Vol 14, No. 2, Summer 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Numerical simulation of Taybad plain aquifer using MODFLOW and prediction of management scenarios

Behzad Azadegan[1]✉ | Hannan Hanafi[2] | Maryam Varavipour[3] | Hamid Kardan Moghaddam[4]

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail:bazad@ut.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hannan.hanafi77@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: mvaravi@ut.ac.ir
4. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: hkardan@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 December 2023
Received in revised form
10 February 2024
Accepted 16 April 2024
Published online 5 September 2024

Keywords:
Calibration
Drop water level
Groundwater modeling
MODFLOW

ABSTRACT

The aim of the research is quantitative modeling of the underground water flow of the plain aquifer and the investigation of management solutions to deal with the drop in the underground water level. This research was investigated using hydrogeological information, hydrology, meteorology and basic studies of underground water sources. Quantitative underground water modeling was done using GMS software and Modflow code and the underground water level was simulated for the years 2011-2015 with 60 monthly time steps. Manual calibration of the model was done for 2011-2014 and its validation was done for 2014-2015. Future management solutions, in the form of combined scenarios:One- 10% reduction in withdrawal from wells with a 5% reduction in feeding from return of agricultural water. Two- 20% reduction in withdrawal from wells with a 10% reduction in feeding from return of agricultural water. Three- Their comparison with the continuation of the existing trend was predicted for the years 2015-2019. The result of the aquifer modeling for the above time periods showed the deficit of the reservoir 33.09 MCM. But by applying a 10% reduction in withdrawal and a 5% reduction in feeding, 21.38 MCM/year and by applying a 20% reduction in recharging from the return flows of agricultural consumption and 10% reduction in feeding, 25.94 MCM/year were added to the volume of the water balance. But with the continuation of the current trend, the deficit volume of the aquifer was estimated to be more than 54 MCM.

Cite this article: Azadegan, B., Hanafi, H., Varavipour, M., & Kardan Moghaddam, H. (2024). Numerical simulation of Taybad plain aquifer using MODFLOW and prediction of management scenarios. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 343-355. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.369806.1129

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.369806.1129

دوره چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت تایباد با استفاده از MODFLOW و پیش‌بینی سناریوهای مدیریتی

بهزاد آزادگان[۱]✉ | حنان حنفی[۲] | مریم وراوی‌پور[۳] | حمید کاردان مقدم[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hannan.hanafi77@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mvaravi@ut.ac.ir

۴. مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: hkardan@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

افت سطح آب

مادفلو

مدل‌سازی آب زیرزمینی

واسنجی

چکیده

هدف پژوهش، مدل‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت و بررسی راه‌کارهای مدیریتی مقابله با افت تراز آب زیرزمینی، است. این پژوهش با استفاده از اطلاعات هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژی، هواشناسی و مطالعات پایه منابع آب زیرزمینی، بررسی شد. مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی، با استفاده از نرم‌افزار GMS و کد کامپیوتری MODFLOW انجام و سطح آب زیرزمینی، برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۹ با ۶۰ گام زمانی ماهانه، شبیه‌سازی گردید. واسنجی دستی مدل برای سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و صحت‌سنجی آن برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۲ انجام شد. راه‌کارهای مدیریتی آتی، در قالب سه سناریو ۱- کاهش ۱۰ درصد برداشت از چاه‌ها با کاهش ۵ درصد تغذیه از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی، ۲- کاهش ۲۰ درصد برداشت از چاه‌ها با کاهش ۱۰ درصد تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی، ۳- مقایسه دو سناریوی فوق، با وضعیت موجود سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۴، پیش‌بینی گردید. نتیجه مدل‌سازی آبخوان برای دوره زمانی فوق، کسری مخزن ۳۳/۰۹- میلیون مترمکعب را نشان داد. ولی با اعمال ۱۰ درصد کاهش برداشت و کاهش ۵ درصد تغذیه، ۲۱/۳۸ میلیون مترمکعب در سال و با اعمال ۲۰ درصد کاهش برداشت و ۱۰ درصد کاهش تغذیه، ۲۵/۹۴ میلیون مترمکعب در سال، بر حجم بیلان آب، افزوده شد. با ادامه روند موجود، حجم کسری آبخوان، بیش از ۵۴ میلیون مترمکعب، برآورد گردید.

استناد: آزادگان، بهزاد؛ حنفی، حنان؛ وراوی‌پور، مریم و کاردان مقدم، حمید (۱۴۰۳). شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت تایباد با استفاده از MODFLOW و پیش‌بینی سناریوهای مدیریتی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۲)، ۳۵۵-۳۴۳. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.369806.1129

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

در سال‌های اخیز که با رشد جمعیت و تنش‌های اقلیمی همراه بوده، بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی از منابع آب، باعث افت شدید منابع آب زیرزمینی، گردیده است. این موضوع سبب شد از سال ۱۳۸۴ با کسری بیش از ۱۰۰ میلیارد مترمکعب آب در کشور، طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در قالب ۱۵ پروژه تعریف گردد (Ministry of Energy, 2014). در پژوهشی، روند نوسانات سطح ایستابی آبخوان دشت تویسرکان همدان با کد MODFLOW بررسی و اقدام به تعریف دو سناریو گردید، در سناریوی اول، ادامه روند کنونی برداشت آب زیرزمینی و در سناریوی دوم، افزایش راندمان آبیاری به میزان ۲۰ درصد در نتیجه کاهش برداشت‌ها بود. نتایج نشان‌دهنده، کاهش سطح ایستابی در پیزومترهای دشت، بوده است (Taheri Tizro and Kamali, 2017). راه‌کارهای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به این مفهوم است که حجم تخلیه آبخوان به‌گونه‌ای کاهش یابد تا بتواند روند کاهش تراز آب زیرزمینی را به حداقل برساند و بهبود وضعیت کمی آبخوان، را ایجاد کند (Ketabchi and Ataie-ashtiani, 2015a). استفاده از شبیه‌سازی مدل آب زیرزمینی در واقع، فرم ساده‌شده‌ای از یک سیستم واقعی آبخوان، است که به‌طور تقریبی همبستگی بین عمل و عکس‌العمل هیدرودینامیکی را در یک سیستم ارائه می‌دهد (Wang and Yang, 2015). در پژوهشی، شبیه‌سازی آبخوان دشت لور اندیمشک، با استفاده از کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS و ارزیابی پروژه پخش سیلاب جارمه، برای مدیریت آبخوان بررسی گردید. نتایج مدل آب‌های زیرزمینی، نشان داد تغذیه مصنوعی علاوه بر افزایش تراز سطح ایستابی، توانسته بیلان منفی را کاهش داده و باعث بهبود ترازآب زیرزمینی آبخوان، شود (Nozarpour *et al*., 2014). در پژوهشی، از مدل عددی به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان دشت روداب سبزوار بررسی شد. نتایج مدل نشان داد اختلاف اندک بیلان آب زیرزمینی آبخوان، در قبل و بعد از احداث سد، به‌علت تأثیرپذیری کم در اثر تغذیه سطحی، تقریباً مشابه است (Parsasadr *et al*., 2016). در پژوهشی اثر تعادل بخشی، با استفاده از ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت، اثر سناریوهای کاهش برداشت، تغذیه مصنوعی و بهینه‌سازی الگوی کشت، با استفاده از مدل MODFLOW، ارزیابی گردید (Kardan Moghaddam *et al*., 2021). در پژوهشی وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت میناب، با استفاده از دو مدل MODFLOW و MT3DMs بررسی شد (Eskandari Damaneh *et al*., 2022). نتایج نشان داد، به‌علت حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در حالت پایه، بیش‌ترین افت آبخوان منطقهٔ به‌ترتیب برابر با قدر مطلق مقادیر ۳/۱۶، ۱۲/۸۷، ۲۳/۸۹ و ۳۰/۳۰ متر بوده و بیش‌ترین میزان افزایش افت آب زیرزمینی، با گذشت زمان تحت سناریوهای پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش بهره‌برداری، به‌ترتیب برابر با قدر مطلق مقادیر ۵۹/۵، ۶۱/۳ و ۶۳/۲ متر و کاهش حجم آبخوان، تحت تأثیر این سناریوها به‌ترتیب ۱۵۳/۵۵، ۱۶۰/۸۶ و ۱۶۸/۱۷ میلیون مترمکعب، نسبت به شرایط پایهٔ می‌باشد. ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر نوسانات آب زیرزمینی دشت هشتگرد، براساس سناریوهای RCP انجام شد نتایج پژوهش‌ها، حاکی از برتری خوب مدل‌های آب زیرزمینی در شبیه‌سازی جریان، می‌باشد (Goodarzi and Mortazavizadeh, 2020). هدف این پژوهش مدل‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت تایباد و بررسی راه‌کارهای مدیریتی برای مقابله با افت تراز آب زیرزمینی می‌باشد. مدل‌سازی و محاسبات عددی تراز آب زیرزمینی با تعریف مدل مفهومی، برای سال‌های ۱۳۸۹–۱۳۹۴ انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

