جبهه آب زیرزمینی در بخش شمال‌غربی آبخوان که جهت جریان آب زیرزمینی در آن بخش از آبخوان در مدل کمی، معکوس شده باعث ورود املاح شور به آبخوان می‌شود. تحلیل غلظت کلراید در این منطقه نیز نشان می‌دهد که در طول دوره‌ی ۶ ساله شبیه‌سازی غلظت این پارامتر افزایش دارد.



شکل ۲. مرزبندی بخش خروجی آبخوان و مدل مفهومی بخش خروجی آبخوان جهت شبیه‌سازی

با توجه به غلظت بالای املاح در بخش خروجی آبخوان و مشابهت غلظت TDS و کلراید در بخش خروجی آبخوان با غلظت املاح در دریا از یک‌طرف و بالاتربودن چگالی آب شور نسبت به آب شیرین سبب می‌شود که این تهاجم جبهه‌های آب شور علاوه بر حرکت افقی دارای حرکت عمودی یا بالازدگی جبهه‌های آب شور را نیز به‌همراه داشته باشد. بر این اساس شبیه‌سازی سه‌بعدی آبخوان با استفاده از مدل عددی SEAWAT می‌تواند میزان بالازدگی آب در آبخوان را نشان دهد. بر این اساس مدل مفهومی در بخش خروجی آبخوان برای شبیه‌سازی هجوم آب شور در عمق آبخوان در ناحیه خروجی به‌صورت ۳ بعدی با استفاده از نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS انجام گرفت. در شکل (۳) نمای سه‌بعدی از شبکه‌بندی آبخوان ارائه شده است.

پس از شبیه‌سازی کیفی آبخوان با استفاده از مدل MT3D، جهت شبیه‌سازی کیفی آبخوان در عمق از مدل SEAWAT استفاده می‌شود. در این حالت جبهه‌های آب شور در مقابل جبهه‌های آب شیرین قرار داشته، لذا مرزبندی مدل SEAWAT با مدل کیفی MT3D یکسان نمی‌باشد. هم‌چنین در مدل SEAWAT مرز جبهه‌های آب شور در مقابل مرز جبهه‌های آب شیرین به‌صورت GHB براساس نتایج مدل MT3D تعریف می‌شود. شبکه‌بندی مدل به‌صورت ۵۰۰×۵۰۰ متری مشابه مدل کمی و درنظرگرفتن شبکه جریان در عمق در جنوب آبخوان شبیه‌سازی انجام گرفت. در این شبیه‌سازی با توجه به انتخاب بخش خروجی آبخوان برای شبیه‌سازی مدل SEAWAT، شبکه در طول ۷۰۰۰ متر و شامل ۱۴ سلول در جهت محور X و ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متر شامل پنج تا هفت سلول ۵۰۰ متری در جهت محور Y ایجاد شد.



شکل ۳. مدل مفهومی جهت شبیه‌سازی با SEAWAT

به‌منظور نمایش بهتر اثر چگالی آب شور در عمق آبخوان، شبکه ۲/۵ متری و شامل ۲۰ سلول در عمق آبخوان ایجاد شد. تعداد سلول در نظر گرفته‌شده در عمق آبخوان با توجه به ضخامت آبخوان بوده و فاصله ۲/۵ متری نیز به‌منظور مشخص‌شدن تعداد مناسب سلول در نظر گرفته شده است.

جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی و خروجی به‌عنوان پارامتر مهم در اجرای مدل و شبیه‌سازی می‌بایست به‌صورت مناسب در محل دقیق وارد مدل شود. این جبهه‌ها دقیقاً مشابه مدل کمّی و کیفی MT3D اجراشده در مدل SEAWAT اعمال شد. به‌منظور بررسی اثر تهاجم جبهه‌های آب شور و حرکت شعاعی شوری در مدل SEAWAT دو ردیف سلول در شبکه‌بندی مدل در بخش شمالی مطابق مدل مفهومی از دو طرف اضافه تعریف گردید. این دو سلول در مدل تنها برای بررسی اثر حرکت به اطراف مورد بررسی قرار گرفته و جبهه ورودی یا خروجی در آبخوان نمی‌باشد. خصوصیات استراگرافی آبخوان در لایه‌های عمقی براساس توپوگرافی، تراز آب زیرزمینی اولیه و سنگ بستر آبخوان تعریف شد. پس از معرفی خصوصیات استراگرافی آبخوان، معرفی پکیج VDF در مدل با توجه به غلظت اولیه کلراید در آبخوان، غلظت کلراید در آب شور و چگالی آب شور و شیرین انجام می‌شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده و اندازه‌گیری به‌عمل‌آمده متوسط چگالی آب شور در بخش خروجی آبخوان اردستان ۱۰۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان غلظت نمک ۳۵ کیلوگرم در هر مترمکعب مشخص شده است. بر این اساس مقدار پارامتر DRHODC براساس رابطه زیر به‌دست آمد.

