تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
Volume 16, No. 1, Spring 2020 (IR-WRR)
۱۱۶-۱۳۴

مدل‌سازی اقدامات مدیریتی در کنترل افت سطح تراز آب زیرزمینی (دشت هشتگرد، استان البرز)

افسانه شهبازی[۱]، فرشید صفری[۲] و حامد کتابچی[۳*]

چکیده

افزایش استحصال از آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر موجب شده است، سطح تراز آب زیرزمینی استان البرز و بخصوص دشت هشتگرد دچار افت شدیدی شود. از این‌رو، با توجه به اهمیت این ذخایر ارزشمند، باید راهبردهای مناسبی در جهت پایداری این منابع مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، شبیه‌سازی عددی MODFLOW این محدوده، در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار برای دوره سه ساله (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳)، واسنجی و برای یک دوره یک ساله (۱۳۹۴)، صحت‌سنجی شد. سپس اثرات اجرای طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور در دشت هشتگرد ارزیابی گردید و حرکت یون‌های آلاینده (نیترات و سولفات) در این طرح با استفاده از MODPATH، بررسی شد. نتایج نشان دادند، در صورتی که وضع موجود ادامه یابد، ذخیره آبخوان به طور متوسط یک میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا می‌کند. همچنین از میان اقدامات مدیریتی، به ترتیب دستورالعمل انسداد چاه‌های غیرمجاز و طرحی که با یک محدودیت تدریجی در استحصال از آب زیرزمینی همراه می‌باشد، موجب بهبود ذخیره آبخوان به میزان ۸/۸ و ۶/۸ میلیون مترمکعب در سال می‌گردد. نتایج حاصل از MODPATH نیز نشان دادند که در صورت اجرای طرح‌هایی نظیر سناریو ۷ و ۹، حرکت یون‌های نیترات (با غلظت ۳۰ تا ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر) در ناحیه واقع در شهر هشتگرد، محدود خواهد شد. می‌توان نتیجه گرفت، با وجود اینکه محدودیت کامل استخراج چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز، بهترین نتیجه ممکن را در راستای اهداف احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان داشته است، اما ممکن است محدودیت تدریجی استخراج چاه‌های بهره‌برداری از مقبولیت و قابلیت اجرای بیشتری برخوردار باشد.

کلمات کلیدی: اقدامات مدیریتی، دشت هشتگرد، شبیه‌سازی عددی، احیاء و تعادل‌بخشی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۸/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۴

۱- دانشیار گروه فناوری‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آلاینده‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Modeling of Management Measures Taken to Control Groundwater Level Depletion (Hashtgerd Plain, Alborz Province)

*A. Shahbazi [1], F. Safari [2], and H. Ketabchi [3]**

Abstract

Increased groundwater extraction has caused severe depletion (On average 65 cm/year) in the groundwater resources of Alborz province and especially Hashtgerd Plain in over the past few decades. Hence, considering the importance of these valuable resources, appropriate strategies should be considered for the sustainability of this resources. In order to realize these measures, the MODFLOW numerical simulation was calibrated in steady-state and transient conditions for three years (2013 to 2014) and validated for a one-year period (2015). Then, the influence of the implementation of the Iran Aquifer Restoration plan in Hashtgerd plain was evaluated and pollutant ions movement (nitrate and sulfate) in this scheme were investigated using MODPATH. According to the results, if the current conditions continued, the aquifer storage would decrease by an average of one MCM/year. Also from the management measures, the guidelines for restriction of unlicensed utilization wells and the step-by-step restriction of groundwater extraction cause improving the aquifer storage about 8.8 and 6.8 MCM/year. The results of the MODPATH also showed that if the plans such as scenarios 7 and 9 were implemented, the movement of nitrate ions (at concentrations of 30 to 70 mg/l) will be limited in the Hashtgerd city area. The study concludes, although the complete restriction of unlicensed utilization wells may work best in line with the objectives of the Aquifer Restoration Plan, the step-by-step restriction of utilization wells may be more acceptable and applicable.

Keywords: Management Measures, Hashtgerd Plain, Numerical Simulation, Restoration.

Received: November 9, 2019
Accepted: January 24, 2020

1- Associate Professor, Department of Environmental Pollutants Research, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran. Email: a_shahbazi@sbu.ac.ir

2- M.Sc., Graduated of Environmental Pollutants, Department of Environmental Pollutants Research, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- مقدمه

ذخایر آب زیرزمینی در ایران یکی از اصلی‌ترین منابع تامین آب می‌باشد که در چند دهه اخیر بروز عواملی همچون توسعه، افزایش استحصال از آب زیرزمینی و خشکسالی موجب کاهش کمیت و کیفیت این منابع شده است (Poor-Asghar, 2015; Nouri-Esfandiari, 2015). از این‌رو باید مدیریت صحیحی برای حفاظت و پایداری از این ذخایر ارزشمند صورت گیرد و تا حد ممکن از بروز پیامدهای منفی بیشتر جلوگیری شود.

از راهبردهایی که در جهت مدیریت و حفاظت از منابع آب در ایران طراحی شده است، می‌توان به طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (مصوب ۱۳۹۳)، اشاره نمود که به منظور حفاظت کمیت و کیفیت منابع آب و ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب زیرزمینی تنظیم و ابلاغ گردیده است. هدف کمی طرح مورد نظر به نحوی است که کسری مخزن متوسط درازمدت آبخوان‌ها تا پایان برنامه ششم توسعه و کسری مخزن تجمعی طی یک برنامه ۲۰ ساله جبران گردد (Aquifer Restoration Plan, 2014). این طرح را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: دسته اول، پروژه‌هایی که منجر به تولید و تدقیق داده‌ها و اطلاعات در خصوص منابع، مصارف و وضعیت آبخوان می‌شوند، مانند تجهیز چاه‌های پیزومتری و تهیه بیلان. دسته دوم، راهبردهایی که نقش کنترل، نظارت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را بر عهده دارند، مانند استقرار گروه‌های بازرسی و به‌روز نمودن سند ملی آب. دسته سوم، پروژه‌هایی که منجر به ذخیره‌سازی آب در آبخوان‌ها می‌شوند، مانند نصب کنتور حجمی بر روی چاه‌های بهره‌برداری و طرح‌های تغذیه مصنوعی (Nouri-Esfandiari, 2015).

Nikbakht and Moradi (2019) با استفاده از آمار ۶ ایستگاه هواشناسی و ۸ چاه مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی به بررسی اثر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت هشتگرد طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ پرداختند. در این مطالعه از شاخص آب و هوایی SPI و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی GRI برای بررسی اثر خشکسالی بر وضعیت آبخوان استفاده شده است. نتایج مطالعه مذکور نشان داد که شرایط آب و هوایی در ۷۳/۳ درصد از سال‌های آماری نرمال بود. علاوه بر این، سطح آب زیرزمینی دشت هشتگرد در طول ۲۳ سال آبی با شیب ۷۰ درصد و به میزان ۱۵/۵ متر افت داشته است. به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از این است که عمدتاً افت سطح تراز آب زیرزمینی ناشی از بیش‌برداشت از آبخوان‌ها بوده و کاهش بارندگی نقش کمتری داشته است. در مطالعه‌ای دیگر Eshmatami et al. (2002)، گزارش کردند که استحصال از منابع آب زیرزمینی بر روی افت آبخوان دشت هشتگرد تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد و باید اقداماتی مؤثر (نظیر نصب کنتور حجمی و مسدود نمودن چاه‌های غیرمجاز) در جهت جلوگیری از بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی صورت گیرد. به طور کلی با توجه به نتایجی که از مطالعات پیشین بدست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که آبخوان دشت هشتگرد در سال‌های پیشین افت قابل ملاحظه‌ای داشته و انجام اقدامات احیاء و تعادل‌بخشی در این محدوده بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

در مطالعات داخلی، Ketabchi and Saghi-Jadid (2019)، جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت نمدان (استان فارس) را با استفاده از مدل MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی مورچه‌ها بررسی نمودند. در این مطالعه ابتدا وضعیت آبخوان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار برای یک دوره هفت ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۵)، واسنجی شد و بعد در یک بازه زمانی سه ساله (۱۳۹۵-۱۳۹۲)، تحت صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس، در قسمت پیش‌بینی وضعیت آتی، تأثیر سه شاخص احیاء، پرشدگی و پایداری در راستای طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور محاسبه گردید. نتایج آنها نشان داد که تحت اعمال شاخص احیاء بهترین نتیجه حاصل شده است و در این سناریو، سطح تراز آب زیرزمینی ۱۰/۶ متر افزایش یافته است.

Abdelhalim et al. (2019)، اثر افزایش استحصال از منابع آب زیرزمینی (Minia Governorate–Samalut city) کشور مصر را با استفاده از مدل MODFLOW بررسی نمودند. در این مطالعه ایشان از سلول‌های ۲۵۰ متر × ۲۵۰ متر و پارامترهای دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳، جهت ساخت مدل مفهومی استفاده کردند و سپس با واسنجی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به شبیه‌سازی سناریوهای مورد نظر پرداختند. مطابق نتایج، هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به ترتیب ۵۰ تا ۰/۷۵ متر بر روز و ۰/۲۱ واسنجی شد. نتایج حاصل از بررسی سناریوها نیز نشان دادند در صورتی که استحصال از آب زیرزمینی در مقایسه با شرایط فعلی، ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش یابد، ذخیره آبخوان نسبت به شرایط موجود به ترتیب ۱۰/۹ و ۳۸/۹ هزار مترمکعب در روز کاهش می‌یابد. علاوه بر این سایر نتایج نشان دادند که افزایش تغذیه از سطح در محل رود نیل می‌تواند به عنوان یک عامل مؤثر در بهبود وضعیت بیلان آبخوان در هنگام افزایش استحصال آب زیرزمینی در نظر گرفته شود.

Chen et al. (2016)، با استفاده از مدل MODFLOW به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی محدوده‌ای با وسعت ۵۰۰۰ کیلومترمربع در شمال چین (Zhangye Oasis) پرداختند. در این

مطالعه، اثرات اجرای راهکارهای مدیریت کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی بر حفاظت و مدیریت منابع آب زیرزمینی ارزیابی شد. پس از معرفی شرایط اولیه، مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شده برای حالت غیرماندگار به ترتیب ۱ تا ۳۰ متر بر روز و ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ گزارش شده و مقادیر ریشه مربع میانگین خطا (RMSE) نیز برای حالت واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب بین ۰/۲۲ تا ۰/۴۶ و ۰/۲۰ تا ۰/۸۷ به‌دست آمد. نتایج پیش‌بینی‌های صورت گرفته نشان داد که از میان سناریوهای مدیریتی، کاهش ۸۰ درصدی سهمیه آبیاری در بخش کشاورزی، بیشترین تأثیر را در بهبود سطح تراز آب زیرزمینی داشته است.