منطقه مطالعاتی تایباد با وسعت ۳۰۰۸/۵۸ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط ۱۰۳۱ متر از سطح دریا، در جنوب‌شرقی حوضه

آبریز قره‌قوم، واقع شده است. محدوده تایباد به لحاظ تقسیمات سیاسی در جنوب‌شرقی استان خراسان رضوی است و بخشی از شهرستان‌های تربت جام و تایباد را شامل می‌شود. آبخوان تایباد با وسعت ۸۷۲/۷۸ کیلومترمربع و تخلیه سالانه ۱۳۰میلیون مترمکعب در قسمت میانی- جنوب‌شرقی دشت، قرار گرفته است. به لحاظ جغرافیایی در محدوده ۶۰ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. موقعیت آبخوان دشت تایباد به‌همراه پستی و بلندی‌های آن در شکل (۱) نشان داده شده است. شیب عمومی دشت از غرب به شرق بوده و با توجه به مطالعات انجام‌شده، آبخوان تایباد از نوع آبخوان آزاد است. با توجه به آمار ۳۰ ساله منتهی به سال ۱۳۹۵، دشت تایباد دارای دمای میانگین ۱۵/۸ سانتی‌گراد و متوسط بارش ۱۵۴/۳ میلی‌متر است.

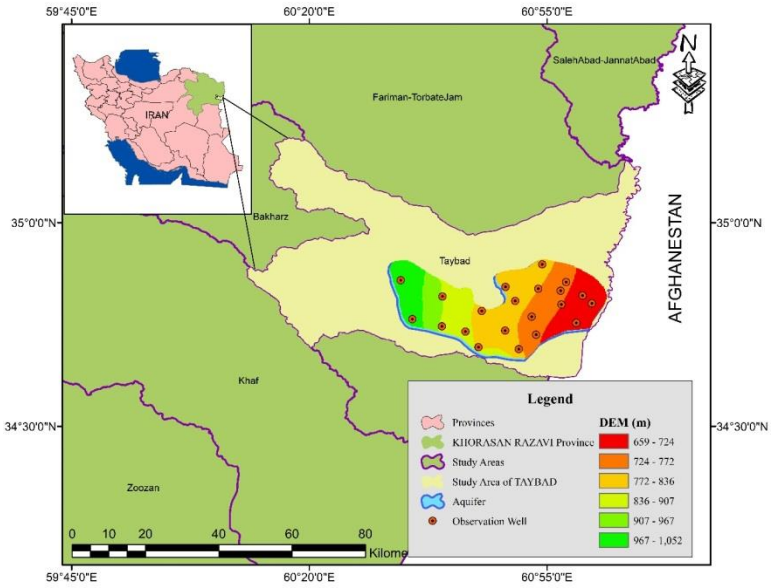

Figure 1. Map of the location of the Taibad study area and its aquifer in Razavi Khorasan province and Iran

Table 1. Characteristics of the cultivation pattern of the study area of Taybad Plain

Group	Crop name	Area (ha)	Water consumption (m^3/ha)		
			Traditional irrigation	New irrigation	New irrigation efficiency (percent)
Agricultural	Wheat	7020	6250	5400	85
	Atmosphere	5800	5300	4500	85
	Canola	235	5800	5200	80
	Cotton	1595	11000	9500	90
	Beans	150	11400	10200	80
	Watermelon	1850	9400	7400	90
	Melon	5600	8400	7100	90
	Alfalfa	75	14200	12000	80
	Fodder corn	1740	10300	8300	90
	Cumin	2230	6300	5100	80
	Herbs	23	3400	2800	75
	Saffron	6850	3900	3100	85
Garden	Apple	16	8500	7800	70
	Price	75	9100	7800	70
Nucleated	Plum Apricot Cherry Cherry Green plum Peach Nectar	170	12000	7000	70
	Grape	170	11000	6700	70
	Pistachio	5300	7400	5800	75
	Almonds	140	5000	4000	70
	Damask rose	375	6000	5100	80
	Jujube	14	9500	8300	85

۲. ۲. نیاز آبی محصولات و الگوی کشت منطقه

باتوجه به این‌که عمده فعالیت مردمان ساکن در منطقه، کشاورزی بوده و منبع اصلی در آمد مردم منطقه را کشت گیاهان زراعی آبی و دامپروری، تشکیل می‌دهد، برای تعیین میزان آب مصرفی بخش کشاورزی منطقه باید نیاز آبی و آبیاری محصولات مختلف محاسبه شود. برای تعیین نیاز آبی و نیاز آبیاری محصولات زراعی در منطقه لازم است سطح زیر کشت محصولات زراعی مختلف در منطقه مشخص باشد. برای تعیین سطح زیر کشت هر یک از محصولات زراعی–آبی و نیاز آبی آن‌ها، آمار و اطلاعات مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان تایباد و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، جمع‌آوری شد که خلاصه آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