رابطه (۳) Dnsity/consentration. slop(DRHODG):

$$\frac{1028(kg/m3) - 1000(kg/m3)}{35(kg/m3) - 0(kg/m3)} = 0.8$$

دوره شبیه‌سازی جهت تعیین عمق پیشروی آب شور مشابه مدل کمّی MODFLOW و مدل کیفی MT3D دوره ۶ ساله انتخاب شد. به‌منظور تعیین غلظت در جبهه‌های آب خروجی در لایه‌های مختلف از نتایج نمونه‌برداری کیفی، داده‌های کیفی در و رابطه بین غلظت آب شور در بخش خروجی آبخوان استفاده و نتایج به‌صورت غلظت اولیه در مدل وارد شد.

نتایج و بحث

ارزیابی نتایج مدل‌سازی کمی

پس از شبیه‌سازی مدل کمی آبخوان، دقت نتایج مدل‌سازی در حالت ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی مدل مطابق جدول (۱) ارائه و نتایج این دقت را تأیید می‌کنند.

جدول ۱. میزان خطای مدل کمّی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار

شاخص خطا	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار	صحت‌سنجی
میانگین خطا	۰/۰۰۸	۰/۶۶۹	۰/۴۸
میانگین مطلق خطا	۰/۴۱۸	۱/۰۳۱	۰/۶۱۵
میانگین مجذور خطا	۰/۴۹۶	۱/۴۷۳	۰/۷۶۵

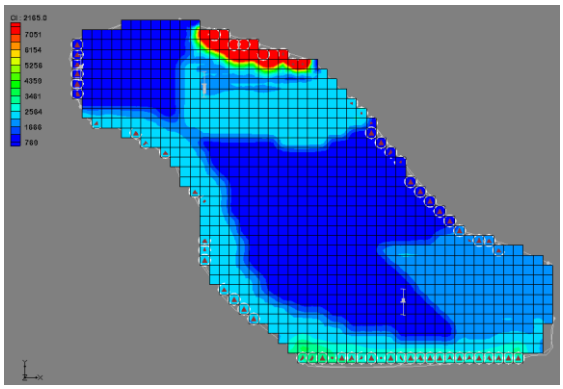
با توجه به بیلان منابع آب‌زیرزمینی منطقه و کسری مخزن، نتایج مدل‌سازی نیز حاکی از افت سطح آب زیرزمینی در کلیه چاه‌های مشاهده‌ای را نشان داد. نتایج حاکی از دقت مناسب نتایج شبیه‌سازی می‌باشد و تنها در چاه‌های مشاهده‌ای که تحت تأثیر منابع تخلیه در بخش مرکزی آبخوان قرار دارند دقت کم‌تری مشاهده شد.

هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان اردستان که یک آبخوان خشک و متصل به بخش