امروزه افزایش جمعیت، مصرف آب و توسعه در بخش‌های مختلف، منجر به افزایش پتانسیل تولید آلودگی در محیط آبی شده است که می‌تواند کیفیت منابع آب را تهدید نماید (Yousefi et al., 2018). یکی از مهم‌ترین نکات در کنترل و پیشگیری از آلودگی، شناسایی عوامل و منابع آلودگی، منابع بحرانی آلوده شده و همچنین جهت حرکت آلودگی است (Einlo et al., 2016). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، شناسایی عواملی که کیفیت منابع آب را تهدید می‌نمایند، برای جلوگیری از کاهش کیفیت این منبع با ارزش اهمیت زیادی دارد. از مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته است می‌توان به Arumi (2000)، اشاره کرد که اثرات مدیریت کشاورزی را (در مقیاس مزرعه) بر روی کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی محدوده Central Platte Valley، نبراسکا (ایالت متحده آمریکا)، بررسی نمودند. در این مطالعه، ایشان با توسعه مدل‌های MODFLOW-MT3D توانستند، اثرات ناشی از تغییر میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی و آبشویی نیترات (از محدوده ریشه گیاهان زراعی) را بر روی آب‌های زیرزمینی، در بازه زمانی ۱۵ ساله (۱۹۸۱ تا ۱۹۹۶)، ارزیابی نمایند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با مدیریت آبیاری و کوددهی نیتروژن پس از ده سال، غلظت آلاینده‌ها در یک سوم بالایی آب‌های زیرزمینی به میزان ده درصد کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر Samani and Kamrani (2015)، با بکارگیری MODFLOW و برنامه MODPATH، حریم کمی و کیفی چاه‌های آب شرب دشت آسپاس را نسبت به نیترات (طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹) بررسی نمودند. در این پژوهش، پس از این که عمل بهینه‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان با موفقیت همراه بود، حریم کمی تمام چاه‌های آب شرب موجود در محدوده مورد مطالعه، با استفاده برنامه MODPATH، شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که اختلاط آب برگشتی از کشاورزی با رودخانه موجب افزایش غلظت نیترات در محدوده‌های مرکزی دشت نسبت به نواحی مرزی (ورودی آب زیرزمینی) گردیده است.

Bastani and Harter (2019)، تأثیر مدیریت مواد مغذی مصرفی در کشاورزی و بهره‌برداری از آبخوان را بر بهبود کیفیت آب زیرزمینی (در چاه‌های تحت تأثیر نیترات) محدوده شمال شرقی San Joaquin Valley- Modesto basin ایالت کالیفرنیا، ارزیابی نمودند. در این راستا، ابتدا مدل مفهومی برای شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل MODFLOW توسعه داده شد و در ادامه منشاء آلاینده نیترات با استفاده از برنامه MODPATH و ردیابی پس‌رو از موقعیت چاه‌های هدف (تأثیر پذیرفته از نیترات) محاسبه گردید. سپس مدل مفهومی مناسب برای مدل MT3D توسعه داد شد و سناریوهایی نظیر ادامه شرایط موجود، استفاده از محصولات با نیاز کمتر به مواد مغذی و مدیریت آب نفوذ یافته از کشاورزی به آبخوان بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی سناریوها نشان دادند که بهترین نتایج در عمل انتخاب محصولات زراعی با تأثیر کم‌تر بر روی افزایش نیترات در آبخوان (نظیر گونه‌ای یونجه و تاکستان) و افزایش تغذیه از سطح در زمستان حاصل شده است. در این سناریو، غلظت نیترات در محدوده چاه‌های بهره‌برداری هدف طی دوره ۶۰ ساله، نسبت به ادامه شرایط موجود ۸۰ درصد کاهش یافته است.

Tam and Nga (2018)، به ارزیابی اثرات توسعه شهری بر منابع آب زیرزمینی محدوده (Hanoi) ویتنام با وسعت ۳۳۰۰ کیلومترمربع (یک آبخوان چهار لایه) پرداختند. اثرات در نظر گرفته شده شامل تغییر کاربری اراضی و برداشت از منابع آب زیرزمینی در یک دوره ۲۵ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵) بوده است. در این پژوهش، جریان آب زیرزمینی و اثرات تغییر کاربری اراضی، به ترتیب با استفاده از مدل‌های MODFLOW و WetSpa شبیه‌سازی گردیدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که بارندگی (۵۳/۶ درصد)، رودخانه، دریاچه‌ها (۳۱ درصد) و فاضلاب شهری (۱۵/۴ درصد) به ترتیب بر روی تغذیه منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار هستند. علاوه بر این، نتایج حاصل از اجرای سناریوها نیز نشان دادند که برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی نسبت به توسعه شهری و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، تأثیر بیشتری را بر روی کاهش سطح آب زیرزمینی می‌گذارد. در سناریوهای ذکر شده، سطح آب زیرزمینی در یک دوره ۲۵ ساله، به ترتیب ۰/۵۰ تا ۶/۸ متر و ۰/۴۹ تا ۶/۶ متر کاهش یافته است.

به طور کلی می‌توان جمع‌بندی نمود که امروزه استفاده از مدل‌های عددی نظیر MODFLOW، MODPATH و MT3D در شناسایی وضعیت و مدیریت منابع آب رشد چشمگیری یافته است. از نقاط قوت مطالعاتی که در قسمت پیشین ذکر گردید می‌توان به وجود برنامه منظم در جهت پایش وضعیت کیفیت آب و تعریف سناریوهای کاربردی در جهت بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی اشاره نمود

(Bastani and Harter, 2019; Arumi, 2000). نوآوری مطالعه حاضر که آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد، شناسایی و تحلیل وضعیت آبخوان در جهت ارزیابی اثرات اجرای سناریوهای مدیریتی بر اساس یک طرح ملی (طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور) به همراه تحلیل آن‌ها با کاربری اراضی است که در سطح کشور در حال اجرا می‌باشد. در این راستا، ابتدا جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW، برای دو حالت ماندگار و غیرماندگار، طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴، تحت واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته است. سپس این مدل برای بررسی تأثیر اقدامات مدیریتی نظیر کنترل استحصال از منابع آب زیرزمینی، استفاده شد. با توجه به امکان اثرگذاری طرح مذکور بر روی حرکت آلاینده در آبخوان، در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده و بکارگیری برنامه MODPATH، وضعیت حرکت آلاینده (نیترات و سولفات) در اثر اجرای اقدامات مدیریتی نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱، روند انجام مطالعه حاضر را نمایش می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه، در آبخوان آبرفتی دشت هشتگرد (استان البرز) و در نیمه شمالی حوضه آبریز دریاچه نمک قرار گرفته است و دارای مساحتی در حدود ۳۲۱/۳ کیلومترمربع می‌باشد (شکل ۲). آبخوان دشت هشتگرد در اراضی مخروط افکنه و تراس رودخانه‌ای واقع شده است که نفوذپذیری نسبتاً بالایی دارد. از نکات قابل ذکر دیگر، رخنمون رسوبات تبخیر میوسن در اراضی جنوبی دشت است که موجب تنزل کیفیت آب‌های سطحی در این محدوده شده است (Regional Water Company of Tehran, 2011).

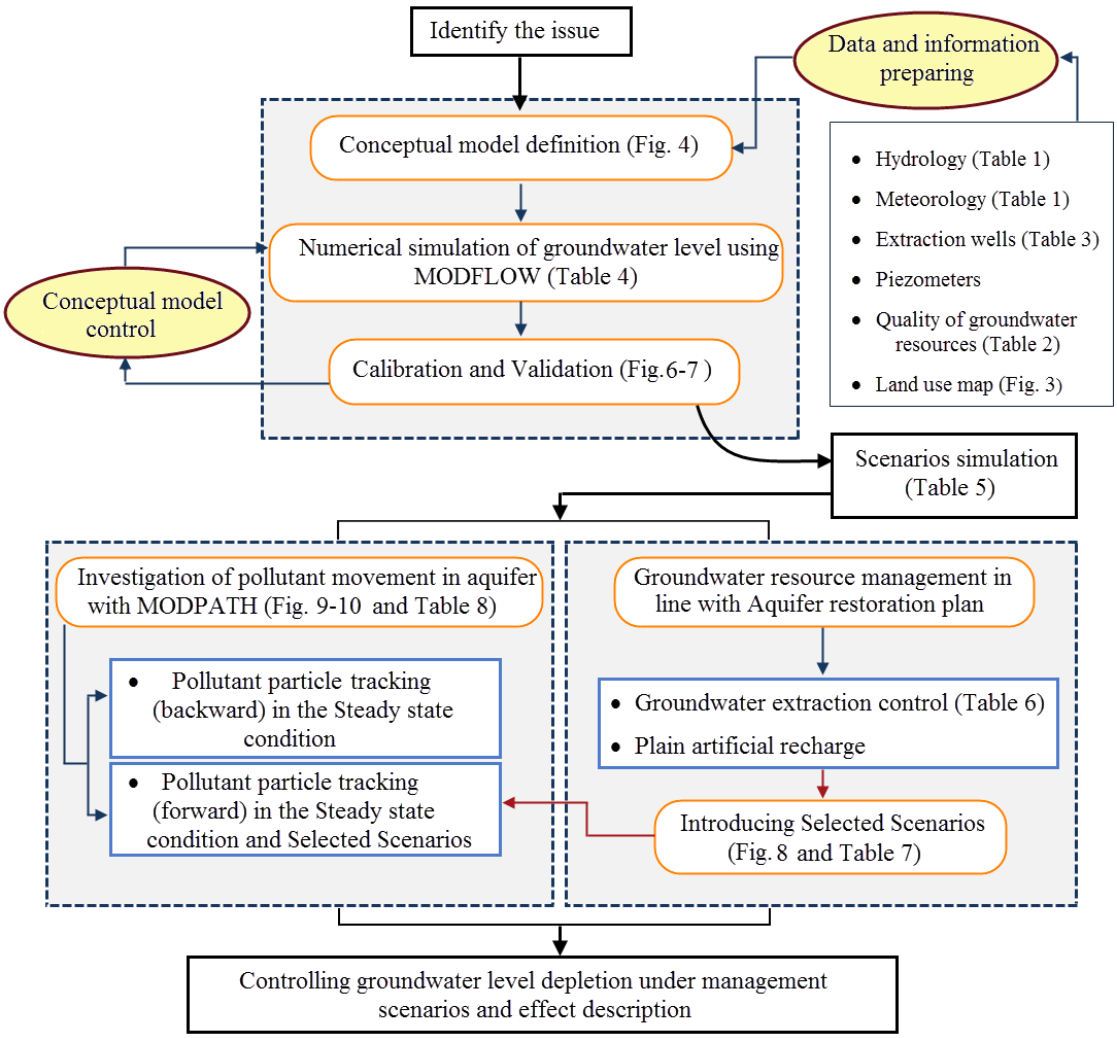


Fig. 1- The flowchart of the study procedure

شکل ۱- نمودار روند انجام مطالعه

جدول ۱، مشخصات منطقه مطالعاتی دشت هشتگرد را به اختصار نشان می‌دهد.

هیدروگراف معرف آبخوان دشت هشتگرد نشان می‌دهد که در طی چند دهه اخیر، سطح تراز آب زیرزمینی به طور متوسط سالانه ۰/۶۵ متر کاهش یافته است. علاوه بر این، برآوردهای دقیق‌تر (با استفاده از ۱۲ پیزومتر) در بازه زمانی مطالعه حاضر (۱۳۹۴-۱۳۹۱)، نشان دادند که افت سطح تراز آب زیرزمینی نسبت به چند دهه اخیر شدیدتر شده است. به طوری‌که سطح تراز آب زیرزمینی به طور متوسط ۳/۱ متر در سال کاهش می‌یابد. تعداد زیاد چاه‌های بهره‌برداری و کاهش بارندگی، از عواملی می‌باشد که در کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در این بازه زمانی مؤثر بوده است. آزمایش پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و اکتشافی که در خصوص برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان صورت گرفته است، نشان می‌دهد که در دشت هشتگرد، مقادیر قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمربع در روز متغیر می‌باشد. علاوه بر این، سایر حفاری‌های اکتشافی و مطالعات ژئوالکتریک صورت گرفته در دشت هشتگرد، ضخامت آبخوان را بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر برآورد نموده است. مطابق نتایج، بیشترین ضخامت آبرفت در قسمت‌های میانی دشت واقع گردیده است و با فاصله گرفتن از قسمت‌های میانی، مقدار آن کاهش می‌یابد (Regional Water Company of Tehran, 2013).