۲. ۳. هیدروژئولوژی منطقه موردمطالعه

سفره آب زیرزمینی یا آبخوان به لایه یا منطقه قابل نفوذی در عمق خاک اطلاق می‌گردد که آب در آن می‌تواند جریان یابد. آبخوان هم‌چنین باید توانایی آبدهی خوبی دارا باشد. به‌طور کلی شکل سطح ایستابی غالبا از شکل سطح زمین، تبعیت می‌کند. پمپاژ از چاه‌های حفرشده درون آبخوان، نفوذ بارش و آب برگشتی کشاورزی مهم‌ترین عوامل تغییرات ارتفاع سطح ایستابی، هستند، این تغییرات را بر حسب زمان به‌صورت نمودارهایی به نام هیدروگراف نشان می‌دهند. عمق سطح آب زیرزمینی را حدفاصل توپوگرافی زمین و سطح ایستابی آب زیرزمینی، بخش غیراشباع می‌گویند. عمق سطح آب از مؤلفه‌های مهم در مطالعات آب زمین‌شناسی است که این عمق با تغییرات تراز آب زیرزمینی دائماً تغییر می‌کند. عمق سطح آب در بخش غربی و جنوب‌غربی بیش‌تر است و با حرکت به سمت شرق دشت تایباد از عمق آب زیرزمینی کاسته می‌شود. بیش‌ترین مقدار عمق سطح آب در غرب که ورودی و قسمت مرتفع دشت به لحاظ توپوگرافی می‌باشد، ۱۸۰ متر است و کم‌ترین عمق برخورد به آب زیرزمینی در نزدیک مرز قسمت شرقی، ۲۰ متر است. منحنی‌های تراز آب زیرزمینی به این‌گونه است که آب از تراز بیش‌تر به سمت تراز کم‌تر می‌رود، جهت جریان آب‌های زیرزمینی را مشخص می‌کنند. در آبخوان آبرفتی دشت تایباد که دارای افت مستمر و قابل‌توجه‌قابل‌توجه می‌باشد، نقشه تراز سطح آب زیرزمینی، شکل(۲) و نقشه خطوط هم عمق آب زیرزمینی آبخوان در شکل (۳) براساس داده‌های مهر سال ۱۳۸۹، تهیه و ارائه شده است. رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی این محدوده در نواحی شمال‌شرقی، شمال‌غربی، غرب و جنوب‌غربی دارای مقدار حداکثر ۸۶۰ متر است و هرچه به سمت مرکز و شرق آبخوان حرکت می‌کنیم، به‌علت موقعیت و میزان بهره‌برداری چاه‌های کشاورزی، به مقدار حداقل ۶۳۰ متر کاهش می‌یابد. این خطوط بیان‌کننده حرکت آب زیرزمینی از قسمت شمالی و جنوبی و غربی آبخوان به سمت مرکز و شرق آبخوان می‌باشد.

۲. ۴. مدل‌سازی آبخوان

۲. ۴. ۱. ساخت مدل مفهومی

در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از نرم‌افزار GMS، تحت کد MODFLOW، استفاده شد. این مدل، جریان را به‌صورت سه‌بعدی از روش تفاضل محدود، در حالت ماندگار و غیرماندگار، شبیه‌سازی می‌کند (Goodarzi *et al.*, 2020). برای ایجاد مدل جریان در نرم‌افزار GMS از روش مدل مفهومی استفاده شد. برای ساخت مدل مفهومی و ایجاد اطلاعات و لایه‌های اولیه از ابزار اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ماژول ArcMap استفاده گردید. موقعیت منابع تغذیه و تخلیه مانند موقعیت چاه‌ها و تغذیهٔ سطحی، پارامترهای کالیبره از قبیل هدایت هیدرولیکی، مرزهای مدل و سایر اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی در سطح مدل مفهومی با تعریف پوشش‌های جداگانه به نرم‌افزار، معرفی و با ایجاد شبکه، مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای تبدیل شد.

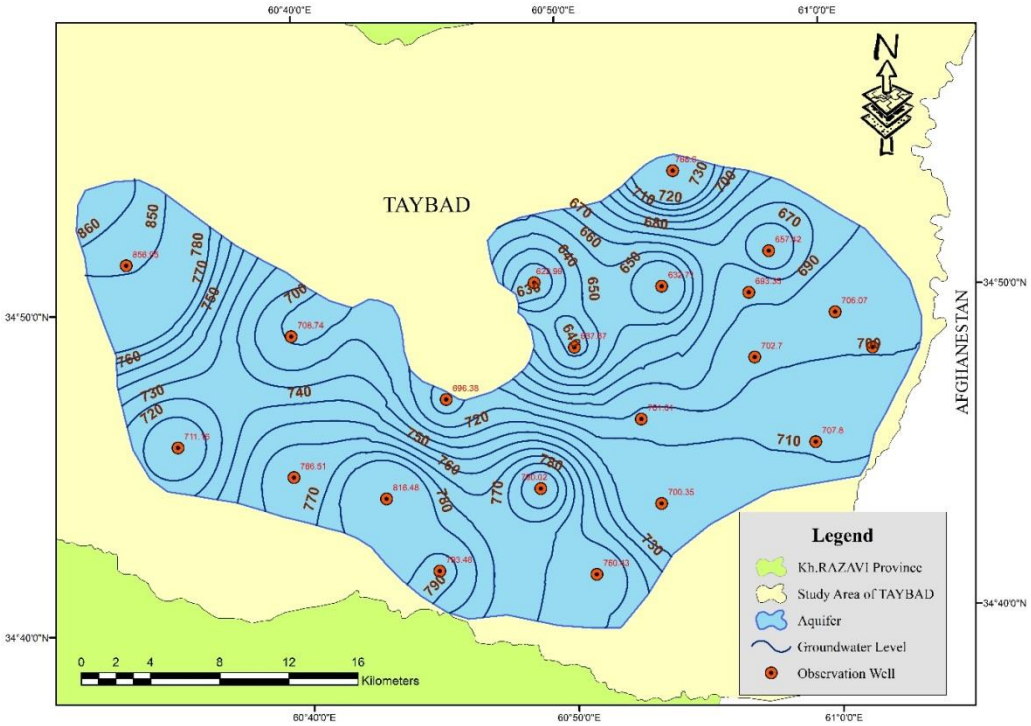

Figure 2. Map of the underground water level lines of Taibad aquifer (based on the water level in October of 2019)

