

مدل سازی اثر سناریوی مدیریتی روی آبخوان کاشان با مدل ریاضی Seawat و Modflow

الیاس ریحانی^۱، حسین یوسفی^{۲*}، محمد میرزاوند^۳، سید جواد ساداتی نژاد^۲

۱. کارشناس ارشد اکوهیدرولوژی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۳. استادیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۳/۰۷؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۶/۰۷؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۱۰/۰۸)

چکیده

در ایران آب‌های زیرزمینی عنصر اصلی توسعه پایدار هستند. با توجه به افزایش جمعیت، بهره‌برداری بیش از حد، کاهش بارندگی و الگوی کشت نامناسب، آب‌های زیرزمینی با افت زیادی مواجه شده‌اند. یکی از مواردی که به تصمیم‌گیری و در نتیجه، مدیریت بهینه منابع آب کمک می‌کند، مدل‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی است. بنابراین در پژوهش حاضر با توجه به شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان کاشان، مدل کمی و کیفی آب زیرزمینی (۱۳۸۸-۱۳۹۶) در شرایط پایدار و ناپایدار با استفاده از مدل Seawat و Modflow در محیط نرم‌افزار GMS تهیه شده است. بررسی صحت مدل، از طریق آزمون‌های آماری نشان می‌دهد این دو مدل بهترین نتایج را در مدل‌سازی ارائه داده‌اند که پس از حصول اطمینان از مدل‌ها، روند کنونی آبخوان به بررسی وضعیت تراز آب زیرزمینی و کیفیت آبخوان در دوره (۱۳۹۶-۱۴۰۳) تحت فرض سناریوهای مدیریتی پرداخته شده است. نتایج حاصل از اعمال سناریوی روند کنونی نشان داد در دوره مورد مطالعه حجم آبخوان به میزان ۱/۵۵۶ میلیون متر مکعب کاهش و غلظت TDS به میزان متوسط ۱۶۰/۳۳ میلی‌گرم در لیتر افزایش خواهد داشت. سناریوی خاموشی چاه‌ها به مدت یک ماه نشان داد طی یک ماه حجم آبخوان به میزان ۰/۱۴۷ میلیون متر مکعب افزایش و غلظت نمک به میزان متوسط ۴۲/۲۷ میلی‌گرم در لیتر کاهش خواهد داشت. نتایج نشان‌دهنده توانایی زیاد مدل برای شناخت الگوی پیچیده حاکم بر آبخوان است و تطبیق خوبی بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی ایجاد شده است. گسترش آب شور در بخش شمال شرق باعث افت کمی و کیفی در این بخش از آبخوان شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، اجرای چندین سناریوی مدیریتی و علمی به طور هم‌زمان برای جلوگیری از وخیم‌تر شدن اوضاع کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی این توصیه می‌شود.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی، پیشروی آب شور، GMS، دشت کاشان، آب زیرزمینی.

مقدمه

آبخوان‌ها به عنوان یکی از بهترین مخازن آب زیرزمینی به منظور نگهداری و بازیافت آب به شمار می‌روند [۱]. افت کمی و کیفی منابع آب باعث ایجاد چالش‌های بسیاری برای انسان‌ها می‌شود [۲]. با توجه به روند کاهشی سطح آب‌های زیرزمینی و اضافه برداشت از ذخایر استاتیک، چنانچه وضع موجود را در سال‌های آتی نیز دنبال کنیم، علاوه بر افت مکرر سطح آب، منجر فرونشست دشت‌های کشور نیز خواهد شد. از دیگر عواقب ادامه روند موجود، کمبود کمی و کیفی منابع آب برای تأمین آب شرب شهری و روستایی و حتی کشاورزی و صنعتی خواهد بود [۳]. امروزه تقریباً ۵۵ درصد نیاز آبی کشور، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. این در حالی است که حجم تغذیه آبخوان‌ها توسط بارندگی ۳۵ میلیارد متر مکعب است [۴]. مسئله حائز اهمیت دیگر این است که حفر چاه‌های غیرمجاز و برداشت بی‌رویه آب به تهدیدی علیه منابع آبی زیرزمینی کشور تبدیل شده است. در نتیجه، به دلیل پیشروی آب شور بسیاری از چاه‌های شیرین به چاه شور تبدیل شده است [۵]. با توجه به جهانی بودن بحران آب، لزوم برنامه‌ریزی در حفظ و بقای آب کشور و استفاده بهینه از این منابع از مهم‌ترین برنامه‌های توسعه هر کشور است [۶]. به طوری که منابع آب زیرزمینی ایران حدود ۷۷/۸ درصد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی را تأمین می‌کند [۷]. افت سطح آب زیرزمینی طی فصل آبیاری، دلیل اصلی تداخل جبهه آب شور دریا به آبخوان ساحلی است؛ بنابراین مدل‌های شبیه‌سازی‌های هیدروشیمیایی به عنوان مبنایی برای مدیریت بهتر آبخوان ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. مطالعات مدل‌سازی در ایران برای نخستین بار در سال ۱۳۴۸ خورشیدی توسط سازمان خواربار جهانی (FAO) انجام شده است. در پی این مطالعات مدل ریاضی دشت ورامین تهیه شد [۹]. باغوند و همکاران به بررسی مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان مشهد با کد کامپیوتری MODFLOW پرداختند و دریافتند در سال ۱۴۰۰ مشکل آلودگی نترات برای بخش‌های عمده مرکزی و شرق آبخوان پابرجا خواهد ماند و غلظت آن از ۱۰ تا ۹۰ میلی‌گرم در لیتر متغیر خواهد بود و میزان افت سالیانه این آبخوان ۰/۹ متر خواهد بود و دلایل آلودگی را، چاه‌های جاذب و نفوذ فاضلاب در سطح

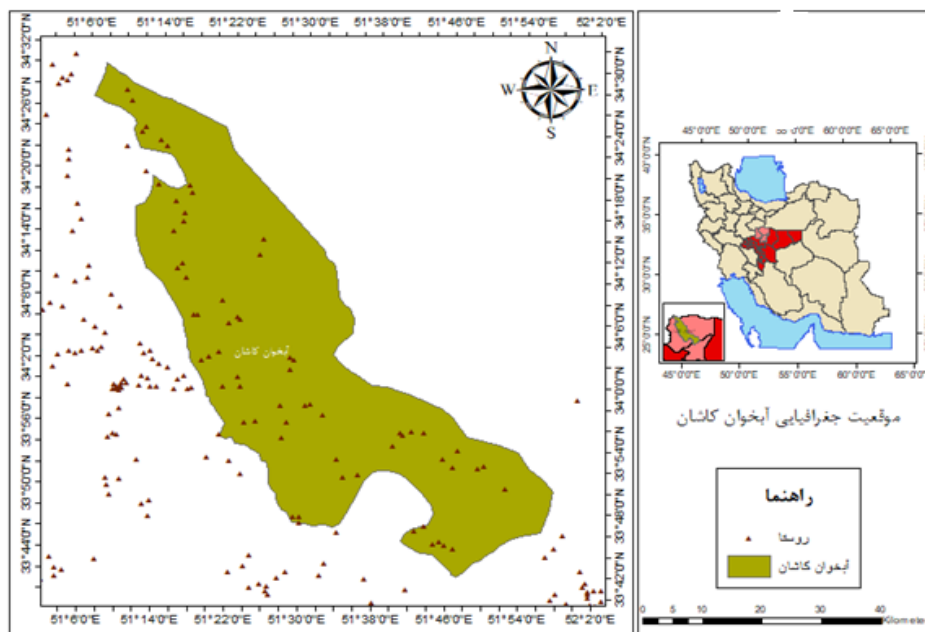
شهر بیان کردند [۱۰]. کمالی و نیک‌سخن به بررسی وضعیت پایداری آبخوان با استفاده از مدل ترکیبی که شامل مدل هیدرولیکی SWAT، مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل انتقال آلاینده MT3DMS در حوضه اصفهان-برخوار بود، پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان‌دهنده شاخص پایداری طی دوره شبیه‌سازی برابر ۰/۰۵۲ بود. همچنین نتایج پژوهش یادشده نشان داد با کاهش ۳۰ درصدی بهره‌برداری از آبخوان، شاخص پایداری کمی و کیفی آبخوان در بیشتر نقاط به طور شایان توجهی بهبود خواهد یافت [۱۱]. رجانی و همکاران دو آبخوان را در حوضه Balasore هندوستان با استفاده از شبیه‌سازی مدل MODFLOW مورد مطالعه قرار دادند و پاسخ مدل را نسبت به ۵ سناریوی پمپاژ با وضعیت پوشش موجود ارزیابی کردند و در نهایت استراتژی مدیریتی شامل کاهش ۵۰ درصدی پمپاژ آبخوان دوم در محل پایین دست رودخانه موجود در منطقه یادشده و افزایش ۱۵۰ درصدی پمپاژ آبخوان اول و دوم در نقاط با پتانسیل بالا را بیان کردند [۱۲]. وانگ و همکاران یک بسته جدید برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW در آبخوان‌های آزاد شیب‌دار ارائه کردند. بسته شیب ارائه‌شده را می‌توان برای پیش‌بینی هد هیدرولیکی در طول پروفیل عمودی آبخوان آزاد وقتی که شیب کمتر از ۰/۵۰ باشد، استفاده کرد. خطای به‌وجودآمده در مدل در نتیجه این بسته در شیب کمتر از ۰/۵۰ کم بوده، ولی برای شیب ۰/۷۵ قابل توجه و برای شیب ۱ معنادار است [۱۳]. پرادیپ کومار و آنیل کومار با استفاده از مدل Visual MODFLOW اقدام به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان چوتوپال ماندال، نالگوندا در ایالت تلنگانا در هند کردند. آن‌ها از ۱۹ چاه مشاهداتی استفاده کردند و در نهایت نتایج پژوهش یادشده بیانگر همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی بود [۱۴]. وانگ و همکاران به ارزیابی منابع مشترک آب‌های زیرزمینی و سطحی با مدل تعادل آب WetSpas-GMS در دشت sangiang پرداختند. نتایج مطالعه یادشده نشان می‌دهد باید برنامه‌های مدیریت یکپارچه ترویج یابد و به منظور کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست منطقه باید آبیاری با آب‌های زیرزمینی کاهش و استفاده از آب سطحی توسعه یابد [۱۵]. احمد و