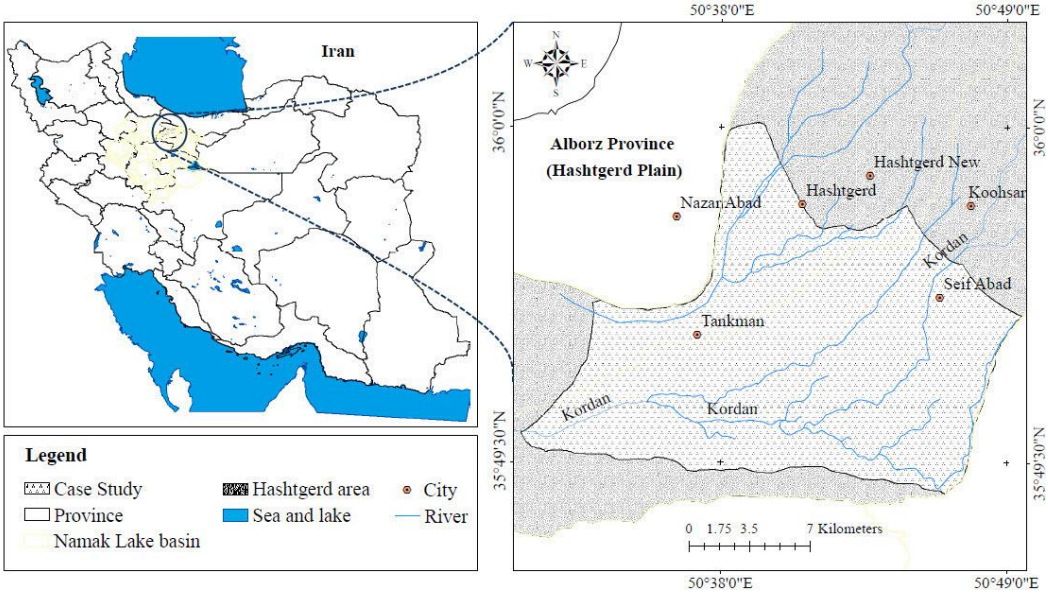


Fig. 2- Hashtgerd plain study area, Namak Lake basin, Alborz province, Iran

شکل ۲- محدوده مطالعاتی دشت هشتگرد، حوضه آبریز دریاچه نمک، استان البرز، ایران

Table 1- Characteristics of case study (Regional Water Company of Tehran, 2011)

جدول ۱- مشخصات منطقه مطالعاتی (Regional Water Company of Tehran, 2011)

Characteristics	Description
Overview	
Geographical coordinates	50° 22' - 51° 07' Longitude 35° 48' - 36° 07' Latitude
Area of basin (km^2)	92884
Area of aquifer (km^2)	410.7
Plain elevation (m)	1151-1442
Type of Quaternary sediments in plain	Piedmont fan and valley terrace deposits
Operation status	
Depth of Groundwater (m)	10-100
Number of exploitation wells	698
Discharge rate (annual)	239.5 MCM
Meteorological	
Temperature (°C)	10.3–13.9
Precipitation (mm)	225-700
Evaporation (mm)	1094-1275

وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی از دیگر پارامترهایی است که در مباحث مربوط به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش از ۲۴ حلقه چاه پایش بـــرای سنجش کیفیت منابع آب زیـــرزمینی دشت هشتگرد طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۱ (بـه صورت ماهانه) استفاده شـــده است (شکل ۳). پـارامتر نیترات از روش رنگ‌سنجی و سنجش میزان جـــذب نـــور در طول مـــوج مشخص، بـــا استفاده از دستگاه فتومتر و روش آزمـــایش استانـــدارد (SMWW 4500 NO^-_3) مورد تحلیل قرار گرفته و علاوه بر این، پارامترهای سولفات، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و کل مواد جامد محلول نیز با روش استاندارد مرجع (به ترتیب SMWW 4500-SO_4^{2-}، SMWW 3500-Ca، SMWW 2340، SMWW-3500-K، 1030) اندازه‌گیری شده است. جدول ۲، خلاصه وضعیت کیفیت منابع زیرزمینی دشت هشتگرد را در مقایسه با استانداردهای مطرح در سنجش کیفیت آب، ارائه می‌نماید. همان طور که در این جدول نشان داده شده است، بیشترین غلظت اندازه‌گیری شده در تمامی پارامترها (نیترات، سولفات، سختی کل و کل مواد جامد محلول) از حد مطلوب و حداکثر مجاز فراتر رفته است.

بهره‌برداری از آب‌زیرزمینی در محدوده مطالعاتی حاضر، عمدتاً از طریق چاه‌های بهره‌برداری عمیق و نیمه‌عمیق (جهت تامین مصارف کشاورزی و صنعتی) صورت می‌گیرد. جدول ۳، وضعیت برداشت چاه‌های بهره‌برداری دارای پروانه و فاقد پروانه فعالیت را در محدوده مطالعاتی واقع در دشت هشتگرد، نشان می‌دهد. مطابق این جدول، از ۶۹۸ حلقه چاه بهره‌برداری فعال در محدوده مطالعاتی حاضر، تعداد قابل توجهی (۴۱ درصد) فاقد پروانه بهره‌برداری هستند که به طور متوسط ۷۵ درصد از کل حجم آب استحصال شده را به خود اختصاص می‌دهند.

امروزه با توجه به رشد سریع جمعیت و افزایش بهره‌برداری ناهمگون از منابع طبیعی، مطالعه تغییرات کاربری‌ها و استفاده از روش‌های سنجش از دور امری مهم به‌حساب می‌آید (Parvar and Shayesteh, 2017). جهت تهیه نقشه کاربری اراضی، تصاویر ماهواره لندست ۸ (سنجنده (OLI)، مسیر ۱۶۵، ردیف ۰۳۵) سال ۲۰۱۳ میلادی، تهیه گردید. سپس تصحیح اتمسفری و رادیومتریک بر روی تصاویر صورت گرفت. پس از انجام تصحیحات لازم و برش مرز، طبقه‌بندی تصاویر به شکل نظارت شده و با استفاده از روش حداکثر احتمال انجام گردید. با استفاده از برآورد ماتریس خطا، ضریب کاپا (۰/۷۶) و صحت کلی طبقه‌بندی (۸۳/۲۵ درصد) محاسبه گردید.

Table 2- Investigating the quality of groundwater resources of Hashtgerd Plain
(Safari et al., 2020; Chapman, 1996; Drinking water- physical and chemical specifications, 2009)

جدول ۲- بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت هشتگرد

Groundwater quality assessments	Value	TH (mg/l)	NO^-_3 (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	TDS (mg/l)
Average concentration of four years 2012-2016	Minimum	62.9	6.3	33.5	184
	Average	370.4	20.7	257.1	988.4
	Maximum	1014.6	107	816.1	2669
Iranian Drinking Water Quality	Admissible Limit	200	-	250	1000
	Maximum Contaminant Level	500	50	400	1500
World Health Organization	Admissible Limit	200-100	-	250	600
	Maximum Contaminant Level	300	50	500	1000

Table 3- Summary of extraction wells information

جدول ۳- خلاصه اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری (Regional Water Company of Tehran, 2011)

Well operation status	Number	Well drilled years	Well depth (m)	Discharge (l/s)	Operating hours	Annual average (m^3/year)
Unlicensed wells	287	1339-1387	10-210	0.5-58.8	24-8404	181963
Licensed wells	411	1340-1390	22-210	0.70-48.2	142-8760	57575

کاربری‌های کشاورزی ۲۲ درصد، باغات ۲۳ درصد و نواحی شهری و روستایی ۳۳ درصد از مساحت محدوده مطالعاتی را شامل می‌شوند. شکل ۳، وضعیت توزیع کاربری‌ها را به همراه موقعیت نمونه‌های سنجش کیفیت آب زیرزمینی در محدوده دشت هشتگرد نمایش می‌دهد.

۲-۲- معرفی مدل مفهومی و عددی

در مطالعه حاضر، مدل MODFLOW (Harbaugh, 2005)، جهت بررسی رفتار آبخوان در شرایط فعلی و آتی، مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل عددی MODFLOW، معادله دیفرانسیل جزیی حاکم بر جریان در یک محیط متخلخل اشباع، سه‌بعدی و در حالت غیرماندگار به شرح زیر می‌باشد (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}h\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}h\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

که در آن، K_{xx}، K_{yy} و K_{zz}: ضرایب هیدرولیکی در راستاهای x، y و z ($L.T^{-1}$)، (h): سطح تراز آب زیرزمینی (L)، (W): میزان تغذیه یا تخلیه ($L.T^{-1}$) و (S_s): ضریب ذخیره (-) می‌باشند.

اولین گام در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، تهیه مدل مفهومی است. بدین منظور، با بکارگیری مشخصات شرایط مرزی، پیزومترها، چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه از سطح (بارش، آب برگشتی از چاه‌های پمپاژ و رودخانه) و مقادیر اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، مدل مفهومی آبخوان دشت هشتگرد تهیه گردیده است (شکل ۴).

در ادامه، با توجه به این که برای شبیه‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW (روش تفاضل محدود[1])، باید آبخوان را به واحدهای کوچک‌تری تقسیم نمود، سیستم آب زیرزمینی به سلول‌هایی با ابعاد ۲۰۰ متر × ۲۰۰ متر تقسیم گردید، به طوری که راستای قائم تک لایه فرض شده است. از میان عواملی که بر روی تعیین اندازه سلول‌ها تأثیرگذار است می‌توان به وضعیت زمین‌شناسی، تغذیه از سطح، کاربری اراضی، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، پایداری و سازگای روش عددی حل مساله و کنترل زمان لازم برای محاسبات اشاره نمود. جدول ۴، خلاصه‌ای از مشخصات شبیه‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی هشتگرد را ارائه می‌نماید.

۲-۳- واسنجی و صحت‌سنجی

در مطالعه حاضر، عمل واسنجی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار، با استفاده از روش سعی و خطا و برنامه عملیات واسنجی خودکار[2] انجام شده است. برنامه واسنجی خودکار بر مبنای حل معکوس مدل آب زیرزمینی استوار می‌باشد و با استفاده از آن، نتایج تنظیم پارامترهای ورودی به مدل با یکدیگر مقایسه می‌گردند (Ahmadi et al., 2017).