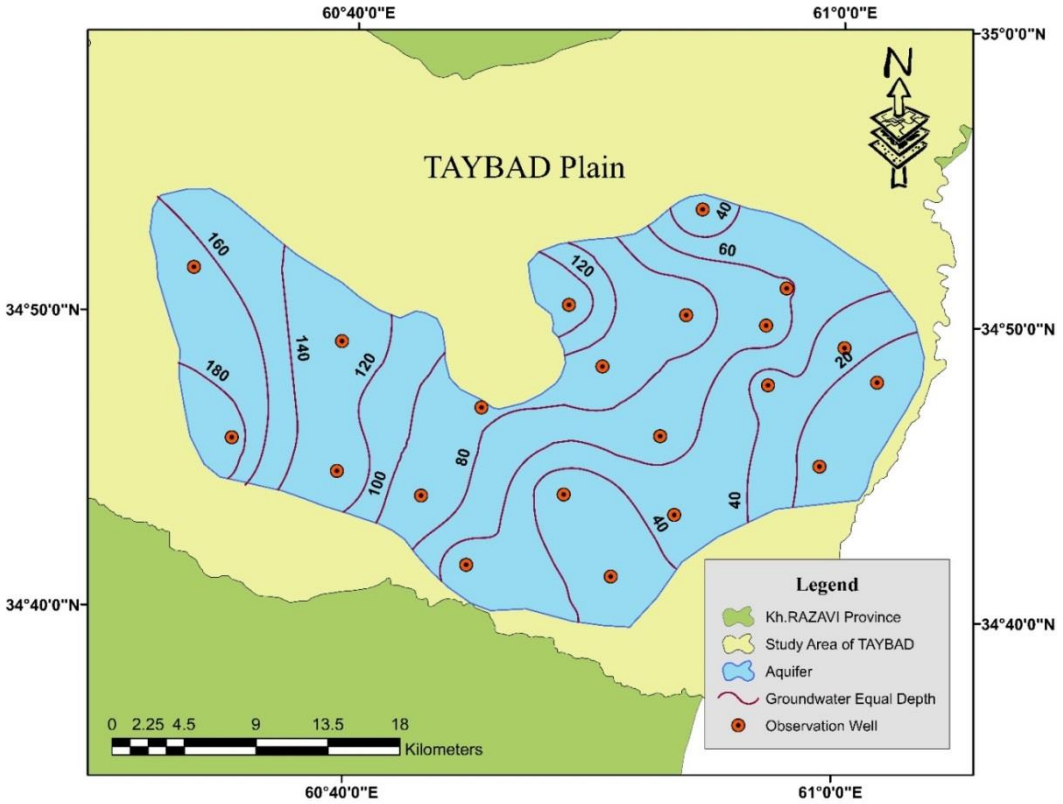

Figure 3. Map of equal depth lines of underground water of Taybad aquifer (based on water level in October of 2019)

مادفلو برای حل مسائل، از شبکهٔ سلول مرکزی تفاضل محدوده، استفاده می‌کند. با توجه به خصوصیات مربوط به آبخوان دشت تایباد و استفاده از تجارب سایر پژوهش‌گران، شبکه‌ای با سلول‌هایی به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ متر در یک لایه برای محدودهٔ مطالعاتی تهیه گردید. اطلاعات رقومی توپوگرافی سطح زمین از داده‌های DEM، با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی استخراج و به مدل معرفی شد. منحنی‌های رقوم سنگ کف آبخوان به‌علت نداشتن داده از روش دستی و به‌کمک چاه‌هایی که به سنگ بستر برخورد کرده بودند، درون‌یابی و ایجاد شده است. تراز اولیه آب زیرزمینی، به‌کمک داده‌های ترازآب زیرزمینی مهرماه ۱۳۸۹ به‌عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شده است. برای مشخص‌کردن شرایط مرزی، بار هیدرولیکی یا میزان جریان یا ترکیبی از آن‌ها به سلول‌های مرزی اختصاص داده شد. از جمله راه‌های تعیین نوع مرز، استفاده از نقشهٔ هم‌تراز و نقشهٔ خطوط جریان آب زیرزمینی است. مرزهایی را که خطوط جریان به‌صورت عمود(یا نزدیک به عمود) بر آن‌ها قرار دارد، برحسب جریان، می‌توان به‌عنوان مرز ورودی یا خروجی در نظر گرفت و هر کجا که خط جریان با مرز موازی باشد، می‌توان مرز نفوذناپذیر دانست. به‌منظور اجرای درست و دقت مناسب مدل ماندگار در آبخوان تایباد، پارامترهای نفوذ جریان برگشتی چاه‌های بهره‌برداری و جریان ورودی آب زیرزمینی به‌عنوان ورودی‌های سفره و پارامترهای پمپاژ از چاه‌ها به‌عنوان خروجی از آبخوان، در نظر گرفته شدند.

۲.۴.۲. مدل غیرماندگار

مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت تایباد در شرایط غیرماندگار، با توجه به آمار و اطلاعات موجود براساس یک دوره پنج ساله (سال آبی ۱۳۹۴–۱۳۸۹) تهیه شده است. تقسیم‌بندی زمانی دوره‌ها یا گام‌های زمانی در حالت غیرماندگار در هر سال، به‌صورت ماهانه بوده، به گونه ای که طول هر یک از گامها برابر با تعداد روزهای هر ماه می‌باشد، به‌عنوان مثال برای اسفندماه طول آن ۲۹ روز و برای فروردین‌ماه ۳۱ روز، در نظر گرفته شده است. تمامی اطلاعات وابسته به زمان در مدل‌سازی غیرماندگار، مانند تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای برای ماه‌های مختلف، تخلیه آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه آبخوان ناشی از جریان‌های برگشتی آب مصرفی کشاورزی، در گام‌های زمانی مختلف، با فرمت مناسب، به مدل، وارد گردیده است.

۳.۴.۲. سناریوهای مدل‌سازی

هدف این پژوهش و مدل‌سازی مذکور، بررسی وضعیت آبخوان و مصارف کشاورزی، می‌باشد. با توجه به الگوی کشت منطقه که در جدول (۱) ارائه شده، مشخص است که در این منطقه با اقلیم گرم و خشک، وضعیت بحرانی ممنوعه آبخوان، محصولات پر آبی مانند هندوانه، خربزه، پنبه، یونجه و ... کشت می‌شوند. در منطقه‌ای با وضعیت بحرانی آب، اکثر ۳۸۶۰۰ هکتار، سطح زیرکشت اراضی آبی آن، با شیوه‌های سنتی (آبیاری غرقابی) آبیاری می‌شوند. با مدنظر قراردادن تغییر الگوی کشت در جهت الگوی کم‌مصرف‌تر و هم‌چنین تغییر شیوه‌های آبیاری از سنتی به روش‌های نوین برای ارتقای راندمان آبیاری، کاهش برداشت از آبخوان توسط چاه‌های کشاورزی به مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد با کاهش تغذیه جریان‌های برگشتی آب کشاورزی به مقدار پنج و ۱۰ درصد سناریوهایی منطقی برای بررسی هستند. هم‌چنین ادامه روند فعلی و موجود، بررسی خواهد شد تا با اعمال سناریوها و خروجی نتایج، تجزیه و تحلیل مناسب و مدیریت صحیحی برای آبخوان بحرانی ممنوعه محدوده مطالعاتی تایباد اتخاذ گردد. آخرین گزارش مطالعه بیلان آب زیرزمینی منتشرشده منتهی به سال ۱۳۹۰ می‌باشد. گزارش مطالعات بیلان آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی ۱۳۹۵–۱۳۹۰ و ۱۴۰۰–۱۳۹۵ منتشر نشده است. لذا پیش‌بینی مربوط به سال‌های آماری گذشته است که با نتایج این پژوهش مقایسه خواهند شد.

