Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Quantitative Changes in Groundwater Resources of Miandoab Plain under the Influence of Contractionary Water Allocation Policies

Ehsan Javadi[1], Behzad Hessari[*2], Mahsa Mohammad Hoseinzadeh[3]

1. M.Sc. Graduate of Water Recourses Engineering, Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: ehsanj03@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, College of Agriculture and Urmia Lake Research Institute, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: b.hessari@urmia.ac.ir
3. Ph.D. Student of Water Recourses Engineering, Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: m.mohammadhoseinzadeh@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 08.05.2023
Revised: 01.03.2024
Accepted: 02.06.2024

Keywords:
GMS,
Groundwater quantity,
Modflow,
Urmia Lake

ABSTRACT

Background and Objectives: Due to limitations in renewable freshwater resources, proper management of resources and demands is one of the key factors for achieving sustainable management. This is a critical factor in achieving sustainable water management. This study aims to investigate the impact of government contractionary policies on the reduction of surface and groundwater rights in the Miandoab plain and quantitatively examining their impacts on groundwater resources.

Materials and Methods: The quantitative modeling of groundwater in the Miandoab plain utilized data from 120 observation wells. Geological, soil layer, and recharge layers pertinent to the region were collected. Groundwater level changes from October 2010 to September 2016 were modeled and analyzed in both stable and unstable transient states using the MODFLOW code. The model calibration stages were performed based on adjusting the hydrodynamic parameters of the aquifer, such as hydraulic conductivity and recharge, for 50 time steps from November 2010 (70% of the modeling period). The best fit between computational and observational values was achieved both manually and automatically. 30% of the data was used for model validation. The model's sensitivity to the aquifer's hydrodynamic coefficients was examined. Finally, various scenarios related to water allocation reduction policies of the region and their effects on groundwater behavior, such as reducing extraction and recharge by decreasing surface water entering the plain, were quantified.

Results: The results demonstrated that the Root Mean Square Error (RMSE) was approximately 1 and 1.68 meters for the stable and unstable (transient) states, respectively. The hydraulic conductivity values within the aquifer ranged between 3.5 and 28 meters per day, and the specific yield values varied between 3 to 24 percent. The model exhibited the highest sensitivity to surface recharge and the least sensitivity to specific yield. The Pearson coefficient for the calibration and validation period of the unstable state exceeded 0.98, indicating a high degree of model accuracy. All effects of the government's contractionary policies on reducing 40% of surface water and balancing the aquifer with the levels of natural aquifer recharge were implemented. Given that the average drop in groundwater level is approximately 0.1 meters per year, a scenario of reducing extraction from all operating wells has been applied to balance the

aquifer. With a 5% reduction in extraction, the aquifer is projected to experience a half-meter increase in the static level. The Miandoab aquifer, due to the low slope of the plain, is sensitive and shows a part of the plain as a water ponding in reducing extraction at a high rate, hence any policy-making should be based on modeling.

Conclusion: To improve the conditions of the Miandoab aquifer, one of the country's most unique aquifers, suggestions have been made for changes in the cultivation pattern of agricultural products, monitoring of water extraction from operating wells, and examination of the impact of climate change and drought on groundwater resources in terms of quantity and quality. Various scenarios, including optimization and change of cultivation pattern, as well as the construction of drainage in areas where evaporation from the aquifer is high, should be evaluated to improve the aquifer situation.

Cite this article: Javadi, Ehsan, Hessari, Behzad, Mohammad Hoseinzadeh, Mahsa. 2024. Quantitative Changes in Groundwater Resources of Miandoab Plain under the Influence of Contractionary Water Allocation Policies. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (1), 27-49.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21638.3677
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی دشت میاندوآب تحت‌تأثیر سیاست‌های انقباضی تخصیص آب

احسان جوادی[۱]، بهزاد حصاری*[۲]، مهسا محمدحسین‌زاده[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
رایانامه: ehsanj03@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
رایانامه: b.hessari@urmia.ac.ir

۳. دانش‌آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
رایانامه: m.mohammadhoseinzadeh@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۵/۱٤
تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۰/۱۳
تاریخ پذیرش: ۰۲/۱۱/۱۷

واژه‌های کلیدی:
دریاچه ارومیه،
کمیت آب زیرزمینی،
GMS،
Modflow

چکیده

سابقه و هدف: به‌علت محدودیت‌های منابع تجدیدشونده آب شیرین، مدیریت صحیح میان منابع و مصارف، یکی از عوامل اصلی برای دستیابی به مدیریت پایدار است. هدف در این پژوهش بررسی تأثیرات سیاست انقباضی دولت در قبال کاهش حق آبه سطحی و زیرزمینی در دشت میاندوآب و بررسی اثرات آن‌ها در آبخوان، به‌صورت کمی است.

مواد و روش‌ها: در مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی دشت میاندوآب از اطلاعات ۱۲۰ چاه مشاهده‌ای استفاده شد و لایه‌های خاکشناسی، زمین‌شناسی، تغذیه و... برای منطقه جمع‌آوری گردید. تغییرات تراز آب زیرزمینی از مهر ۱۳۸۹ (۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۵ (۲۰۱٦) در حالت پایدار و ناپایدار با کد مادفلو مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. در GMS تحت کد MODFLOW، مراحل واسنجی مدل بر اساس تنظیم پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان مثل هدایت هیدرولیکی و تغذیه... برای ۵۰ گام زمانی از آبان ۱۳۸۹ (۷۰٪ دوره مدل‌سازی) انجام شد و بهترین تطبیق بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی به روش دستی و خودکار انجام شد. ۳۰٪ داده‌ها برای صحت‌سنجی استفاده شد. حساسیت مدل به ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان بررسی گردید. درنهایت سناریوهای مختلف حاکم و پیش روی منطقه و اثر آن‌ها بر روی رفتار آب زیرزمینی مثل سناریوها کاهش برداشت و کاهش تغذیه با کم کردن آب سطحی ورودی دشت کمی‌سازی شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مقدار خطای RMSE به ترتیب برای حالت پایدار و ناپایدار در حدود ۱ و ۱/٦۸ متر بوده و مقادیر هدایت هیدرولیکی در آبخوان بین ۳/۵ و ۲۸ متر در روز و مقادیر

آبدهی ویژه در آبخوان بین ۳ تا ۲٤ درصد متغیر است. مدل به تغذیه سطحی بیش‌ترین حساسیت و برای آبدهی ویژه کم‌ترین حساسیت را از خود نشان داد. ضریب پیرسون دوره واسنجی و صحت‌سنجی حالت ناپایدار بالای ۰/۹۸ بوده و مدل از دقت بالایی برخوردار است. کلیه تأثیرات سیاست‌های انقباضی دولت در قبال کاهش ٤۰٪ آب سطحی و تعادل بخشی آبخوان با سطوح کاهش تغذیه طبیعی آبخوان اعمال گردید. باتوجه‌به این‌که مقدار افت متوسط تراز آب زیرزمینی حدود ۰/۱ متر در سال است به‌منظور تعادل بخشی به آبخوان و هم‌چنین راهکارهای مدیریتی سناریو کاهش برداشت از همه چاه بهره‌برداری اعمال‌شده است که با کاهش ۵٪ برداشت، آبخوان نیم متر افزایش سطح ایستابی را تجربه خواهد کرد. آبخوان میاندوآب به‌خاطر کم شیب بودن دشت، حساس بوده و در کاهش برداشت با نرخ بالا، قسمتی از دشت زه‌داری را نشان می‌دهد؛ بنابراین هرگونه سیاست‌گذاری باید مبتنی بر مدل‌سازی باشد.

نتیجه‌گیری: به‌منظور بهبود شرایط آبخوان میاندوآب که یکی از خاص‌ترین آبخوان‌های کشور است، پیشنهادهایی مبنی بر تغییر در الگوی کشت محصولات کشاورزی، نظارت بر برداشت‌هایی آب از چاه‌های بهره‌برداری موردتوجه سازمان‌ها قرار گیرد و اثر تغییر اقلیم و خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی ازنظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار گیرد. سناریوهای مختلفی ازجمله بهینه‌سازی و تغییر الگوی کشت و هم‌چنین احداث زهکش در مناطقی که تبخیر از آبخوان زیاد است در جهت بهبود وضعیت آبخوان مورد ارزیابی قرار گیرد.