شبیه‌سازی نفوذ آب شور به داخل یک محیط شور زیر یک تالاب رودخانه‌ای در هند پرداختند. آن‌ها برای انجام این پژوهش بیش از ۱۶ شبیه‌سازی با دو مدل MODFLOW و Seawat انجام دادند و نتیجه گرفتند که Seawat در مدل‌سازی چگالی‌های متغیر از MODFLOW بهتر عمل می‌کند و MODFLOW در مواقعی که کریپتوم بیش از ۱۰۰۰ باشد بهتر عمل می‌کند و همین‌طور MODFLOW دقت زیادی در پیش‌بینی تعیین محل تخلیه آب زیرزمینی را دارد [۲۰]. با توجه به مطالعات و پیشینه روش مطالعه آب‌های زیرزمینی با استفاده از MODFLOW و Seawat، در این پژوهش مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی باعث شناخت از وضعیت آبخوان شده و می‌توان منابع آبی موجود در منطقه را بهتر مدیریت کرد و به علت برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر و افزایش میزان شوری در آبخوان کاشان ضرورت مطالعه دقیق و کاربردی پیرامون وضعیت این آبخوان لازم و ضروری است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و هیدرولیکی آبخوان، بررسی تغییرات کیفی و کمی آب زیرزمینی، تهیه مدل‌های انتقال جریان و انتشار آلودگی در راستای کمک به درک مکانیسم حرکت آب شور و مدیریت بهره‌وری مناسب از آبخوان در آینده است.

موقعیت مطالعه‌شده

حوضه آبخیز کاشان به دو قسمت تقسیم می‌شود: بخشی از آن را اراضی بایر و شوره‌زار در بر می‌گیرد که وسعت آن، ۲۵۶۹ کیلومتر مربع و شامل مناطق کویری حاشیه دریاچه نمک است. بخش دیگر که مستعد کشاورزی است، معروف به دشت کاشان است و وسعتی حدود ۱۴۷۴ کیلومتر مربع دارد [۲۱]. در این مطالعه محدوده آبخوان (۲۲۲۳ کیلومتر مربع) کاشان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش به ارزیابی و مطالعه آب‌های زیرزمینی در محدوده یادشده که با عنوان آبخوان کاشان نام برده می‌شود و موقعیت آن که در شکل ۱ نشان داده شده است، پرداخته می‌شود.

همکاران مقدار آب زیرزمینی منطقه Dera Ghazi Khan پاکستان در محیط modflow شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش یادشده آن بود که استفاده حداکثر از آب سیلاب‌ها برای آبیاری زمین‌های کشاورزی (یا استفاده حداکثر از آب‌های سطحی) منجر به افزایش سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه می‌شود [۱۶]. شفیع و همکاران به مکانیسم کنترل نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از موانع پرداختند. آن‌ها در این مطالعه تلاش کردند شاخص‌های بهینه را از موانع زیرزمینی به دست آورند و ویژگی‌ها از جمله موقعیت، ارتفاع، ضخامت و هدایت هیدرولیکی را مد نظر قرار دادند. سناریوهای مختلفی تعریف و مدل SEAWAT اجرا شد نتایج نشان داد قرار دادن مانع و تغییر ضخامت مانع زیرزمینی به سمت ساحل، نفوذ آب شور را بیشتر کنترل می‌کند. در نهایت، نتایج نشان داد ساخت موانع زیرزمینی یک روش بلندمدت برای کنترل نفوذ آب شور است [۱۷]. پولیمو و رومانازی به مدل‌سازی عددی به عنوان پشتیبان مدیریت منابع زیرزمینی آبخوان ساحلی کارستیک در جنوب ایتالیا پرداختند و از ترکیب دو مدل Seawat و MODFLOW بهره بردند. آن‌ها با مدل‌سازی‌های انجام‌شده در مرحله صحت‌سنجی دریافتند که ضریب تأثیر این مدل‌های ۰/۹۲ در منطقه مورد مطالعه بوده، در صورتی که استاندارد آن برابر با ۰/۷ و مقدار میانگین خطای مربعات برابر با حدود ۰/۶۵ بوده که گویای توانمند بودن مدل‌ها است. در نهایت از طریق کاهش کیفیت دریافتند که آب شور به داخل آبخوان نفوذ کرده است و همین‌طور داشتن برنامه و سیاست در استخراج آب زیرزمینی را بااهمیت عنوان کردند [۱۸]. قریبا و همکاران تأثیرات بالقوه تغییر اقلیم را روی آبخوان ساحلی غزه مدل‌سازی کردند. آن‌ها برای بخش تغییر اقلیم از پیش‌بینی‌کننده مدل جهانی اقلیمی و برای ارزیابی آب‌های زیرزمینی از مدل Seawat استفاده کردند و با انجام بخش تغییر اقلیم، سناریوهای مختلفی وارد مدل Seawat کردند و نتیجه کلی گرفتند که در آینده دچار تنش آب می‌شوند و همچنین تولید سناریو برای ۳۰ سال آینده را یک استراتژی در حل مشکل آن دانستند [۱۹]. آل طلیبی و همکاران به مقایسه



شکل ۱. موقعیت آبخوان کاشان در ایران

قبولی در مراحل مختلف مدل سازی اعم از ورود داده ها، خروج داده ها، تنظیم و ارائه نتایج دارد [۲۲]. در این مطالعه مدل SEAWAT برای شبیه سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر در حالت ناپایدار تهیه شده است. این نرم افزار با ترکیب نرم افزارهای MODFLOW و MT3DMS به وجود آمده است و توانایی حل هم زمان معادلات جریان و انتقال را دارد. اطلاعات مورد نیاز مدل شامل موارد زیر است:

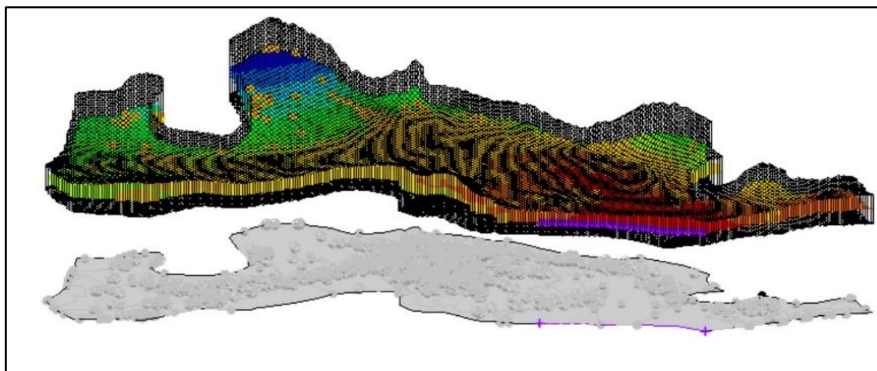
۱. شکل هندسی آبخوان؛ ۲. مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، آبدهی ویژه و برای کل آبخوان و در صورت ناهمگن بودن به صورت منطقه بندی شده؛ ۳. مقادیر پارامترهای معادله انتشار آلودگی در آبخوان، از طریق آزمایش های صحرایی (ویسکوزیته سیال)؛ ۴. شرایط مرزی، مقادیر چاه و چشمه، آمار تبخیر و بارندگی، ضرایب نفوذ، عمق تبخیر، آمار هواشناسی و تعداد کافی چاه مشاهده ای کمی و کیفی با توزیع مناسب در منطقه مورد نظر [۲۳].

