



Assessment of the sustainability indicators of groundwater resources (case study of Mahidasht aquifer)

Ali Fattahi Chaghabaghi¹ , Ali Mohammad Akhund Ali² , Arash Azari³ 

¹ Ph.D student, water resources engineering, Department of Hydrology and Water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ali.fattahi.ch@gmail.com

² Corresponding Author, professor, Department of Hydrology and Water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: aliakh@scu.ac.ir

³ Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: arashazari.ir@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

Groundwater is a limited and vulnerable resource that is reversible in the conditions of balance between nutrition and extraction. Mahidasht plain of Kermanshah province, which in the past was one of the most fertile and vast plains in the west of Iran, the trend of decreasing groundwater, especially in recent years, is quite evident.

Methodology

It has been tried in this article by using Mahidasht plain underground water modeling using ModFlow model, Mahidasht plain underground water stability based on analysis of the current situation and four management scenarios (scenario of continuation of the current trend, scenario of adjustment of permits and reduction of 30 The percentage of underground water extraction, the scenario of removing unauthorized wells and adjusting the permits and reducing the extraction of underground water by 40 percent and the scenario of increasing the extraction of underground water and developing unauthorized cultivation) should be investigated.

Results and discussion

The results show the unstable situation of the Mahidasht aquifer, and the application of the management scenario of 30-40% reduction in groundwater extraction will not stabilize the central areas of the aquifer.

Conclusions

The unstable situation of this plain means many social, economic, political, security and environmental risks. In other words, this plain, more than ever, wants to control the harvest and should be prioritized in the water scarcity adaptation programs of politicians, planners, managers and all water guarantors in the region and removed from the list of susceptible areas for agricultural development. It is recommended to follow the principles of quality sustainability of the aquifer, and encourage farmers to change the harvesting pattern from agriculture to industry with incentive policies.

Keywords: Groundwater, Mahidasht aquifer, GMS Model, Resiliency

Article Type: Research Article

Article history: Received: 01 May 2023 Revised: 26 June 2023 Accepted: 18 July 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Fattahi Chaghabagi, A., Akhund Ali, A.M., & Azari, A. (2023). Assessment of the sustainability indicators of groundwater resources (case study of Mahidasht aquifer), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 1-14. DOI:10.22126/ATWE.2023.9082.1050

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارزیابی وضعیت شاخص های پایداری منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان ماهیدشت)

علی فتاحی چقباگی^۱، علی محمد آخوندعلی^۲، آرش آذری^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. رایانامه:

ali.fattahi.ch@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استاد، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. رایانامه: aliakh@scu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: arashazari.ir@gmail.com

چکیده

آب‌های زیرزمینی منابعی محدود و آسیب پذیرند که در شرایط تعادل بین تغذیه و استحصال برگشت پذیر هستند. دشت ماهیدشت استان کرمانشاه که در گذشته به عنوان یکی از حاصلخیزترین و پهناورترین دشتهای غرب ایران بوده است، روند رو به کاهش آب زیرزمینی به ویژه در سال‌های اخیر کاملاً مشهود است. سعی شده است در این مقاله با بهره گیری از مدل سازی آب زیرزمینی دشت ماهیدشت با استفاده از مدل ModFlow، پایداری آب زیرزمینی دشت ماهیدشت بر مبنای تحلیل وضعیت موجود و چهار سناریوی مدیریتی (سناریو ادامه روند کنونی، سناریو تعدیل پروانه‌ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، سناریو حذف چاه‌های غیرمجاز و تعدیل پروانه‌ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی و سناریو افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز) با استفاده از شاخص GSI مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بیانگر وضعیت ناپایدار آبخوان ماهیدشت است و اعمال سناریو مدیریتی بصورت کاهش ۳۰ و ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی نیز مناطق مرکزی آبخوان را پایدار نخواهد کرد و در بالاترین حالت ممکن شاخص مذکور ۰/۶ خواهد بود. وضعیت ناپایدار این دشت بیش از هر زمان، نیاز به کنترل برداشت داشته و باید در اولویت برنامه‌های سازگاری با کم آبی سیاستمداران، برنامه ریزان، مدیران و همه گروداران آب منطقه قرار گرفته و از فهرست مناطق مستعد توسعه کشاورزی حذف گردد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان ماهیدشت، مدل GMS، بازگشت پذیری

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۱ اسفند ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۵ تیر ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۷ تیر ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: فتاحی چقباگی، ع، آخوندعلی، م.ع، و آذری، آ. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت شاخص های پایداری منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان ماهیدشت)، فناوری

های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۱-۱۴. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9082.1050