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. شبیه‌سازی مدل مفهومی

پس از ساخت مدل مفهومی و تبدیل آن به مدل عددی، شبیه‌سازی ایجادشده با داده‌های تراز آب زیرزمینی مهرماه ۱۳۸۹ به‌عنوان شرایط اولیه، اجرا شد. قبل از اجرا توسط گزینه Run Check که یکی از امکانات نرم‌افزار GMS است، خطاهای احتمالی برطرف شده، سپس مدل اجرا گردید که با واسنجی دستی، داده‌های هدایت هیدرولیکی منطقه و بار هیدرولیکی شرایط مرزی و جبهه‌های ورودی و خروجی، کالیبره شده و مقادیر هدایت هیدرولیکی، بهینه و برآورد شدند. برای آبخوان موردنظر مقادیر حداقل چهار متر بر روز و حداکثر ۴۱ متر بر روز، به‌دست آمده و خطای قابل‌قبول مدل‌سازی یک متر، در نظر گرفته شده است. در شکل (۴) خروجی نهایی مدل ماندگار و هم‌چنین در جدول (۲)، مقادیر شبیه‌سازی برای چاه‌های مشاهده‌ای آورده شده است.

Table 2. Characteristics of observation wells in the steady state model

Name	Observation head (m)	Obs.head interval (m)	Computed head (m)	Residual head (m)
Ekteshafi Polband	820.1	1	819.38	-0.7262
Asadabad Darband	793.48	1	793.64	0.1628
Charborji	766.51	1	766.3345	-0.1755
Hajiabad	760.43	1	760.111	-0.319
Dogharoun(1)	707.8	1	708.0876	0.2876
Dogharoun(2)	703.4	1	703.8734	0.4734
Sizdahmetri	705.06	1	704.4655	-0.5945
Kariz	693.35	1	693.8383	0.4883
KalatehAgha	696.38	1	696.0194	-0.3646
Shamsabad	701.01	1	701.6401	0.6301
ArzanchehOliya	622.99	1	623.201	0.211
Rizeh	708.74	1	709.2912	0.5512
Jafarabad	701.7	1	701.105	-0.595

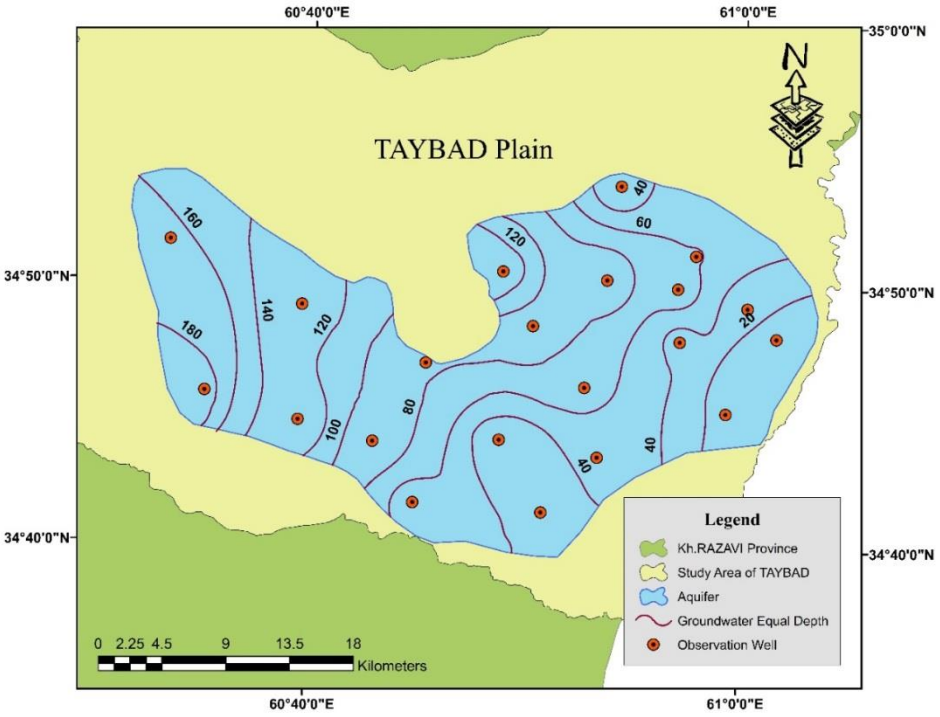

Figure 4. The final and calibrated model of Taybad aquifer in steady state

۳. ۲. شبیه‌سازی مدل غیرماندگار

در حالت غیرماندگار، واسنجی مدل با استفاده از داده‌های ماهانه تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای، در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ (۳۶ گام زمانی) انجام شد. در این مرحله هدف اصلی، تعیین مقدار آبدهی ویژه آبخوان موردمطالعه، می‌باشد. واسنجی به روش دستی، انجام گرفت. مقادیر آبدهی ویژه، به نحوی تنظیم و ادامه یافت که در هر گام زمانی مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و مشاهداتی به هم نزدیک و تطابق داشته باشند تا نمودار میله رنگی پیزومترها به حد خطای قابل‌قبول برسد و سبز یا زرد رنگ شود. در انتها، برای آبدهی ویژه آبخوان، مقادیر حداقل ۰/۰۴ و حداکثر ۰/۱۴ به‌دست آمد و مدل غیر ماندگار واسنجی گردید. سپس مدل توسط ۲۴ گام زمانی انتهایی، داده‌های ماهانه تراز آب زیرزمینی ۱۳۹۴-۱۳۹۲ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و از صحت و سقم نتایج مدل اطمینان حاصل گردید. هم‌چنین نمودارهای تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در طول دوره واسنجی و صحت‌سنجی، مقایسه شدند که در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) برای چند چاه مشاهده‌ای به‌عنوان نمونه نمایش داده شده است.