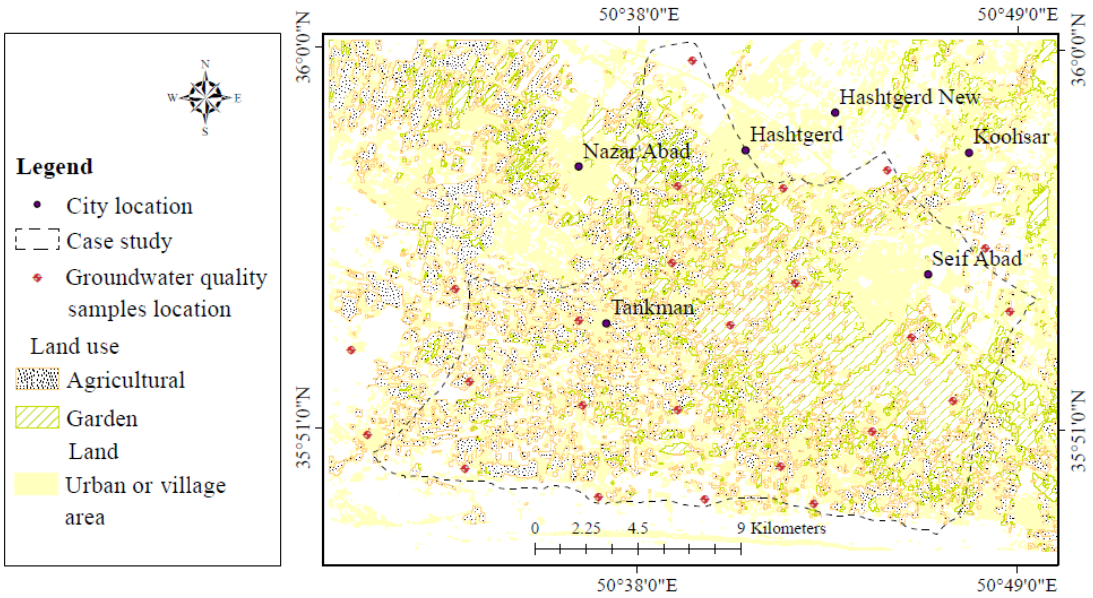


Fig. 3- Land use map of Hashtgerd Plain (prepared using Landsat8 images, (2013)) and location of groundwater quality samples

شکل ۳- نقشه توزیع کاربری اراضی دشت هشتگرد (تهیه شده با استفاده از تصاویر ماهواره لندست، سال ۲۰۱۳ میلادی) و موقعیت نمونه‌های بررسی کیفیت آب زیرزمینی

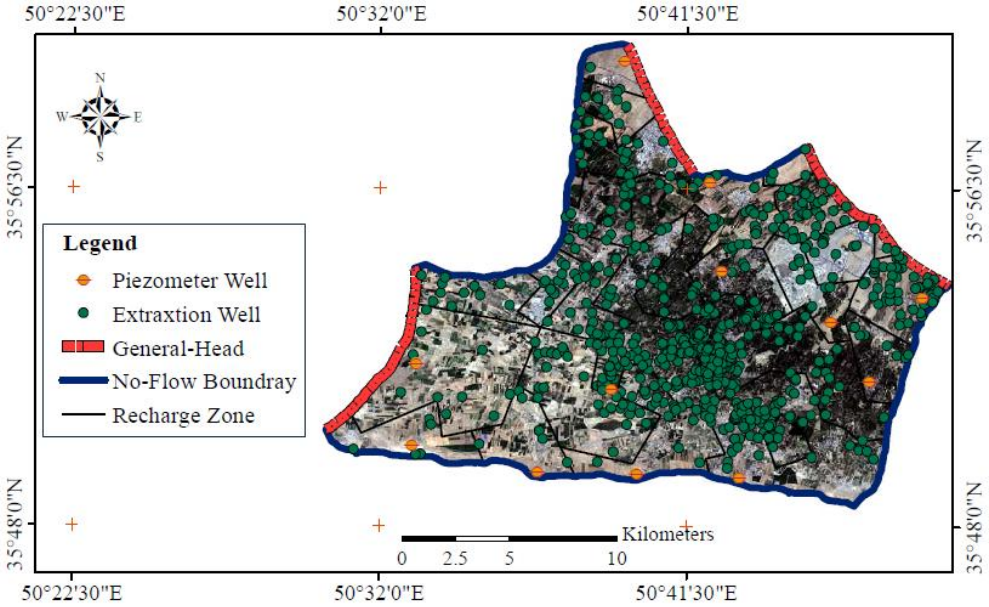


Fig. 4- Conceptual model of Hashtgerd aquifer, Alborz province

شکل ۴- مدل مفهومی آبخوان دشت هشتگرد، استان البرز

مدل آب زیرزمینی دشت هشتگرد در حالت ماندگار با استفاده از متوسط مقادیر دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ توسعه داده شد و برای هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح مورد واسنجی قرار گرفت. در فرایند واسنجی هدایت هیدرولیکی، مقادیر اولیه بر اساس داده‌های موجود ضخامت آبخوان و قابلیت انتقال تهیه گردید. سپس با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، نوع خاک و مطالعات پیشین، مقادیر حداقل و حداکثر در بازه ۱ تا ۳۰ متر بر روز تنظیم گردید. در فرایند واسنجی تغذیه از سطح، مقادیر اولیه بر اساس کاربری اراضی، شیب و اطلاعات زمین‌شناسی به‌دست آمد. سپس آب نفوذ یافته از بارش و آب استحصال شده به ترتیب در بازه ۱۱ تا ۱۵ درصد و ۲۵ تا ۶۵ درصد تنظیم گردید. با گذر از فرایند واسنجی در حالت ماندگار، مقادیر حاصل به عنوان مبنای عمل واسنجی حالت غیرماندگار قرار گرفت. به این ترتیب ضرایب تغذیه از سطح واسنجی شده در حالت ماندگار، برای ۳۶ گام زمانی حالت غیرماندگار (۱۳۹۳-۱۳۹۱) اختصاص داده شد و به همراه مقادیر هدایت هیدرولیکی به مدل معرفی گردید.

در حالت غیرماندگار علاوه بر پارامترهای ذکر شده، آبدهی ویژه نیز تدقیق شده است. برای تهیه مقادیر اولیه ضریب ذخیره، رویکرد مشابه هدایت هیدرولیکی اتخاذ گردید. به این ترتیب، با معرفی مؤلفه‌های مؤثر به مدل و تعریف گام‌های زمانی در حالت غیرماندگار، رفتار آبخوان نسبت به تغییرات حاصل شده شبیه‌سازی گردید.

پس از اینکه فرایند واسنجی پارامترها به پایان رسید، ضروری است که صحت عملکرد مدل تهیه شده مورد ارزیابی قرار گیرد (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015). از این‌رو در ادامه مدل برای ۱۲ گام زمانی (ماهانه) در سال ۱۳۹۴ تحت صحت‌سنجی قرار گرفته است. بدین منظور پارامترهای تدقیق شده و تنش‌های وارد شده به آن، برای داده‌های مشاهده‌ای سال ۱۳۹۴ تنظیم شد و تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده نسبت به شرایط تعریف شده بررسی گردید.

۲-۴- سناریوها

جدول ۵، مشخصات سناریوهای مدیریتی و اقلیمی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. بررسی طرح‌های تعادل‌بخشی آبخوان (سناریو ۹-۳) و ردیابی آلاینده (سناریو ۱۰) در سیستم آب زیرزمینی، از سناریوهای مدیریتی می‌باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴-۱- تغییرات اقلیمی

با توجه به اهمیت اثرات تغییر اقلیم بر روی تامین منابع آب، بخصوص منابع با ارزش آب زیرزمینی، در این مطالعه سعی شده است که تأثیر این پارامتر بر روی آبخوان مورد بررسی قرار گیرد. گزارش منتشر شده از سوی مرجع ملی هیأت بین‌الدولی تغییر اقلیم (سازمان هواشناسی کشور) در سال ۱۳۹۶، نشان می‌دهد که وضعیت بارش در دهه ۲۰۳۰ میلادی، نسبت به وضعیت مشاهده شده در منطقه، ۰ تا ۱۰ درصد افزایش خواهد داشت.

Table 4- The numerical simulation model characteristics.

جدول ۴- مشخصات شبیه‌سازی عددی

Characteristics	Description
Simulation setup	
Groundwater flow modeling	MODFLOW (Harbaugh, 2005)
Dimension	Two dimensional
Simulation mode	Saturated steady-state and transient flow
Spatial discretization	
Structure	Finite difference method
Number of elements	8153
Mesh dimension (vertical direction)	One layer
Mesh dimension (horizontal direction) (m)	200×200
Temporal discretization	
Time step for transient simulation (day)	29-31
Stress period for transient simulation (month)	36
Boundary conditions	
Lateral boundaries	No flow Time-dependent fixed head (1184.8-1141.2 m)
Top surface boundary	Flow boundary (recharge and extraction rates)
Bottom surface boundary	No flow
Model Parameters	
Topography elevation (m)	1168-1336.9
Bedrock elevation (m)	957-1153
Water table elevation (m)	1133-1191
Aquifer thickness (m)	19.1-221.2
Freshwater density (kg/m^3)	1000
Recharge rate (m/day)	0.00039-0.00099
Extraction rate ($m^{3/}day$)	0.38-4636
Gravitational acceleration (m/s2)	9.81
Hydraulic conductivity (m/day)	1-30
Specific storage	0.00001
yield Specific	0.003-0.12
Calibration	
Auto-calibration code	PEST (Doherty, 2005)
Optimization algorithm	Gauss-Marquardt-Levenberg nonlinear scheme
Calibration observation	Water elevations in 12 piezometer wells Hydraulic conductivity Recharge rate Specific yield (only for transient calibration)
Max number of iteration for PEST	12-20
Max of iteration with no improvement for PEST	3-5
Relative convergence limit	0.005
Relative parameter change criterion	0.005
Preferred homogenous regularization	Yes
Prior information power factor	1.0
Preferred value regularization	No

Table 5- Characteristics of the scenarios used in the present study

جدول ۵- مشخصات سناریوهای استفاده شده در مطالعه حاضر

Item	Scenario type	Description
1	Management actions	Continue the current conditions
2	Climatic	10% increase in precipitation
3-9	Management actions (Aquifer restoration plan)	Plain artificial recharge (50% increase in recharge rate) and reduction of extraction rate of licensed and unlicensed operation wells
10	Pollutant particle tracking	Investigating the potential movement of Nitrate and Sulfate contaminant particles in the groundwater system

بنابراین در سناریو ۲ مطالعه حاضر، رفتار آبخوان نسبت به افزایش ۱۰ درصدی در بارش مورد بررسی قرار می‌گیرد تا به این ترتیب رفتار آبخوان نسبت به تغییر اقلیم پیش‌بینی شده شبیه‌سازی گردد (Climatological Research Institute of Mashhad – IPCC, 2017).

۲-۴-۲- طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی

در این قسمت با تعریف سناریوهایی که بر مبنای وقایع استوار هستند، عکس‌العمل سیستم نسبت به اعمال طرح‌های مدیریتی (طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی) و وقایع احتمالی سنجیده می‌شود. تغذیه مصنوعی دشت هشتگرد و محدودیت برداشت چاه‌های بهره‌برداری، طرح‌های مدیریتی هستند که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به شرح هر یک موارد مذکور پرداخته می‌شود.

محدودیت برداشت چاه‌های بهره‌برداری: مطابق دستورالعمل طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014)، میزان برداشت چاه‌های بهره‌برداری دارای پروانه، باید مطابق آیین‌نامه مصرف بهینه آب کشاورزی اصلاح و سپس با در نظر گرفتن میزان آب قابل برنامه‌ریزی برای چاه‌های بهره‌برداری تعدیل گردد. علاوه بر این، در خصوص چاه‌هایی که غیرمجاز هستند (و باید پر و مسلوب‌المنفعه گردند)، مطابق ماده ۸-۵ دستورالعمل مذکور، باید به ترتیب اولویت (سطح زیر کشت و غیره) تعدیل یا کاملاً محدود شوند.

به این ترتیب با توجه به دستورالعمل مذکور و اطلاعاتی که در خصوص وضعیت چاه‌های بهره‌برداری در قسمت‌های پیشین ارائه گردید، اجرای طرح‌های مدیریتی آبخوان (احیاء و تعادل‌بخشی) در سال‌های آینده، بسیار محتمل به نظر می‌رسد. از این‌رو در این مطالعه سعی شده است تا با اعمال محدودیت‌های فرضی متعدد در برداشت از منابع آب زیرزمینی، طرح‌های پیش‌رو مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۶ سناریوهایی که با محدودیت در برداشت از منابع آب زیرزمینی مرتبط است را نشان می‌دهد. مطابق جدول مذکور، در سناریوهای ۳ تا ۷، محدودیت‌هایی که برای چاه‌های بهره‌برداری در نظر گرفته شده است در تمامی گام‌های زمانی یکسان است. به طور مثال، در سناریو ۳ با کنترل استحصال آب زیرزمینی، حجم بهره‌برداری از چاه‌های مجاز و غیرمجاز به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد کاهش یافته است. در سناریوهای ۸ و ۹ نیز با نزدیک شدن به سال‌های پایانی شبیه‌سازی، محدودیت‌های شدیدتری برای برداشت از منابع آب زیرزمینی اعمال شده است. قابل ذکر است که در سناریوهای مذکور (۹ و ۸) میزان محدودیت در استحصال از آب زیرزمینی در دوره‌های ۳ یا ۴ ساله افزایش می‌یابد. محل اجرای سناریوهای ذکر شده در مطالعه حاضر در شکل ۵ مشخص گردیده است.