مقدمه

اهمیت روزافزون منابع آب زیرزمینی به عنوان در دسترس ترین منابع آب شیرین در کشورهای خشک و نیمه خشک بر همگان آشکار است. به گزارش یو اس جی اس¹، از یک درصد سهم آب شیرین موجود بر کره خاکی، نود و نه درصد آن مختص آب زیرزمینی و یک درصد باقیمانده سهم دریاچه ها و رودخانه ها است. فراوانی ظاهری این منبع نسبت به دیگر منابع آب شیرین و سهولت دسترسی به آن با بهره گیری از فناوری های نوین نظیر پمپاژ و ...، باعث شده است سهم برداشت از این منبع بر سهم تغذیه طبیعی آن سبقت گیرد و تعادل و پایداری آن را با چالش مواجه سازد. در صورت ادامه این روند، وقوع بحران آب دور از انتظار نیست. افت سطح آب زیرزمینی برای چندین دوره متوالی، می تواند از نشانه های شروع دوران بحرانی برای آب باشد. وضعیتی که در آن آب در دسترس در یک حوضه آبخیز از میزان آب مورد تقاضا برای رفع نیازهای آبی کمتر باشد (طاهری و علیزاده، ۱۳۹۰). بهره برداری از منابع آب به ویژه منابع آب زیرزمینی و تامین آب مورد نیاز بخش صنعت، کشاورزی و شرب امری ضروری است. اما میزان برداشت از آن باید فراخور توان آبخوان و به عبارتی پایدار باشد. از این رو شاخص هایی تعریف شده اند که می توان با بهره گیری از آن ها وضعیت میزان برداشت از این منابع را سنجید. ارزیابی پایداری آبخوان ها در برابر تهدیدها، تنش ها و وقایع کنونی به منظور حفظ و بقای آن ها لازم و ضروری است. دغدغه محققین به ویژه در سال های اخیر، دستیابی به روش های علمی و برگرفته از وضعیت واقعی آبخوان برای توصیف و تحلیل پایداری منابع آب بوده است. شاخص هایی که بیانگر عملکرد سیستم باشند و در آن آب مورد نیاز و مقدار آب تامین شده برای مصرف کننده یا کاربر آب یا یک منبع آب (همانند مخازن آب زیرزمینی که تأمین کننده نیاز شرب، صنعت یا کشاورزی است)، مورد بررسی قرار گیرد (کمالی و نیک سخن، ۱۳۹۶). شاخص هایی که با بهره گیری از متغیرهای قابل درک و اندازه گیری برای معرفی وضعیت سیستم سودمند باشند. بنابراین شاخص های بسیاری در این زمینه در سراسر دنیا متناسب با داده های در دسترس معرفی شده اند (سامانی و همکاران، ۱۳۹۹). شاخص هایی نظیر آسیب پذیری^۲، اطمینان پذیری یا قابلیت اعتماد^۳ و بازگشت پذیری^۴ بر مبنای واقعیت مصرف آب، تامین آب و میزان آب موجود توسط پژوهشگران تعریف شده اند که با توجه به شرایط منطقه، داده های موجود و پژوهش های صورت گرفته در مناطق مشابه در این مقاله از آن ها بهره گرفته شده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال های اخیر همگام با توسعه بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، بررسی وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی مورد توجه سیاستگذاران و برنامه ریزان حوزه آب واقع شده است. تلاش جمعی از پژوهشگران، کارشناسان و متخصصان حوزه آب از سال ۲۰۰۷ تا کنون منتهی به توسعه مجموعه ای از شاخص های آب زیرزمینی شده است که به فراخور مکان، زمان و داده های موجود شاخص هایی برای تحلیل شرایط و وضعیت منابع آب زیرزمینی معرفی شده است (لیپونن^۵، ۲۰۰۷). هدف و غایت این شاخص ها کمک به ذینفعان و تصمیم گیرندگان برای دستیابی به پایداری واقعی است. نکته حائز اهمیت این است که تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با روند کندی اتفاق می افتد و ممکن است سرعت آن به قدری آهسته باشد که گروه داران آب با آن سازگار شده و تغییرات را عادی و طبیعی قلمداد نمایند. بنابراین ارزیابی تغییرات و رفتار سیستم سفره های آب زیرزمینی طی زمان، امری ضروری و غیرقابل اجتناب است. در دهه های گذشته، شبیه سازی آبخوان و در نظر گرفتن سناریوهای مدیریتی مختلف (نظیر ادامه روند فعلی، کاهش برداشت و یا افزایش برداشت) مورد توجه پژوهشگران بوده است تا بتوانند با بهره گیری از فناوری های نوین، وضعیت منابع آب زیرزمینی را در آینده - ای نه چندان دور، جهت اخذ تصمیمات مهم مدیریتی تبیین نمایند. برای مثال، با استفاده از شاخص های ارزیابی منابع آب به تحلیل در مورد مباحثی نظیر تغذیه آب زیرزمینی، بیلان، ارتباط هیدرولیکی آب های زیرزمینی با منابع آب سطحی، کیفیت این منابع، کاهش سطح آب زیرزمینی، وضعیت پراکنش و توزیع چاه های مشاهداتی شبکه سنجش منابع آب زیرزمینی، آسیب پذیری ذاتی، کاربری زمین و اثرات تغییر آن، مباحث فرونشست زمین و دیگر مباحث مشابه پرداخته شده است که در ادامه به برخی از این پژوهش ها اشاره شده است (سامانی و همکاران، ۱۳۹۹).

قربانی و همکاران (۱۳۹۱) خطر ناپایداری منابع آب زیرزمینی در دشت داراب استان فارس را با استفاده از تحلیل داده های آب زیرزمینی و شاخص های پایداری اعلام نمودند. حافظ پرست و فاطمی (۱۳۹۵) با بهره گیری از شاخص های پایداری منابع آب در مقیاس

1 United States Geological Survey

2 Vulnerability

3 Reliability

4 Resiliency

5 Lipponen

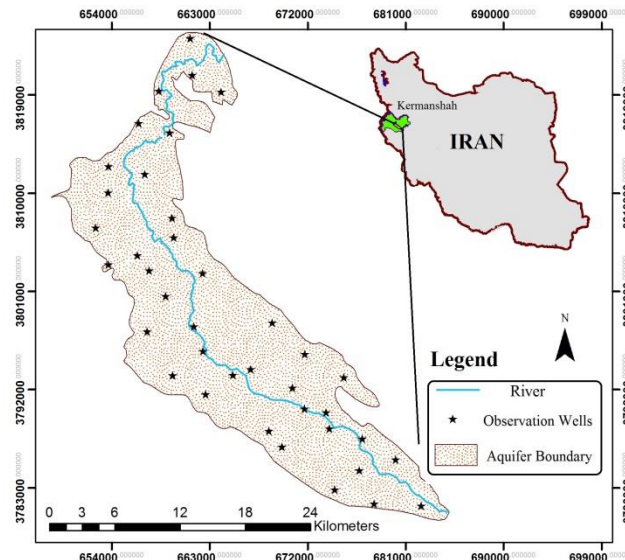
حوضه آبریز (برگشت پذیری، آسیب پذیری و اطمینان پذیری) و سناریو سازی، راهکارهای سازه‌ای را جهت کاهش تلفات بررسی کردند و نشان دادند با توجه به شرایط منطقه، بهترین راهکار کاهش تلفات، استفاده از سازه سد جامیشان، قشلاق و آناهیتا می‌باشد. کمالی و نیک سخن (۱۳۹۶) در پژوهشی با بهره‌گیری از مدل‌های آب زیرزمینی و شاخص‌های پایداری، وضعیت دشت برخوار اصفهان را تحت سناریوهای مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد با ادامه روند فعلی از نظر برداشت از منابع آب زیرزمینی، وضعیت کیفی و به ویژه وضعیت کمی آن بدتر خواهد شد. با افزایش برداشت ۳۰ درصدی از آبخوان، شاخص پایداری به شدت کاهش می‌یابد و در ادامه آن شاخص آسیب پذیری آبخوان نسبت به چالش‌های احتمالی افزایش خواهد یافت. در صورتی که ۳۰ درصد از میزان برداشت از آبخوان کاهش یابد، شاخص پایداری روند صعودی و افزایشی داشته و بهبود وضعیت آبخوان در سال‌های آتی اتفاق خواهد افتاد. محسنی و همکاران (۱۴۰۱) پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه بهشهر بندرگز را با استفاده از دو شاخص بهره برداری آب و کمبود آب سبز بررسی کردند. نتایج نشان داد کشت گندم در فصل بهار باعث کاهش آب و ناپایداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در منطقه می‌گردد. رجانی و همکاران^۱ (۲۰۰۸) آبخوان ساحلی در هند را از منظر کمی و کیفی (شوری) و میزان پمپاژ آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. بویی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) در زمینه محیط زیست شاخص‌هایی را جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی ارائه نمودند. همچنین در سال ۲۰۱۸ نیز از منظر اجتماعی پژوهشی را انجام داده و در آن شاخص‌هایی را برای ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی معرفی نمودند. کریشنامورتی و همکاران^۳ (۲۰۲۳) با استفاده از بررسی شاخص‌های کیفی نشان دادند کیفیت آب زیرزمینی به طور قابل توجهی تحت تأثیر رودخانه نویال قرار گرفته و آلوده شده است و باید برای حفظ کیفیت آب زیرزمینی اقداماتی صورت گیرد. شناسایی عوامل موثر بر کیفیت و کمیت منابع آب (بهتر با بدتر شدن وضعیت آن) هدف برنامه ریزان، سیاستگذاران و اقدامات مدیریتی آن‌ها است. به بیان دیگر، هدف، توسعه سیاست‌های پیش برنده‌ای است که از منظر اقتصادی، سیاسی، حقوقی، اجتماعی و محیط زیستی آثار مطلوبی بر منابع آب و محیط زیست داشته باشد و در مقابل کنترل عوامل بازدارنده و زیان آور برای این منابع است. بنابراین نیاز است شاخص‌هایی وجود داشته باشند تا به کمک آن‌ها عملکرد را اندازه‌گیری نموده و شرایط مختلف حاکم بر سیستم را در اثر سیاست‌ها و برنامه‌های مختلف (به عبارتی سناریوهای مختلف) ارزیابی و با یکدیگر مقایسه نمود. به طور کلی شاخص‌های ارزیابی پایداری به عنوان یک معیار آماری به محققان کمک می‌نمایند تا تغییرات نسبی یک یا چند متغیر را بیان و توصیف کنند. برای نخستین بار در سال ۱۹۹۷، لوکس^۴ سه معیار برگشت پذیری، آسیب پذیری و اطمینان پذیری سیستم را ارائه نمود و این روابط در سال ۲۰۱۰ توسط سندووال سولیس^۵ اصلاح شد.