استناد: جوادی، احسان، حصاری، بهزاد، محمدحسین‌زاده، مهسا (۱۴۰۳). تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی دشت میاندوآب تحت‌تأثیر سیاست‌های انقباضی تخصیص آب. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۱)، ۴۹-۲۷.
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21638.3677

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

به‌علت محدودیت‌های منابع تجدیدشونده آب شیرین، مدیریت صحیح میان منابع و مصارف، یکی از عواملی است که برای دستیابی به مدیریت پایدار نقش اساسی دارد. در بسیاری موارد نیز آب‌زیرزمینی یک منبع مقرون‌به‌صرفه، امن و کافی هست (۱). بااین‌حال توجه و لزوم مدیریت آب جهت استفاده از آب‌های زیرزمینی، و درعین‌حال جلوگیری از اثرات زیان‌آور مانند برداشت مازاد آب‌زیرزمینی به جهت افزایش زیرکشت، نامناسب شدن کیفیت و نشست زمین‌بر اثر پمپاژ بیش‌ازحد جلوگیری نماید. در مناطق دلتایی با فرونشست زمین احتمال نفوذ آب‌شور هم در پی دارد (۲). کشاورزی غیراصولی و ناپایدار در دشت‌های ایران و حفر چاه غیرمجاز فشار زیادی بر کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی وارد می‌کند. مدل‌سازی ریاضی باسابقه بیش از سه دهه، یکی از ابزار مفید برای بررسی رفتار آبخوان‌ها و اعمال سناریوهای اجرایی قبل از پیاده‌سازی در عرصه هست. در این زمینه استفاده از نرم‌افزار GMS به همراه کد MODFLOW بسیار رایج هست. در ادامه سوابق تحقیقاتی داخلی و خارجی از این مدل‌سازی‌ها ارائه می‌گردد. رجا و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیر مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌های آب‌زیرزمینی در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی و مؤلفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-NWT به‌عنوان یک مدل جامع و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت مهاباد بررسی کردند. نتایج نشان داد به‌طور متوسط حدود ۹ درصد از آب بارندگی و ۳۶ درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی به آبخوان نفوذ می‌کند. بررسی نتایج اجزای اصلی بیلان آب‌زیرزمینی برای سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (سال خشک)، ۹۷-۱۳۹۶ (سال نرمال) و ۹۸-۱۳۹۷ (سال‌تر) نشان داد میزان تغذیه ناشی از نفوذ آب بارندگی و جریانات برگشتی آب کشاورزی در هر سه سال متفاوت است. هم‌چنین، ارتباط بین منابع آب سطحی و زیرزمینی بین سال‌های آبی از حدود ۳۰ تا ۵۰ میلیون مترمکعب متغیر است که نشان‌دهنده ارتباط قابل‌توجه بین این منابع است (۳). جنوبی و همکاران (۲۰۱۸)، مدل آب‌زیرزمینی آبخوان دشت میاندوآب توسط مدل MODFLOWNWT را تهیه کردند. ایشان پس از واسنجی و صحت‌سنجی، سه سناریو را بررسی کردند. در این پژوهش سناریوهای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی بازده آبیاری در دشت و کاهش پمپاژ از آب‌زیرزمینی و عدم پمپاژ آب توسط موتورپمپ از رودخانه‌های سیمینه‌رود و زرینه‌رود و تأمین نیاز آبی از آب‌زیرزمینی بررسی گردید. ایشان نتیجه گرفتند در سناریوهای اول و دوم، با افزایش بازده، کل آب مصرفی را می‌توان از ۹۲٤ میلیون مترمکعب در وضع موجود به‌ترتیب به ۷۷٦ و ٦٦٤ میلیون مترمکعب کاهش داد. با تأمین ٦٤۲ میلیون مترمکعب از طریق آب سطحی می‌توان پمپاژ از آب‌زیرزمینی را به ترتیب به میزان ۱٤۸ و ۲۸۲ میلیون مترمکعب نسبت به وضع موجود کاهش داد. نتایج نشان داد از مقدار آبی که دیگر پمپاژ نمی‌شود، به ترتیب میزان ۳٤ و ٤۱ میلیون مترمکعب به‌صورت جریان آب‌زیرزمینی از پایین‌دست به سمت دریاچه ارومیه خارج‌شده است و به ترتیب میزان ٤۰ و ۵۱ میلیون مترمکعب به منابع آب سطحی تخلیه‌شده و بقیه در دشت ذخیره‌شده است. ادامه این شرایط بعد از ۵ سال منجر به زه دار شدن اراضی میانی دشت خواهد شد. مقدار آب برگشتی کشاورزی در وضع موجود ۳۳ درصد و در سناریوهای اول و دوم به‌ترتیب ۲۸ و ۲۰ درصد است که نسبت به وضع موجود ۵ و ۱۳ درصد کاهش‌یافته است. در سناریوی سوم، سطح آب‌زیرزمینی به‌طور متوسط بعد از ۱ و ۵ سال به ترتیب ۱/۵ و ۳ متر پایین رفت، اما توانست در

مدت ۵ سال، ٤٩٥ میلیون مترمکعب آب برای احیای دریاچه تأمین نماید (٤). کرامتی و همکاران (۲۰۱۷) به شبیه‌سازی مدل و تحلیل حساسیت مدل تراز آب‌های زیرزمینی با کد MODFLOW پرداختند. حساس‌ترین عوامل جریان برگشتی، پمپاژ، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و بارندگی هستند که باید در وهله اول در جمع‌آوری آمار و اطلاعات لازم برای بهینه‌سازی توجه ویژه‌ای به پارامترهای حساس‌تر شود و اطلاعات آن‌ها دقیق‌تر برداشت گردد (۵). میرعباسی و همکاران (۲۰۱٦)، منابع آب‌زیرزمینی دشت سیرجان در استان کرمان را با استفاده از MODFLOW در دوره ۹ ساله مدل‌سازی کردند. ضمن بررسی میزان تغذیه در زمان قبل و بعد از احداث سد تنگوئیه مشخص کردند که احداث این سد موجب کاهش تغذیه آبخوان دشت سیرجان شده است. هم‌چنین روند بهره‌برداری‌های سال‌های اخیر ذخیره آب شیرین با خطر شدید تداخل آب‌شور روبرو خواهد بود (٦). حسنی و قادری (۲۰۱۵)، به شبیه‌سازی تأثیرات ساخت و احداث سد گاوشان بر میزان افت آب‌زیرزمینی در پایین‌دست سد با استفاده از مدل MODFLOW پرداختند. نتیجه‌گیری آنان از این پژوهش این بود که سد احداث‌شده مخزنی گاوشان به‌صورت یک منبع تغذیه مصنوعی رفتار کرده است و سطح ایستایی آبخوان در حضور سد، تراز بالاتری نسبت به شرایط بدون سد دارد (۷). آقاری و همکاران (۲۰۱٤)، در این پژوهش به شبیه‌سازی هیدرولیک جریان آب‌زیرزمینی دشت زرین‌آباد گل‌تپه پرداختند. نتایج در این پژوهش نشان داد که مدل، تراز سطح آب‌زیرزمینی را با دقت قابل بسیار خوبی شبیه‌سازی کرده و توانست به مدل کردن جریان آب‌زیرزمینی در آبخوان مذکور شود (۸). جباری و همکاران (۲۰۱٤)، به بررسی تغییرات کمی آبخوان ساحلی با استفاده از مدل ریاضی- دشت مراغه- بناب پرداختند. بعد از تحلیل حساسیت و واسنجی مدل، بین نتایج به‌دست‌آمده محاسباتی و مشاهداتی اختلاف زیادی مشاهده نشد و سطح آب‌زیرزمینی به‌خوبی شبیه‌سازی گردید (۹). شمسایی و فرقانی (۲۰۱۳)، در بررسی آبخوان شهر یزد، به‌منظور ارائه یک برنامه مدیریتی تلفیقی از آب سطحی و زیرسطحی از مدل MODFLOW استفاده کردند. با افزایش ٤۰ درصدی انتقال آب، علاوه بر این‌که آب به‌طورقطع در طول سال تأمین می‌گردد، افت آبخوان در طول سال نیز به صفر می‌رسد (۱۰). یاری و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهش‌های خود به بررسی اثرات تخلیه و تغذیه از طریق شبکه آبیاری و زهکشی دشت با رودخانه زرینه‌رود روی سیستم آب‌زیرزمینی آبخوان دشت با استفاده از MODFLOW پرداختند. نتایج پژوهش آنان این نتیجه را نشان داد که در شرایط موجود حاضر در دشت اختلاف زیادی بین تغذیه و تخلیه آب‌زیرزمینی وجود ندارد. اما با افزایش برداشت چاه‌های پمپاژ و بهره‌برداری منطقه سطح آبخوان به‌ترتیب ۱/۲۳ و ۳/۳ متر افت خواهد داشت (۱۱). اکبرپور و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از کد مدل MODFLOW در محیط GMS مدل ریاضی آن را در سفره دشت مختاران بیرجند تهیه کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که با شرایطی که آبخوان دارد هرگونه بهره‌برداری جدید از این آبخوان باعث تشدید در روند خسارت فعلی به‌جای مانده از سال‌های گذشته به منابع آب‌زیرزمینی و تا حدودی باعث غیراقتصادی شدن بهره‌برداری از آبخوان می‌شود (۱۲).

