

Research Paper

The effects of Water pricing Policy on Groundwater Dynamics of Shahdad Plain.

Ali. Dehghani¹,Mohammad. Reza. Zare
Mehrjerdi^{2*},Tayebeh.
Waezizadeh³Mohammad.
Zounemat Kermani⁴Somayeh.
Amirtaimoori⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, Email: ali.dehghany@iran.ir

² Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: zare@uk.ac.ir

³ Associated Professor, Department of Pure Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: waezizadeh@uk.ac.ir

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: zoinemat@uk.ac.ir

⁵ Associated Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, Email: amirtaimoori@iran.ir



10.22125/iwe.2026.588276.1932

Received:
May 23, 2026
Accepted:
August 19, 2026
Available online:
September 7, 2026

Keywords:

**Aquifer, groundwater,
positive mathematical
programming, dynamic
model, Shahdad**

Abstract

Given climate change and the increased use of groundwater resources, analyzing the dynamics of groundwater quantity is essential. One way to predict the water level of an aquifer in the long term is to simulate changes in the water level of wells in the future using mathematical models. In this study, a dynamic model based on differential equations is introduced that describes the drying process of water wells in the Shahdad aquifer in Kerman city. In addition, the effects of water pricing policy on groundwater dynamics were analyzed based on a positive mathematical programming model. The results of the dynamic model showed that 57 percent of the wells being exploited in the aforementioned aquifer have dried up in 2024 compared to 2015. The continuation of current water extraction trends from the Shahdad aquifer will cause most of the wells being exploited to dry up in 2036; This amount would be equivalent to a 71 percent reduction in water extraction, which would reduce this reduction to 56 percent if the water pricing policy were implemented under a 100 percent water price increase scenario. In fact, implementing a water pricing policy will reduce water consumption by 15% by 2036.

1. Introduction

Studies conducted on the country's aquifers show that the rate of groundwater withdrawal is greater than its recharge, and this has caused a drop in the water table in most aquifers (Mohammadjani et al., 2014). herefore, understanding the current status of an aquifer and predicting its future status is of great importance as the first step in managing the preservation and improvement of water quantity in that aquifer and also an important factor in adopting effective policies in the field of water supply and demand in the agricultural sector. After understanding the current and future status of an aquifer, it is

* **Corresponding Author:** M. R. Zare Mehrjerdi

Address: Department of Agricultural Economics, Faculty of
Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Email: zare@uk.ac.ir
Tel: 09131999230

essential to implement policies that can help preserve and restore groundwater resources. One of the effective policies is water pricing policies to determine the appropriate cultivation pattern, so that based on that cultivation pattern, maximum productivity can be achieved from the limiting factor of water.

In the first part of the present study, using mathematical modeling, the current and future conditions of groundwater quantity in the Shahdad aquifer were analyzed. The dynamic model used in the first part of this research is based on the Kermack and Macken-Drake model and is written based on population divisions. In the second part of this research, the effects of applying water pricing policy on the cultivation pattern of farmers in the Shahdad Plain were examined in the form of positive mathematical programming, and in the third part, the effects of this change in cultivation pattern on the dynamics of groundwater quantity in the Shahdad Plain were analyzed.

2. Methodology

In the first part of this research, a dynamic model based on differential equations is introduced that describes the process of water well drying in the Shahdad aquifer. In this model, the water wells in the region are divided into five classes. The first class is the number of susceptible drought wells at time t . $S(t)$. Some of these wells experience drought and enter class I with rate β . A fraction of μ of wells in class I become dry. They move to compartment R that are dried wells. The rest are divided into groups. Some of them are recovered with natural factors automatically. The name of this class in the model is T . A number of wells in class I experience an economic crisis. This class is indicated by Q . A fraction η of them are recovered. Also, a fraction μ of Q is drying. Recovered water wells become susceptible with rate m . Farmers are allowed to dig wells near the previous well, at rate of λ of the dried-up wells. In this model, a fraction G_γ of I are experiencing an economic crisis. Also, a fraction F_γ of I are recovered, where $F = 1 - G$.

In the second part of this research, positive mathematical programming (PMP), which is an empirical estimation model, was used to apply the water pricing policy under different scenarios of water price increases. The results of the PMP model provided us with an optimal cultivation pattern. According to the optimal cultivation pattern, the amount of water consumed and the gross profit of farmers were analyzed compared to the current situation.

In the third part of this study, we applied the results of crop pattern optimization (part two of the research) to a dynamic groundwater quantity model and compared the results with the current situation.

3. Discussion and Conclusion

Results from the dynamic model of groundwater quantity in Shahdad aquifer

The model's prediction results clearly show that continuing the current trend of water extraction from the Shahdad aquifer's groundwater will cause most of the wells being exploited to dry up in 2036, which will be equivalent to a 71% reduction in water extraction. In fact, the drying up of production wells means a decrease in the water table in the aquifer, which disrupts the natural recharge of the aquifer.