منطقه مورد مطالعه

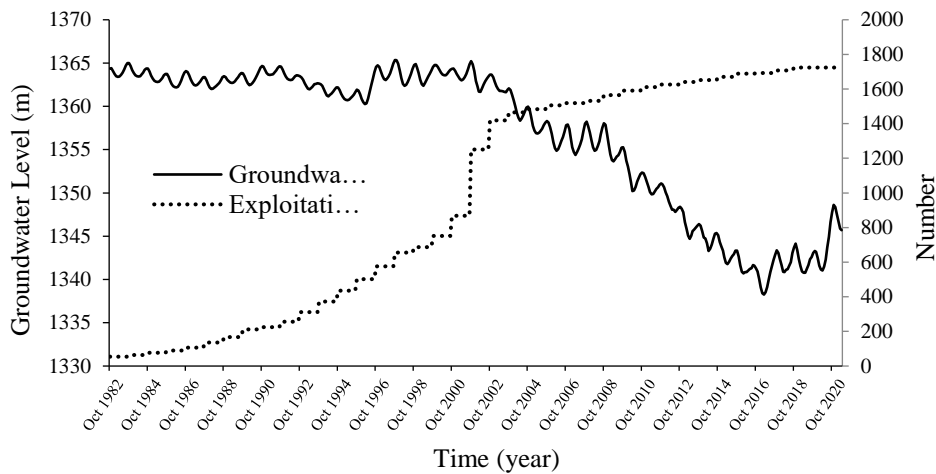
یکی از دشت‌های بسیار مهم و حاصلخیز در استان کرمانشاه، دشت ماهیدشت می‌باشد. این دشت از منظر وسعت، تعداد بهره بردار از چاه‌های آب (با مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و دامپروری و ...)، موقعیت جغرافیایی (هم مرز با مرکز استان)، نقش مهمی در اقتصاد استان ایفا می‌نماید.

دشت ماهیدشت در محدوده مطالعاتی ماهیدشت-سرفیروزآباد (کد ۲۲۲۵) و در استان کرمانشاه واقع شده و یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کرخه می‌باشد. مشخصات جغرافیایی آن سی و چهار درجه و سه دقیقه تا سی و چهار درجه و سی و شش دقیقه عرض شمالی و چهل و شش درجه و سی و دو دقیقه تا چهل و هفت درجه و بیست و یک دقیقه شرقی می‌باشد. مساحت این محدوده ۱۵۰۷ کیلومتر مربع بوده که به ترتیب ۸۹۲/۱ و ۶۱۴/۹ کیلومتر مربع سهم دشت و ارتفاعات بوده و وسعت آبخوان ماهیدشت در این محدوده ۶۳۸ کیلومتر مربع می‌باشد. حداکثر ارتفاع حوزه از سطح دریا ۲۷۵۳ متر و حداقل ارتفاع نیز ۱۳۱۱ متر در خروجی دشت می‌باشد. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ (۱) نشان داده شده است. رودخانه مرگ زهکش اصلی دشت است که از بخش شرقی سرفیروزآباد سرچشمه گرفته و پس از عبور از دشت سرفیروزآباد و ماهیدشت در منطقه دوآب مرگ از محدوده خارج شده و به رودخانه قره سو می‌پیوندد. افزایش استحصال آب در دهه‌های اخیر از آبخوان ماهیدشت سبب کاهش تراز سطح آب زیرزمینی شده که در شکل ۲ آنمود آبخوان ماهیدشت در برابر تعداد چاه‌های بهره برداری را نشان داده شده است.