کویری است این نکته را نشان داد که جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از جنوب‌غربی آبخوان به‌طرف شمال‌شرقی در جریان بوده و تحلیل وضعیت بیلان منابع آب زیرزمینی، حاکی از بیلان منفی بوده به‌گونه‌ای که این آبخوان از نظر بهره‌برداری با محدودیت مواجه است. بررسی شبکه جریان آب زیرزمینی در مدل کمّی نشان داد که با توجه به بیلان منفی آبخوان و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی، بخش‌های خروجی آبخوان تابع این شرایط نبوده و تحلیل دقیق شبکه‌بندی آبخوان در بخش خروجی نشان داد که بخش‌های شمالی این منطقه که دارای تراز آب زیرزمینی بالاتری نسبت به بخش‌های جنوبی است. این تغییر و افزایش تراز به مفهوم، تغییر در جهت جریان آب زیرزمینی و معکوس شدن جهت جریان است (۱۹). از طرفی با توجه به افت شدید سفره آب زیرزمینی و به‌تبع آن کاهش گرادیان هیدرولیکی در آبخوان، میزان خروجی آب زیرزمینی از طریق جبهه‌های آب زیرزمینی در آبخوان کاهش دارد. این میزان کاهش در نتایج به‌دست‌آمده از بیلان منابع آب در طی ۲۰ ساله اخیر نیز مشهود بوده است. در آخرین گزارشات بیلان حجم کم‌تر از یک میلیون مترمکعب آب در سال به‌عنوان خروجی آبخوان برآورد شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). این کاهش جریان خروجی از آبخوان به طرف کویر سبب شده تا در بخش کویری که بهره‌برداری از منابع آب وجود ندارد، افت تراز آب زیرزمینی نیز وجود نداشته باشد. بر این اساس تراز آب در بخش کویری، نسبت به آبخوان اردستان در تراز بالاتری قرار گیرد و باعث هجوم آب شور از بخش خروجی آبخوان به داخل آبخوان شیرین شود. تحلیل این تغییر جهت جریان نشان می‌دهد بخش خروجی آبخوان که به آبخوان کویری با املاح زیاد متصل است بزودی سبب شورشدن اراضی، ایجاد تالاب‌های شور و اثرات زیست‌محیطی می‌گردد.

ارزیابی نتایج مدل‌سازی کیفی

با توجه به نتایج مدل کمّی آبخوان و معکوس شدن جهت جریان در بخش خروجی، شبیه‌سازی کیفی با استفاده از مدل MT3D انجام گرفت. نتایج غلظت کلراید در بخش خروجی آبخوان اردستان این نکته را روشن می‌سازد که هجوم جبهه‌های آب شور در بخش خروجی سبب بالارفتن غلظت شده است. این موضوع در زمان آنالیز و مقایسه چاه کیفی در بخش خروجی آبخوان نیز مشخص است. به‌طوری‌که چاه شماره ۱ و ۲ که تحت تأثیر جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به این منطقه قرار دارند دارای غلظت کلراید کم‌تر از ۱۰۰۰ میلیگرم در لیتر است ولی چاه شماره ۳ که در مسیر معکوس‌شدن جریان آب زیرزمینی است دارای غلظت بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بوده و روند تغییرات غلظت کلراید در طی ۶ سال نشان می‌دهد که بیش از ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت کلراید در این چاه افزایش داشته است. شکل (۴) مدل نهایی کیفی با استفاده از مدل MT3D را نشان می‌دهد.