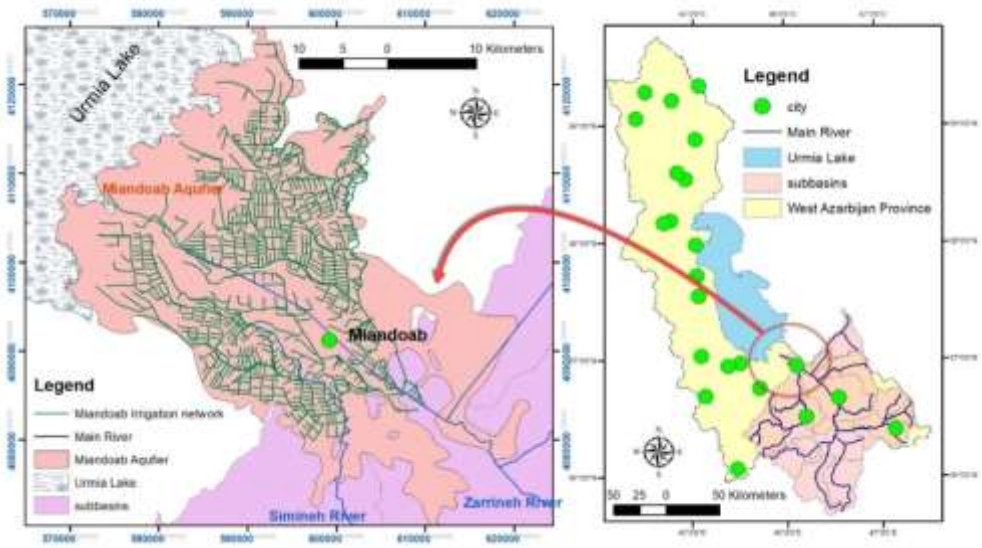
چپکمویی و همکاران (۲۰۲۳) منابع آب‌زیرزمینی در کشور کنیا شهر کریچو را مورد بررسی قرار داده و با هدف پتانسیل‌های زیرزمینی این شهر انجام‌گرفته است. در این مقاله بررسی واکنش آبخوان به سناریوهای مختلف ازجمله رشد جمعیت، اثرات تغییر

اقلیم مورد بررسی قرار داده و نتایج نشان می‌دهد که باوجود آب کافی باید استفاده مؤثر و پایدار در این دشت مورد ارزیابی قرار گیرد (۱۳). هیدالگو و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی به بررسی مدل‌های منطقه‌ای در مقیاس بزرگ با اعمال شرایط و روابط بین آبخوان منطقه‌ای و تالاب‌های کوچک که گنجانده نشده‌اند. آنان در این پژوهش از کد MODFLOW LGR-V2 استفاده کرده برای نشان‌دادن حوضچه سانتا در جنوب اسپانیا در مقیاس کوچک. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از شرایط مرزی دریاچه استفاده از کد مذکور بسیار مفید است و هم‌چنین آنان در این پژوهش دستورالعمل‌هایی برای استفاده از این کد ارائه داده‌اند (١٤). خیانگ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی ارتباط بین DSSAT و MODFLOW که به‌ترتیب مدل زراعی و مدل آب‌زیرزمینی هستند که MODFLOW می‌تواند برای بروزرسانی ضخامت اشباع‌شده و درنتیجه ظرفیت‌های چاه پمپاژ در حوزه مدل استفاده شود و سپس از ظرفیت چاه‌های شبیه‌سازی‌شده برای محدودکردن کاربردهای آبیاری در شبیه‌سازی‌های DSSAT در طول رشد بعدی استفاده شود. آنان در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که ظرفیت چاه‌های پمپاژ بیش از ۵۰٪ کاهش‌یافته است. یک سناریو عدم آبیاری برای همین دوره زمانی منجر به افزایش میانگین ارتفاع سطح ایستابی به میزان ۲ متر و هم‌چنین کاهش ۷۰٪ در عملکرد محصول شد (۱۵). لیازیدی و همکاران (۲۰۲۰)، باهدف کنترل سطح آب‌زیرزمینی سفره ساحلی گراب بوراگ مراکش با استفاده از کد MODFLOW به‌عنوان بخشی از سیستم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در GMS برای بازگرداندن سطح آب به حد ایمنی. با نتایج به‌دست‌آمده از سناریوها کاهش سطح پیزومتری ۵/٤۲ متری را در مساحت ١٤ کیلومترمربع با اعمال پمپاژ ۳۰۰ لیتر بر ثانیه بر روی ۱۰ حلقه چاه با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه امکان‌پذیر ساخت (١٦). المهیلان و همکاران (۲۰۲۰)، آنان در این پژوهش از کد MODFLOW برای شبیه‌سازی سفره آبخوان مدولار که با چالش‌های شرایط مرزی نامشخص مواجه است پرداختند. در نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان می‌دهد پمپاژ آب در این منطقه که با خطر کاهش سطح ایستابی مواجه هست می‌تواند در ۵۰ سال آینده ۱۰۵ متر کاهش سطح ایستابی را به همراه داشته باشد. حفاظت از میزان پمپاژ آب موجود می‌تواند تأثیر بر کاهش آبخوان را ۳۳٪ کاهش دهد (۱۷). جالوت (۲۰۲۰)، با استفاده از کد MODFLOW با شبیه‌سازی ناپایدار نشان دادند که در ده سال آینده کاهش تراز را خواهند داشت. هم‌چنین مدل نشان داد که حداکثر مقادیر برداشت از دو منطقه کنان و بهریز بسیار زیاد است و باید تصمیمات مدیریتی اتخاذ شود (۱۸). چاکرابورتی و همکاران (۲۰۱۹) که در بنگال غربی در هند انجام‌شده داده‌های تخلیه چاه‌های پمپاژ از آب‌های زیرزمینی در دوره‌های مختلف بررسی و شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که جریان آب‌زیرزمینی از جهت جنوب به شمال‌شرق دشت است؛ زیرا نفوذ آب‌شور از دریای مجاور به سفره‌های زیرزمینی به سمت جهت داخلی صورت می‌گیرد (۱۹).

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی ریاضی آبخوان دشت میاندوآب به‌عنوان بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین آبخوان شمال غرب کشور تحت‌تأثیر سد شهید کاظمی بوکان و شبکه آبیاری و زهکشی ٦٥٠٠٠ هکتاری دشت میاندوآب و دو رودخانه زرینه و سیمینه‌رود در راستای اخذ سیاست‌های جدید که از سال ۱۳۹۳ اجرا می‌شود پرداخته شده است. شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی توسط کد ریاضی «MODFLOW» تهیه گردیده و سناریوهای مطرح در منطقه به‌صورت ریاضی مدل‌سازی شده است.

مواد و روش‌ها

آبخوان آبرفتی دشت میاندوآب در استان آذربایجان‌غربی بزرگ‌ترین آبخوان حوضه آبگیر دریاچه ارومیه است که به‌طور عمده توسط رودخانه‌های زرینه‌رود، سیمینه‌رود، لیلان چای و مردق‌چای تغذیه می‌شود. آبخوان آبرفتی دشت میاندوآب با موقعیت جغرافیایی ″۴۰ ′۵۰ °۳۶ تا ″۳۰ ′۵۰۱۳ °۳۷ عرض شمالی و ″۲۰ ′۴۵ °۴۵ تا ″۴۰ ′۱۵ °۴۶ طول شرقی با وسعتی حدود ۱۱۴۵ کیلومترمربع در جنوب دریاچه ارومیه و محدوده استان آذربایجان‌غربی قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت میاندوآب نشان‌داده‌شده است. آب‌نمود واحد آبخوان نشان می‌دهد که متوسط تراز فعلی آب‌زیرزمینی حدود ۲/۷ متر کم‌تر از تراز متعادل سطح آبخوان تا پیش از سال ۱۹۹۸ است. جهت بررسی تأثیرات کاهش ۴۰ درصدی آب سطحی بر منابع آب‌زیرزمینی دشت میاندوآب از اطلاعات سطح آب‌زیرزمینی، ضریب ذخیره، ضریب قابلیت انتقال دشت میاندوآب و میزان برداشت آب‌زیرزمینی و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری که به تعداد زیاد در دشت موجود است از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌غربی در یک دوره ۱۸ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۲) استفاده‌شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه موردمطالعه: دریاچه ارومیه، رودخانه زرینه و سیمینه، آبخوان و شبکه آبیاری میاندوآب.

Figure 1. The location map of the study area: Lake Urmia, Zarineh and Simineh river basin, Miandoab aquifer and Irrigation Network.

- مراحل مدل‌سازی آبخوان دشت میاندوآب

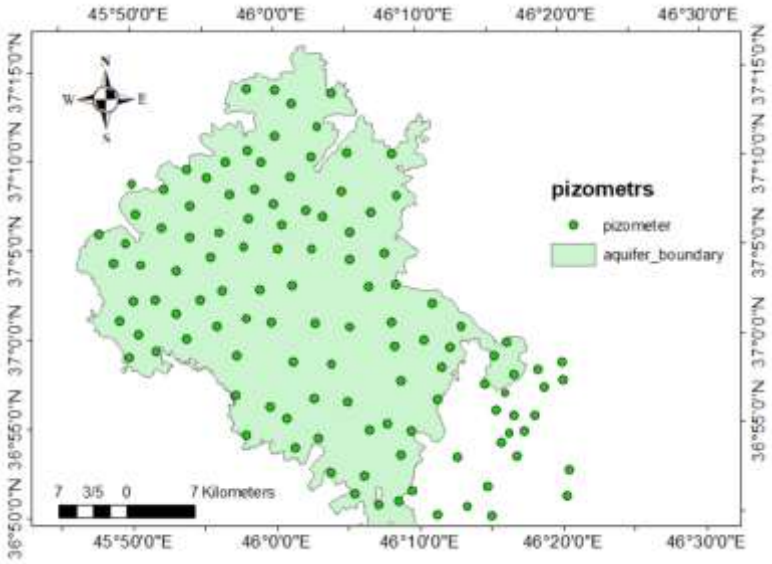
۱- مدل مفهومی: به‌منظور تهیه مدل مفهومی آبخوان دشت میاندوآب اطلاعات لازم مانند اطلاعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدرولوژی، لاگ‌های حفاری و مطالعات ژئوفیزیکی برای محدوده موردنظر تهیه شد و پس از بررسی و تصحیح و تکمیل داده‌ها، به مدل معرفی شدند.

۲- انتخاب کد کامپیوتری: برای تهیه مدل مفهومی و مدل عددی آبخوان دشت میاندوآب در GMS از کد عددی MODFLOW استفاده‌شده است.