ایجاد پایگاه اطلاعاتی از داده های نظیر چاه های بهره برداری و قنات، خصوصیات زمین شناسی، تکنوتیک منطقه، مدل رقومی ارتفاعی، چاه های پیژومتری، نتایج مطالعات ژئوفیزیک، میزان بارش، تبخیر، جریان های سطحی، نفوذ آب برگشتی و غیره همه در راستای ایجاد

روش تحقیق

روش تفاضل محدود، به عنوان تکنولوژی کارآمد در حل مسائل جریان آب زیرزمینی، برای حل معادلات جریان و انتقال استفاده شده و برنامه کاربردی کامپیوتری متعددی برای حل این معادلات نوشته شده است. یکی از کدهای مهم مورد استفاده در شبیه سازی جریان آب، می توان به کدهای MODFLOW و SEAWAT اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از مدل سازی و استفاده از روش های عددی و کدهای MODFLOW و Seawat به مطالعه آب های زیرزمینی منطقه پرداخته شده است. در این دوره استفاده از روش های عددی و مدل های ریاضی برای ارائه طرح های مدیریتی و استفاده بهینه از آب های زیرزمینی، حل مشکلات و مسائل مربوط به منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با آب های سطحی و پارامترهای هیدرولوژیکی، همچنین شناخت ویژگی های سیستم هیدرولوژیک آبخوان ها و پیش بینی وضعیت آن ها متداول و به تدریج کامل تر شده است. منظور از مدل ریاضی، شبیه سازی طبیعی آبخوان با استفاده از روابط ریاضی است. در این پژوهش مدل های استفاده شده بخش کمی در قالب MODFLOW و بخش کیفی SEAWAT به نرم افزار GMS داده شده است. مدل GMS یک بسته نرم افزاری جامع در مدل سازی آب های زیرزمینی است که دقت قابل

شرق و جنوب شرقی و بخشی از غرب آبخوان برای تغذیه آبخوان و مرز شمال شرقی برای تخلیه آبخوان در نظر گرفته شد. خروجی این مرحله، مدل مفهومی ۰۱ است. در مرحله ۳، ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان تعیین شد و خروجی آن به مدل ۰۲ مفهومی توسعه داده شد. در مرحله ۴ تعاملات سطحی و زیرسطحی و جریان‌های داخلی / خروجی زیرزمینی ارزیابی شد. خروجی این مرحله مدل مفهومی نسخه ۰۳ است [۲۴]. در مرحله ۵ نتایج مراحل دیگر با همدیگر ادغام شد و در نهایت، نسخه مدل مفهومی نهایی آبخوان کاشان در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. مدل مفهومی آبخوان کاشان

۱۳۸۸ مؤلفه‌های اولیه هستند و در منطقه مورد مطالعه، مدت و تعداد دوره تنش با توجه به داده‌های هیدروژئولوژیکی منطقه انتخاب شدند. بر این اساس، آبخوان کاشان در ۸۳ گام زمانی به صورت ماهانه شبیه‌سازی شده است (از فروردین سال ۱۳۸۸ تا اسفند ۱۳۹۵). با توجه به اینکه آبخوان منطقه مورد مطالعه آزاد است، برای مدل‌سازی در حالت غیر ماندگار باید ضریب آبدی ویژه نیز وارد شد.

مدل‌سازی کیفی پس از اجرای مدل کمی است مدل‌سازی کیفی با وارد کردن هد اولیه کیفی منطقه شروع شده است مدت و تعداد دوره تنش با توجه به داده‌های هیدروژئولوژیکی منطقه انتخاب شدند. بر این اساس، آبخوان کاشان در ۸ گام زمانی به صورت سالانه شبیه‌سازی شده است. هد اولیه اجرای مدل در شکل ۳ ارائه شده است.

هر مدلی که برای شناخت و پیش‌بینی رفتار یک سامانه آب زیرزمینی انتخاب می‌شود، باید به خوبی تعریف

مدل مفهومی و به تبع آن، یک مدل دقیق از سیستم جریان آبخوان است.

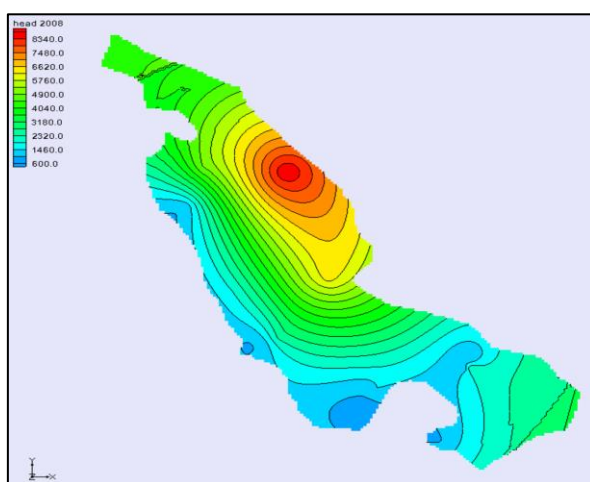
پس از تهیه مدل مفهومی منطقه مطالعه‌شده، در مدل عددی، محدوده پیوسته با محدوده گسسته جایگزین شد و از نوع مرکز سلولی با ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر شبکه‌بندی شد. برای مدل مفهومی این پژوهش به ترتیب (مرحله ۱) جمع‌آوری تمام داده‌ها و اطلاعات انجام شد که خروجی گام اول به عنوان «مشاهدات کنترل‌شده»، مدل مفهومی نسخه ۰ است. سپس مرحله ۲ هندسه آبخوان تعیین شد. که شرایط مرزی شامل مرزهای شمال شرقی و

پس از ساخت و طراحی مدل مفهومی با استفاده از بسته‌های ویژگی هندسی آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری، تراز اولیه، مقادیر تغذیه‌ای، مقادیر تخلیه، سنگ بستر، توپوگرافی سطح زمین، شرایط مرزی اولیه و ضرایب هیدرولیکی آبخوان در فروردین سال ۱۳۸۸ به عنوان مدل اولیه در حالت پایدار تهیه شد. این مدل در ادامه مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. پس از اولین اجرای مدل، بهینه کردن داده‌های ورودی صورت گرفت تا در ادامه کار، خطای بسیار کمی در مدل‌سازی رخ دهد. انجام ۲۰ تا ۵۰ مرتبه آزمون و خطای شبیه‌سازی برای به دست آوردن مرحله مقدار مقبولی از واسنجی، عادی به نظر می‌رسد، که در این پژوهش پارامترهای انیزوتروپی، هدایت هیدرولیکی و تغذیه برای کالیبره کردن مدل مورد استفاده قرار گرفتند و مقادیر بهینه برای هر بخش از آبخوان محاسبه شده است.

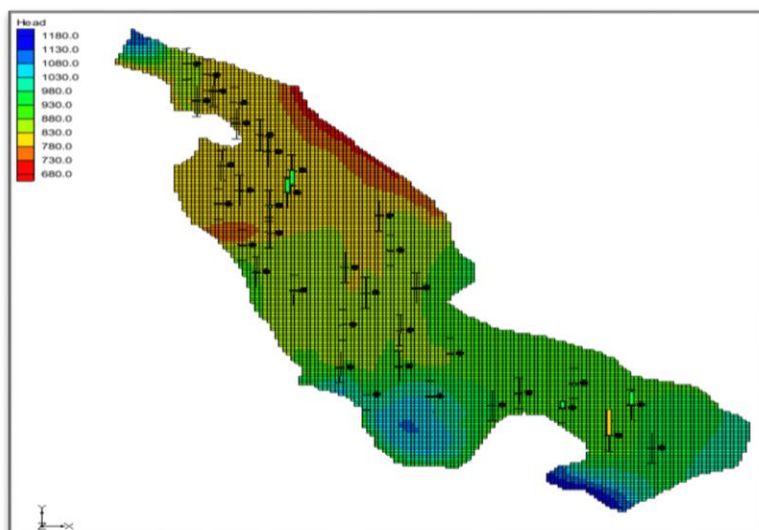
در فرایند مدل‌سازی غیرماندگار، مدل‌سازی کمی در حالت پایدار و واسنجی پارامترهای مورد نظر سال

رساندن عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای استفاده‌شده در مدل بسط یافته است. بیشتر نرم‌افزارهای ریاضی واسنجی خودکار را دارند؛ که هدف آن‌ها بهینه کردن پارامترهای مدل است که در نتیجه، مجموع مربعات انحراف بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی به حداقل کاهش می‌یابد. مقادیر PEST, PES, UCODE کدهای مورد استفاده در GMS در تخمین پارامترها در روش واسنجی خودکار هستند و همان طور در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، نتایج بیانگر خطای پایین و مدل‌سازی مناسب بعد از واسنجی در شرایط پایدار است.

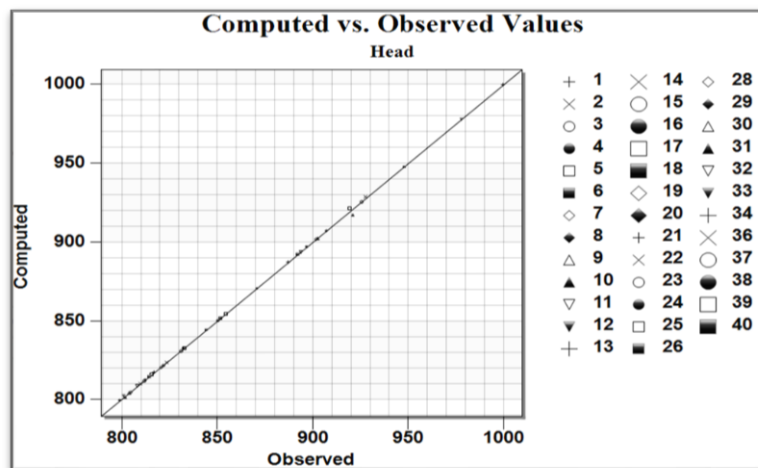
شود. پس عمل واسنجی مدل در واقع انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌شده مربوط به رفتار سامانه آبخوان (از قبیل بار هیدرولیکی پمپاژ و تغذیه) در گذشته است [۲۰] در این پژوهش به ترتیب از دو روش برای واسنجی معمول مدل‌های ریاضی استفاده شده است. اجرای واسنجی دستی، با تغییر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه و ضرایب هیدرودینامیکی و یا تغییر در میزان ورودی‌ها و خروجی‌ها در مناطقی که دارای عدم قطعیت هستند، مدل مرحله‌به‌مرحله تصحیح شد. واسنجی خودکار، فناوری که با اجراهای مکرر مدل برای به حداقل