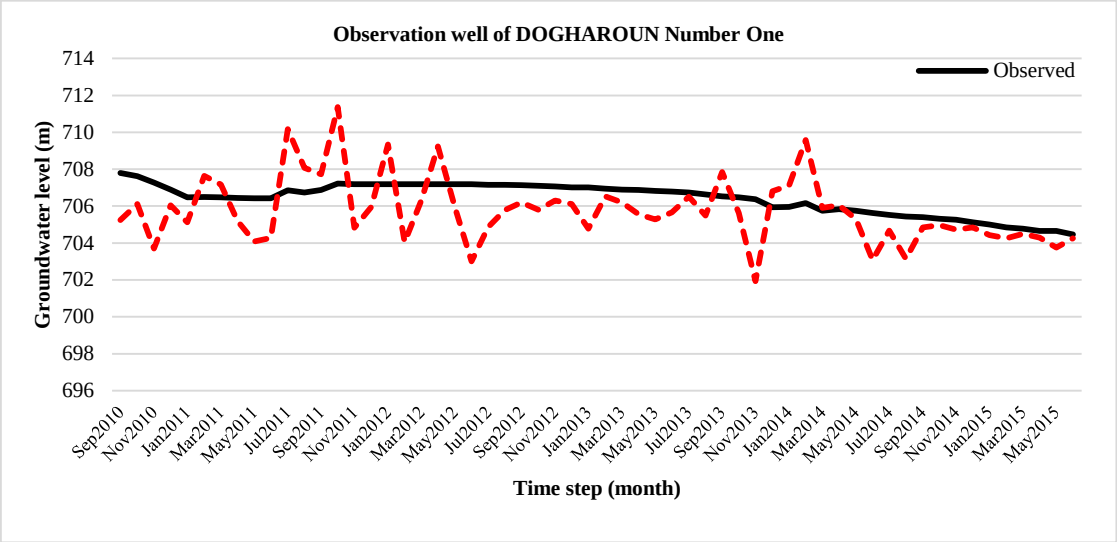

Figure 5. Observational and calculated groundwater level diagram for Dogharon piezometer 1

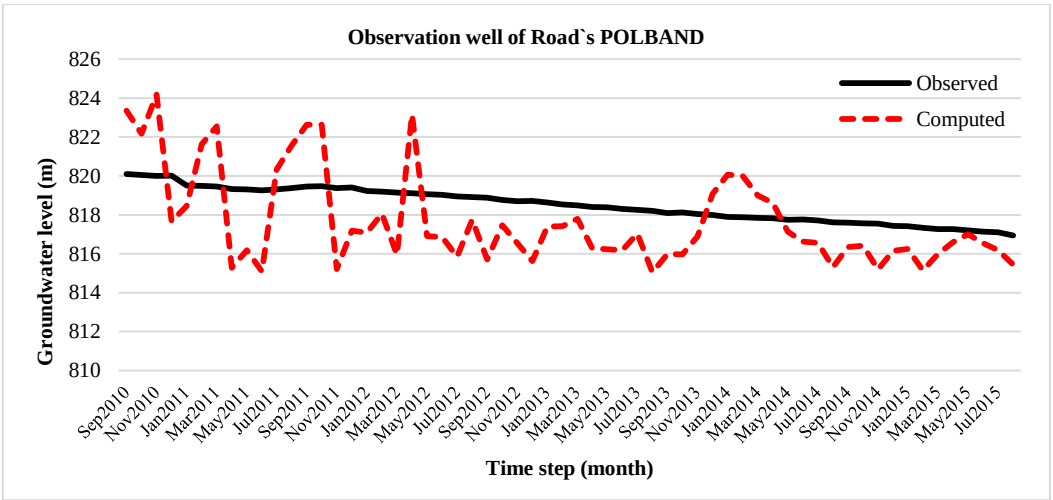

Figure 6. Observational and calculated underground water level diagram for the piezometer of Pleband road

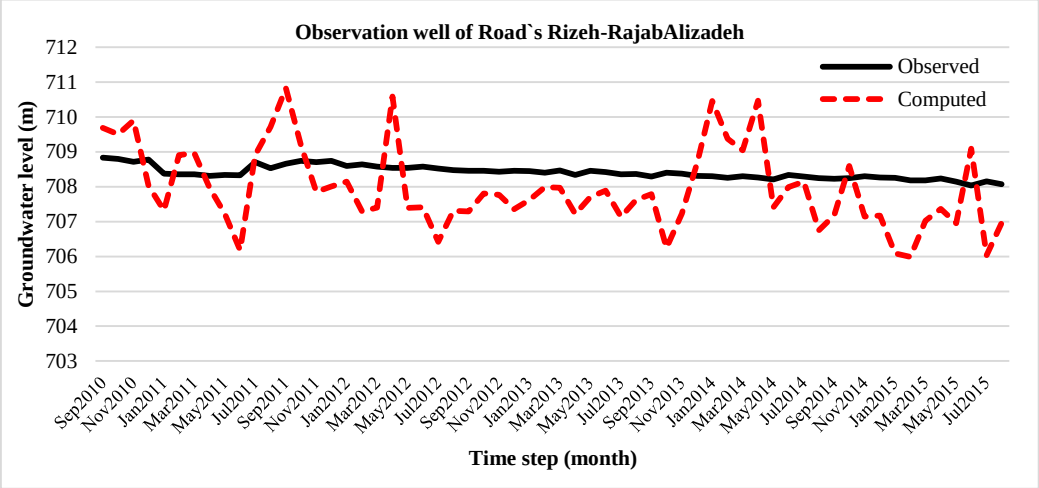

Figure 7. Observational and calculated groundwater level diagram for Rizeh-Rajabalizadeh piezometer

۳. ۳. معیارهای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل

برای مقایسه و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل از بخش های توسعه ای نرم‌افزار GMS مانند هدف کالیبراسیون و واسنجی مدل (Calibration Target)، مقدار متوسط خطا (Mean Error)، میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error)، میانگین مجذور مربعات خطا (Root Mean squared Error) و نمایش نمودار پراکندگی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی شد که در جدول (۳) ارائه گردیده است. در شبیه‌سازی حالت ماندگار، میانگین خطا ۰/۴۲۹ و میانگین مجذور مربعات خطا ۰/۴۶ به‌دست آمد که این مقادیر کم‌تر از ۱ بوده و نشان‌دهنده واسنجی مناسب و دقیق مدل می‌باشد. در حالت غیرماندگار به‌علت تغییرات وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان ها و سطح آب زیرزمینی در گام‌های زمانی، مقادیر خطای آن بیش‌تر از حالت ماندگار است. با توجه به داده‌های تراز آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهداتی، مدل ماندگار از همبستگی خوب و مناسبی برخورداراست.

Table 3. Results of evaluation criteria for aquifer modeling in GMS

Model	ME	MAE	RMSE
Steady	0.002	0.429	0.466
Unsteady	1.285	1.775	4.04

۳. ۴. هیدروگراف آبخوان

برای بررسی آبخوان آبرفتی دشت تایباد، هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی از مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریورماه ۱۳۹۴ ترسیم گردید. میزان افت آب زیرزمینی در طول دوره آماری مذکور براساس هیدروگراف واحد ترسیمی برابر ۳/۰۹ متر که معادل افت سالانه سطح آب زیرزمینی برابر ۰/۶۱۲ متر به‌دست آمده که در شکل (۸) ارائه شده است.