۳- اعمال سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری: آمار و اطلاعات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای و منابع بهره‌برداری (چاه، چشمه، قنات) در محدوده مطالعاتی آبخوان دشت میاندوآب از ۲۰۱۱ تا

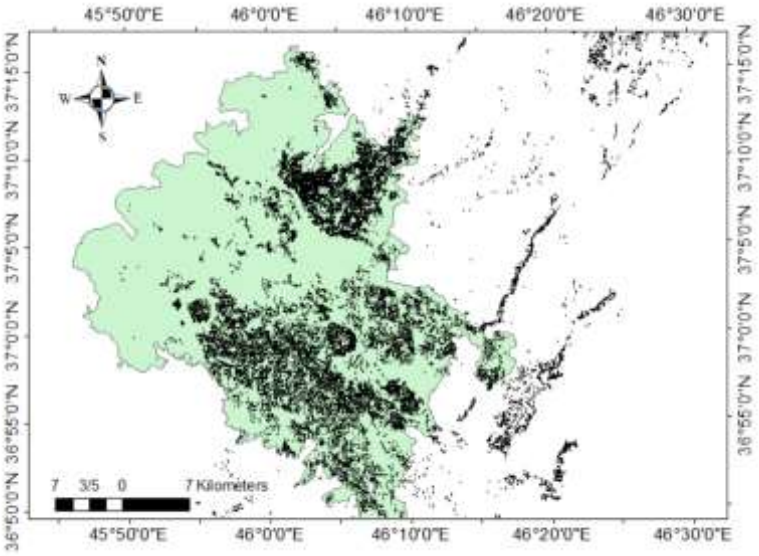
سال ۲۰۲۰ از طریق سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان‌غربی تهیه شد و پس از تصحیح و تکمیل داده‌ها مورداستفاده قرار گرفت. تراز آب‌زیرزمینی میاندوآب توسط حدود ۱۲۰ چاه مشاهداتی کنترل می‌گردد. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۲ نشان داده‌شده است و شکل ۳ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری آبخوان دشت میاندوآب را نشان می‌دهد.

هیدروگراف ۵ ساله آبخوان نشان می‌دهد که به‌طور متوسط حدود ۰/۵ متر افت داشته است که این مقدار به متوسط سالانه افتی در حدود ۰/۱ متر هست. روند نزولی تراز آب‌زیرزمینی نشان می‌دهد که اگر تصمیمات مدیریتی مناسبی اتخاذ نگردد در آینده نزدیک دچار مشکلات جدی در این آبخوان شاهد خواهیم بود.



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای محدوده مطالعاتی آبخوان دشت میاندوآب ورودی به مدل GMS.

Figure 2. The location of observation wells in the study area of Midandoab aquifer input to GMS model.



شکل ۳- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری محدوده مطالعاتی آبخوان دشت میاندوآب.

Figure 3. The location of exploitation wells in the study area of Midandoab aquifer.

٤- تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان: با توجه به نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی در دشت میاندوآب و بررسی و تجزیه‌وتحلیل ارقام آزمایش، ضرایب قابلیت انتقال از روش‌های تیس، ژاکوب و آبدهی مخصوص، به‌دست آمدند و سپس نقشه قابلیت انتقال با پراکندگی مناسب در سطح محدوده مطالعاتی تهیه گردید. برای تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان و مقداردهی آن به سلول‌های شبکه مدل، می‌توان با توجه به رابطه ۱ و در دست داشتن قابلیت انتقال محاسبه‌شده در محل تعدادی از چاه‌های اکتشافی و یا نقشه‌های هم قابلیت انتقال و مقادیر عمق سنگ‌بستر، یک برآورد اولیه هدایت هیدرولیکی در مدل و مقداردهی انجام داد.

$$T = K * b \rightarrow K = \frac{T}{b} \quad (\text{m/day}) \qquad (1)$$

٥- اعمال تغذیه آبخوان: برای شبیه‌سازی مدل، مقدار تغذیه طبیعی توسط بسته نرم‌افزاری تغذیه آب‌زیرزمینی (Recharge Package) در زیرمجموعه مدل مفهومی به مدل اعمال شد. منابع اصلی تغذیه آبخوان دشت میاندوآب شامل نفوذ مستقیم از ریزش‌های جوی، تغذیه از نفوذ آب‌های جاری و تغذیه از آب برگشتی کشاورزی، صنعت و شرب در سطح دشت، می‌باشند. میزان نزولات جوی در آبخوان شهر میاندوآب در سال آبی ۲۰۱۱-۲۰۱۰، ۲۷۵/۸ میلی‌متر بوده است که در سطح ۱۳٤٦ کیلومترمربع حجمی برابر با ۳۷۱/۲۳ میلیون مترمکعب ایجاد می‌کند و هم‌چنین میزان نفوذ از بارندگی ۱۵/٤ mcm است. میزان رواناب دشت ۳۳/۷۵ mm و حجم ۳۱/۹۷ mcm هم‌چنین بر طبق محاسبات انجام‌شده از این میزان نفوذ از جریان سطحی دشت سالانه ۷۵/٤۸ میلیون مترمکعب است. یکی از عوامل تغذیه ناشی از نفوذ از جریان‌های سطحی مربوط به رودخانه است که میزان تغذیه از این رودخانه حدود ۲۳/۷۵ میلیون مترمکعب برآورد گردیده و از طریق (Recharge River) به مدل واردشده است. هم‌چنین با احتساب ضریب ۱۷٪ برای برگشت آب از مصارف کشاورزی، درصد برای برگشت آب از مصارف شرب و صنعت به‌عنوان تغذیه در مدل استفاده‌شده است.

٦- شبکه‌بندی آبخوان: شبکه‌بندی مدل به‌صورت ۵۰۰*۵۰۰ تهیه و در مدل اعمال شد.

۷- اعمال توپوگرافی سطح زمین و سنگ‌بستر آبخوان به محدوده مدل مطالعاتی: نقشه توپوگرافی سطح آبخوان با استفاده از داده‌های DEM و ارتفاع مطلق محل سوندژهای ژئوالکتریکی و پیزومترها، در GIS استخراج شد و سپس به‌صورت فایل Txt به مدل MODFLOW وارد گردید و سپس در GMS، با مدول Scatter point، با روش درون‌یابی کریگینگ به یک سطح پیوسته تبدیل شد (شکل ٤). نقشه رقومی سنگ کف آبخوان هم با توجه به مطالعات ژئوالکتریک و مشخص بودن ارتفاع مطلق سنگ کف در محل سوندژها و تطابق این ارتفاع با ستون چینه‌شناسی چاه‌های منطقه، ساخته شد و برای تمامی بلوک‌ها درون‌یابی گردید. شکل ۵ رقوم ارتفاعی سنگ‌بستر آبخوان میاندوآب را نشان می‌دهد.

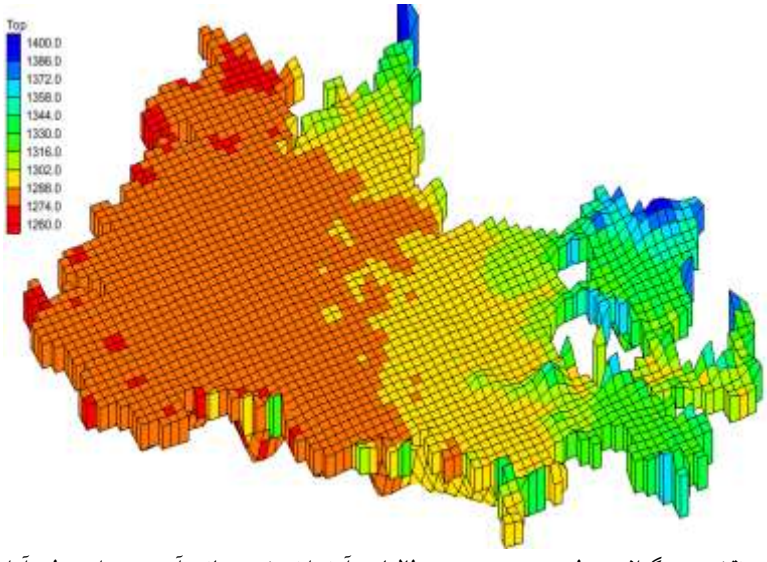
۸- اعمال شرایط مرزی به مدل مطالعاتی: با توجه به همسایگی دشت میاندوآب با دریاچه ارومیه در شمال‌غربی دشت موردنظر این دشت شیب ملایمی به‌سمت دریاچه داشته و از سمت جنوب‌شرقی و شرق با توجه به وجود دامنه رشته‌کوه‌ها تغذیه می‌شود. شرایط مرزی در آبخوان میاندوآب مطابق شکل ٦ براساس تحلیل خطوط هم‌پتانسیل آب‌زیرزمینی مشخص شد. با توجه به تغذیه آبخوان از

محدوده‌های مجاور و تخلیه آب‌زیرزمینی به دریاچه ارومیه، مرزهای ورودی و خروجی جریان طبق محاسبات بیلان آب‌زیرزمینی با دبی ثابت (مرز نیومن) به مدل وارد شد.

۹- اجرای مدل و انجام فرایند واسنجی برای حالت پایدار برای مهر ۱۳۸۹ صورت گرفت و در ادامه برای ۵۰ گام ماهانه از آبان ۱۳۸۹ فرایند اجرا و واسنجی در حالت ترانزینت (ناپایدار) صورت گرفت و برای ۳۰٪ دوره ۱۰ ساله، فرایند صحت سنجی انجام شد. درنهایت پس از تحلیل حساسیت مدل، برای چهار سطح کاهش برداشت ۵، ۱۰ و ۲۰ و ٤٠ درصد، نتایج استخراج گردید.