شکل ۳. هد اولیه غلظت کل جامدات محلول (TDS) سال ۱۳۸۸



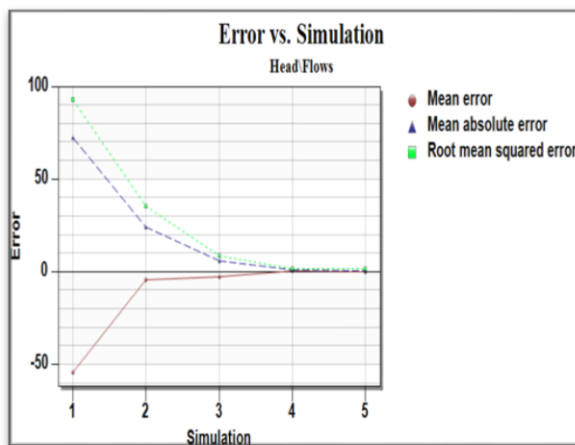
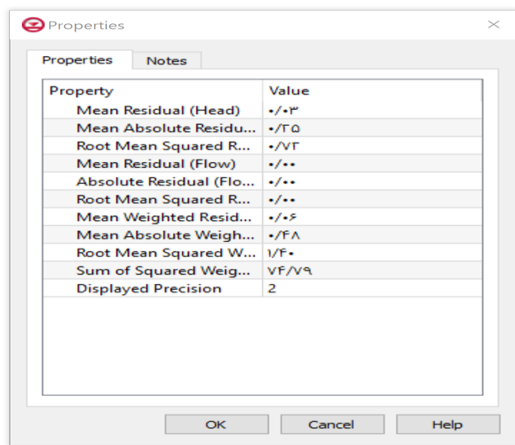
شکل ۴. مقایسه تراز آب محاسباتی و چاه‌های مشاهداتی بعد از واسنجی در شرایط پایدار



شکل ۵. مقایسه مقادیر تراز آب در چاه‌های مشاهداتی و محاسباتی

در شکل ۶، مقادیر اختلاف‌های بین بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در محدوده مطالعاتی آبخوان کاشان ۱/۴ متر آمده که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل در مرحله بعد از واسنجی در مرحله پایدار است.

در شکل ۴ هر چه هد به عدد واقعی نزدیک باشد، به رنگ سبز نزدیک‌تر است و قابل قبول بودن محاسبات را نشان می‌دهد و شکل ۵ مقادیر مشاهده‌ای، انطباق قابل قبولی با مقادیر محاسباتی دارند، به طوری که نقاط معرف چاه‌ها، به خط نیمساز محورها نزدیک هستند.



شکل ۶. نمودار و مقدار خطای میانگین، خطای میانگین مطلق، جذر میانگین مربعات خطاها مربوط به حالت کمی پایدار

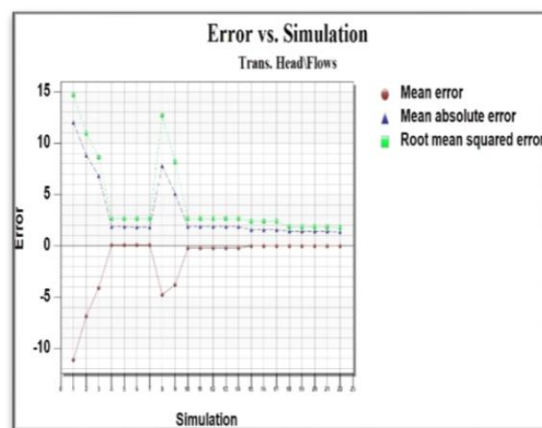
محاسبه شده و مشاهداتی مدل تغییر داده شد و بهینه‌ترین حالت انتخاب شد. در واسنجی خودکار ابتدا از حالت منطقه‌ای برای بهینه کردن استفاده شد و در ادامه از طریق نقاط آزمایشی (Pilot point) پارامترهای مورد نظر بهینه شد و بهترین حالت ممکن حاصل شد و در شکل ۷ مقادیر خطا و مقادیر واسنجی در حالت ناپایدار ارائه شده است. و همچنین پارامترهای واسنجی شده در حالت ناپایدار در شکل ۸ ارائه شده‌اند.

در این مرحله، بعد از مدل‌سازی با وارد کردن پارامترهای بهینه شده در حالت پایدار و ضریب آبدهی ویژه در ۹۳ گام زمانی که شروع آن در فروردین ۱۳۸۸ و پایان آن اسفند ۱۳۹۵ بود، واسنجی مدل صورت گرفت. برای واسنجی مدل ابتدا از سعی و خطا برای مقدار آبدهی ویژه استفاده شد و در ادامه از واسنجی خودکار (PEST) برای مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی (شکل ۸) برای هر اجرای متعدد تا رسیدن به بیشترین انطباق بین مقادیر

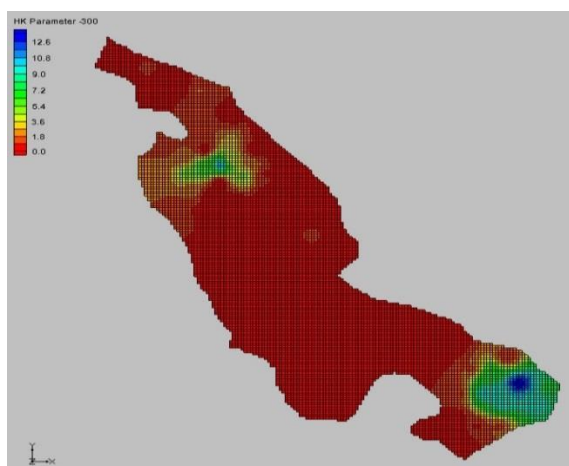
Properties

| Item | Value |
|---|--------|
| Mean Residual (Head) | 0.00 |
| Mean Absolute Residual (Head) | 0.37 |
| Root Mean Squared Residual (Head) | 0.48 |
| Mean Residual (Flow) | 0.00 |
| Absolute Residual (Flow) | 0.00 |
| Root Mean Squared Residual (Flow) | 0.00 |
| Mean Weighted Residual (Head+Flow) | 0.01 |
| Mean Absolute Weighted Residual (Head+Flow) | 0.72 |
| Root Mean Squared Weighted Residual (Head+Flow) | 0.94 |
| Sum of Squared Weighted Residual (Head+Flow) | 956.28 |
| Displayed Precision | 2 |

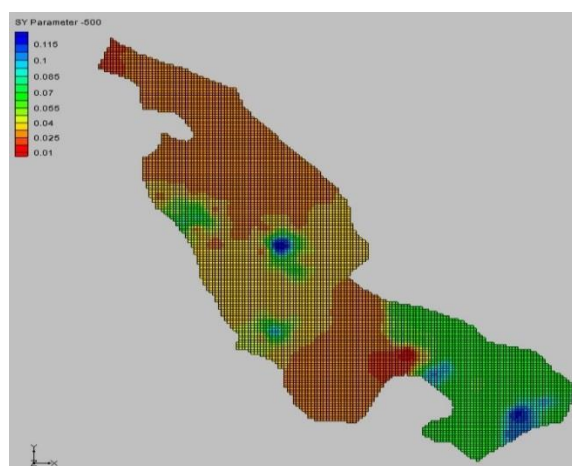
Help... Done



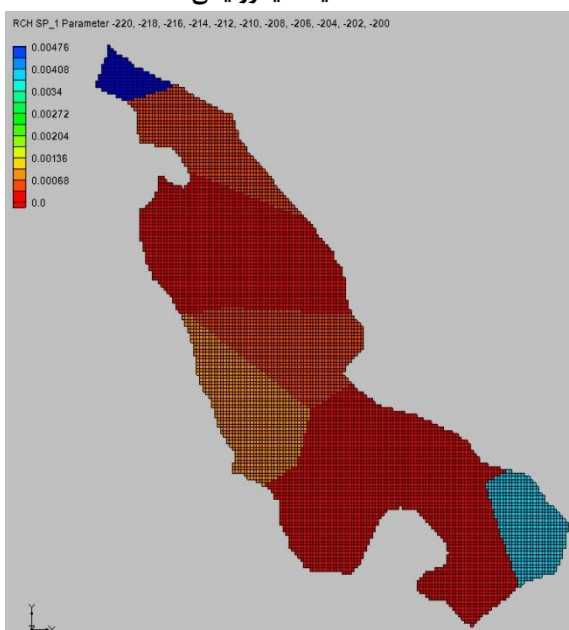
شکل ۷. نمودار و مقدار خطای مدل در شرایط غیرماندگار در حالت کمی