1 Rejani et al
2 Bui et al
3 Krishnamoorthy
4 Loucks
5 Sandoval Solis



شکل ۱. موقعیت آبخوان ماهیدشت

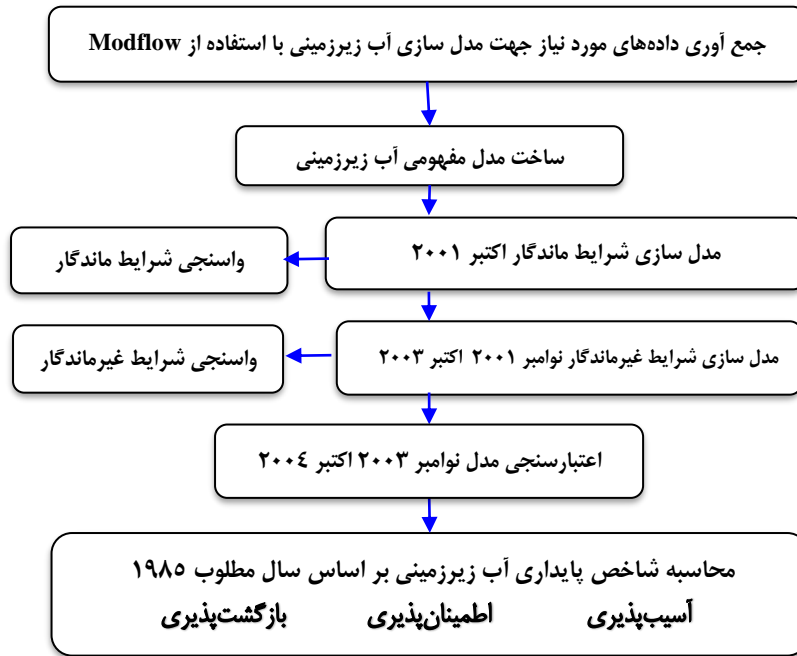


شکل ۲. آبنمود آبخوان ماهیدشت در برابر تعداد چاه های بهره برداری

روش پژوهش

نحوه پایش و ارزیابی سیستم های منابع آب و معیارهای مربوط به آن از دغدغه های محققین و تصمیم گیران در دهه های اخیر بوده است. شاخص ها نماینده ترکیبی از معیارهای عملکرد سیستم می باشند. معیارهای عملکرد سیستم های منابع آب بر اساس پارامترهای آب مورد نیاز و مقدار آب تأمین شده برای مصرف کننده یا کاربر آب یا یک منبع آب (همانند مخازن آب زیرزمینی که تأمین کننده نیاز شرب، صنعت یا کشاورزی است) تعریف می شوند.

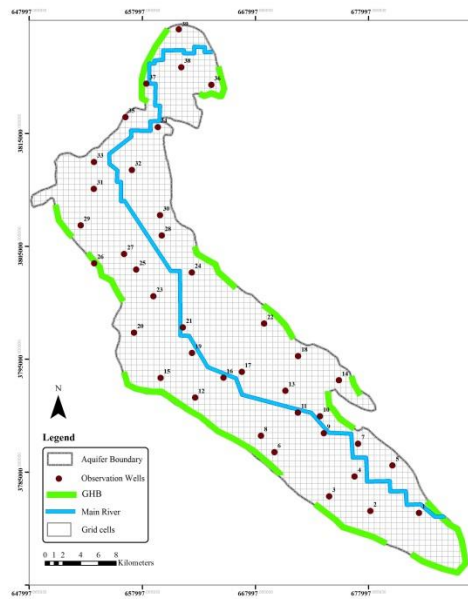
جهت بررسی شاخص پایداری کمی منابع آب زیرزمینی دشت ماهیدشت واقع در استان کرمانشاه از نرم افزار GMS و مدل MODFLOW برای مدل سازی منابع آب زیرزمینی و از معیارهای عملکردی آسیب پذیری، اطمینان پذیری و برگشت پذیری جهت محاسبه شاخص پایداری آب زیرزمینی برای ۴ سناریو مدیریتی استفاده شد در شکل ۳ (۳) فلوچارت بکار رفته در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوجارت ارزیابی شاخص پایداری منابع آب زیرزمینی ماهیدشت

مدل سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار GMS

برای شبیه سازی آبخوان ماهیدشت از مدل MODFLOW و نرم افزار GMS استفاده شد. برای مدل سازی منابع آب زیرزمینی بر اساس داده‌هایی نظیر سطح آب از سال ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۹، لوگ‌های زمین شناسی (مربوط به چاه‌های اکتشافی)، مطالعات ژئوفیزیک، گزارش‌های هیدروژئولوژی و هیدرولوژی، داده‌های بارش، اطلاعات تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و بیلان منابع آب محدوده استفاده شده است. ورودی به آبخوان شامل بارش، جریان رودخانه فصلی مرگ، انتقال آب، تغذیه سطحی و جذب آب برگشتی و خروجی از آبخوان برداشت آب توسط چاه‌های بهره‌برداری و جریان خروجی زیرسطحی در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ مدل مفهومی آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت نشان داده شده است.



شکل ۴. مدل مفهومی آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت

معیارهای پایداری آب زیرزمینی

آسیب پذیری^۱

آسیب پذیری بیانگر میزان کمبود در سیستم آب زیرزمینی می باشد که شدت شکست های سیستم را بیان می نماید. بر این اساس در گام های زمانی که تراز آب زیرزمینی پایین تر از تراز مطلوب باشد، سیستم آبخوان دارای کمبود می باشد (مایز، ۲۰۱۳).

$$Vul = \frac{N_{Failure}}{T} \times 100 \quad (1)$$

Nfailure = تعداد گام های زمانی دارای کمبود آب

T = تعداد کل گام های زمانی

اطمینان پذیری یا قابلیت اعتماد^۲

این مفهوم بیان می کند با چه میزان احتمال، آبی که در اختیار مصرف کننده قرارداد شده است، نیاز وی را تامین می نماید. در منابع آب زیرزمینی به منظور به تعادل رسیدن آبخوان (تعادل بین تغذیه طبیعی و مصرف) تراز مطلوب محاسبه و رسیدن به این تراز در هر دوره به عنوان تامین آب مورد نیاز مصرف کننده (عدم شکست) در نظر گرفته می شود (مایز، ۲۰۱۳).

$$Rel = \frac{N_{Success}}{T} \times 100 \quad (2)$$

Nsuccess = تعداد گام های زمانی کمبود آب برابر صفر (نیاز تامین شده است)

T = تعداد کل گام های زمانی

بازگشت پذیری^۳

بازگشت پذیری در سیستم های منابع آب، به این صورت تعریف می شود که احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برسد، چه میزان است. نسبت تعداد گام های تغییر سیستم از شکست به موفقیت به تعداد کل گام های شکست را بازگشت پذیری گویند (مایز، ۲۰۱۳).

$$Res = \frac{N(Success \text{ follows Failure})}{N_{Failure}} \times 100 \quad (3)$$

شاخص پایداری آب زیرزمینی^۴

با بررسی سه شاخص قبل، می توان شاخص پایداری آب زیرزمینی را محاسبه نمود. شاخص پایداری جمع بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم گیری بین گزینه های مختلف مدیریت و برنامه ریزی است. که به صورت زیر تعریف می شود (مایز، ۲۰۱۳).

$$GSI = \sqrt[3]{Res \times Rel \times (1 - Vul)} \quad (4)$$

با بهره گیری از شاخص های پایداری می توان به شناخت وضعیت سیستم، عامل های موثر در شرایط به وجود آمده در آن، شناخت تصمیم صحیح و اولویت بندی برنامه های مدیریتی و گروه داران آب، کمک شایانی نمود (کمالی و نیک سخن، ۱۳۹۶).

1 Vulnerability

2 Mays

3 Reliability

4 Resiliency

5 Groundwater Sustainability Index

معیارهای سنجش خطا در مدل سازی

اعتبار هر مدل به وسیله معیارهای سنجش خطا مورد بررسی قرار می گیرد. در این پژوهش برای بررسی و مقایسه میزان خطای مدل MODFLOW در شبیه سازی آب زیرزمینی از معیارهای ضریب همبستگی، میانگین مطلق خطا (MAE^1) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) استفاده گردید.