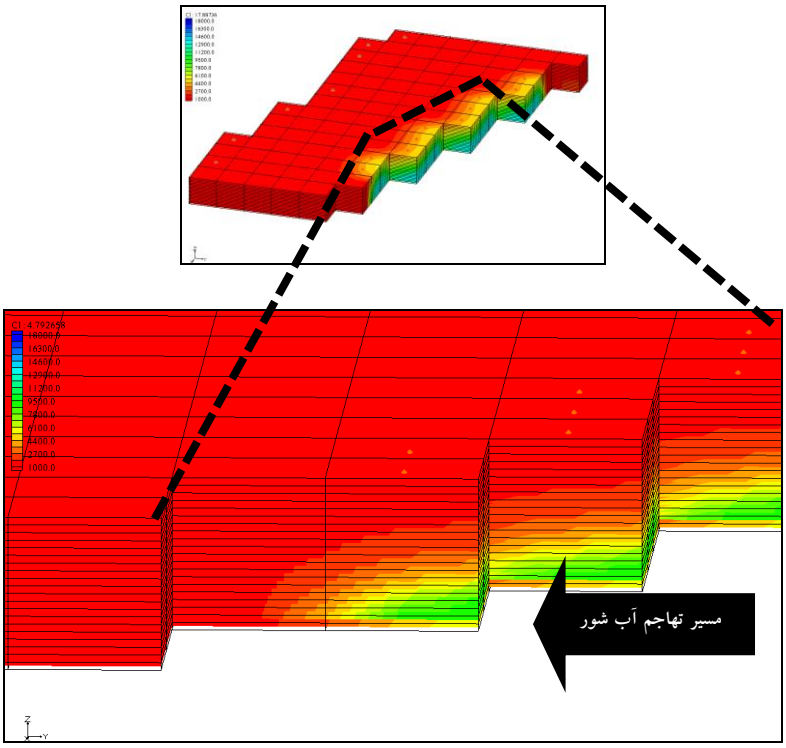


شکل ۴. میزان تهاجم جبهه‌های آب شور به داخل آبخوان اردستان در انتهای دوره شبیه‌سازی

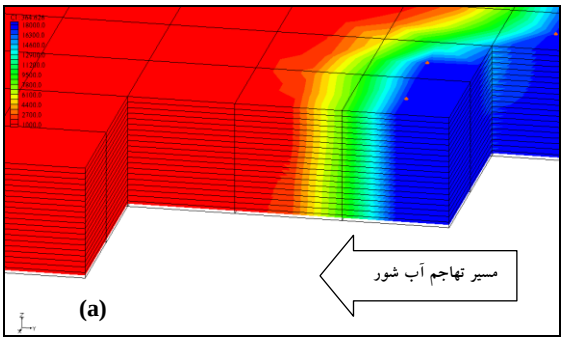
نتایج مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد که همان‌طورکه در مدل MT3D غلظت کلراید در سطح آبخوان در حال افزایش بود، در مدل SEAWAT نیز غلظت در سطح افزایش داشته

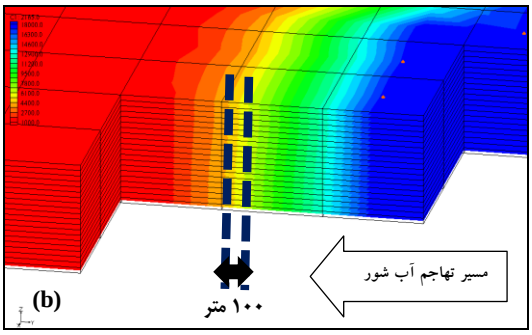
و علاوه بر آن با توجه به شبکه‌بندی بخش خروجی در عمق آبخوان، غلظت در عمق نیز به‌صورت یک معادله نمایی در حال افزایش است. در شکل (۵) برش عمودی از هجوم جبهه‌های آب شور در آبخوان نمایش داده شده است. این معادله نمایی براساس تغییرات چگالی آب شور و شیرین به‌دست می‌آید. آب شور دارای چگالی بیش‌تر و در زمان حرکت افقی به داخل آبخوان شیرین در زیر آب شیرین قرار می‌گیرد و لذا تهاجم جبهه‌های آب شور از کف بیش‌تر از لایه‌های بالایی بوده و عملاً ابتدا چاه‌هایی که تا سنگ بستر حفر شده باشد را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به مرور به سایر چاه‌ها تأثیر می‌گذارد. در این شکل حرکت آب شور به‌طرف آب شیرین و لایه‌بندی نشان داده شده است. شکل (۶) میزان تهاجم جبهه‌های آب شور در ابتدا (الف) و انتهای (ب) دوره شبیه‌سازی شش ساله را نشان می‌دهد.

نتایج ارائه‌شده در دوره‌ی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با توجه به چگالی آب شور در آبخوان اردستان تهاجم جبهه‌های آب شور از کف آبخوان بیش‌تر از حرکت افقی در سطح بوده و منحنی تهاجم در سطح آب زیرزمینی نسبت به کف آبخوان حدود ۱۰۰ متر اختلاف فاصله دارد که در شکل (۶) این اختلاف نشان داده شده است. همان‌طورکه در این شکل نشان داده شده است منحنی غلظت ۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از محل سطح آب زیرزمینی تا کف آبخوان که جریان آب زیرزمینی وجود دارد ۱۰۰ متر اختلاف فاصله دارد. بررسی‌های انجام‌شده در بخش خروجی آبخوان جهت تحلیل این میزان اختلاف نشان می‌دهد که با توجه به ریزدانه‌بودن بافت خاک منطقه و افزایش خاصیت مولینگی در این بخش این تفاوت بین تهاجم افقی و عمودی ایجاد می‌شود.