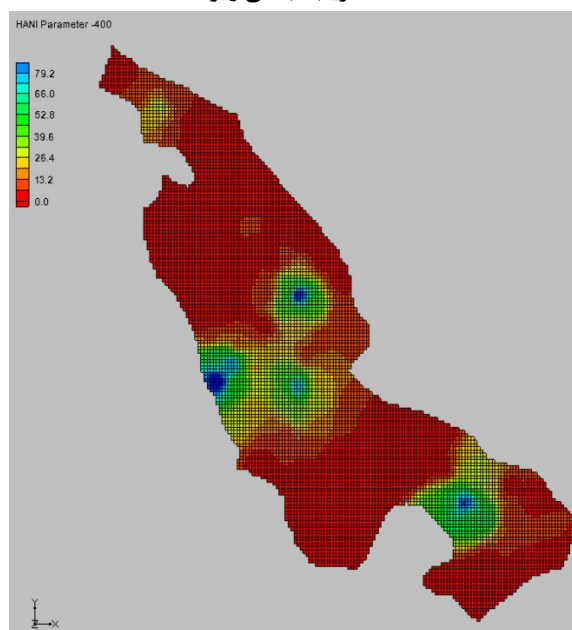
A: هدایت هیدرولیکی



B: ضریب آبدهی ویژه



C: تغذیه

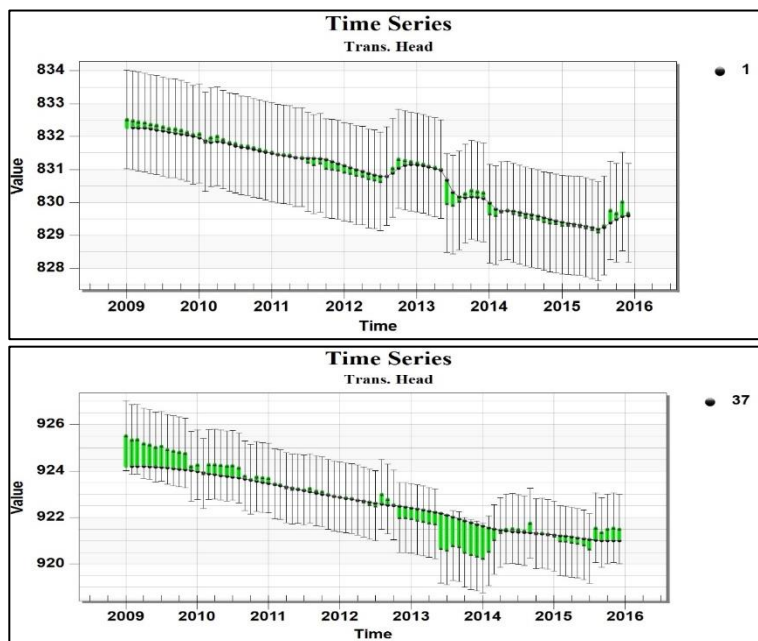


D: انیزوتروپی

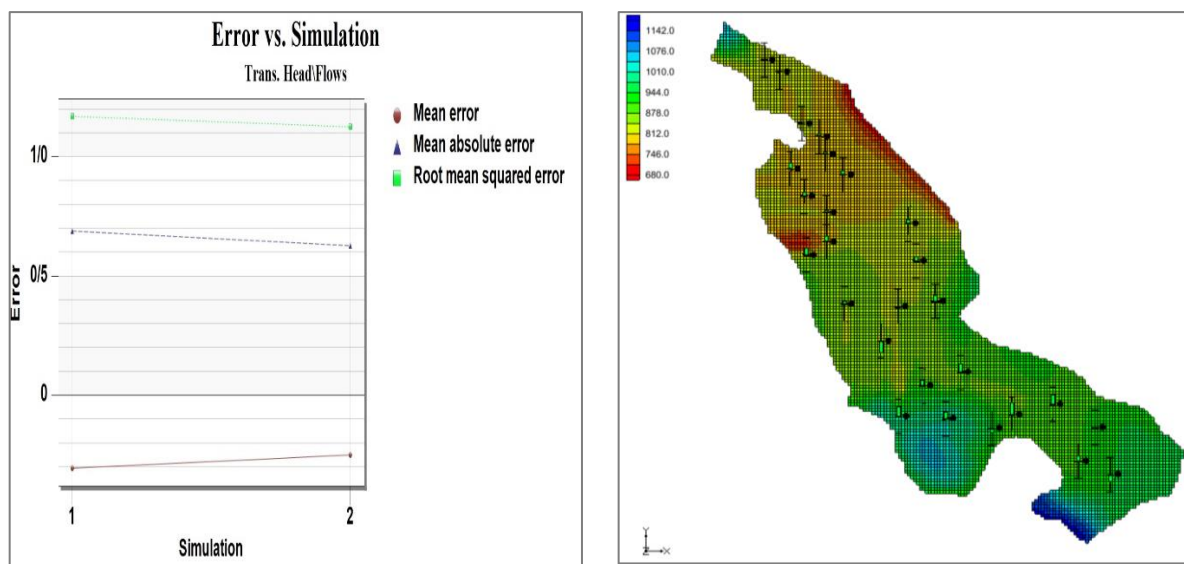
شکل ۸. پارامترهای واسنجی شده در مرحله ناپایدار در حالت کمی

در این مدل با توجه به دوره انتخابی برای واسنجی، از سری زمانی مربوط به فروردین تا اسفند ۱۳۹۶ برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده استفاده شده است. خروجی حاصل خطای مدل چاه‌های مشاهداتی در گام زمانی اول در شکل ۱۰ ارائه شده است.

و همین‌طور برای نمایش میزان خطای کم در مدل‌سازی در شرایط غیرماندگار بین مقادیر محاسبه‌شده و مشاهداتی در شکل ۹ آورده شده است؛ با توجه به شکل‌های ذیل که به صورت موردی آورده شده، در چاه‌های ۱ و ۳۷ میانگین خطا کمتر از ۳۰ سانتی‌متر است که نشان‌دهنده مدل‌سازی مناسب در هر گام زمانی است.



شکل ۹. مدل‌سازی در ۸۳ گام زمانی مربوط به چاه‌های ۱ و ۳۷ در منطقه در حالت کمی



شکل ۱۰. خطای مدل در مرحله صحت‌سنجی در حالت کمی

۳. جذر میانگین مربعات خطاها یا Root (RMSE): Mean Squared Weighted Residual

$$RMSE = 1/n \sum_{i=1}^n \{(hm - hs)_i\}^{1/2} \quad (3)$$

جذر میانگین مربعات خطاها یا انحراف معیار برابر است با میانگین مربع اختلاف‌های بین بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (رابطه ۳). در این مرحله، بعد از مدل‌سازی با وارد کردن پارامترهای بهینه‌شده، مدل در حالت ناپایدار کمی دوباره واسنجی شده است که این مرحله در ۸ گام زمانی که شروع آن در ۱۳۸۸ و پایان آن ۱۳۹۵ صورت گرفت. برای واسنجی مدل ابتدا از سعی و خطا برای مقدار پخش‌شدگی طولی استفاده شد و در ادامه از واسنجی خودکار (PEST) برای مقادیر پارامترهای تخلخل و پخش‌شدگی طولی استفاده و بهینه‌ترین حالت انتخاب شد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودار اسکاتر واسنجی کیفی (غلظت) برای چاه‌های مشاهده‌ای سال ۱۳۸۸ و سال ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. تعداد چاه‌های کیفی ۱۶ عدد است که همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مقادیر غلظت مشاهداتی و محاسباتی نمک در شبیه‌سازی مدل کیفی آبخوان کاشان وجود دارد. در شکل‌های واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر مشاهده‌ای، انطباق قابل قبولی با مقادیر محاسباتی وجود دارد، به طوری که نقاط معرف چاه‌ها، به خط نیمساز محورها نزدیک هستند.

در کندل‌های آماری هر چه هد نزدیک با عدد واقعی نزدیک‌تر و به رنگ سبز باشد نشان‌دهنده محاسبات قابل قبول‌تر است و به این منظور، برای نشان دادن توانایی بالای مدل از آماره‌های آزمون برای بررسی صحت‌سنجی مدل استفاده شده است که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به مقادیر این آماره‌های آزمون مدل انجام‌شده از دقت مناسبی برخوردار است.

۱. خطای میانگین یا Mean Error (ME)

خطای میانگین عبارت است از: اختلاف میانگین بین بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده با بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده (رابطه ۱).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hm - hs)_i \quad (1)$$

در این رابطه N تعداد پیرومترها است. اندازه‌گیری ME ساده و آسان ولی معیار مناسبی نیست، چرا که اختلاف میانگین‌های مثبت و منفی با هم جمع جبری می‌شوند و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. از این‌رو ME پایین نشان‌دهنده یک واسنجی خوب است.

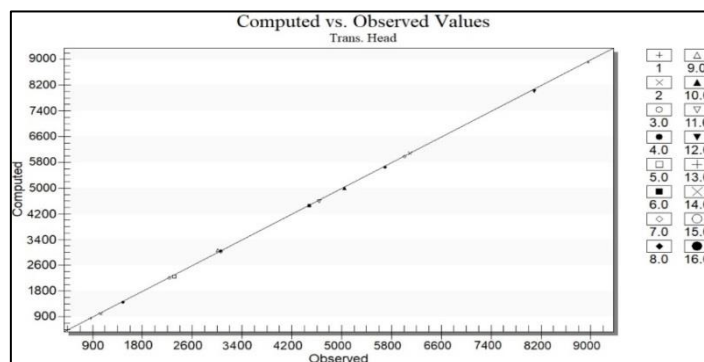
۲. خطای میانگین مطلق یا Mean Absolute Error (MAE)

خطای میانگین مطلق عبارت است از: مقدار میانگین اختلاف بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (رابطه ۲).