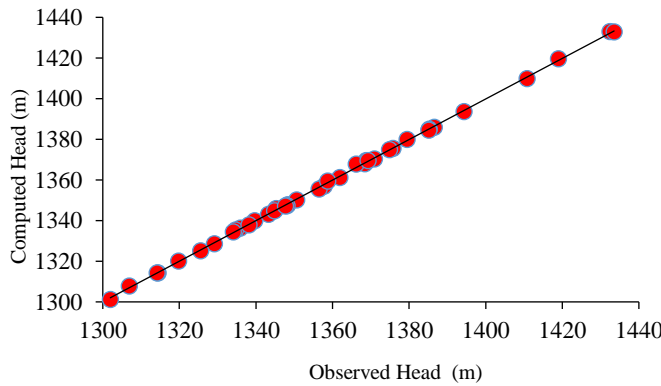
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_o - P_c| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_o - R_c)^2} \quad (7)$$

که در آن P_o ، P_c و \bar{P}_0 به ترتیب پارامتر مشاهداتی، پارامتر محاسباتی و میانگین پارامتر مشاهداتی می باشد.

نتایج مدل سازی جریان آب زیرزمینی

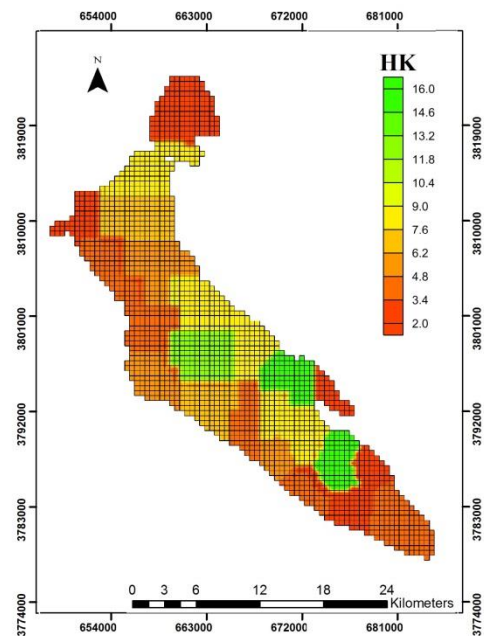
با استفاده از داده های ۳۹ چاه مشاهده ای در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار، شبیه سازی وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت انجام گردید. ابتدا به واسطه شرایط پایدار آبخوان، اکتبر سال ۲۰۰۱ به عنوان ماه و سال پایه برای شرایط ماندگار انتخاب شد و مدل بر مبنای آن اجرا، آنالیز حساسیت و واسنجی گردید. شکل ۵ همبستگی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی را در شرایط ماندگار و شکل ۶ نتایج واسنجی شده پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می دهد. در جدول ۱ نتایج معیارهای ارزیابی خطا شامل ضریب همبستگی، $RMSE$ و MAE آورده شده است.



شکل ۵. همبستگی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی

جدول ۱. نتایج خطای مدل سازی

| Error | Steady-state | Transient | Verification |
|----------------|--------------|-----------|--------------|
| R ² | 0.989 | 0.97 | 0.965 |
| MAE | 0.543 | 0.446 | 0.713 |
| RMSE | 0.621 | 0.719 | 0.816 |

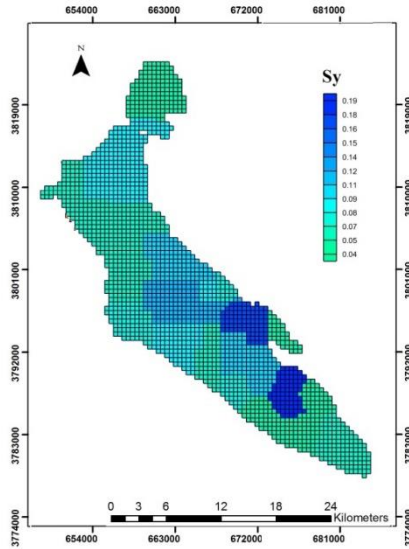


شکل ۶. نتایج واسنجی شده پارامتر هدایت هیدرولیکی

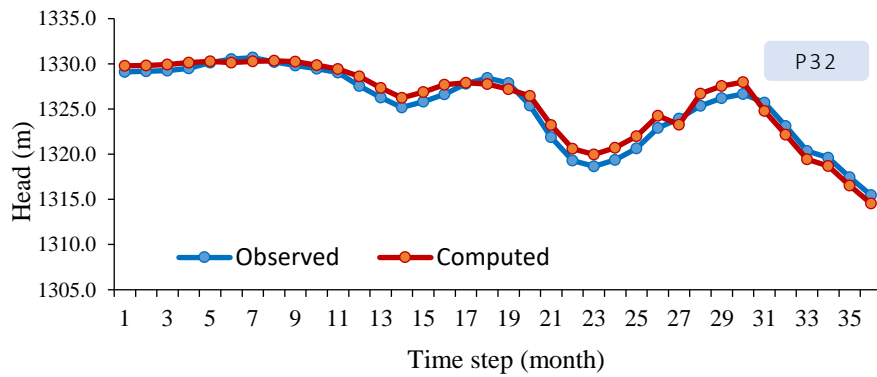
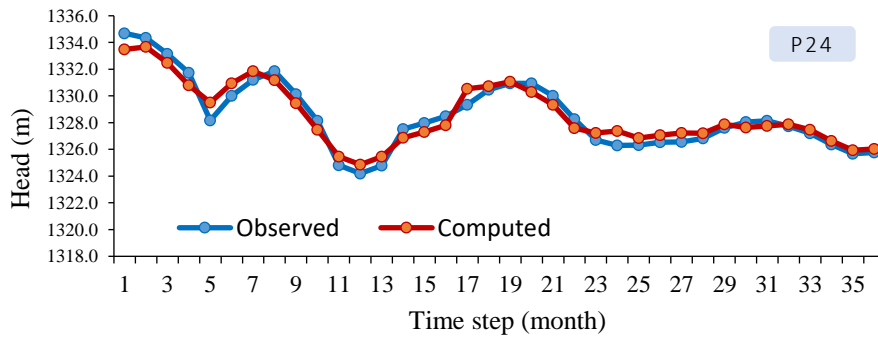
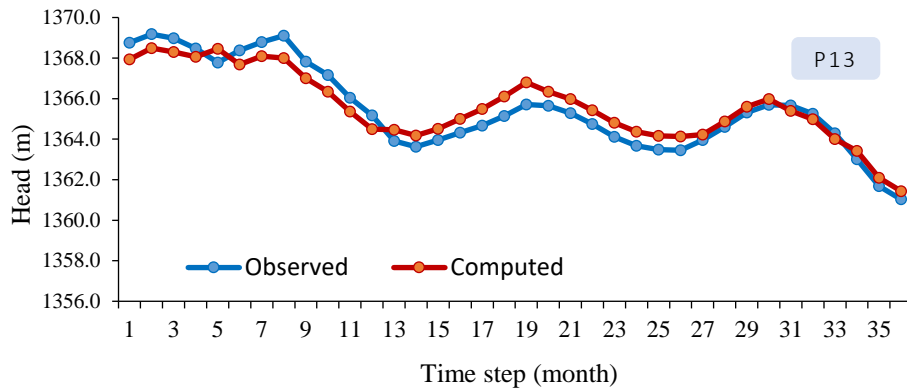
در حالت غیر ماندگار مدل برای ۲۴ گام زمانی و از نوامبر ۲۰۰۱ تا اکتبر ۲۰۰۳ اجرا و واسنجی گردید. نتایج واسنجی پارامتر ذخیره ویژه (Sy) در شکل ۷ و شبیه سازی تراز سطح آب زیرزمینی چاه های مشاهده ای شماره ۱۳، ۲۴ و ۳۲ در شکل ۸ آورده شده است. در این مرحله نیز مقادیر معیارهای ارزیابی خطا قابل قبول بوده که نشان دهنده انطباق مناسب مدل با تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت می باشد. این مطالب در جدول (۱) قابل مشاهده است. در نهایت، داده های یک سال پس از دوره مدل سازی غیرماندگار (نوامبر ۲۰۰۳ تا اکتبر ۲۰۰۴) برای اعتبارسنجی در مدل درج شد. همانطور که در شکل ۸(۸) نشان داده شده تنها یک اختلاف ناچیز بین سطح آب محاسبه شده و مشاهده شده وجود دارد که دقت مدل را در پیش بینی سطح آب ثابت می کند.