شکل ۵. نمای تهاجم جبهه آب شور و شیرین در آبخوان اردستان در عمق





شکل ۶. نمای سه‌بعدی شبیه‌سازی در ابتدای و انتهای دوره شبیه‌سازی

پیش‌بینی وضعیت کیفی آبخوان

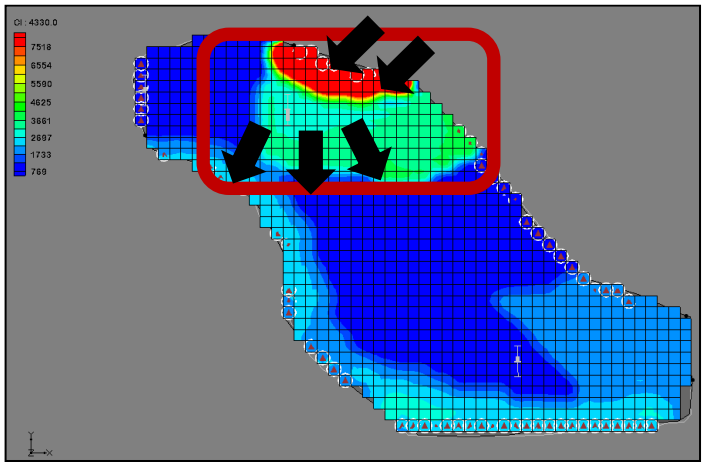
به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان، با توجه به بیلان منابع آب منطقه و اجرای مدل کمی آبخوان، میزان جریان ورودی به بخش انتهایی آبخوان محاسبه و در مدل وارد شد. با در نظرگرفتن کلیه شرایط مدل کمی، پیش‌بینی وضعیت آتی کیفی آبخوان انجام گرفت. نتایج حاکی از همبستگی بالا بین افت آب زیرزمینی و افزایش غلظت کلراید در آبخوان است. بر این اساس نتایج مدل کیفی MT3D نیز حاکی از افزایش غلظت کلراید در بخش خروجی مورد مدل‌سازی‌شده را نشان می‌دهد که در شکل (۷) ارائه شده است.

نتایج نشان داد که متوسط تهاجم آب شور در طی ۶ سال، حدود ۴۵۰ متر است که در بخش‌های مرکزی این افزایش بیش‌تر و در بخش‌های جنوبی و شمالی مرز خروجی این میزان کاسته می‌شود. غلظت کلراید در بخش منتهی به خروجی بیش از ۳۰۰۰ میلیگرم در لیتر است که این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر تهاجم در بخش خروجی و بالارفتن غلظت کلراید، پخشیدگی کلراید در سطح بعدی آبخوان با سرعت بیش‌تری منتقل شده و باعث می‌شود که آبخوان با این غلظت قابلیت بهره‌برداری را نداشته باشد. پس از ارزیابی نتایج پیش‌بینی غلظت کلراید در بخش خروجی آبخوان، پیش‌بینی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور با استفاده از مدل SEAWAT نیز در شرایط نرمال هیدرولوژیکی انجام گرفت. در شکل (۸) پیش‌بینی میزان تهاجم از عمق آب شور در آبخوان برای سال اول، سوم و ششم پیش‌بینی ارائه شده است.