Table 6- Control details groundwater extraction in management measures scenarios (Aquifer Restoration Plan)

جدول ۶- جزئیات کنترل حجمی استحصال از آب زیرزمینی در سناریوهای مدیریتی (طرح احیاء و تعادل‌بخشی)

Item	Decrease of extraction rate of licensed wells	Decrease of extraction rate of unlicensed wells	Stress periods (month) (2016-4 to 2032-3)
3	10%	20%	192 Identical steps
4	15%	30%	192 Identical steps
5	20%	40%	192 Identical steps
6	25%	50%	192 Identical steps
7	0%	100%	192 Identical steps
8	10-25%	20-50%	4 steps 48 months
9	10-25%	20-100%	4 steps 36 months, 1 steps 48 months

طرح تغذیه مصنوعی: طرح تغذیه مصنوعی در دشت هشتگرد از سال (۱۳۹۱) اجرا شده و تا سال (۱۳۹۴)، ۵۰ درصد از پروژه با موفقیت به اتمام رسیده است. از اقداماتی که تاکنون در این زمینه در دستور کار قرار گرفته است می‌توان به اجرای سد انحرافی، حوضچه رسوبگیر، کانال انتقال آب و حوضچه‌های جاذب اشاره نمود. علاوه بر این، در سایر گزارش‌های منتشر شده ذکر گردیده است که سازمان متولی طرح، خواهان پیشرفت ۵۰ درصد دیگر از طرح تغذیه مصنوعی (نفوذ ۱۲ میلیون مترمکعب آب در سال) می‌باشد. با توجه به این که جزییات بیشتری از سوی مراجع مربوط به اجرای طرح منتشر نشده است، با بررسی مطالعه PoorTabari et al. (2008)، موقعیت احتمالی اجرای طرح تغذیه مصنوعی دشت هشتگرد شناسایی گردید. سپس با اعمال یک ضریب آب برگشتی از رودخانه کردان (۵۰ درصد افزایش تغذیه از سطح)، رفتار آبخوان آبرفتی دشت هشتگرد نسبت به افزایش تغذیه از سطح در موقعیت فرضی، مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر مواردی که ذکر گردید، قابل ذکر است که در مطالعه حاضر تأثیر اقدامات تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در تمامی سناریوهای ۳ تا ۹ (به طور همزمان با اعمال محدودیت بر استحصال آب زیرزمینی)، در نظر گرفته شده است. شکل ۵، محل اعمال آب برگشتی از رودخانه در اثر طرح تغذیه مصنوعی را نمایش می‌دهد.

۲-۴-۳- ردیابی آلاینده

کد عددی (MODPATH)، یک برنامه پس‌پردازش ردیابی ذرات[۳] است که در این مطالعه جهت ردیابی ذرات آلاینده در آب زیرزمینی دشت هشتگرد استفاده شده است. برنامه (MODPATH) اولین بار توسط Pollock (1994)، ارائه گردیده است. این برنامه با در نظر گرفتن حرکت جرمی آب زیرزمینی، رفتار ذرات آلاینده در آبخوان را شبیه‌سازی می‌نماید (۱۴). رابطه (۲)، معادله حاکم بر ردیابی ذرات را در سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Pollock, 1994):

$$\frac{\partial}{\partial x}(nv_x)+\frac{\partial}{\partial y}(nv_y)+\frac{\partial}{\partial z}(nv_Z)=W \qquad (۲)$$

که در آن، (v_x، v_y و v_z): سرعت متوسط خطی آب زیرزمینی در راستای محورهای x، y، z ($L.T^{-1}$)، (n): تخلخل آبخوان (-) و (W): حجم جریانی که در هر واحد حجم آبخوان وارد یا از آن خارج می‌گردد ($L.T^{-1}$).

به منظور ردیابی ذرات آلاینده در سیستم آب زیرزمینی، با استفاده از برنامه (MODPATH)، شرایط بهینه‌سازی شده در فرایند واسنجی حالت ماندگار، به همراه مقادیر تخلخل، به این برنامه معرفی گردید. سپس موقعیت نقاط بحرانی غلظت یون‌های آلاینده نیترات و سولفات مورد بررسی قرار گرفت و جهت حرکت با دو روش پس‌رو یا رو به عقب[۴] و پیشرو یا رو به جلو[۵]، ردیابی شد که به ترتیب برای منشاءیابی و سنجش پتانسیل حرکت ذرات نیترات و سولفات در سیستم آب زیرزمینی دشت هشتگرد مورد استفاده قرار گرفته است.

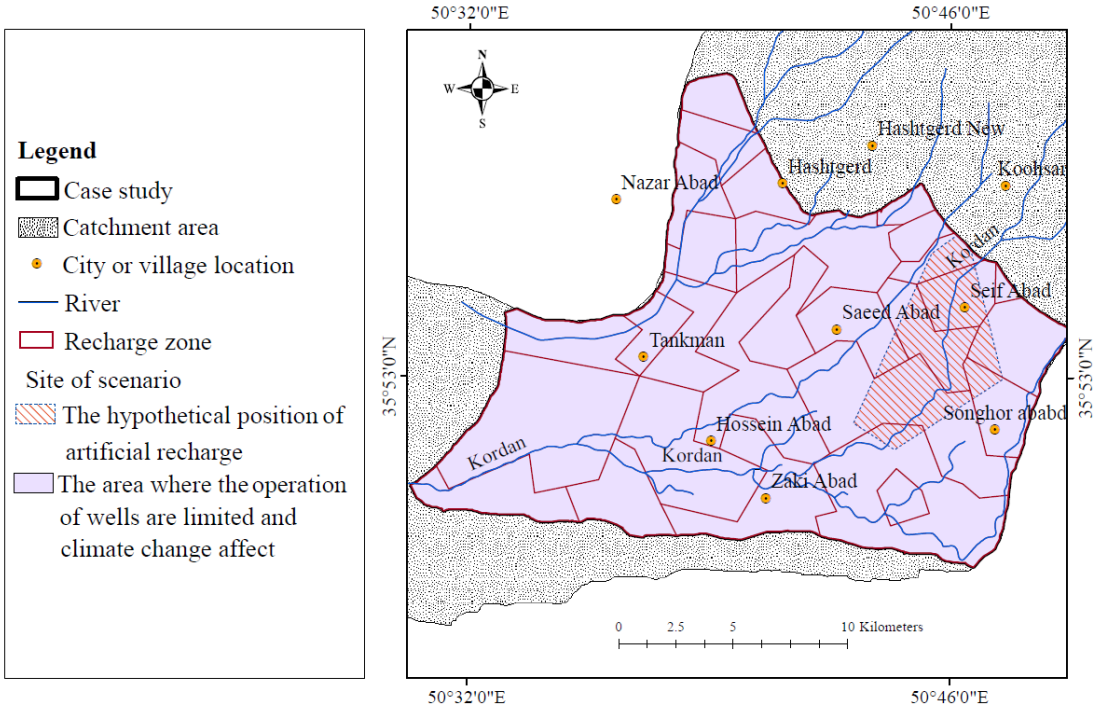


Fig. 5- Location of management measures and climate scenarios implementation

شکل ۵- محل اجرای سناریوهای مدیریتی و اقلیمی

۳- نتایج

۳-۱- شبیه‌سازی حالت ماندگار و غیرماندگار

پس از تنظیم پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح در حالت ماندگار، ضریب تبیین مقادیر تراز مشاهداتی و محاسباتی در محل چاه‌های مشاهداتی سطح آب زیرزمینی، معادل ۰/۹۹ برآورد گردید. علاوه بر این پارامترهای مجذور میانگین مربع خطاها و قدر مطلق میانگین خطاها نیز به ترتیب ۰/۱۲ متر، ۰/۰۱ متر به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب شرایط تعریف گردیده در حالت ماندگار می‌باشد.

در ادامه، با تنظیم پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح و آبدهی ویژه در حالت غیرماندگار (سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴)، کمترین مقدار خطا در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به‌دست آمد. شکل ۶، تغییرات ماهیانه تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده را نسبت به تغییرات آب برداشتی و تغذیه از سطح نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، مقدار ضریب تبیین ۰/۹۱ برآورد گردید. همچنین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطاها و قدر مطلق میانگین خطاها نیز به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۰۹ متر بدست آمده است. شکل ۷، توزیع مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، تغذیه از سطح (متر بر روز) و آبدهی ویژه را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، به‌واسطه وجود فعالیت‌های مرتبط با باغداری و تعداد قابل ملاحظه چاه‌های بهره‌برداری در ناحیه میانی دشت (سعیدآباد و نواحی نزدیک به آن)، تغذیه از سطح این ناحیه در مقدار حداکثری خود (۰/۰۰۱ متر بر روز) قرار دارد.

نتایج حاصل از صحت‌سنجی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده نیز در شکل ۶، خلاصه گردیده است. مطابق شکل ذکر شده، مجذور میانگین مربعات خطاها و قدر مطلق میانگین خطاها در گام صحت‌سنجی ۰/۱۳ و ۰/۰۱ متر برآورد شد. علاوه بر این، ضریب تبیین ۰/۹۰ محاسبه گردید که نشان می‌دهد مدل به صورت مطلوبی روندها را شبیه‌سازی نموده است.

۳-۲- سناریوها

از شرایط تعریف شده در سال پایانی شبیه‌سازی (۱۳۹۴)، جهت پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان استفاده گردیده است. شکل ۸، هیدروگراف‌های حاصل از اجرای سناریوهای ذکر شده در مطالعه حاضر را برای یک دوره ۱۶ ساله (سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۱) ارائه می‌نماید. در ادامه جزییات شکل مذکور، به همراه تغییرات بیلان آب زیرزمینی که به صورت متوسط سالیانه در جدول ۷ آورده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی رفتار آبخوان نشان داده است در صورتی که وضعیت موجود تحت سناریو ۱ ادامه پیدا کند، سطح تراز آب زیرزمینی به طور متوسط ۰/۸۹ متر در سال کاهش می‌یابد و در سال ۱۴۱۱ (سال پایانی اجرای سناریو)، در محدوده ۱۱۶۴ متر می‌رسد (شکل ۸). علاوه بر این، بیلان سالیانه آب زیرزمینی نیز نشان دادند که با ادامه وضعیت موجود، آبخوان سالیانه ۰/۹۹ میلیون مترمکعب کسری مخزن خواهد داشت (جدول ۷).