¹ Mean Absolute Error

² Root-Mean-Square Error



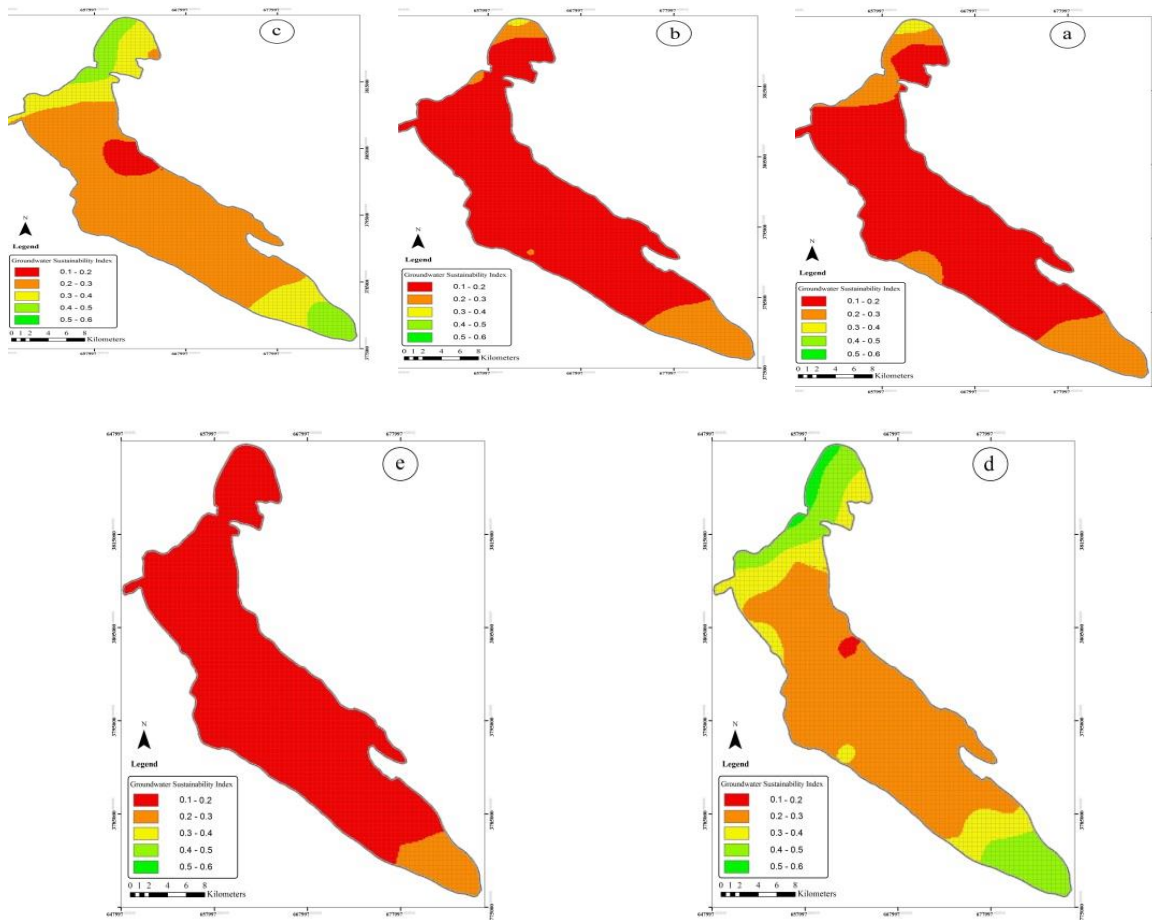
شکل ۷. نتایج واسنجی شده پارامتر ذخیره ویژه (S_y)



شکل ۸. نتایج شبیه سازی چاه های مشاهده ای شماره ۱۳، ۲۴ و ۳۲

نتایج شاخص پایداری آب زیرزمینی

پس از اطمینان از اعتبار سنجی مدل آب زیرزمینی تهیه شده، ابتدا سال ۱۹۸۵ بدلیل شرایط پایدار آبخوان، استحصال کم آب زیرزمینی و شرایط بارندگی نرمال به عنوان سال مطلوب (وضعیت مطلوب تراز آب زیرزمینی) انتخاب شد، سپس شاخص پایداری آب زیرزمینی برای شرایط موجود با شبیه سازی ۱۲۰ گام زمانی ماهانه منتهی به اکتبر ۲۰۱۹ بدست آمد همانگونه که در شکل ۹ (a) مشخص است اوضاع شاخص پایداری برای کل دشت در وضعیت نامطلوب قرار دارد، مناطقی از دشت که مرز جریان ورودی است شاخص بالاتری نشان می دهد. پس از این مرحله مدل سازی طی ۱۲۰ گام زمانی ماهانه انجام و با استفاده از چهار سناریو مدیریتی (۱- ادامه روند کنونی، ۲- تعدیل پروانه ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، ۳- حذف چاه های غیرمجاز و تعدیل پروانه ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی و ۴- افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز) شاخص پایداری آب زیرزمینی مجدد مورد ارزیابی قرار گرفت که شکل ۹ (b)، (c)، (d) و (e) به ترتیب نتایج چهار سناریو مذکور را نشان می دهد. ادامه وضع موجود باعث کاهش بیشتر شاخص پایداری آبخوان و بغرنج شدن وضعیت آب زیرزمینی خواهد شد. با کاهش استحصال تحت سناریو ۲ و ۳ بهبود نسبی در شاخص پایداری آب زیرزمینی خواهیم داشت اما این وضعیت در بهترین شرایط مناطق با مرز بار ورودی نهایتاً عدد ۰/۶ خواهد بود که نشان دهنده وضعیت ناپایدار آبخوان حتی با وجود کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب می باشد. در شرایط سناریو ۴ آبخوان به شرایط بسیار ناپایدار خواهد رفت. جدول (۲) وضعیت شاخص GSI برای هر یک از چاه های مشاهده ای در شرایط حاضر و تحت سناریو های تعریف شده نشان می دهد.