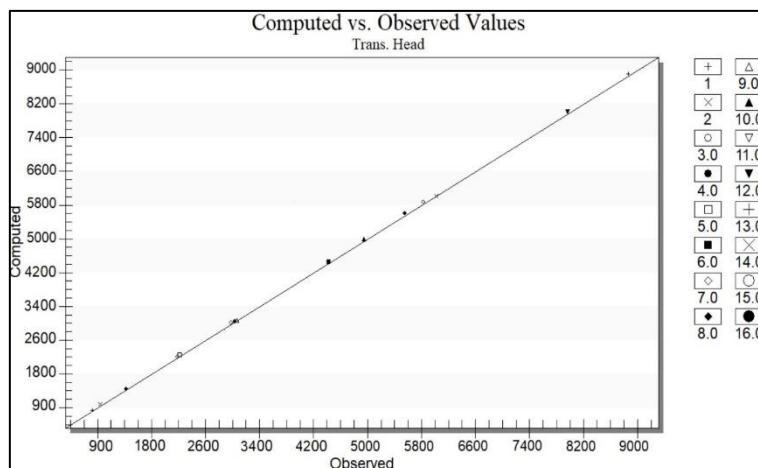
$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |(hm - hs)_i| \quad (2)$$

جدول ۱. میزان خطای آزمون آماری در مرحله صحت‌سنجی حالت کمی

| RMSE | MSE | ME | تاریخ | دوره زمانی |
|-------|-------|-------|--------------------------|-------------------------------|
| ۱/۱۲۵ | ۰/۶۲۷ | -۰/۲۵ | ۱۳۹۵/۱۲/۰۱ تا ۱۳۹۵/۰۱/۰۱ | اجرای مدل در صحت‌سنجی کل دوره |



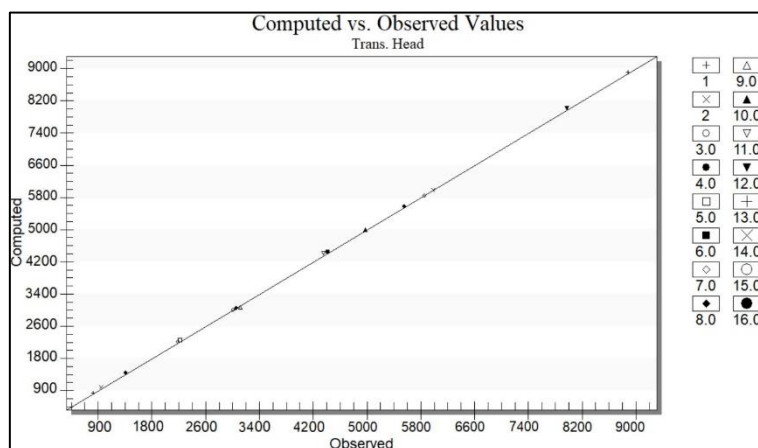
شکل ۱۱. نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای غلظت کل جامدات محلول در حالت واسنجی کیفی مدل سال ۱۳۸۸



شکل ۱۲. نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای غلظت کل جامدات محلول در حالت واسنجی کیفی مدل سال ۱۳۹۵

قرار گرفت. برآزش مناسب بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر مشاهده‌ای انطباق قابل قبولی با مقادیر محاسباتی دارند، به طوری که نقاط معرف چاه‌ها، به خط نیمساز محورها نزدیک هستند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است، داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی چاه‌های کیفی از همبستگی مناسبی نسبت به هم برخوردار هستند. برای اطمینان از مدل کیفی ساخته‌شده برای آبخوان کاشان، نتایج واسنجی دشت برای سال ۱۳۹۶ مورد صحت‌سنجی



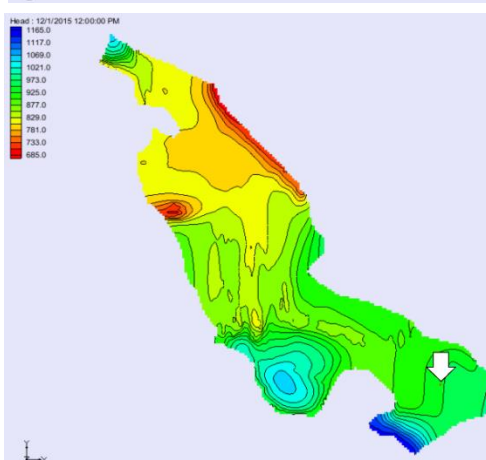
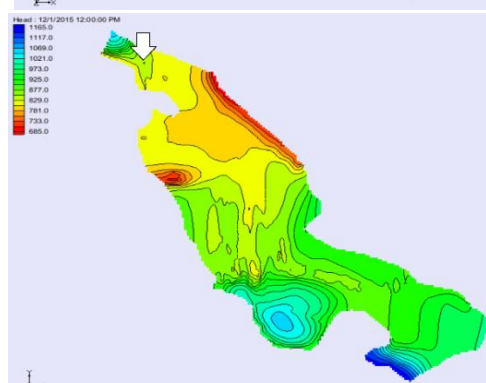
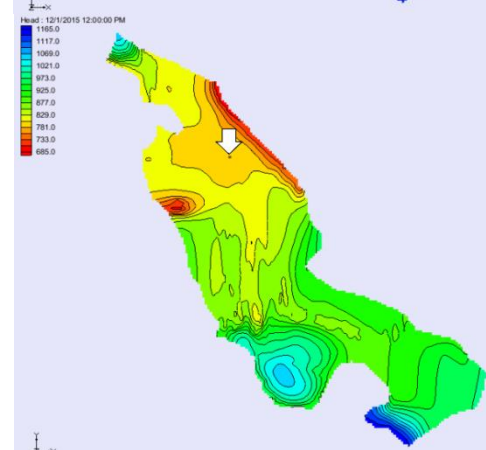
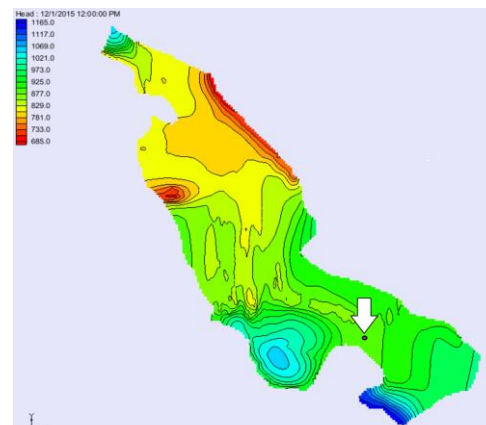
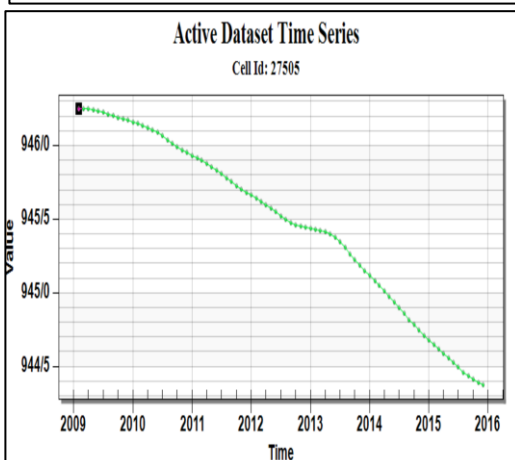
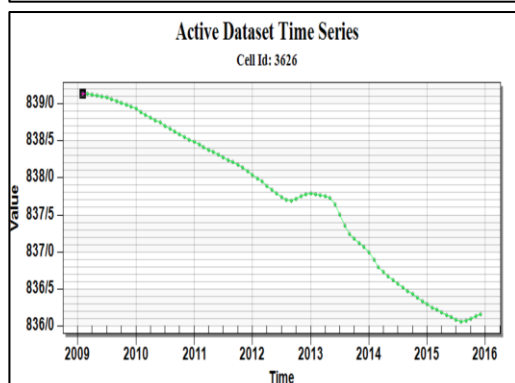
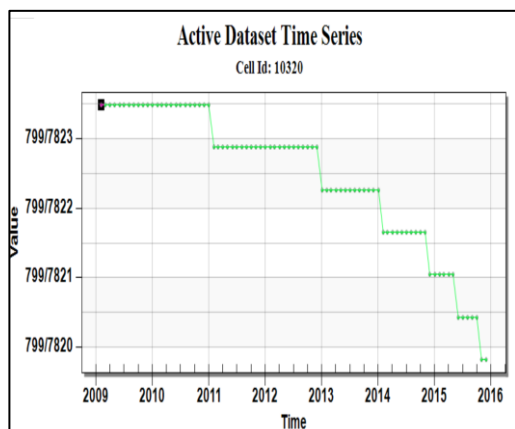
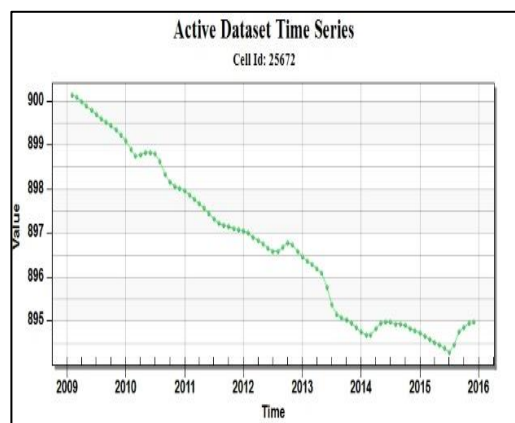
شکل ۱۳. نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در حالت صحت‌سنجی کیفی مدل سال ۱۳۹۶

آبخوان در سال‌های آتی به وجود نمی‌آید و همین عوامل و شرایط در سال‌های آتی ثابت خواهند ماند، درک بهتر از آبخوان قبل از اعمال سناریوهای بهبوددهنده و کاهنده سطح تراز آبخوان، تغییرات تراز آب از ابتدای فروردین ۱۳۹۶ تا اسفند ۱۴۰۳ شبیه‌سازی شد. در شکل ۱۵ تغییرات تراز سطح آب و میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS) در دوره آتی نسبت به حالت پایه در سناریو ادامه روند کنونی را نشان می‌دهد.