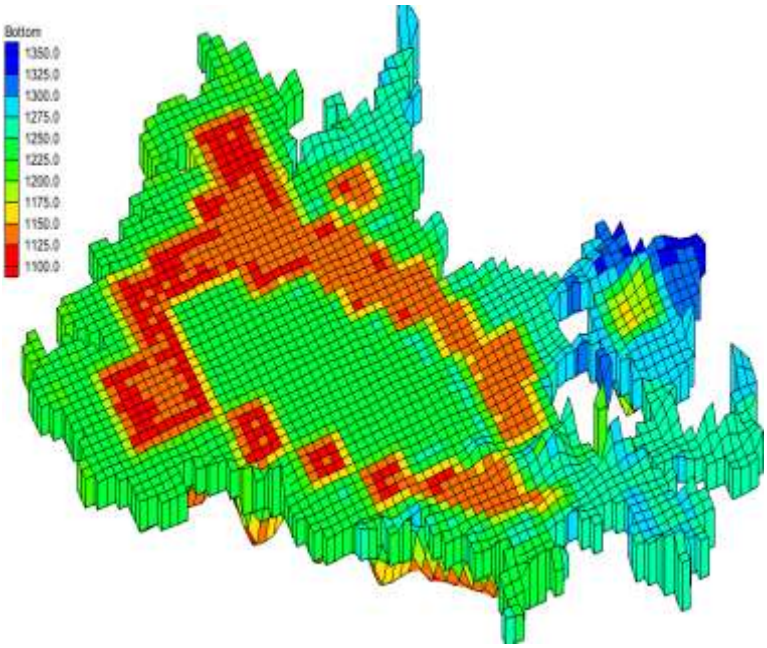
نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج فرایند واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برای حالت پایدار و ناپایدار و سپس فرایند تحلیل حساسیت و درنهایت نتایج سناریوهای اعمال‌شده ارائه می‌شود. در اولین گام، مدل‌سازی برای حالت پایدار برای مهرماه سال ۱۳۸۹ انجام شد که نتایج آن، به‌صورت بصری برای پیزومترها مطابق شکل‌های ۷ و ۸ است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تعدادی از میله‌های رنگی پیزومترها داری خطا بوده و به رنگ قرمز و زرد می‌باشند و تعدادی هم بدون خطا و به رنگ سبز هستند. به‌منظور بهینه شدن پارامترهای مدل‌سازی و کم شدن مقدار خطا در حالت پایدار، واسنجی به روش سعی و خطا صورت گرفت و مدل بهینه گردید. شکل ۹ نشان‌دهنده نتایج نهایی واسنجی در حالت پایدار و شکل ۱۰ تراز آب به‌صورت بصری است و همان‌طور که مشاهده می‌شود همه میله‌ها در محدوده قابل‌قبول قرار دارند و با معیارهای کلی GMS برای محدوده خطا (اختلاف مشاهداتی و مدل شده زیر دو متر) همخوانی دارد.



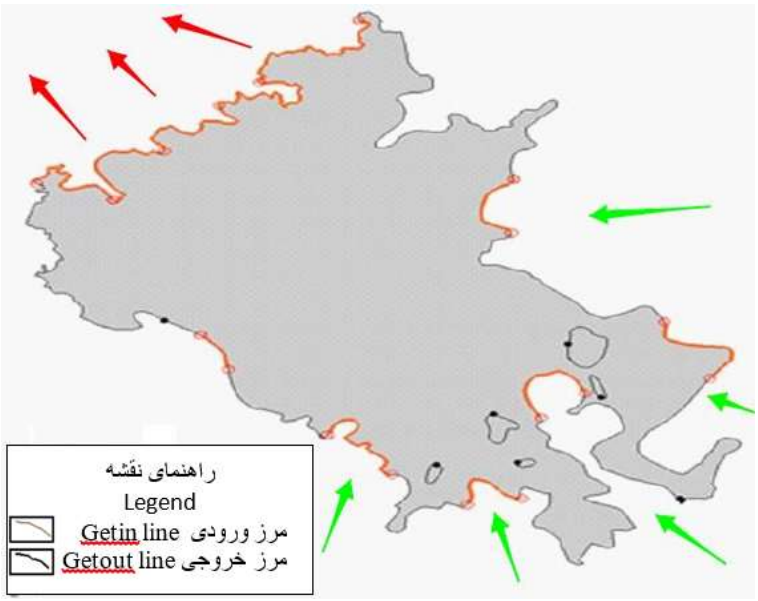
شکل ٤- نقشه توپوگرافی سطح زمین محدوده مطالعاتی آبخوان دشت میاندوآب- متر از سطح آزاد دریا.

Figure 4. Land surface topographic map of the Midandoab aquifer study area -meters above sea level.



شکل ۵- نقشه رقوم ارتفاعی سنگ‌بستر محدوده مطالعاتی آبخوان دشت میاندوآب- متر.

Figure 5. Altitude map of the bedrock of the Miandoab aquifer –meters.

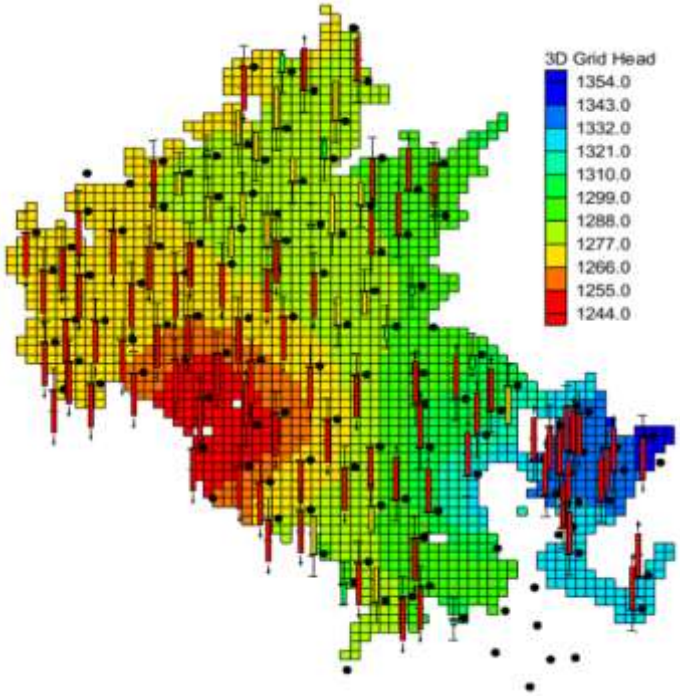


شکل ٦- شرایط مرزی- سبز: ورودی- قرمز: خروجی- محدوده مطالعاتی دشت میاندوآب.

Figure 6. Boundary conditions of the Miandoab plain in study area.

شکل ۷- موقعیت مکانی چاه‌های انتخابی از مدل مفهومی.

Figure 7. Location of selected wells in the conceptual model.



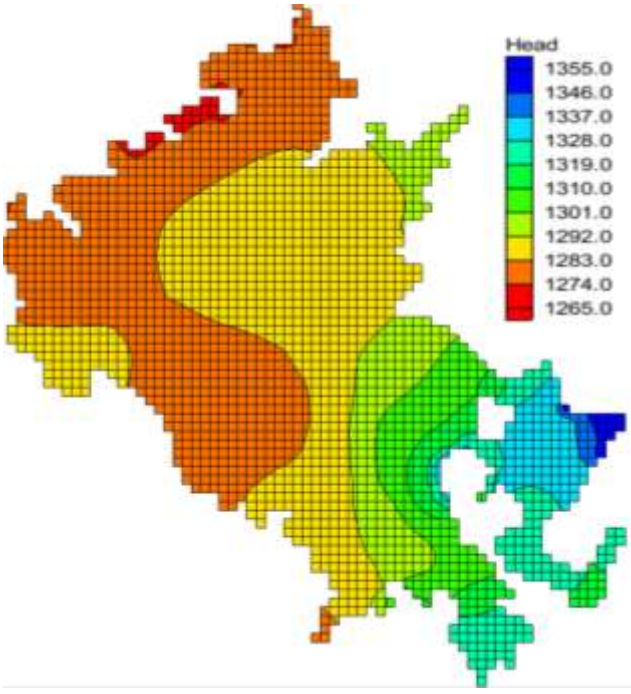
شکل ۸- نتایج پیزومترهای آبخوان میاندوآب قبل از مدل بهینه‌سازی در حالت پایدار.

Figure 8. Piezometer results of Meandoab aquifer before optimization model in steady state.

شکل ۹- نمایش نتایج بصری پیزومترهای آبخوان دشت میاندوآب در پایان واسنجی در شرایط پایدار.