The impact of water price increase policy on water consumption and farmers' gross profit

Implementing a policy of increasing the price of water by increasing the cost of water extraction is one of the policies that directs the regional cultivation pattern towards increasing the area under cultivation of crops, which in addition to reducing water consumption, also increases the gross profit of farmers in the region. The results of this study showed that implementing this policy in the Shahdad Plain, in addition to reducing water consumption by four percent, increases the gross profit of farmers in the region by 12 percent.

Results of the Shahdad Aquifer Dynamic Model after Implementing a 100% Water Price Increase Policy

The model results clearly show that implementing a water pricing policy in the Shahdad Plain will improve the current trend of water extraction from the Shahdad aquifer groundwater, reducing the 71 percent reduction in water extraction (equivalent to 46.8 million cubic meters) to 56 percent (36.9 million cubic meters) over a twenty-year period. This 15% saving in water extraction will have a significant impact on the preservation and restoration of the Shahdad aquifer by increasing the water table and accelerating the natural recharge process of the aquifer.

4. Results

The results of this study showed that implementing a water pricing policy in the Shahdad Plain, in addition to reducing water consumption by four percent, increases the gross profit of farmers in the region by 12 percent. Applying this amount of water savings to the dynamic aquifer water quantity model resulted in 15 percent of the water returning to the aquifer water cycle over a twenty-year period, which would be approximately equivalent to 9.8 million cubic meters. Since the model used in the present study is based on population divisions, it has filled the gap between theoretical and practical research well. So that the resulting dynamic system is reliable and this provides the possibility to apply efficient policies such as water pricing policy in order to improve groundwater dynamics in the study area.

5. The most important references

Conflict of Interest

- 1) Dehghani, Ali; Amirtimori, Samia and Zare Mehrjardi, Mohammadreza. (2019). The effects of the policies of increasing the price of irrigation water and reducing the available water on the water productivity of agricultural products (case study: Shahdad district, Kerman city). *Iranian Irrigation and Drainage Journal*, No. 6, Volume 13, pp. 1661-1671.
- 2) He, L., Tyner, W.E., Doukkali, R. and Siam, G. (2006). Policy options to improve water allocation efficiency: analysis on Egypt and morocco. *Water international*. 31: 320-337.
- 3) Howitt, R.E., Medellin-Azuara, J., MacEwan, D. and Lund, R. (2012). Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Science of the Environmental Modeling and Software*. 38: 244-258.
- 4) Rahnama, M. B, Sohrabipour, N and Barani, G. A. (2019). Investigation of groundwater level fluctuations in Shahdad aquifer. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. Volume 14, Issue 5, Page 1650-1663.
- 5) Sumriti, P., & Hon-Jay, C. (2025). Long-term projections of global groundwater storage under future climate change scenarios using deep learning. *Scince of The Total Environment*. 10(9), Page 1810-43.
- 6) Waezizadeh, T., & Ebrahimi, N. (2022). Dynamical model for COVID-19 in a population, *J. Mahani Math. Res. Cent.* 11(1), 25-34.



آثار سیاست قیمتی آب بر دینامیک آب‌های زیرزمینی دشت شهداد

علی دهقانی^۱، محمدرضا زارع مهرجردی^۲، طیبه واعظی‌زاده^۳، محمد ذونعمت کرمانی^۴، سمیه امیر تیموری^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

مقاله پژوهشی

چکیده

با توجه به تغییرات اقلیمی و استفاده بیشتر از منابع آب زیرزمینی، تحلیل دینامیک کمیت آب‌های زیرزمینی ضروری است. یکی از راه‌های پیش‌بینی سطح آب یک آبخوان در بلندمدت، شبیه‌سازی تغییرات سطح آب چاه‌ها در آینده با استفاده از مدل‌های ریاضی است. در این مطالعه، یک مدل دینامیکی بر پایه معادلات دیفرانسیل معرفی شده است که روند خشک شدن چاه‌های آب آبخوان شهداد در شهرستان کرمان را شرح می‌دهد. علاوه بر این آثار سیاست قیمتی آب بر دینامیک آب‌های زیرزمینی بر اساس مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل دینامیکی نشان داد که ۵۷ درصد از چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان مذکور در سال ۱۴۰۲ نسبت به سال ۱۳۹۶، خشک شده‌اند. ادامه روند فعلی استحصال آب از آبخوان شهداد، باعث خشک شدن اکثر چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۴۱۶ خواهد شد؛ این میزان، معادل کاهش ۷۱ درصدی در استحصال آب خواهد بود که اعمال سیاست قیمتی آب تحت سناریوی ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، این میزان کاهش را به ۵۶ درصد می‌رساند. در واقع اعمال سیاست قیمتی آب باعث کاهش ۱۵ درصدی مصرف آب تا سال ۱۴۱۶ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، آب‌های زیرزمینی، برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، مدل دینامیکی، شهداد