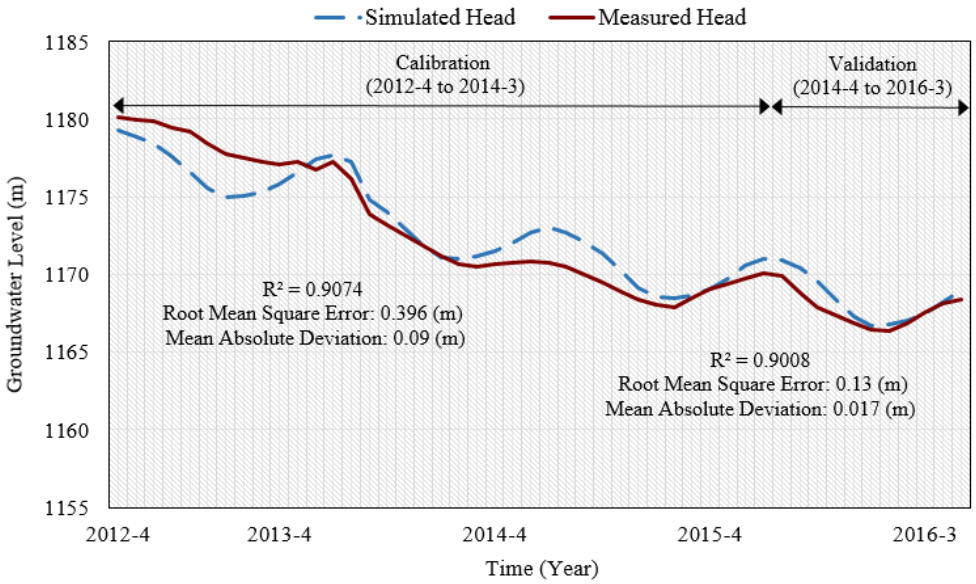


Fig. 6- Calibrated and validated aquifer hydrograph

شکل ۶- هیدروگراف آبخوان در گام واسنجی و صحت‌سنجی

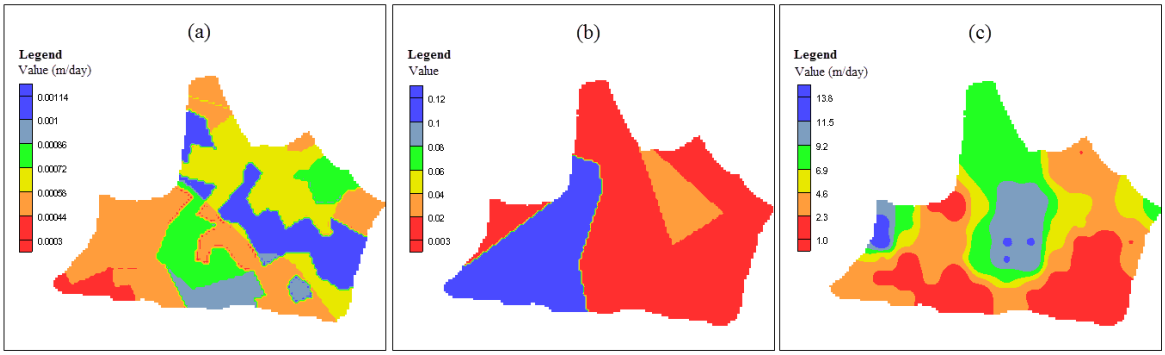


Fig. 7- Calibrated values of (a) recharge rate (m/day), (b) specific yield (-), and (c) hydraulic conductivity (m/day)

شکل ۷- مقادیر واسنجی شده: (الف) تغذیه از سطح (متر بر روز)، (ب) آبدهی ویژه و (ج) هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)

نتایج تغییرات بیلان آب زیرزمینی در سناریو ۲ نشان دادند که در صورت افزایش ۱۰ درصد بارندگی در محدوده مطالعاتی، تغذیه از سطح نسبت به وضع موجود به طور متوسط ۱/۸ میلیون مترمکعب افزایش می‌یابد که موجب می‌شود کسری مخزن به ۰/۴۱ میلیون مترمکعب در سال تغییر نماید (جدول ۷). همچنین افت کلی سطح تراز آب زیرزمینی (شکل ۸–الف) در بازه زمانی پیش‌بینی نسبت به وضع موجود ۱ متر کاهش یافته است.

در سناریوهای ۳ و ۴ که استخراج چاه‌های بهره‌برداری دچار محدودیت گردیده است، میزان استخراج چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان به ترتیب ۱۱/۸ و ۱۸/۱ میلیون مترمکعب در سال کاهش می‌یابد (جدول ۷). اجرای این طرح موجب شده است که ذخیره آبخوان به طور متوسط سالانه ۱/۱ و ۲/۳ میلیون مترمکعب افزایش یابد و هیدروگراف آبخوان در محدوده ۱۱۷۳/۱ و ۱۱۷۵/۷ متر برسد (شکل ۸–الف).

نتایج ارائه شده در سناریوهای ۵ و ۶ نشان دادند، میزان کل خروجی از آب زیرزمینی ۱۳ تا ۱۷ درصد کاهش یافته است که این تغییرات می‌تواند ذخیره آبخوان را سالانه ۳/۵ تا ۴/۸ میلیون متر مکعب بهبود دهد (جدول ۷). علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی هیدروگراف آب زیرزمینی (شکل ۸–ب) نیز نشان دادند که سطح تراز آب زیرزمینی نسبت به شروع دوره پیش‌بینی ۹ تا ۱۱/۴ متر افزایش یافته است.

در سناریو ۷ که بیشترین محدودیت بر استخراج چاه‌های بهره‌برداری ملحوظ شده است، کل میزان خروجی از آبخوان با کاهش ۳۱ درصدی همراه می‌باشد. در اثر این اقدامات، میزان آب برگشتی از کاربری‌ها نیز سالانه ۱۵/۵ میلیون متر مکعب کاهش پیدا کرده است. به طور کلی در این سناریو مخزن سالانه ۸/۷ میلیون مترمکعب بهبود می‌یابد (جدول ۷) و سطح تراز آب زیرزمینی به طور میانگین ۰/۳۰ متر در سال دچار افزایش می‌شود (شکل ۸–ب).

بررسی نتایج سناریوهای ۸ و ۹ نشان دادند، در صورتی که طرح‌های مدیریتی با گذشت زمان (دوره‌های ۳ الی ۴ ساله) محدودیت شدیدتری را بر چاه‌های بهره‌برداری اعمال نمایند، مقدار کل خروجی از آبخوان ۱۰ تا ۱۶/۳ میلیون مترمکعب در سال افت پیدا می‌کند (جدول ۷). به این ترتیب، با کاهش میزان خروجی از آبخوان ذخیره مخزن نیز سالیانه ۳/۶ تا ۴/۸ بهبود می‌یابد و سطح تراز آب زیرزمینی (شکل ۸–ج) در محدوده ۱۱۷۹/۳ و ۱۱۸۷/۴ متر می‌رسد.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، اجرای اقداماتی که در جهت کنترل حجمی استحصال از منابع آب زیرزمینی (سناریو ۳ تا ۹) طراحی گردید (جدول ۶)، به نحو مطلوبی بر روی بهبود وضعیت کمی آبخوان دشت هشتگرد (طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۱) موثر بوده است. به طوری که موجب افزایش مقدار جریان ورودی زیرزمینی نسبت شرایط موجود (سناریو ۱) شده است. علاوه بر این مقدار جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان نیز افزایش پیدا کرده است که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش سطح تراز آب زیرزمینی در این سناریوها باشد. از میان سناریوهای مدیریتی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت، به ترتیب سناریو ۷ و ۹ بیشترین تأثیر را بر بهبود ذخیره آبخوان وارد نموده است. در سناریوهای ذکر شده، سطح تراز آب زیرزمینی سالانه ۰/۱۲ الی ۰/۵۰ متر افزایش پیدا کرده است.

از مطالعاتی که یافته‌های مطالعه حاضر را در خصوص اهمیت کنترل حجمی استخراج چاه‌های غیرمجاز تایید می‌نماید، می‌توان به Ghadimi and Ketabchi (2019) اشاره کرد. در این مطالعه، ایشان تأثیر تغییر الگوی کشت و کنترل برداشت از منابع آب زیرزمینی را در

آبخوان نمدان استان فارس، طی یک دوره سی‌ساله، بررسی نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده ، تغییر الگوی کشت (با تغییر نوع محصول از گندم به محصولی با نیاز آبی کم مانند جو) باعث شده است تا سطح تراز آب زیرزمینی تا پایان دوره شبیه‌سازی، ۴/۴ متر افزایش یابد. علاوه بر این، سایر نتایج نشان دادند که از میان سناریوها طراحی شده، انسداد کامل چاه‌های غیرمجاز در کل منطقه، بیشترین تأثیر (۱۹/۶ متر افزایش) را بر بهبود سطح تراز آب زیرزمینی وارد نموده است. در مطالعه‌ای دیگر Porhemmat et al. (2019)، در سناریوهای مختلف مدیریتی ابتدا آبخوان حوضه روانسر- سنجابی کرمانشاه را به پهنه‌هایی با افت ۵-۰، ۱۰-۵، ۲۰-۱۰، ۴۵-۲۰ متر تفکیک نمودند. سپس تأثیر اجرای طرح‌های مدیریت استخراج آب زیرزمینی را در کاهش سطح تراز آب زیرزمینی بررسی کردند. نتایج حاصل از اجرای سناریوها نشان دادند که در حالت کاهش ۱۰ درصدی بهره‌برداری از پهنه یک و کاهش ۲۰ درصدی از سایر پهنه‌ها، بهترین نتیجه را از نظر بازیافت افت (۵/۶۳ متر) در مقابل نرخ کاهش پمپاژ داشته است. در سناریو برگزیده، میزان برداشت از آبخوان سالانه ۱۵/۶ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. به طور کلی می‌توان جمع‌بندی نمود که در مطالعه حاضر، همانند مطالعاتی که به اختصار بیان شد به ارزیابی تأثیر اجرای طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور پرداخته شده است، با این تفاوت که علاوه بر محدودیت چاه‌های غیرمجاز، کنترل حجمی استحصال چاه‌های مجاز نیز (در راستای احیاء و تعادل‌بخشی) بررسی گردیده است.

پس از اینکه در مطالعه حاضر نتایج اعمال طرح‌های تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی ارائه شد، اکنون در این قسمت به یافته‌های حاصل از مسیریابی ذرات آلاینده (سناریو ۱۰) پرداخته شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰). نتایج به‌دست آمده از منشأیابی (حرکت پس‌رو) ذرات آلاینده در حالت ماندگار (با استفاده از برنامه MODPATH) نشان دادند که به ترتیب نواحی واقع در محدوده‌های شهری و کشاورزی منشأ آلاینده نیترات و سولفات با غلظت بیشینه می‌باشند (موقعیت منشأ نیترات و سولفات محاسبه شده با برنامه مذکور، در شکل ۹ مشخص گردیده است). علاوه بر این، با استفاده از نتایج ذکر شده، نسبت‌های یونی مؤثر در افزایش غلظت سولفات نیز جهت ارائه نکات تکمیلی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۸). بررسی نسبت‌های یونی ($Ca/(Ca + SO_4)$) حاکی از این است که در نواحی واقع در محدوده حسین‌آباد، سنقرآباد و زکی‌آباد، انحلال گچ از عوامل مؤثر بر روی افزایش غلظت سولفات می‌باشد که نتایج حاصل از بررسی نقشه سازندهای زمین‌شناسی نیز مطالب ذکر شده را تأیید می‌نماید.

در ادامه مطالعه حاضر، با استفاده از موقعیت احتمالی منشأیابی آلاینده (نیترات و سولفات) که در گام پیشین محاسبه گردیده است، مسیریابی پیش‌رو ذرات آلاینده در حالت ماندگار و سناریوهای منتخب (سناریوهای ۷ و ۹) مورد بررسی قرار گرفته است.