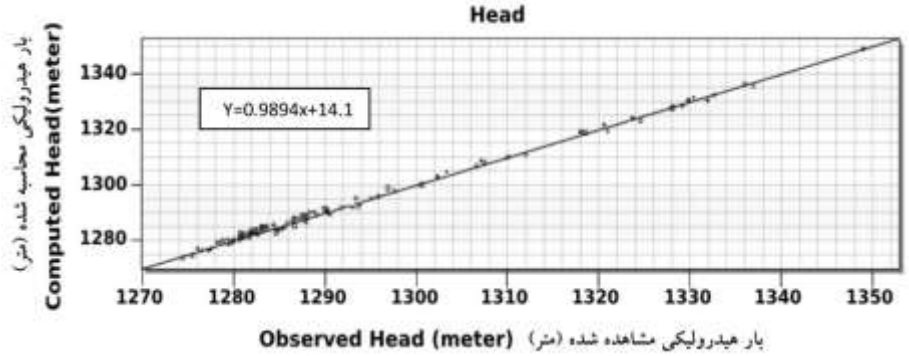
Figure 9. Display of visual results of piezometers of Miandoab aquifer at the end of calibration in steady state conditions.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده نتایج محاسباتی و مشاهداتی سطح آب‌زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی آبخوان دشت میاندوآب، در پایان مرحله واسنجی در حالت پایدار است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نتایج به‌طور قابل‌قبولی بر یکدیگر منطبق هستند و اختلاف کمی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی وجود دارد که این انطباق بین مقادیر و مقدار رگرسیون نزدیک یک و زیر سطح معنی‌داری ۱٪، دقت بالای شبیه‌سازی در حالت پایدار را تأیید می‌کند. خطای مدل در حالت پایدار بین ۰/۰۲ تا ۱/۹۸ متر است.



شکل ۱۰- تراز آب‌زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده آبخوان میاندوآب در حالت پایدار- متر از سطح آزاد دریا.

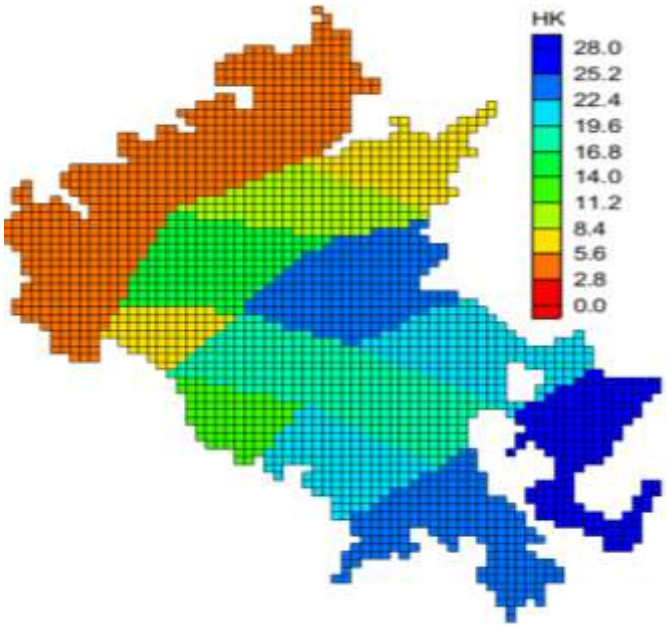
Figure 10. Simulated underground water level of Midandoab aquifer in steady state -meters above free sea level.



شکل ۱۱- نمودار مقادیر محاسباتی و مشاهداتی تراز آب‌زیرزمینی در تمامی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان دشت میاندوآب در مرحله واسنجی شرایط پایدار.

Figure 11. The graph of the calculated and observed values of the underground water level in all piezometric wells of the Meandoab Plain aquifer in the stable condition calibration stage.

به‌منظور ارزیابی صحت نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی مدل در شرایط پایدار، از میانگین خطاها استفاده می‌شود و نتایج خروجی به‌صورت جدول ۱ است. همان‌طور که در جدول زیر مشاهده می‌شود خطای RMSE برابر ۱/۰٤ متر است که در محدوده قابل‌قبولی است. هم‌چنین خطای میانگین مطلق (MAE) نیز ۰/۹۳ متر است. با توجه به جدول مذکور و نتایج آن نشان می‌دهد که مدل با دقت بسیار مناسبی توانسته مقادیر تراز را شبیه‌سازی کند. شکل ۱۲ مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی پس از واسنجی مدل را نشان می‌دهد. شمال آبخوان مقادیر هدایت هیدرولیکی مقادیری بین ۲/۵ تا ۳۰ متر در روز را دارا است. بیش‌ترین مقدار آن نیز در قسمت جنوب غربی آبخوان است که مقادیر آن از ۱٦/۵ تا ۲۹ متر در روز متغیر است. ناحیه مرکزی آبخوان نیز دارای مقادیر متوسط که از ۱٤ تا ۱٦ متر در روز متغیر است.



شکل ۱۲- مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی آبخوان- متر در روز.

Figure 12. Calibrated values of hydraulic conductivity of the aquifer -meters per day.

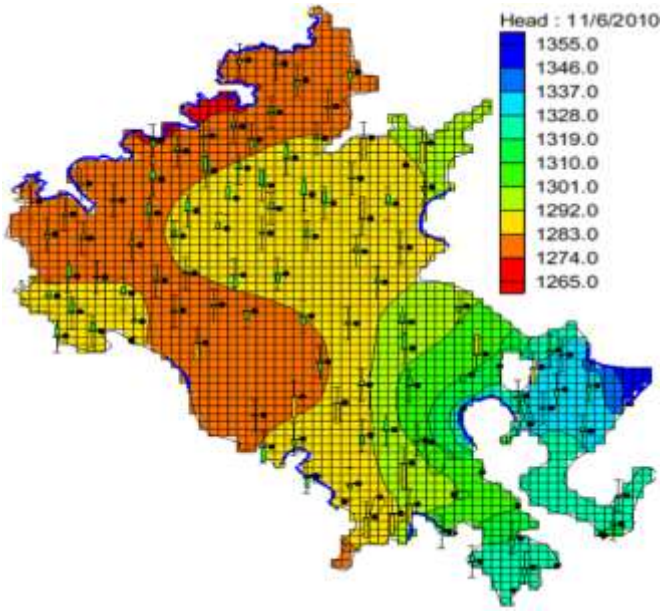
جدول ۱- نتایج معیارهای ارزیابی خطا برای حالت ماندگار.

Table 1. Results of error evaluation criteria for steady state.

	RMSE	MAE	R^2
حالت پایدار Steady state	1.04	0.93	0.99

- نتایج شبیه‌سازی تراز آب‌زیرزمینی در حالت ناپایدار: در حالت ناماندگار گام‌های مختلفی جهت واسنجی مدل انجام می‌گردد که به آن گام‌های زمانی حالت گذر یا ناپایدار[1] گفته می‌شود. در این پژوهش برای واسنجی مدل از ۵۰ گام زمانی ماهانه و از آبان سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰) در نظر گرفته‌شده است. شبیه‌سازی تراز آب‌زیرزمینی در تمام گام‌ها و برای همه چاه‌های مشاهداتی صورت گرفته است. شکل‌های ۱۳ و ۱٤ نمونه‌هایی از مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی چاه‌های مشاهداتی برای حالت نا ماندگار را به‌صورت توزیعی و سری زمانی نشان می‌دهند. ملاحظه می‌گردد که انطباق خوبی بین مقادیر ذکرشده برقرار است. در انتها و همانند حالت ماندگار، نتایج ارزیابی شاخص‌های ارزیابی خطا برای حالت نا ماندگار با دقت بسیار خوبی توانسته شبیه‌سازی را انجام دهد.

- نتایج بهینه کردن پارامتر ضریب ذخیره: ضریب ذخیره بین مقادیر ۲/۹ درصد تا ۲٤ درصد قابل‌تغییر است. بیش‌ترین مقادیر آبدهی ویژه مربوط به ناحیه جنوب‌غربی آبخوان است. جنوب‌شرقی آبخوان نیز دارای کم‌ترین مقادیر ضریب ذخیره است. مقادیر ضریب ذخیره در مرکز آبخوان از ۸/۵ درصد تا ۱۵ درصد متغیر است (شکل ۱۵). نتایج معیارهای ارزیابی در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ نشان داده‌شده است. نتایج بیانگر دقت مناسب مدل در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی است.

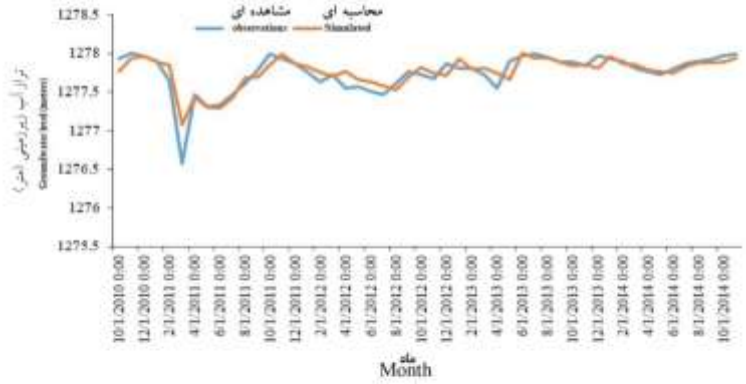


شکل ۱۳- تراز آب‌زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده در حالت نا ماندگار.

Figure 13. Simulated groundwater level in transient state.