۳. ۵. سناریوهای مدیریتی

از عوامل مهم استفاده از این مدل‌ها، کاربرد آن‌ها برای مدیریت و سیاست‌های تصمیم‌گیری برای آینده آبخوان، می‌باشد. به‌کمک مدل‌سازی می‌توان، نتیجه راه‌کارهای مختلف را با صرف کم‌ترین هزینه مشاهده کرد. لذا، پس از ورود کامل اطلاعات به نرم‌افزار و کالیبره‌نمودن مدل در دو بخش ماندگار و غیرماندگار، مطمئن‌شدن از اعتبارسنجی مدل تهیه‌شده، مدل توانایی پیش‌بینی راه‌کارهای مختلف مدیریتی، اجرایی و بررسی تأثیر آن‌ها بر آبخوان در آینده را خواهد داشت.

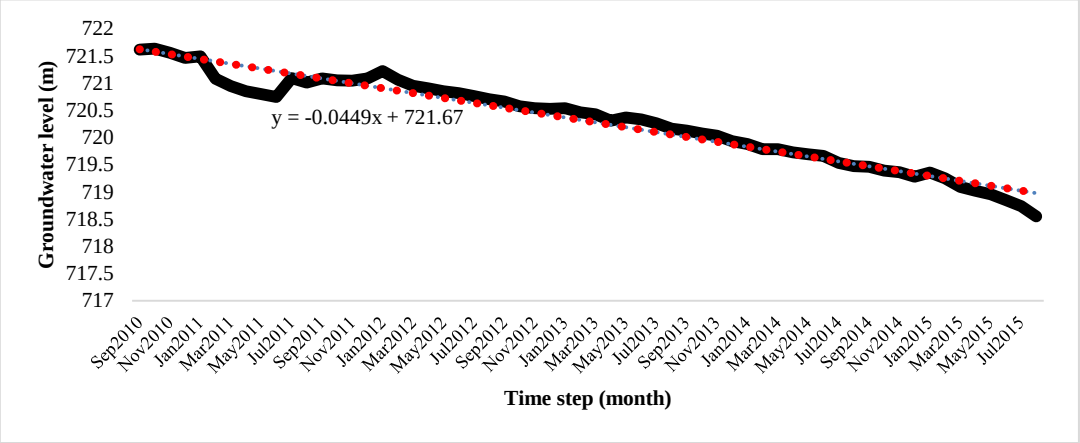

Figure 8. Representative Hydrograph of Taibad Plain alluvial aquifer in the mentioned time period

سیاست‌های موردنظر می‌توانند از نوع تغییرات برداشت از آبخوان یا تغییرات تغذیه به آبخوان باشند. با توجه به بیلان منفی آبخوان و بررسی کشاورزی منطقه، نتیجه‌گیری شد که براساس وضعیت اقلیم منطقه و میزان منابع آب زیرزمینی موجود، الگوی کشت نامناسبی از لحاظ میزان مصرف آب و شیوه‌های آبیاری سنتی با راندمان پایین در دشت محدوده موردمطالعه به‌کارگرفته شده است. لذا با هدف تغییر الگوی کشت به الگویی کم‌مصرف‌تر و تغییر شیوه‌های آبیاری از سنتی به نوین در جهت افزایش راندمان آبیاری، سه سناریو به‌شرح ذیل تعریف شد؛ ۱- کاهش ۱۰ درصد برداشت چاه‌های کشاورزی با کاهش ۵ درصد تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی به آبخوان، ۲- کاهش ۲۰ درصد برداشت چاه‌های کشاورزی با کاهش ۱۰ درصد تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی به آبخوان، ۳- ادامه وضعیت و روند کنونی، برای دوره پنج‌ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۴). بعد از بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، اثرات آن‌ها پیش‌بینی و به‌شرح ذیل ارائه گردیده است.

۳. ۵. ۱. سناریوی اول: ادامه وضعیت و روند کنونی

در این سناریو فرض شده کلیه عوامل و پارامترها تا پنج سال آینده تغییر نخواهند کرد. با این شرایط و وضعیت، مدل برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۹ اجرا شده است. در اثر این سناریو سطح آب زیرزمینی بیش‌تر از ۳ متر دیگر افت خواهد کرد و حجم کسری آبخوان به بیش از ۵۴ میلیون مترمکعب خواهد رسید.

۳. ۵. ۲. سناریوی دوم: کاهش ۱۰ درصدی برداشت چاه‌های کشاورزی به‌همراه کاهش ۵ درصدی تغذیه سطحی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی

با توجه به بررسی‌ها و پیشنهاد تغییر الگوی کشت به زراعت‌های آبی کم‌نیاز و افزایش راندمان آبیاری با سیستم‌های آبیاری نوین، این سناریو انتخاب شد. از مقادیر تخلیه چاه‌های کشاورزی ۱۰ درصد و از پلیگون‌های تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی، مقدار ۵ درصد کاسته شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که شیب تراز آب زیرزمینی مثبت شده و از مقدار ۳/۰۹ متر افت آبخوان در دوره شبیه‌سازی، به افت ۱/۱ متر نسبت به ابتدای دوره مدل‌سازی (مهرماه ۱۳۸۹) می‌رسد. در این سناریو به‌مدت پنج سال، نزدیک به ۲ متر افت آبخوان، جبران و مقدار ۲۱/۳۸ میلیون مترمکعب در سال، به حجم بیلان افزوده می‌شود.

۳. ۵. ۳. سناریوی سوم: کاهش ۲۰ درصدی برداشت چاه‌های کشاورزی به‌همراه کاهش۱۰ درصدی تغذیه سطحی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی

در این سناریو، نتایج مقادیر تخلیه و تغذیه چاه‌ها، نشان می‌دهد در کاهش ۲۰ درصد تخلیه چاه‌های کشاورزی به همراه کاهش ۱۰ درصد تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی آب کشاورزی، میزان افت تراز آب زیرزمینی مثبت نمی‌شود، اما به مقدار قابل‌توجهی از افت آن، کاسته می‌شود به‌گونه‌ای که از افت ۳ متر در دوره شبیه‌سازی به مقدار افت ۰/۷ متر می رسد. با اعمال این سناریو در پنج سال ۲/۵ متر افت آبخوان جبران گردیده و مقدار ۲۵/۹۴ میلیون مترمکعب در سال به حجم آن اضافه، خواهد شد. نتایج سه سناریوی فوق‌الذکر، در هیدروگراف شکل (۹) نشان داده شده است.