شکل ۹. (a). شاخص پایداری آب زیرزمینی برای شرایط موجود، (b). سناریو ادامه روند کنونی، (c). سناریو تعدیل پروانه ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، (d). سناریو حذف چاه های غیرمجاز و تعدیل پروانه ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، (e). سناریو افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز

جدول ۲. نتایج شاخص GSI برای هریک از چاه های مشاهده ای

| Well No | GSI | | | | |
|---------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Current status | Scenario (1) | Scenario (2) | Scenario (3) | Scenario (4) |
| 1 | 0.268 | 0.281 | 0.459 | 0.471 | 0.230 |
| 2 | 0.260 | 0.301 | 0.366 | 0.435 | 0.203 |
| 3 | 0.170 | 0.150 | 0.253 | 0.281 | 0.131 |
| 4 | 0.181 | 0.139 | 0.279 | 0.322 | 0.139 |
| 5 | 0.160 | 0.150 | 0.251 | 0.257 | 0.132 |
| 6 | 0.164 | 0.131 | 0.247 | 0.281 | 0.131 |
| 7 | 0.164 | 0.131 | 0.266 | 0.281 | 0.131 |
| 8 | 0.139 | 0.130 | 0.223 | 0.249 | 0.130 |
| 9 | 0.158 | 0.131 | 0.235 | 0.260 | 0.131 |
| 10 | 0.159 | 0.131 | 0.235 | 0.274 | 0.131 |
| 11 | 0.160 | 0.140 | 0.250 | 0.281 | 0.140 |
| 12 | 0.271 | 0.211 | 0.328 | 0.312 | 0.131 |
| 13 | 0.156 | 0.130 | 0.228 | 0.257 | 0.130 |
| 14 | 0.162 | 0.138 | 0.218 | 0.301 | 0.138 |
| 15 | 0.175 | 0.143 | 0.258 | 0.281 | 0.143 |
| 16 | 0.137 | 0.137 | 0.268 | 0.284 | 0.137 |
| 17 | 0.141 | 0.130 | 0.209 | 0.250 | 0.130 |
| 18 | 0.146 | 0.136 | 0.190 | 0.249 | 0.136 |
| 19 | 0.166 | 0.139 | 0.248 | 0.287 | 0.139 |
| 20 | 0.181 | 0.132 | 0.229 | 0.248 | 0.132 |
| 21 | 0.154 | 0.131 | 0.247 | 0.253 | 0.131 |
| 22 | 0.177 | 0.139 | 0.232 | 0.243 | 0.139 |
| 23 | 0.148 | 0.131 | 0.207 | 0.244 | 0.131 |
| 24 | 0.139 | 0.130 | 0.157 | 0.192 | 0.130 |
| 25 | 0.161 | 0.138 | 0.212 | 0.268 | 0.138 |
| 26 | 0.212 | 0.183 | 0.344 | 0.409 | 0.132 |
| 27 | 0.162 | 0.131 | 0.209 | 0.221 | 0.131 |
| 28 | 0.152 | 0.154 | 0.169 | 0.254 | 0.132 |
| 29 | 0.144 | 0.133 | 0.213 | 0.239 | 0.133 |
| 30 | 0.147 | 0.132 | 0.253 | 0.259 | 0.132 |
| 31 | 0.152 | 0.132 | 0.213 | 0.338 | 0.132 |
| 32 | 0.158 | 0.131 | 0.241 | 0.263 | 0.131 |
| 33 | 0.194 | 0.130 | 0.412 | 0.452 | 0.130 |
| 34 | 0.219 | 0.151 | 0.437 | 0.447 | 0.131 |
| 35 | 0.320 | 0.235 | 0.469 | 0.544 | 0.144 |
| 36 | 0.136 | 0.136 | 0.248 | 0.312 | 0.136 |
| 37 | 0.188 | 0.174 | 0.512 | 0.538 | 0.157 |
| 38 | 0.149 | 0.134 | 0.344 | 0.445 | 0.116 |
| 39 | 0.431 | 0.342 | 0.462 | 0.522 | 0.174 |

بحث

با توجه به مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب و رویکرد امنیت آب، حفاظت محیط زیست و امنیت اجتماع، می توان اهداف ارزیابی پایداری آب های زیرزمینی را در حفاظت از منابع آب زیرزمینی در برابر تخلیه و کاهش ذخایر، حفاظت از کیفیت این منابع در برابر آلودگی،

محافظت از قابلیت زیست پذیری اکوسیستم، دستیابی به رفاه اقتصادی و اجتماعی و استفاده از حکمرانی خوب جست و جو کرد. آب‌های زیرزمینی یک منبع محدود، پویا و آسیب پذیرند که در صورت تعادل در تغذیه و استحصال برگشت پذیر هستند، اما تشدید مصرف آن در بخش کشاورزی و مصرف شرب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا آسیب پذیر تر و در برخی مناطق به سوی بازگشت ناپذیری برده است. بر این اساس در این تحقیق به منظور شناسایی شاخص پایداری آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت ابتدا شبیه سازی آبخوان با استفاده از مدل Modflow انجام شد و سپس مدل عددی تهیه شده در شرایط ماندگار و غیر ماندگار اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی گردید.

نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه به روند نزولی سطح آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ با وجود عدم روند کاهشی بارش در این دوره پایداری این آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد آبخوان ماهیدشت در وضعیت ناپایدار است که با یافته‌های تحقیق مجیدپور و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. اعمال سناریو مدیریتی بصورت کاهش ۳۰ و ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی نیز مناطق مرکزی آبخوان را پایدار نخواهد کرد. بررسی داده‌های آبخوان نشان می‌دهد میزان تغییرات سطح آب در خلال دوره مذکور معادل با ۲۴/۸۹- متر بوده است که این روند نزولی حتی با وجود ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از سال ۲۰۰۵ ادامه داشته است. از عوامل موثر بر این موضوع می‌توان به افزایش تعداد مجوزهای صادره در خلال سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۱، تعداد قابل توجه چاه‌های غیرمجاز، نبود نظارت کافی بر الگوی کشت، عدم اطلاع رسانی و آگاهی بخشی در خصوص وضعیت پایداری آبخوان در شرایط کنونی و آتی اشاره نمود. وضعیت ناپایدار این دشت یعنی مخاطرات اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، امنیتی و محیط زیستی فراوانی را در پی خواهد داشت. به عبارتی این دشت، بیش از هر زمان، نیاز به کنترل برداشت داشته و باید در اولویت برنامه‌های سازگاری با کم آبی سیاستمداران، برنامه‌ریزان، مدیران و همه‌گروداران آب منطقه قرار گرفته و از فهرست مناطق مستعد توسعه کشاورزی حذف گردد. توصیه می‌گردد با رعایت اصول پایداری کیفی آبخوان، گروداران با سیاست‌های تشویقی به سوی تغییر الگوی برداشت از کشاورزی به صنعت سوق داده شوند.

منابع

- سامانی، سعیده، روزبهانی، رضا، کاوسی حیدری، علیرضا، و کاردان مقدم، حمید. (۱۳۹۹). ارائه چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی از طریق شاخص. آب و توسعه پایدار، ۷(۱)، ۶۰-۴۹. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.80946>
- طاهری، سیددانیال، و علیزاده، کامیاب. (۱۳۹۰). دسترسی و حفظ منابع آب در بحران. مجله علمی ابن سینا/اداره بهداشت و درمان نهاجا، ۱(۲)، ۶۰-۵۸. <http://ebnesina.ajaums.ac.ir/article-1-130-fa.html>
- فاطمی، سید احسان، و حافظ پرست، مریم. (۱۳۹۵). محاسبه شاخص های پایداری آب و پایداری حوضه آبریز در راستای حفظ توسعه پایدار (مطالعه موردی: حوضه آبریز گاماسیاب). نشریه جغرافیا و پایداری محیط، ۱۸(۱)، ۳۳-۲۱. https://ges.razi.ac.ir/article_553.html
- فلاح، سیف اله، قبادی نیا، مهدی، شکرگزار دارابی، محسن، و قربانی دشتکی، شجاع. (۱۳۹۱). بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۲۶(۲ (ب))، ۱۷۲-۱۶۱. <https://sid.ir/paper/196687/fa>
- کمالی، اصغر، و نیک سخن، محمدحسین. (۱۳۹۶). توسعه مدلی برای محاسبه شاخص های پایداری کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی. مجله اکوهیدرولوژی، ۴(۴)، ۱۰۸۷-۱۰۷۱. <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.63237>
- محسنی، بهروز، حبیب نژاد روشن، محمود، شاهی، کاکا، و درزی نفت چالی، عبدالله. (۱۴۰۱). ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص های بهره برداری آب و کمبود آب سبز. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران، ۱۶ (۵۹)، ۳۱-۲۳. <http://jwmsei.ir/article-1044-1-fa.html>

References

- Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du BUI, D., & Truong, N.T. (2016). Environmental sustainability assessment of ground water resources in Hanoi, Vietnam by a sample AHP approach. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Re-Greece. Water, 6(4), 1043-1068*. https://doi.org/10.2208/jscejer.72.L_137.
- Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N.T., & Nakagawa, K. (2018). Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. *Ecological indicators, 93, 1034-1042*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.005>.
- Falah, S. E., Qobadinia, M., Shekargar Darabi, M., & Ghorbani Dashtaki, Sh. (2011). Investigating the sustainability of underground water resources in Darab plain, Fars province. *Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences), 26(2(b)), 161-172*. <https://sid.ir/paper/196687/fa>. [In Persian]
- Fatemi, S.E., & Hafez Parast, M. (2015). Calculation of indicators of water stability and watershed stability in order to maintain sustainable development (case study: Gamasiab watershed). *Journal of Geography and Environmental Sustainability, 18(1), 21-33*. https://ges.razi.ac.ir/article_553.html. [In Persian]
- Kamali, A., Khosh Sokhan, & M. H. (1396). Development of a model for calculating quantitative and qualitative sustainability indicators of underground water resources. *Journal of Ecohydrology, 4(4), 1071-1087*. <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.63237>. [In Persian]
- Lipponen, A. ed. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators*. Paris, UNESCO.
- Loucks, DP. (1997). Quantifying trends in system sustainability, *Hydrological Sciences Journal, 42(4), 513-30*. <https://doi.org/10.1080/02626669709492051>.
- Majidipour, F., Najafi, S.M.B., Taheri, K., Fathollahi, J., & Missimer, T.H. (2021). Index-based Groundwater Sustainability Assessment in the Socio-Economic Context: a Case Study in the Western Iran. *Environmental Management, 67, 648-666*. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01424-7>
- Mays, L. W. (2013). *Groundwater Resources Sustainability: Past, Present, and Future*. *Water Resour Manage*. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0436-7>

- Mohseni, B., Habibnejad Roshan, M., Shahidi, K., & Darzi Naftchali, A. (1401). Assessing the sustainability of underground water resources using water exploitation indicators and green water shortage. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 16 (59), 23-31. <http://jwmsei.ir/article-1044-1-fa.html>. [In Persian]
- Krishnamoorthy, N., Thirumalai, R., Lenin Sundar, M., Anusuya, M., Manoj Kumar, P., Hemalatha, E., Mohan Prasad, M., & Munjal, N. (2023). Assessment of underground water quality and water quality index across the Noyyal River basin of Tirupur District in South India. *Urban Climate*, 49, 101436. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101436>.
- Ranjbarmanesh, N., & Entezari, M. (2013). Crisis caused by falling groundwater level due to tectonic activity in Mahidasht plain. *Applied Geomorphology of Iran*, 1 (2), 1-18. <http://journals.hsu.ac.ir/agi/article-1-46-fa.html>. [In Persian]
- Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., Mull, R. (2008). Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*, 22(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9142-z>.
- Samani, S., Rozbahani, R., Kaousi Heydari, A., & Kardan Moghadam, H. (2019). Providing a framework for assessing the sustainability of underground water resources through an index. *Water and sustainable development*, 7(1), 49-60. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.80946>. [In Persian]
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D.C., & Loucks, D.P. (2010). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134).
- Taheri, S.D., & Alizade, K. (2011). Management and conservation of water resources in crisis. *Ibn Sina scientific journal/ Nahaja health and treatment department*, 1&2. 5-60. <http://ebnesina.ajaums.ac.ir/article-1-130-fa.html>. [In Persian]