1- Transient

چاه ۷



چاه ۱۰

چاه ۳٤

چاه ۷۸

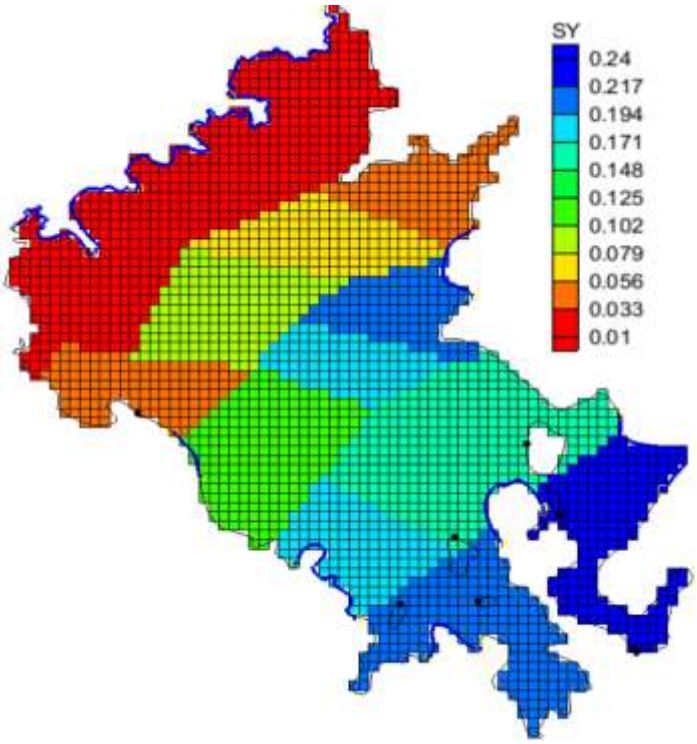
شکل ١٤- مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده در حالت نا ماندگار برای چاه‌های مختلف.

Figure 14. Simulated and observed values in transient state for different wells.

جدول ۲- نتایج ارزیابی معیار خطا برای حالت ناماندگار.

Table 2. Evaluation results of statistical criteria for transient state.

MAE(m)	R^2	RMSE (m)	
1.28	0.98	1.68	ناپایدار (دوره واسنجی) Transient (calibration period)
1.42	0.98	1.85	ناپایدار (دوره اعتبارسنجی) Transient (validation period)



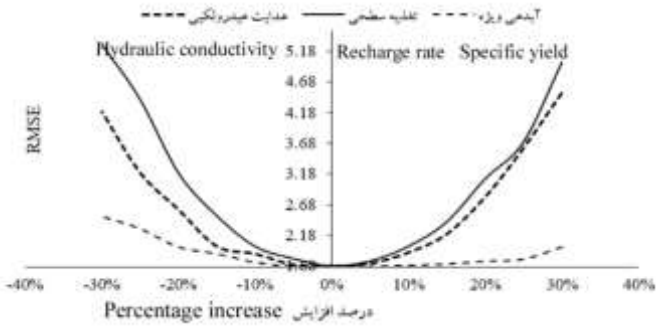
شکل ۱۵- مقادیر ضریب ذخیره واسنجی‌شده در حالت غیرماندگار.

Figure 15. Calibrated storage coefficient values in non-permanent mode.

نتایج تحلیل حساسیت مدل: در این پژوهش از پارامترهای مقدار هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و مقدار تغذیه از سطح برای تحلیل حساسیت استفاده گردید و با معیار خطای RMSE مورد ارزیابی قرار گرفتند نتایج تحلیل حساسیت در پارامترها به شکل ۱۶ است. باتوجه‌به شکل می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبیه‌سازی‌شده به مقدار تغذیه سطحی حساسیت بیش‌تری دارد به‌طوری‌که با تغییر مقدار آن خطای مدل در معیار ارزیابی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. هم‌چنین به مقدار هدایت هیدرولیکی نیز حساس است؛ اما کم‌ترین حساسیت را به آبدهی ویژه دارد طوری‌که در درصدهای مختلف تغییر چندانی نکرده است.

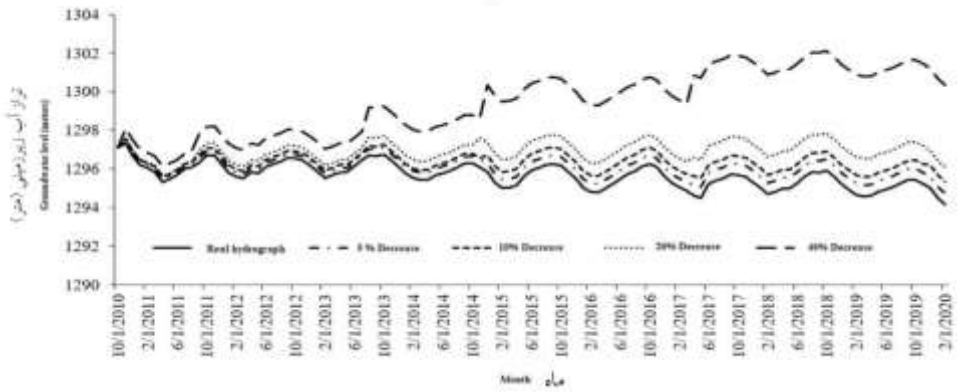
بررسی سناریوهای کاهش برداشت: برای بهبود شرایط آبخوان ازنظر کیفی و کمی و افزایش سطح تراز آب‌زیرزمینی سناریوهای کاهش برداشت اعمال‌شده است. مبنای انتخاب سناریوهای کاهش برداشت به‌این‌علت بوده است که یکی از المان‌های

تغییر در منطقه، مقدار آب مصرفی کشاورزان از آب‌زیرزمینی است. عملاً این سناریوها نماینده کلی روش‌های "به کاشت"، مدیریت برتر زراعی، تغییر الگوی کشت از محصولات پر آب‌بر به کم آب‌بر، ارتقا راندمان تحت تأثیر توسعه آبیاری نوین، پروژه ۸گانه تعادل بخشی آب‌زیرزمینی و ... است. با توجه به افت آبخوان که در شکل ۱۷ مشخص است ٤ سناریوی کاهش برداشت آب در سطح آبخوان به‌منظور تعادل‌بخشی مورداستفاده قرار گرفت. به‌منظور بهبود شرایط موجود سناریوهای کاهش برداشت در سطوح ۵، ۱۰، ۲۰ و ٤۰ درصد در همه چاه‌های بهره‌برداری منطقه اعمال گردید. بر این اساس شبیه‌سازی انجام و نتایج برای هیدروگراف کل آبخوان با توجه به نتایج نمودار مشخص است که بیش‌ترین تأثیر در کاهش افت آب‌زیرزمینی در تمام چاه‌های مشاهداتی کاهش ٤۰ درصد برداشت از آبخوان بوده است. در این سناریو با اعمال ٤۰ درصد کاهش برداشت آبخوان دارای خیز آب‌زیرزمینی در حدود ٦ متر در ۵ سال موردبررسی خواهد بود. کم‌ترین خیز آب‌زیرزمینی نیز برای سناریوی کاهش ۵ درصد برداشت از آبخوان بود که در آن در طول دوره موردبررسی حدود ۰/۵ متر موجب خیز آب‌زیرزمینی خواهد شد. علی‌رغم نتیجه بهتر کاهش برداشت ٤۰ درصد و تأثیر بسیار مثبت آن بر تراز آب زیرزمینی باید بررسی کرد اجرای این سناریو تا چه حد در حالت واقعی عملی خواهد بود.این سناریو عملاً زه‌داری بخشی از آبخوان را نشان می‌دهد و حساسیت دشت به سناریوهای غیرواقع‌بینانه را نشان می‌دهد. به‌عبارتی کشاورزان که مصرف‌کنندگان آن هستند تا چه حد موافقت اجرای این طرح خواهند بود که نیاز به بررسی و ارزیابی دارد. در سناریوهای واقع‌بینانه کاهش برداشت از آبخوان، تأثیر به‌سزایی در بالا آمدن سطح تراز آب‌زیرزمینی و هم‌چنین بالاتر رفتن کیفیت آب‌زیرزمینی با توجه به هم‌جواری با دریاچه ارومیه و ذخیره منابع آب‌زیرزمینی برای سالیان آینده می‌شود. با بالا آمدن سطح تراز آب‌زیرزمینی متعاقباً در سال‌های آینده شاهد ورود بیش‌تر آب به دریاچه ارومیه هستیم و نهایتاً به احیا این دریاچه کمک خواهد کرد. نتایج این پژوهش همخوانی خوبی با نتایج یاری (۲۰۱۸)، حمزه‌خوانی و همکاران (۲۰۱٤) و جنوبی و همکاران (۲۰۱۸) در فرایندها و نتایج ضرایب حاصله و عملکرد آبخوان را نشان می‌دهد. یاری (۲۰۱۸) در پژوهشی که بر روی آبخوان میاندوآب انجام داده با استفاده از کد MODFLOW به بررسی اثرات تغذیه و تخلیه از طریق آبیاری و زهکشی دشت با رودخانه زرینه‌رود پرداخته است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که وضعیت سطح ایستابی مطلوب و اختلاف زیادی بین مقادیر تغذیه و تخلیه دیده نمی‌شود ولی با افزایش بهره‌برداری از چاه‌های پمپاژ و بهره‌برداری سطح آبخوان حدود ۲ متر افت را تجربه خواهد کرد. پیش‌بینی ایشان از افت تراز ایستابی در سال‌های اخیر نسبتاً درست بوده است و با افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری سطح آبخوان افتی را در این سال‌ها تجربه کرده است (۲۰). نتایج جنوبی و همکاران (۲۰۱۸) در پیش‌بینی زه‌داری تحت سناریوی حدی کاهش آب با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (۲۱).



شکل ۱۶- تحلیل حساسیت پارامترهای موردنظر با معیار خطای RMSE.

Figure 16. Sensitivity analysis of the desired parameters with the RMSE error criterion.



شکل ۱۷- سناریوهای کاهش برداشت.