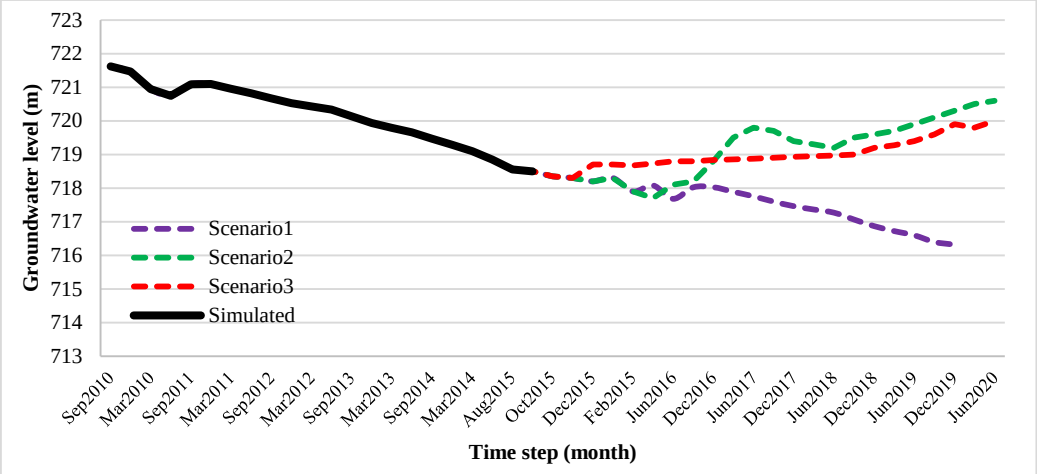

Figure 9. Diagram of the results in prediction of management scenarios on the simulated model of Taibad aquifer

۶. نتیجه‌گیری

هیدروگراف واحد دشت تایباد در پنج سال (۱۳۹۴-۱۳۸۹) نشان‌دهنده افت سطح آب آبخوان است. با توجه به هیدروگراف و بیلان دشت، مدلی برای حالت مفهومی و غیرماندگار شبیه‌سازی شد. شکل هیدروگراف، گویای نامناسب‌بودن مصرف آب و تعیین‌کننده آن است. آبخوان آبرفتی دشت تایباد از نوع آزاد است که در وضعیت خالی‌شدن بوده و از تغذیه سالانه حتی در سال‌های پر بارش تأثیرپذیری ندارد. برای تهیه مدل جریان آبخوان با توجه به مطالعات بیلان منابع آب زیرزمینی و پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای، از ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای استفاده گردید. نتایج حاصل از بررسی شیب تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۴- ۱۳۸۹ نمایانگر سیر نزولی تراز آب زیرزمینی آبخوان به دلائل استفاده زیاد و نادرست از منابع آب زیرزمینی و کاهش تغذیه سفره می‌باشد. سطح تراز سفره آب زیرزمینی در طی این پنج سال با توجه به هیدروگراف واحد منطقه، به‌طور متوسط ۳/۰۹ متر افت کرده که مبین برداشت بیش از حد و غیراصولی از سفره آب زیرزمینی است. خشکسالی‌های شدید چندین ساله باعث تشدید روند افت سطح آب سفره در منطقه شده و وضعیت سفره را در حالت ممنوعه بحرانی قرار داده است. اگر به مصرف منابع آب زیرزمینی در این دشت دقت شود، ملاحظه می‌گردد که تقریباً تمام آب موجود، صرف کشاورزی می‌شود. با نگاهی اجمالی به وضعیت کشاورزی منطقه، درمی‌یابیم که محصولاتی با نیاز آبی بسیار بالا مانند هندوانه، خربزه، یونجه و ... در سطوح وسیع کشت می‌شوند. با توجه به تغییر الگوی کشت و افزایش کارایی مصرف آب آبیاری، سناریوهای ترکیبی کاهش برداشت چاه‌های

کشاورزی (با توجیه انتخاب الگوی کشت‌هایی با نیاز آبی پایین) به‌همراه کاهش تغذیه سطحی ناشی از جریان‌های برگشتی کشاورزی (با کاربرد شیوه‌های نوین آبیاری) انتخاب و بررسی شدند. پس از اطمینان از اعتبار مدل ساخته‌شده از بازگویی شرایط محدوده موردمطالعه فرایند پیش‌بینی مدل آغاز می‌گردد. نتایج پیش‌بینی آتی مشخص می‌کند که با شرایط فعلی، شیب منفی سطح آب آبخوان ادامه خواهد داشت و در پایان دوره پیش‌بینی (۱۳۹۹) حجم کسری آبخوان به بیش از ۵۴ میلیون مترمکعب خواهد رسید. لذا باید با متعادل‌کردن مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان از طریق مدیریت صحیح آن، از افت بیش‌تر سطح آب جلوگیری گردد. بدین منظور سناریوهای ذکرشده در قسمت‌های قبل، به مدل اعمال گردیده و نتایج آن‌ها بررسی شد. در سناریوی اول با کاهش ۱۰ درصدی برداشت چاه‌های کشاورزی به‌همراه کاهش ۵ درصدی تغذیه ناشی از جریان برگشتی آب کشاورزی مقدار بیلان منفی مخزن جبران نمی‌شود، اما به مقدار ۲۱/۳۸ میلیون مترمکعب در سال به حجم بیلان افزوده می‌شود. با اعمال سناریوی دوم با کاهش ۲۰ درصدی برداشت چاه‌ها، به‌همراه کاهش ۵ درصدی تغذیه سطحی مقدار ۲۵/۹۴ میلیون مترمکعب در سال به حجم آبخوان اضافه می‌شود.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

Casanova, J., Devau, N., & Pettenati, M. (2016). Managed aquifer recharge: An overview of issues and options. Springer, New York. 413-434.

Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H., & Barati, A. (2022). The Future of Temporal and Spatial Variations in the Quantitative and Qualitative Parameters of Groundwater in Arid Regions: A Case Study of Minab Plain. *Environmental Erosion Research*, 12(3), 78-99. (In Persian).

Goodarzi, M., & Mortazavizadeh, F. S. (2020). Assessing climate change impacts on groundwater fluctuations using RCP scenarios: A case study of Hashtgerd plain. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 7(3), 801-814. (In Persian).

Hamze, S., Bagherpour, Z., Delghandi, M., & Kardan Moghaddam, H. (2018). Risk assessment of climate change impacts on groundwater level (Case study: Gotvand Aghili aquifer). *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 5(1), 111-122. (In Persian).

Kardan Moghaddam, H., Banihabib, M. E., & Javadi, S. (2017). Assessment of artificial recharge on aquifer restoring using sustainability index. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 4(4), 1241-1253. (In Persian).

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

Ministry of Energy. (2014). Groundwater Reclamation and Balancing Plan, 5th Directive: Blockage of unauthorized wells, prevention of over-harvesting of water resources (In Persian).

Nozarpour, L., Chit Sazan, M., & Farhadi Manesh, A. (2014). Evaluation of the hydraulic connection of the Lor Andimeshk plain aquifer and the Dez river using the MODFLOW model. Advanced Applied Geology. (In Persian).

Parsasadr, H., Mohammadzadeh, H., & Naseri, H. R. (2016). Numerical simulating of Sabzevar Roudab aquifer and checking of influences of constructing Sabzevar Roudab dam on it. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 23(1), 119-135. (In Persian).

Taheri Tizro, A., & Kamali, M. (2017). Groundwater modeling by MODFLOW model In Toyserkan aquifer and evaluation of hydrogeological state under present and future conditions. *Water resources engineering*, *9*(31), 45-60. (In Persian).

Wang, Y., & Yang, P. P. (2015). The application of GMS. *Advanced Materials Research*, 1092, 1209-1212.