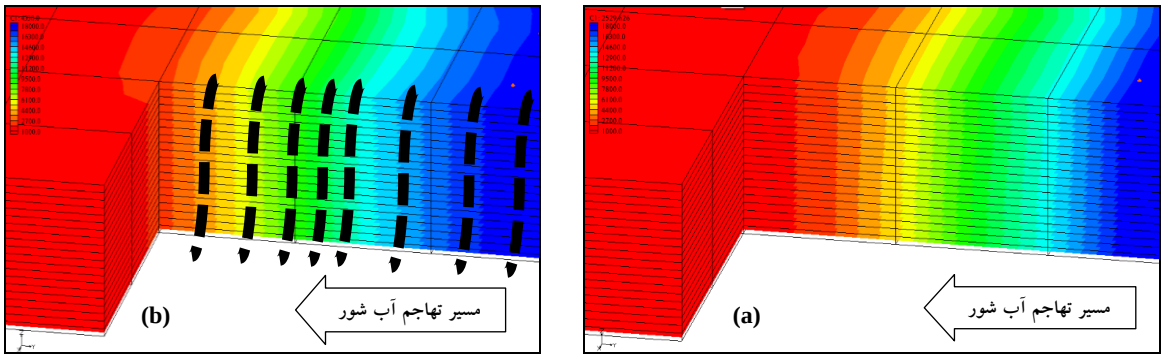
بررسی تهاجم جبهه‌های آب شور با استفاده از مدل SEAWAT نشان می‌دهد که همان‌طورکه در مدل کیفی MT3D غلظت کلراید در حال افزایش و وارد شدن به آبخوان است. بررسی‌های نشان می‌دهد که در طی ۶ سال دوره پیش‌بینی، ۴۰۰ متر از عمق تهاجم جبهه‌های آب شور را شاهد هستیم. نتایج نشان می‌دهد با ادامه روند معکوس شدن جریان تهاجم جبهه‌های آب شور افزایش دارد. هم‌چنین نتایج تحلیلی مدل SEAWAT نشان می‌دهد با توجه به غلظت اولیه کلراید در اعماق آبخوان، منحنی تهاجم آب شور از طرف بخش خروجی در حال تشدید و افزایش غلظت در اعماق مشاهده می‌گردد.

نتیجه‌گیری

تنش‌های مختلف در پی توسعه‌های شکل‌گرفته باعث شده تا علاوه بر بالارفتن حجم بهره‌برداری از منابع آب، حجم آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز رشد زیادی داشته باشد. این مطالعه به بررسی عدم مدیریت برداشت منابع آب زیرزمینی در آبخوان های منتهی به مناطق کویری پرداخته و بحث افت آب زیرزمینی و تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف کویر را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۷. پهنه‌بندی غلظت کلراید پیش‌بینی‌شده در خروجی آبخوان اردستان



شکل ۸. پیش‌بینی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور در سال اول (a) و ششم (b)

به این منظور با شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW وضعیت جبهه‌های آب زیرزمینی آبخوان مشخص و نتایج در طول دوره شبیه‌سازی نشان داد که با افت آبخوان، گرادیان هیدرولیکی تغییر و سبب تغییر جهت جریان آب زیرزمینی و انتقال آب شور از کویر به داخل آبخوان می‌شود. این تغییر مسیر جریان باعث ورود جبهه‌های آب شور به داخل آبخوان شده که بر این اساس شبیه‌سازی کیفی آبخوان با استفاده از مدل MT3D در سطح و مدل SEAWAT در عمق انجام گرفت. نتایج نشان داد که در بخش خروجی آبخوان غلظت کلراید به‌عنوان پارامتر کیفی، افزایش چشم‌گیری داشته و تا ۷۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز می‌رسد. هم‌چنین نتایج تهاجم جبهه‌های آب شور در عمق آبخوان نیز نشان داد که با توجه به اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین منحنی تهاجم یا اینترفاز بین جبهه‌های آب شور و شیرین وجود داشته و میزان تهاجم حداقل ۱۰۰ متر در کف آبخوان بیش‌تر از سطح آبخوان است. پیش‌بینی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور حاکی از تهاجم به میزان ۴۵۰ متر در سطح آبخوان است به‌گونه‌ای که بخش‌های مرکزی بخش خروجی آبخوان بیش‌ترین تأثیر را در افزایش غلظت دارند. غلظت کلراید در بخش منتهی به خروجی بیش از ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است که این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر تهاجم در بخش خروجی و بالارفتن غلظت کلراید، پخشیدگی کلراید در سطح بعدی آبخوان با سرعت بیش‌تری منتقل شده و باعث می‌شود که آبخوان با این