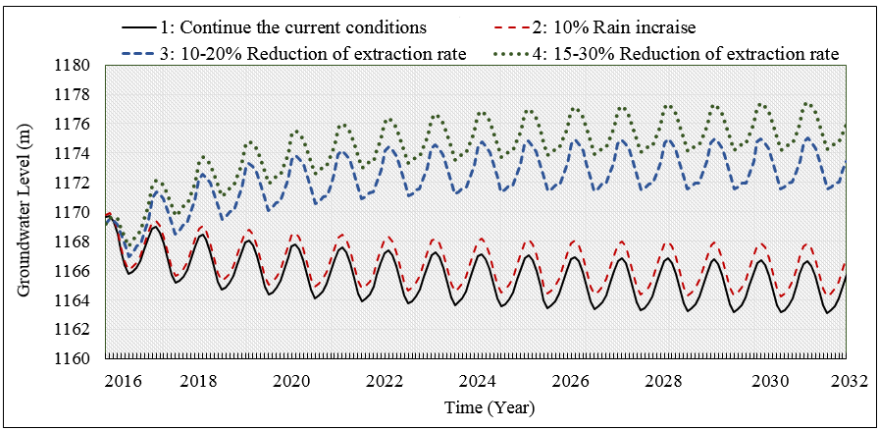
Table 7- Characteristics balance in the study area under management measures and climate change (Million cubic meters per year) scenarios

جدول ۷- مشخصات بیلان آب زیرزمینی تحت اقدامات مدیریتی (طرح احیاء و تعادل‌بخشی) و تغییرات اقلیمی (میلیون مترمکعب بر سال)

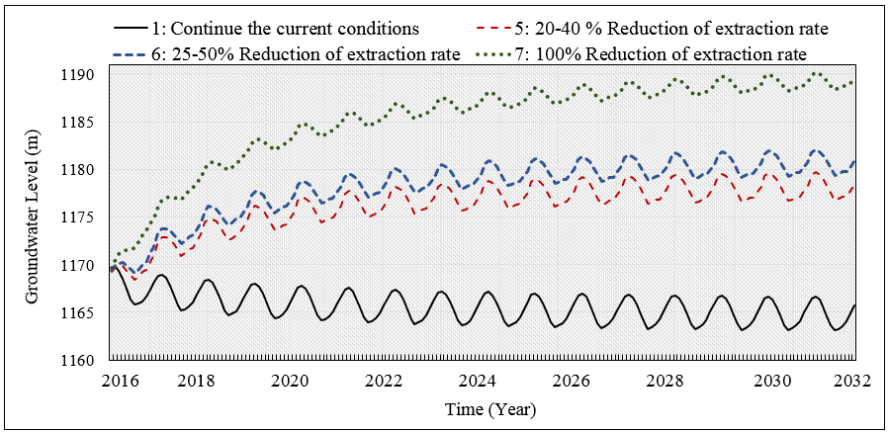
Scenario items	Recharge			Discharge			Storage change	level changes (m)
	Groundwater inflow from boundaries	Recharge rate*	Total inflow	Groundwater outflow from boundaries	Discharge from wells	Total outflow		
1	1.8	80.5	82.3	8	75.3	83.3	-0.99	-0.89
2	1.5	82.3	83.8	8.9	75.3	84.2	-0.41	-0.85
3	1.2	79.1	80.4	15.8	63.4	79.2	1.1	-0.99
4	1.1	76.8	78	18.5	57.1	75.6	2.3	-0.75
5	1.1	74.5	75.7	21	51	72.1	3.5	-0.53
6	1.1	72.2	73.3	23.8	44.6	68.5	4.8	-0.30
7	1	64.9	66	33.3	23.8	57.2	8.7	+0.50
8	1.2	75.7	76.9	19.2	54	73.2	3.6	-0.49
9	1.1	72.6	73	23	43.2	67	6.8	+0.12

*Infiltration from precipitation and return flow of operation wells

(A)



(B)



(C)

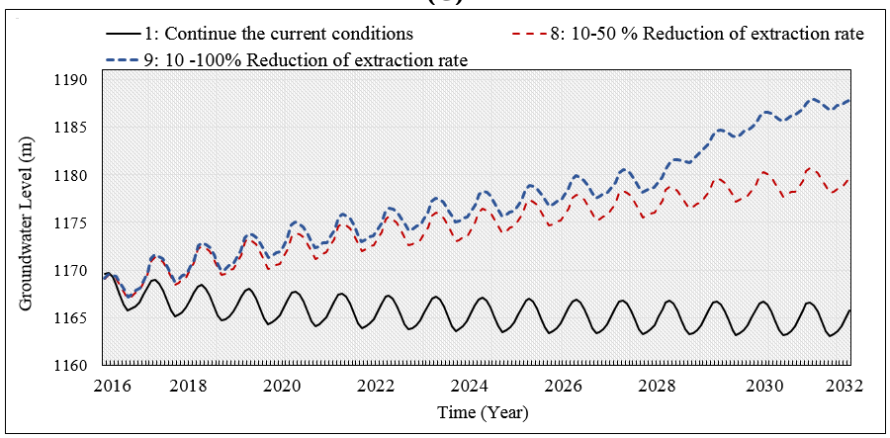


Fig. 8- Comparison of the aquifer hydrograph under the management measures and climate change scenarios under current condition: A) scenarios 2 to 4, B) scenarios 5 to 7, C) scenarios 8 and 9

شکل ۸- مقایسه هیدروگراف آبخوان تحت اقدامات مدیریتی و تغییرات اقلیمی تحت شرایط وضع موجود: الف) سناریوهای ۲ تا۴، ب) سناریوهای ۵ تا ۷، ج) سناریوهای ۸ و ۹

Table 8- Examination of Ionic Ratio of the aquifer of Hashtgerd plain using Average values of four years (2012-2016)

جدول ۸- بررسی نسبت‌های یونی آبخوان دشت هشتگرد با استفاده از میانگین مقادیر چهار ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۱)

Case Study	Ca/(Ca + SO_4)	pH	Description
Anbartappe	0.29	8.1	Ion exchange or Calcite precipitation
Tankman	0.18	8.7	Ion exchange or Calcite precipitation
Kordan	0.27	8.1	Ion exchange or Calcite precipitation
Hossein abad	0.47	8.0	Gypsum dissolution
Saeed Abad	0.28	8.0	Ion exchange or Calcite precipitation
Songher Abad	0.47	8.1	Gypsum dissolution
Zakei abad	0.46	8.2	Gypsum dissolution

نتایج حاصل از مسیریابی پیش‌رو نیترات در حالت ماندگار جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهند که تعدادی از چاه‌های آب شرب واقع در محدوده‌های تنکمان، زکی‌آباد و سیف‌آباد در مسیر نیترات با غلظت ۱ تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و چاه‌های آب شرب واقع در محدوده هشتگرد در مسیر حرکت نیترات با غلظتی معادل ۳۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد (شکل ۹، الف). یافته‌های مسیریابی پیش‌رو نیترات در سناریو ۷ (شکل ۱۰، الف) حاکی از این می‌باشد که تحت اجرای این اقدامات چاه‌های آب شرب واقع در محدوده‌های تنکمان، حسین‌آباد، سعیدآباد، سیف‌آباد و هشتگرد در مسیر حرکت نیترات با غلظت ۱ تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار می‌گیرند. علاوه بر موارد ذکر شده قابل ذکر است که نتایج مسیریابی پیش‌رو نیترات در سناریو ۹ (شکل ۱۰، ب)، معادل سناریو ۷ می‌باشد، با این تفاوت که شامل محدوده حسین‌آباد نمی‌گردد.

یافته‌های ارائه شده از مسیریابی پیش‌رو سولفات در حالت ماندگار جریان آب زیرزمینی (شکل ۹، ب)، نشان می‌دهند که در این شرایط، چاه‌های آب شرب واقع در محدوده‌های تنکمان، سعیدآباد، سیف‌آباد در مسیر سولفات با غلظت ۶۰۰ تا ۷۸۰ میلی‌گرم بر لیتر و چاه‌های آب شرب واقع در محدوده حسین آباد در مسیر سولفات با غلظت ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد. سایر نتایج حاصل از مسیریابی پیش‌رو ذرات سولفات که مربوط به سناریوهای ۷ و ۹ می‌باشند (شکل ۱۰، ج و د)، نشان می‌دهند که در صورت اجرای این اقدامات، چاه‌های آب شرب واقع در سعیدآباد و سیف‌آباد بـــه ترتیب در مسیر حرکت سولفات با غلظتی معادل ۶۰۰ تا ۷۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار خواهد گرفت.

به طور کلی با توجه به مطالبی که در قسمت‌های پیشین ارائه گردید می‌توان ذکر کرد که اجرای اقدامات مرتبط با طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر روی پیشروی یا تغییر جهت حرکت آلاینده داشته باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، لازم است که هنگام اجرای طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، وضعیت کیفیت منابع آب زیرزمینی نیز مورد توجه ویژه قرار گیرد.

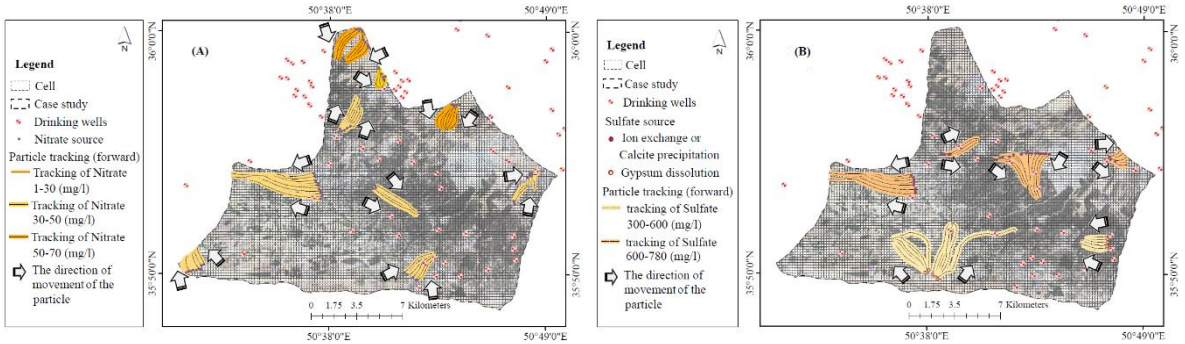


Fig. 9- Pollutant particle tracking in steady state groundwater system of Hashtgerd plain: A) Nitrate, B) Sulfate

شکل ۹- ردیابی ذرات آلاینده در حالت ماندگار سیستم آب زیرزمینی دشت هشتگرد: الف) نیترات ب) سولفات