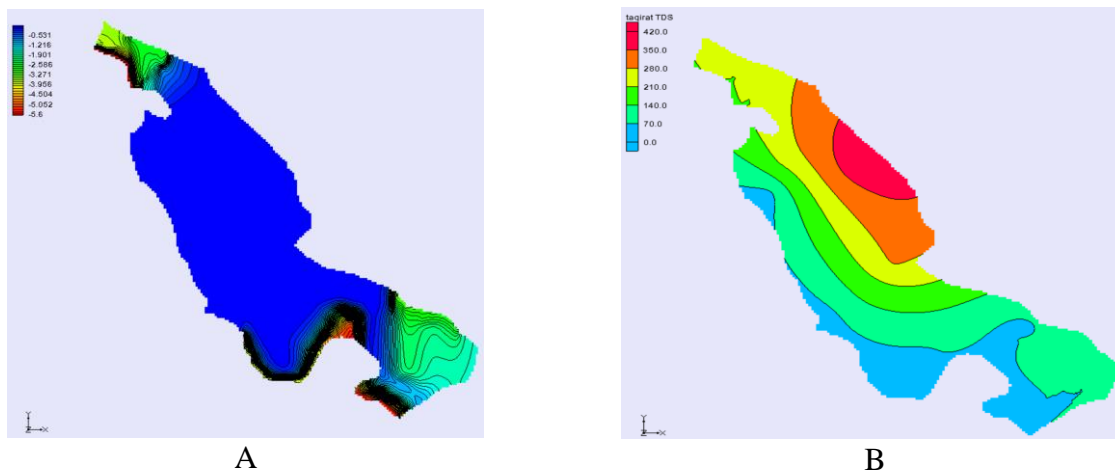
نتایج به‌دست آمده

با توجه به نوسان‌های مختلف سطح تراز آب زیرزمینی در مناطق مختلف آبخوان، برای درک بهتر شرایط آبخوان در نمودارها و نقشه‌های محل تغییرات تراز آب زیرزمینی طی دوره مورد بررسی در زیر ارائه شده‌اند. سطح تراز آب شبیه‌سازی شده در دوره آماری موجود در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

ابتدا با فرض بر اینکه هیچ‌گونه تغییری در شرایط



شکل ۱۴. نقشه موقعیت و نمودار تغییرات تراز آب زیرزمینی در مناطق مختلف آبخوان و میزان افت آبخوان



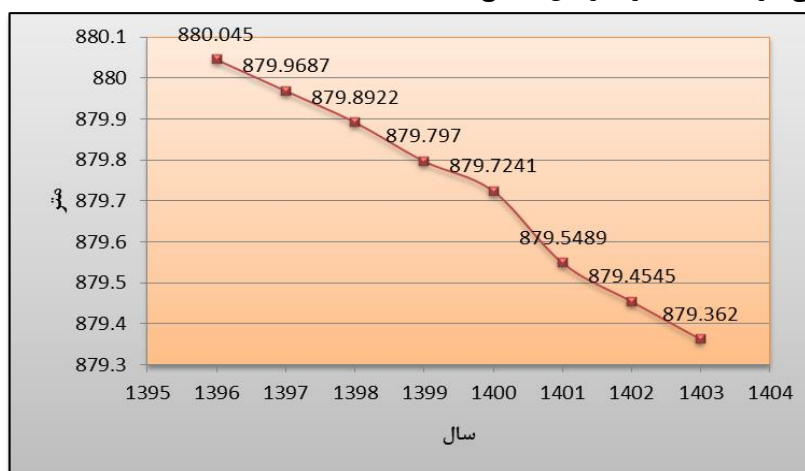
شکل ۱۵. تغییرات تراز سطح آب و میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS) در دوره آبی نسبت به حالت پایه در سناریوی ادامه روند کنونی؛ A و B: میزان تغییرات سطح تراز آب و غلظت کل جامدات محلول

خواهیم داشت. شکل ۱۸ تغییرات تراز آب در این سناریو را نشان می‌دهد.

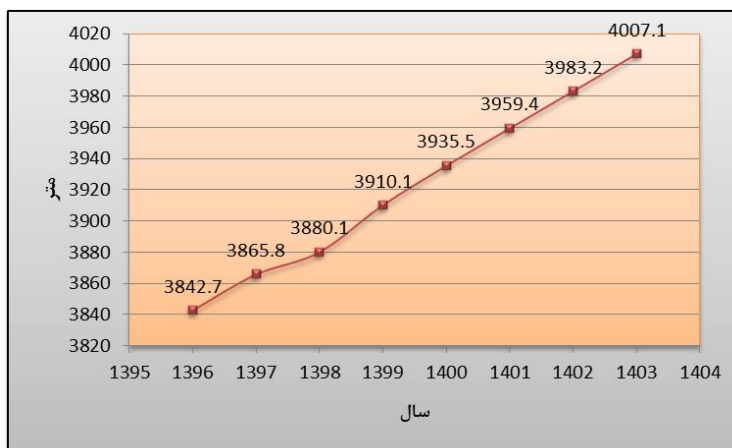
تراز آب زیرزمینی کل آبخوان در دوره پایه ۸۶۳/۵۴ متر و بعد از اجرای سناریو ۸۶۳/۶۷ متر برآورد شده است. با توجه به خروجی حاصل می‌توان برداشت کرد که میزان افزایش سطح آبخوان به ازای هر ماه خاموش بودن چاه به طور متوسط ۰/۱۳ متر خواهد بود و در ادامه میزان غلظت کل جامدات محلول مناطق نزدیک به دریاچه نمک (شمال شرق آبخوان (محل تجمع آب شور)) حدود ۱۰۴ ppm کاهش و در مناطق دیگر به طور میانگین حدود ۴۲ ppm کاهش خواهد یافت. نقشه اختلاف میزان غلظت کل جامدات محلول سال مبنا (سال ۱۳۹۶) نسبت به مدل بعد از اعمال سناریو در شکل ۱۹ ارائه شده است.

در شکل ۱۶ میانگین تغییرات سطح آبخوان به صورت متوسط در ۸ گام زمانی از ۹۶ گام زمانی مدل‌سازی شده و به صورت سالانه ماه اسفند از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳ آورده شده است.

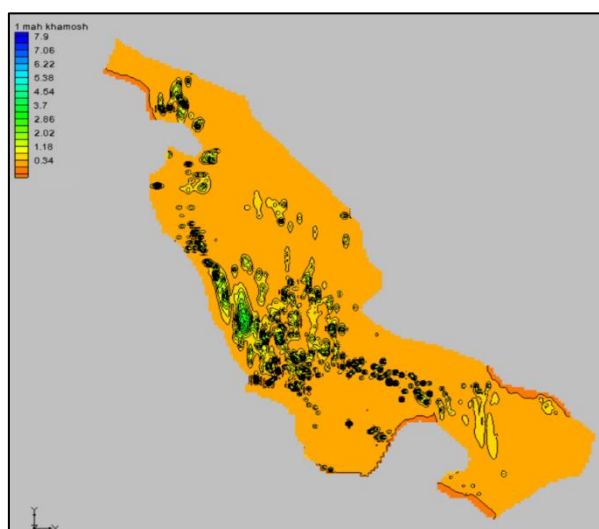
در شکل ۱۷ تغییرات میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS) آبخوان به صورت متوسط در ۸ گام زمانی و به صورت سالانه از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳ ارائه شده است. در این سناریو فرض شده است که میزان غلظت کل جامدات محلول در شرق و شمال شرقی به سمت مرکز آبخوان افزایش یافته است. به همین منظور چاه‌های بخش مرکزی و شمال شرقی و شرقی به مدت یک ماه خاموش شدند. تمام شرایط همانند شرایط سناریوهای قبلی در نظر گرفته شده است. با توجه به این سناریو و اختلاف تراز آن با تراز مبنا بین ۳۵ سانتی‌متر تا ۷/۹ متر افزایش سطح



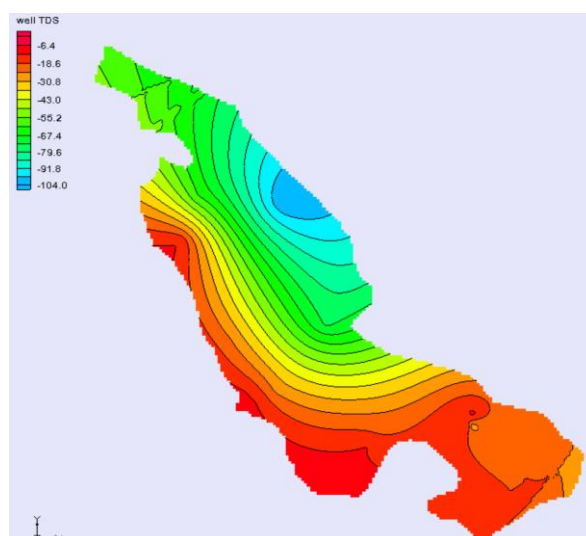
شکل ۱۶. نمودار میانگین تغییرات تراز آب آبخوان در دوره ۱۳۹۶-۱۴۰۳



شکل ۱۷. میانگین تغییرات میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS) آبخوان در دوره ۱۳۹۶-۱۴۰۲ برحسب ppm



شکل ۱۸. تغییرات تراز سطح آب نسبت به حالت پایه در سناریوی چاه‌های بهره‌برداری به مدت یک ماه خاموش



شکل ۱۹. تغییرات میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS) در دوره آبی نسبت به حالت پایه در سناریوی چاه‌های بهره‌برداری به مدت یک ماه خاموش

نتیجه‌گیری

و بهره‌برداری از منابع آب و ممانعت از گسترش بیشتر شوری منطقه مؤثر باشد. با رشد جمعیت و نیاز مبرم به توسعه کشاورزی و صنعت تقاضای مصرف آب بالاست و مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب در محدوده مورد مطالعه چاه‌های بهره‌برداری هستند و از طرفی، دلیل شور شدن آبخوان برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها است. به همین دلیل برای جلوگیری از کاهش کیفیت، لازم است مدیریت جدی در مصرف آب مد نظر قرار گیرد. برای جلوگیری از پیشروی آب شور به آبخوان کاشان دو راه وجود دارد: چاه‌های که باعث آپکنینگ می‌شود به دلیل افزایش شوری خاک جهت کشاورزی خاموش شوند و حفظ شیب هیدرولیکی و عدم برگشت شورابه‌ها از شمال شرقی به غرب آبخوان با احداث کارخانه نمک‌زدایی.