غلظت قابلیت بهره‌برداری را نداشته باشد. نتایج شبیه‌سازی کیفی در عمق آبخوان با استفاده از مدل SEAWAT نشان داد که طول پیشروی جبهه‌های آب شور ۴۰۰ متر افزایش داشته و با ادامه روند فعلی بهره‌برداری این روند افزایش و سبب معکوس‌شدن جریان در سایر جبهه‌های خروجی نیز خواهد شد. نتایج این مطالعه نشان داد که خطر تهاجم جبهه‌های آب شور کویری مثل تهاجم جبهه‌های آب شور دریا وجود دارد و این خطر زمانی اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند که معمولاً در مناطق کویری تنها منبع تأمین آب منابع آب زیرزمینی بوده که با افزایش املاح و تهاجم جبهه‌های آب شور سبب تخریب و از بین‌رفتن آبخوان جهت بهره‌برداری می‌شود.

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جهت حمایت مالی این پژوهش تحت پروژه تحقیقاتی با کد ۹۶/۱۳۳ و نیز در اختیار قراردادن کلیه آمار و اطلاعات، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱. جعفری، ف. و افتخاری، م. (۱۳۹۲). بررسی تبادلات آبی و نفوذ جبهه آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان‌های همجوار. مدیریت آب و آبیاری. ۳(۱): ۲۹-۴۷.

۲. کاردان مقدم، ح. و بنی‌حبیب، 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.

۳. کاردان مقدم، ح.، بنی حبیب، م.ا. و جوادی، س. (۱۳۹۶). ارزیابی اثر تغذیه مصنوعی بر تعادل‌بخشی آبخوان با استفاده از شاخص پایداری. اکوهیدرولوژی. ۴(۴): ۱۲۴۱-۱۲۵۳.

۴. کاردان مقدم، ح. و روزبهانی، ع. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل‌های شبکه بیزین در پیش‌بینی ماهانه سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). مدیریت آب و آبیاری. ۵(۲): ۱۳۹-۱۵۱.

۵. گزارش ممنوعیت بهره‌برداری از دشت اردستان. (۱۳۹۵). وزارت نیرو.

6. Armanuos AM and Negm A (2018) Integrated Groundwater Modeling for Simulation of Saltwater Intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt. In Groundwater in the Nile Delta (pp. 489-544). Springer, Cham.
7. Ganot Y, Holtzman R, Weisbrod N, Russak A, Katz Y and Kurtzman D (2018) Geochemical processes during managed aquifer recharge with desalinated seawater. *Water Resources Research* 54(2): 978-994.
8. Ghyben WB (1888) Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *Inst Ing Tijdschr* 21, 8-22.
9. Guo X, Feng Q, Si J, Xi H, Zhao Y and Deo RC (2019) Partitioning groundwater recharge sources in multiple aquifers system within a desert oasis environment: Implications for water resources management in endorheic basins. *Journal of Hydrology*, p. 124212.
10. Herzberg A (1901) Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder [The water supply of some spas at the North Sea]. *J Gasbeleuch Wasserversorg* 44(44): 815-819.
11. 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 Harvestimg Reesearcch* 3(1): 1-14.
12. Kardan Moghaddam H, Jafari F and Javadi S (2017) Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal* 62(1): 137-146.
13. Langevin CD, Shoemaker WB and GuoW (2003) MODFLOW-2000, the US Geological Survey Modular Ground-Water Model--Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT) (No. 2003-426).
14. Motallebian M, Ahmadi H, Raoof A and Cartwright N (2019) An alternative approach to control saltwater intrusion in coastal aquifers using a freshwater surface recharge canal. *Journal of Contaminant Hydrology* 222, 56-64.

15. Pandey V, Shrestha S, Chapagain S and Kazama F (2011) A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy* 14, 396-407.
16. Richter BC and Kreitler CW (1993) Geochemical Techniques for Identifying Sources of Groundwater Salinization. CRC Press.
17. Todd DK and Mays LW (2005) Groundwater hydrology, 3rd edn. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.
18. Zheng CC and Wang PP (1999) MT3DMS, a modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: Documentation and user's guide. US Army Engineer Research and Development Center, Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: USAERDC.
19. Sheikhipour B, Javadi S and Banihabib ME (2018) A hybrid multiple criteria decision-making model for the sustainable management of aquifers. *Environmental Earth Sciences* 77(19): 712.