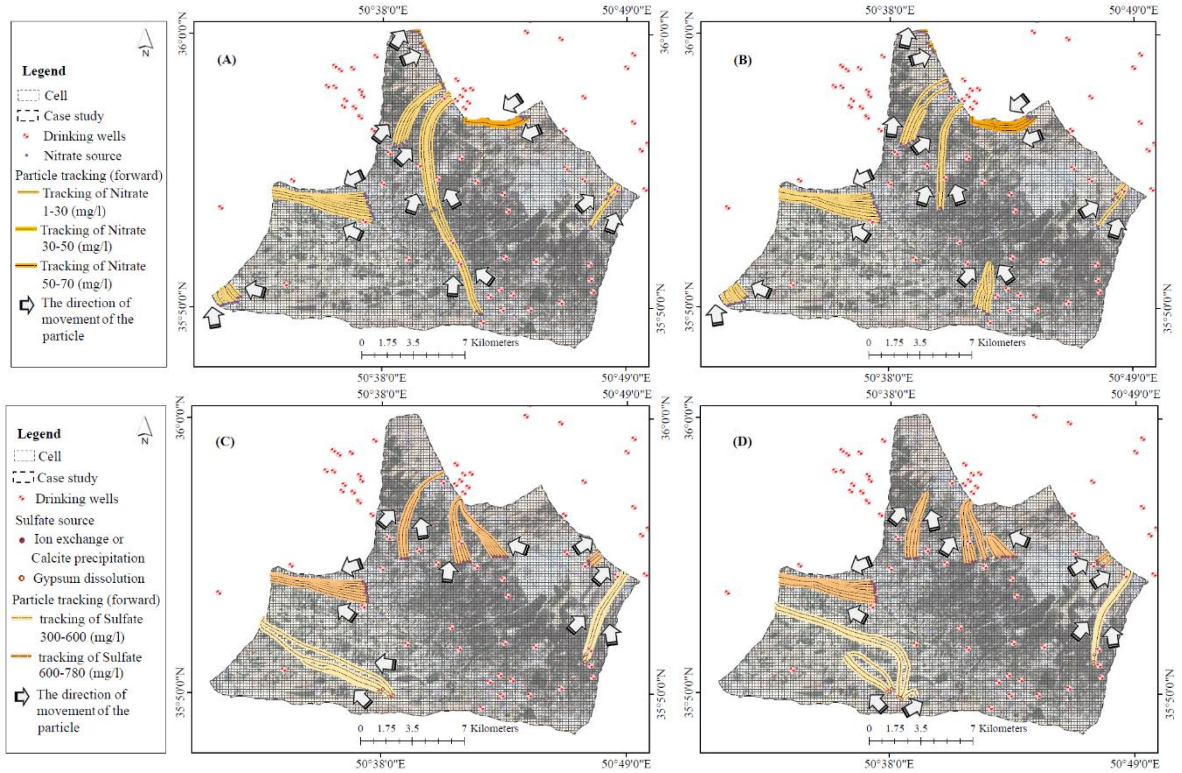


Fig. 10- A) Nitrate particle tracking in scenario 7, B) Nitrate particle tracking in scenario 9, C) Sulfate particle tracking in scenario 7, D) Sulfate particle tracking in scenario 9

شکل ۱۰- الف) ردیابی ذرات نیترات تحت سناریو ۷، ب) ردیابی ذرات نیترات تحت سناریو ۹، ج) ردیابی ذرات سولفات تحت سناریو ۷، د) ردیابی ذرات سولفات تحت سناریو ۹

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مطالعه حاضر که با هدف ارزیابی تأثیر اجرای طرح‌های تعادل‌بخشی و احیاء منابع آب زیرزمینی دشت هشتگرد ارائه شده است، ابتدا، وضعیت آبخوان در حالت ماندگار و غیرماندگار (سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴)، با استفاده از مدل عددی MODFLOW (روش تفاضل محدود) شبیه‌سازی شد. سپس، با عنایت به نتایج مطلوب مدل عددی که در گام واسنجی و صحت‌سنجی بدست آمد، شرایط تعریف شده در حالت غیرماندگار جریان آب زیرزمینی، جهت پیش‌بینی رفتار آبخوان نسبت به تغییر و تحولات آتی مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه با استفاده از برنامه MODPATH، تأثیر اقدامات مدیریتی (طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی) بر وضعیت تحرک ذرات آلاینده (نیترات و سولفات) بررسی شد. نتایج حاصل از ارزیابی تأثیر سناریوهای مدیریتی نشان دادند که از میان طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، اجرای همزمان طرح تغذیه مصنوعی و ممنوعیت کامل چاه‌های بهره‌برداری غیر مجاز (سناریو ۷)، بیشترین تأثیر مطلوب را بر وضعیت کمی آبخوان داشته است. در این سناریو، ذخیره آبخوان سالانه ۸/۸ میلیون مترمکعب بهبود می‌یابد و سطح تراز آب زیرزمینی به طور متوسط سالانه ۰/۵۰ متر افزایش پیدا می‌کند. پس از محدودیت کامل استخراج چاه‌های غیرمجاز، طرحی که با یک نوع محدودیت تدریجی در استخراج چاه‌های غیرمجاز و مجاز (سناریو ۹) همراه می‌باشد، توانسته است نتایج مطلوبی را در بهبود وضعیت کمی آبخوان حاصل نماید. در اثر اجرای طرح ذکر شده، ذخیره آبخوان سالانه ۶/۸ میلیون متر مکعب بیشتر می‌شود و سطح تراز آب زیرزمینی نیز به طور متوسط ۰/۱۲ متر در سال افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، با وجود این که محدودیت کامل استخراج چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز، بهترین نتیجه ممکن را در راستای اهداف طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی داشته است، اما ممکن است، محدودیت تدریجی استخراج چاه‌های بهره‌برداری از مقبولیت و قابلیت اجرای بیشتری برخوردار باشد. زیرا تعداد قابل ملاحظه‌ای از چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده مطالعاتی هشتگرد (۴۱ درصد)، فاقد پروانه بهره‌برداری هستند. علاوه بر موارد ذکر شده، نتایج مسیریابی پیش‌رو آلاینده (نیترات و سولفات) در حالت ماندگار جریان آب زیرزمینی، سناریو ۷ و ۹ نشان دادند که اجرای طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی می‌تواند با تغییر جهت جریان آب زیرزمینی، تأثیر قابل توجهی بر روی جهت پیشروی آلاینده بگذارد. به

نحوی که تحت اجرای سناریوهای ذکر شده، چاه‌های آب شرب کمتری تحت تأثیر آلاینده (نیترات و سولفات) قرار خواهند گرفت. از دیگر مواردی که قابل ذکر است می‌توان به محدود شدن (تحت اجرای سناریوهای ۷ و ۹) حرکت نیترات با غلظت ۳۰ تا ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر در محدوده شهر هشتگرد اشاره نمود. در ادامه با توجه به نتایجی که حاصل شد، پیشنهاد می‌شود محققان و سازمان‌های متولی منابع آب توجه بیشتری در راستای تدقیق بیشتر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دشت هشتگرد و تمرکز مطالعاتی در این راستا جهت استفاده از روش‌ها و فناوری‌های مرسوم و یا نوین، استفاده از مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، جهت برآورد ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی نظیر طرح‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی (پیش از اجرا) و یا پایش منظم و بلندمدت کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت بررسی سرنوشت و انتقال آلاینده‌ها در دشت هشتگرد (با استفاده از مدل‌هایی نظیر MT3D- MT3DMS) داشته باشند.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان البرز و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به جهت در اختیار قرار دادن بخشی از آمار و اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه، کمال تشکر و امتنان را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Finite Difference Method
2- PEST
3- Particle Tracking Post-Processing Program
4- Backward
5- Forward

۶- مراجع

Abdelhalim A, Sefelnasr A, and Ismail E (2019) Numerical modeling technique for groundwater management in Samalut city, Minia Governorate, Egypt. Arabian Journal of Geosciences 12(124):1-18

Ahmadi A, Alimohammadi S, and Mousavi-Nadoushani S-S (2017) Inverse solution of groundwater models - indirect approach. Iran-Water Resources Research 13(2):82-98 (In Persian)

Aquifer Restoration Plan (2014) Ministry of Energy. Water Assistance (In Persian)

Arumi JL (2000) Modeling the effect of agricultural management practice on groundwater quality and quantity. Thesis for Ph.D, Agricultural and Biological Systems Engineering. University of Nebraska, United States America

Ataie-Ashtiani B and Ketabchi H (2014) Groundwater hydraulics and contamination. Sharif University of Technology Publication, Tehran (In Persian)

Bastani M and Harter T (2019) Source area management practices as remediation tool to address groundwater nitrate pollution in drinking supply wells. Journal of Contaminant Hydrology 226:103521

Chapman D (1996) Water quality assessments- A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. United Nations Educational, Scientific and Cultural, Scientific and Cultural Organization, United State America

Chen S, Yang W, Huo G, and Huang Z (2016) Groundwater simulation for efficient water resources management in Zhangye Oasis, Northwest China. Environmental Earth Science 75(647):1-13

Climatological Research Institute of Mashhad-IPCC (2017) Detection, assessing the impacts and prospects of climate change in Iran during the 21st century .Iran Meteorological Organization, Ministry of Roads and Urban Development (In Persian)

Drinking Water-Physical and Chemical Specifications (2009) 5th ed. Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran (In Persian)

Einlo F, Moafi Rabori A, Malekian A, Ghazavi R, and Mohseni M (2016) Investigating the groundwater quality of Zanjan Plain based on Drinking Standard with geostatistics Methods. Geography and Environmental Planning 27(62):1-16 (In Persian)

Eshmatami M, Aghasi A V, and Roya Rezaie A (2002) Investigation of Hashtgerd Plain groundwater changes in the past ten years and Its causes. Journal of Environmental Science and Technology 4(13):61-74 (In Persian)

Ghadimi S and Ketabchi H (2019) Impact assessment of different management strategies implementation on the aquifer using numerical simulation (Case study: Namdan aquifer, Fars province, Iran). Journal of Water and Soil Conservation 25(6):1-23 (In Persian)

Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the US geological survey modular ground-water model: the ground-water flow process. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, United State America

Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2015) Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. Environmental Modelling and Software 74:21-38

Poor-Tabari M, Morsali M, and Noori H (2008) Site selection of artificial recharge aquifer projects using geographic information system, case study; Hashtgerd Plain. 4th National Congress on Civil Engineering, Tehran (In Persian)

Porhemmat J, Altafi-Dadgar M, and Porhemmat R (2019) Simulating the rehabilitation of an over-extracted aquifer by different management scenarios in the Ravansar-Sanjajabi catchment in Kermanshah. Iran-Water Resources Research 14(5):149-163 (In Persian)

Regional Water Company of Tehran (2011) Geology, semi-detailed studies of Hashtgerd Plain. Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy (In Persian)

Regional Water Company of Tehran (2013) Updating water resources studies report of Namak Lake basin. Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy (In Persian)

Safari F, Shahbazi A, and Ketabchi H (2020) Quality analysis and nitrate map of groundwater resources in Alborz province (Hashtgerd Plain). Journal of Water and Soil Conservation, Accepted (In Persian)

Samani N and Kamrani S (2015) Quantitative and qualitative survey of drinking water wells to Nitrate, case study: Aspas Plain of Eqlid city, Fars province. Advanced Applied Geology, Shahid Chamran University of Ahvaz 6(20):29-40 (In Persian)

Tam V-T and Nga V-T-T (2018) Assessment of urbanization impact on groundwater resources in Hanoi, Vietnam. Journal of Environmental Management 27:107-116

Yousefi H, Mohammadi M, Noorollahi Y, and Saadatinejad S-J (2018) Water footprint evaluation of Tehran's crops and garden crops. Journal of Water and Soil Conservation 24(6):67-85 (In Persian)

Ketabchi H and Saghi-Jadid M (2019) Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation-evolutionary ant colony optimization. Iran-Water Resources Research 15(2):119-133 (In Persian)

Nikbakht J and Moradi I (2019) Effect of drought on Hashtgerd plain groundwater quantity and quality considering irrigation use. Iran-Water Resources Research 14(4):120-131 (In Persian)

Nikbakht-Shahbazi A (2011) Drought, past trends, forecasting, speech collection, Deputy of Planning and Strategic supervision of the President. Regional Planning and Development Office (In Persian)

Nouri-Esfandiari A (2015) Discussion on the restoration plan (ten effective notification topics). Iranian Water Policy Research Institute-Kerman Chamber of Commerce Industries Mines and Agriculture, Tehran (In Persian)

Parvar Z and Shayesteh K (2017) Prediction of changes and urban development using satellite image and geographic information systems (Case study: Bojnourd). Journal of Environmental Studies 43(3):513-527 (In Persian)

Pollock D-W (1994) User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model. Open-File Report 94-464. U.S. Geological Survey, Virginia, United State America

Poor-Asghar F (2015) Quantity and quality limitations of water resources, the most important challenge facing with sustainable development in the 6th development plan. Management and Planning Organization, Tehran (In Persian)