منابع

- [1].Sieker, H., Et Al., Development Of A Decision Support System For Integrated Water Resources Management In Intensively Used Small Watersheds. Water Practice And Technology, 2006. 1(1): P. Wpt2006004.
- [2].Nori, A., Eraqi Nejad, Sh., Integrated Management Of Water Resources: An Approach Towards Sustainable Development, The Fourth Conference On The Exchange Of Research, Technical And Engineering Experiences, Kermanshah, 2006, <https://Civilica.Com/Doc/11719/>. [Persian]
- [3].Planning And Budget Organization, The Document Of The Strategic Plan Of The Water Sector, The Sixth Development Document, Tehran, 2017. [Persian]
- [4].Ziae, H., The Hydrology Of The Birjand Plain Aquifer And The Effects Of Their Artificial Feeding Plans, Tabriz University, 2004. [Persian]
- [5].Ghafari, S., Development And Management Of Water Resources In Iran To Deal With Droughts, The Third Water Resource Management Conference, Tabriz, 2008, <https://Civilica.Com/Doc/50506/>. [Persian]
- [6].Alizadeh, A., Applied Hydrology, Publications Of Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad; 2007. [Persian]
- [7].Fazloulou R., Sharifi F.A.S., Behnia A.A.K.. An Investigation Of Flood Spreading Effects On Artificial Recharge Of Moosian Plain. Iranian Journal Of Natural Resources [Internet]. 2006; 59(1): 57-74. Available From: <https://Sid.Ir/Paper/22765/>. [Persian]

به منظور مدیریت بهتر و یکپارچه آب زیرزمینی، مدل کمی و کیفی برای شبیه‌سازی حرکت شوری در آبخوان کاشان مورد استفاده قرار گرفته است. مسئله پیشروی مرز آب شور در آبخوان که همواره با کاهش کیفیت آب خواهد بود بیش از پیش به چشم می‌خورد و با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده در آبخوان کاشان پیشروی مرز آب شور قابل تأمل است. همان‌طور که با افزایش سطح آب آبخوان مقدار پیشروی کاهش خواهد یافت. بنابراین، برای افزایش سطح آب می‌توان با تغذیه و خاموش کردن چاه‌های بهره‌برداری به این مهم رسید. نتایج نشان داد در حالت اول، یعنی با ادامه روند تخلیه و تغذیه کنونی، در سال ۱۴۰۳ سطح آب زیرزمینی بیشترین افت را به میزان حدود ۵/۸ متر در جنوب غربی نزدیک به غرب خواهد داشت و به طبع پیشروی بیشتر آب شور تجمع شده به سمت آبخوان و کاهش کیفیت چاه‌ها رخ خواهد داد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل، در صورت ادامه روند کنونی، غلظت نمک در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال ۱۳۹۶ در محل چاه‌های مشاهده‌ای کیفی به طور متوسط حدود ۱۶۰ ppm افزایش می‌یابد و همچنین حجم آب خارج‌شده از آبخوان به میزان ۱۲۵۵۸۵۶/۲۳۲ متر مکعب خواهد بود. در همین راستا سناریوی دوم با توجه به افزایش سطح آب آبخوان، سناریوی خاموش شدن چاه‌های بهره‌برداری به مدل اعمال شده است که در این حالت، کاهش غلظت در چاه‌های مشاهده‌ای به طور متوسط به حدود ۴۲/۲۷ ppm و افزایش حجم آب آبخوان به حدود ۱۴۷۱۲/۳۲ متر مکعب در ماه خواهد بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با کاهش سطح آبخوان، پیشروی مرز آب شور از شمال شرق آبخوان (نتیجه عمل آپکنینگ) به داخل آبخوان و میزان غلظت کل محلول افزایش یافته است و همین‌طور در باقی چاه‌های مشاهده‌ای میزان غلظت کل محلول افزایش یافته است. در حال حاضر دلیل اصلی این شور شدن آبخوان، فرایند آپکنینگ است. از طرفی نتایج با ارزیابی و بررسی نتیجه راهکار مدیریتی برای بهبود کمی و کیفی آبخوان نشان داد غلظت کل محلول با کاهش برداشت کاهش یافته و تراز آب زمینی افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی انتقال جریان و انتشار آلودگی در آب‌های زیرزمینی می‌تواند در مدیریت و اتخاذ لازم جهت حفاظت

- [8]. Barazzuoli, P., Et Al., A Conceptual And Numerical Model For Groundwater Management: A Case Study On A Coastal Aquifer In Southern Tuscany, Italy. *Hydrogeology Journal*, 2008. 16(8): P. 1557-1576.
- [9]. Navazi, H., Simulating The Components Of The Groundwater Balance And Determining The Infiltration Rate Into The Zanjan Plain Aquifer, Bureau Of Applied Research And Construction Technology: Ministry Of Energy, Water Resources Management Organization Of Iran, 2001. [Persian]
- [10]. Baghvand, A., Vosoogh, A., Givehchi, S., Daryabeigi Zand, A. Ground Water Modeling To Estimate Nitrate Dispersion In Critical Aquifers (A Case Study: Mashhad City). *Journal Of Environmental Science And Technology*, 2015; 17(4): 1-22. [Persian]
- [11]. Asghar Kamali, Mohammad Hossein Niksokhan, (2017). Development Of A Model For Calculation Of Sustainability Index Of Groundwater Resources, *Iranian Journal Of Eco Hydrology*, 4(4), 1071-1087. Magiran.Com/P1757611. [Persian]
- [12]. Rejani, R., Et Al., Simulation Modeling For Efficient Groundwater Management In Balasore Coastal Basin, India. *Water Resources Management*, 2008. 22(1): P. 23.
- [13]. Wang, Q., H. Zhan, And Z. Tang, A New Package In Modflow To Simulate Unconfined Groundwater Flow In Sloping Aquifers. *Groundwater*, 2014. 52(6): P. 924-935.
- [14]. Kumar, P. And P. Anil Kumar, Development Of Groundwater Flow Model Using Visual Modflow. *Internat. Jour. Advd. Res*, 2014. 26: P. 649-656.
- [15]. Wang, X., G. Zhang, And Y.J. Xu, Groundwater And Surface Water Availability Via A Joint Simulation With A Double Control Of Water Quantity And Ecologically Ideal Shallow Groundwater Depth: A Case Study On The Sanjiang Plain, Northeast China. *Water*, 2016. 8(9): P. 396.
- [16]. Ahmad, M., Et Al., Simulation Of Groundwater Quantity Using Hydrological Model For Mithawan Spate Irrigated Area Of Dera Ghazi Khan, Pakistan. *Pak. J. Agri. Sci*, 2017. 54(4): P. 847-853.
- [17]. Shafiee, R., S. Mehdizadeh, And A.S. Gooya Mechanism Of Controlling Seawater Intrusion At Coastal Aquifers Using Subsurface Barrier. *European Water*, 1395. 57: P. 407-412.
- [18]. Polemio, M. And A. Romanazzi. Numerical Model To Support The Management Of Groundwater Resources Of A Coastal Karstic Aquifer (Southern Italy). In *Egu General Assembly Conference Abstracts*. 2013.
- [19]. Gharbia, S.S., A. Aish, And F. Pilla, Modelling Potential Impacts Of Climate Change On Groundwater Of The Gaza Coastal Aquifer From Ensemble Of Global Climate Model Projections. *Civil Environ. Res*, 2015. 7: P. 44-60.
- [20]. Al-Taliby, W., A. Pandit, And H. Heck, Comparison Of Seepage Simulation In A Saline Environment Below An Estuary Using Modflow And Seawat. *Hydrol Current Res*, 2017. 8(270): P. 2.
- [21]. Mirzavand, M. Quantitative And Qualitative Simulation Of Underground Water Of Kashan Plain Using Artificial Neural Network, Faculty Of Natural Resources And Earth Sciences: Kashan, 2012. [Persian]
- [22]. Haqiqi, P. Investigating The Effects Of Climate Change On Renewable Underground Water Resources, University Of Tehran: Tehran, 2017.
- [23]. Ding, F., Et Al. Numerical Study On Seawater Intrusion Into Groundwater In Liaodong Bay Coastal Plain, China. In *Water Resource And Environmental Protection (Iswrep)*, 2011 International Symposium On. 2011. Ieee.
- [24]. Izady, A., Et Al., A Framework Toward Developing A Groundwater Conceptual Model. *Arabian Journal Of Geosciences*, 2014. 7(9): P. 3611-3631.