Figure 17. Harvest reduction scenarios.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به بررسی تأثیرات سیاست انقباضی دولت در قبال کاهش حق‌آبه سطحی در دشت میاندوآب و آبخوان این منطقه پرداخته شد. تغییرات کمی آبخوان میاندوآب با استفاده از GMS تحت کد MODFLOW قادر به شبیه‌سازی آبخوان میاندوآب و هم‌چنین تأثیرات کاهش حق‌آبه و تخصیص آب سطحی را دارد. مدل‌سازی آبخوان در حالت پایدار که از مهر ۱۳۸۹ شبیه‌ساز شده است که خطای RMSE در این حالت در حدود ۱ متر کاهش پیدا کرده است و هم‌چنین خطای RMSE در حالت ناپایدار به ۱/۶۸ متر کاهش پیدا کرده است. مقادیر هدایت هیدرولیکی در آبخوان بین ۳/۵ و ۲۸ متر در روز به‌علت موقعیت خاص آبخوان متغیر است. هم‌چنین مقادیر آبدهی ویژه در آبخوان بین ۳ تا ۲۴ درصد متغیر است. در تحلیل حساسیت مدل به این نتیجه رسیدیم که مدل به تغذیه سطحی بیش‌ترین حساسیت و برای آبدهی ویژه کم‌ترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد. باتوجه‌به این‌که مقدار افت متوسط تراز آب‌زیرزمینی حدود ۰/۱ متر در سال است به‌منظور تعادل بخشی به آبخوان و هم‌چنین راهکارهای مدیریتی سناریو کاهش برداشت از همه چاه بهره‌برداری اعمال‌شده است که با کاهش ۵٪ برداشت، آبخوان نیم متر افزایش سطح ایستابی را تجربه خواهد کرد. هم‌چنین باتوجه‌به این‌که دشت میاندوآب در محدوده حاصلخیز شمال‌غرب کشور جای گرفته است برداشت‌های غیرمجاز در این دشت به‌شدت بالا بوده و اطلاعات دقیقی از سطح برداشت

آب‌زیرزمینی در این دشت در اختیار نداشتیم. به‌منظور بهبود شرایط آبخوان میاندوآب راهکارها و پیشنهادهایی ارائه‌شده است: تغییر در الگوی کشت محصولات کشاورزی در آبخوان دشت میاندوآب باتوجه‌به این‌که سطح زیرکشت در این منطقه بسیار بالا است. نظارت بر برداشت‌هایی آب از چاه‌های پمپاژ و بهره‌برداری موردتوجه سازمان‌ها قرار گیرد. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی ازنظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار گیرد. سناریوهای مختلفی ازجمله بهینه‌سازی و تغییر الگوی کشت و هم‌چنین احداث زهکش در مناطقی که تبخیر از آبخوان زیاد است در جهت بهبود وضعیت آبخوان مورد ارزیابی قرار گیرد. از مدل‌های بهینه‌سازی یا نرم‌افزارهایی برای جهت بهینه‌سازی برداشت بهینه‌سازی آب‌زیرزمینی به‌منظور کاهش افت تراز آب‌زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد. نصب کنتورهای هوشمند و کنترل مستمر در سطح دشت می‌تواند؛ مانند دشت بشریه خراسان تأثیر مثبتی بر کاهش افت سطح آب‌زیرزمینی و بهبود کسری مخزن تجمعی داشته است (۱۰).

تقدیر و تشکر

از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی، دفتر مطالعات پایه منابع آب و مهندس نصیری در اشتراک‌گذاری داده‌ها قدردانی می‌گردد.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

در پژوهش حاضر که حاصل پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد است از داده‌های مطالعات پایه منابع آب استان استفاده‌شده است. داده‌های خام، با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل‌دسترسی است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجوی مقطع کارشناسی‌ارشد است و همه موارد پیاده‌سازی مراحل کار با ایشان بوده است. نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه و مسئول مکاتبات در هدایت کار در مراحل انجام پژوهش و نگارش نهایی مقاله مشارکت داشته‌اند، نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه در همه موارد انجام پژوهش نظارت و در بازبینی مقاله مشارکت داشته‌اند.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت معنوی معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه ارومیه در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول برخوردار بوده است. مطالعه حاضر بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب نویسنده اول است.

منابع

1. Chitsazan, M., & Kashkoli, H. A. (2002). Ground Water Modeling and Solving Hydrogeological Problems Ahvaz Shahid Chamran University Press. 680p. [In Persian]
2. Shamsaei, A., & Farghani, A. (2013). integrated use of surface and underground water resources in dry areas. *Scientific-research journal of water resources research in Iran*. 7-20.
3. Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2022). Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOWNWT

Model (Case Study: Mahabad Plain). *Journal of Water and Soil*. 36 (1), 31-52. [In Persian with English abstract]. **DOI:10.22067/JSW.2022.74890.1138.**

4. Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, J., & Abbaspour, K. (2018), Investigation of quantitative changes in the groundwater table of Miandoab plain affected by surface and groundwater resources management using the MODFLOW-NWT mathematical model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49 (2), 467-481. **doi: 10.22059/ ijswr.2017.239340.667731.**
5. Karamati, M., & Saeed, A. (2007). Simulation and sensitivity analysis of groundwater level with MODFLOW model, 7th Iran Hydraulic Conference, Tehran, Iran Hydraulic Association, Water and Power Industry University. 15-25.
6. Mirabbasi, R., & Rahnama. (2016). Simulation of Sirjan plain aquifer using MODFLOW model and investigation of the effects of construction of Tangouye dam on it, *Iranian Water Research Journal*, first year, first issue. 4-10.
7. Hosni, F., & Seyyed, J. (2015). Simulation of the effects of the construction of Gaoshan dam on the amount of groundwater loss downstream of the dam using MODFLOW software, the third international conference on new research achievements in civil engineering, architecture and urban management, Tehran, International Confederation of Inventors of the World (IFIA), *University of Applied Sciences*. 10-15.
8. Aghaari, E., & Iraj, S. (2014). Hydraulic simulation of underground water flow in Zarinabad Goltepe plain in Zanjan province using MODFLOW model, 13th Iran Hydraulics Conference, Tabriz, Tabriz University - Department of Water Engineering. 40-50.
9. Jabari, S., Sadradini, A., Nazimi, A., & Taran, F. (2014). Investigating the quantitative changes of coastal aquifers using a mathematical model-case study: Maragheh-Banab Plain, 13th Iran Hydraulic Conference, Tabriz, Tabriz University-Department of Water Engineering. 12-20.
10. Shamsaei, A., & Farghani, A. (2013). integrated use of surface and underground water resources in dry areas. *Scientific-research journal of water resources research in Iran*. 7-14.
11. Yari, P., Karimi, S., & Dadmehr. (2013). the response of the underground water resources system model of the Zarineh Rood plain to possible feeding and discharge factors through the irrigation and drainage network of the plain". The 4th Iran Water Resources Management Conference, Amir Kabir University. 20-30.
12. Akbarpour, A., Azizi, M., & Shirazi, M. (2010). Management of exploitation of underground water in Mukhtaran Plain, 9th Iran Hydraulic Conference, Tarbiat Modares University. 12-20.
13. Chepkemoi, A., Home, F., Raude, S., & Kiptum, T. (2023). Modeling of groundwater potential in Kericho County, Kenya, using GMS_MODFLOW. **https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01492.**
14. Hidalgo, S., Guardiola, A., & Heredia, C. (2021). Selecting Suitable MODFLOW Packages to Model Pond–Groundwater Relations Using a Regional Model. Water, 13, 1111. **https://doi.org/10.3390/w13081111.**
15. Xiang, Z., Bailey, R., Nozari, S., Husain, Z., Kisekka, I., Sharda, V., & Gowda, P. (2020). DSSAT MODFLOW: A new modeling framework for exploring groundwater conservation strategies in irrigated areas. *Agricultural Water Management, Elsevier*, 232(C). **DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106033.**
16. Lyazidi, R., Mohamed Abdelbaset Hessane, M., Jaouad Filali Moutei, J., & Bahir, M. (2020). Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the groundwater modeling system. Groundwater for Sustainable Development 11 (3-4), 100471. **doi:10.1016/j.gsd.2020.100471.**
17. Almuhaylan, M., Ghumman, A., Saleh Al-Salamah, I., Ahmad, A., & Ghazaw, Y. (2020). Evaluating the Impacts of Pumping on Aquifer Depletion in Arid Regions Using MODFLOW, ANFIS and ANN. Water, 12(8), 2297; **https:// doi.org/ 10.3390/w12082297.**

18. Jalut, Q. (2020). Modelling of Groundwater Flow of Baquba District Area, Diyala Governorate, North-East, Iraq. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 13 (3), 9-22. **doi:10.24237/ djes.2020.13302.**
19. Chakraborty, S., Maity, P., & Das, S. (2019). Investigation, simulation, identification and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. *Environ. Dev. Sustain*. 22, 3805-3837. **https://doi.org/10.1007/ s10668-019-00344-1.**
20. Yari, E. (2018). The interaction of the irrigation and drainage network of Miandoab Plain (Zarine River) with the model of underground water resources of the plain, master's thesis, Urmia University.
21. Jonubi, R., Rezaverdinejad, V,. behmanesh, J., & Abbaspour, K. (2018). Investigation of quantitative changes in the groundwater table of Miandoab plain affected by surface and groundwater resources management using the MODFLOW-NWT mathematical model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49 (2), 467-481. **doi: 10. 22059/ijswr.2017.239340.667731.**