^۱ دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ali.dehghany@iran.ir

^۲ استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (نویسنده مسئول)، zare@uk.ac.ir

^۳ استادیار گروه ریاضی، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، waezizadeh@uk.ac.ir

^۴ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، zounemat@uk.ac.ir

^۵ دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، amirtaimoori@uk.ac.ir

مقدمه

یکی از منابع طبیعی مهم در سطح جهانی و یکی از نهاده های مهم و کمیاب بخش کشاورزی ایران، آب است. بخش کشاورزی در ایران علاوه بر این که مصرف کننده آب شیرین تجدید شونده است، ۱۸ درصد از تولید ناخالص ملی، ۲۵ درصد از اشتغال و ۲۵ درصد از صادرات غیر نفتی را تأمین می کند. بنابراین کارآمد بودن تخصیص آب در الگوی کشت هر منطقه باید مدنظر قرار بگیرد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۸).

پیش بینی ها در زمینه ی بحران آب نشان می دهد که تا سال ۲۰۵۰ میلادی مسأله ی مدیریت منابع آب، اصلی ترین موضوع مورد بحث در کشورهای مختلف جهان خواهد بود. بر اساس پیش بینی های انجام شده، کشور ایران نیز به لیست کشورهایی که با وضعیت کمبود شدید آب مواجه هستند، اضافه خواهد شد (پرهیزکاری و صبحی، ۱۳۹۲).

بر اساس شاخص فالکن مارک، کشورهای با سرانه ی آب کمتر از ۱۷۰۰ مترمکعب، در مرحله ی تنش آبی قرار دارند (براون، ۲۰۱۱). با توجه به این که سرانه ی منابع آب تجدید شونده ی ایران به کمتر از ۱۶۰۰ مترمکعب رسیده است (باقری، ۱۳۹۴)؛ بنابراین ایران نیز در مرحله ی تنش آبی قرار گرفته است.

مطالعات انجام شده در زمینه آبخوان های کشور نشان می دهد که میزان برداشت از آب های زیرزمینی بیشتر از میزان تغذیه آن ها است و این امر باعث افت سطح ایستابی آب در اکثر آبخوان ها شده است (محمدجانی و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین شناخت وضعیت موجود یک آبخوان و پیش بینی وضعیت آینده آن به عنوان اولین گام در مدیریت حفظ و ارتقای کمیت آب در آن آبخوان و همچنین عامل مهم در اتخاذ سیاست های مؤثر در زمینه عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. از آب یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان تولید و عملکرد محصولات کشاورزی به شمار می رود، مدیریت کارآی این نهاده ی کمیاب یکی از زمینه های مهم توسعه کشاورزی محسوب می شود. (میرزاده و همکاران، ۱۴۰۲)

برای مدیریت کارآی منابع، پیش بینی سطح آب یک آبخوان در بلندمدت یک نیاز اساسی به شمار می آید؛ این کار توسط شبیه سازی تغییرات آبدی چاه های بهره برداری در آینده با استفاده از مدل های ریاضی امکان پذیر است. با استفاده از این مدل ها می توان روند تغییرات آبدی را بدون نیاز به زمان و هزینه زیاد، پیش کرد.

بنابراین یکی از هدف های محوری فرآیند توسعه اقتصادی در بخش کشاورزی، استفاده بهینه از آب می باشد. در این میان سیاست های مدیریت عرضه آب، اغلب پرهزینه بوده و تخریب و آلودگی بیشتر منابع آب های سطحی و زیرزمینی را فراهم می آورد. از این رو، سیاست های مدیریت تقاضای آب ضروری است. هدف اصلی در مدیریت تقاضای آب، مهار (کنترل) تقاضا و بهره برداری کارآمد آب است. ابزار اقتصادی در این زمینه شامل مدیریت قیمت آب، روش های مدرن در زمینه آبیاری و استفاده از الگوهای کشت بهینه می باشند. (طرفدار و همکاران ۲۰۱۶)

اهمیت بهینه سازی الگوی کشت، آنجا آشکار می شود که مصرف بی رویه از آب های زیرزمینی کشور در عملیات کشاورزی، افزون بر ایجاد بحران های اقتصادی و فنی در سفره های آب زیرزمینی، موجب کاهش سطح معیشتی کشاورزان نیز شده است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۸).

استفاده از سیاست های قیمتی آب برای تعیین الگوی کشت مناسب به نحوی که براساس آن بتوان حداکثر بهره وری را از عامل محدودکننده آب به دست آورد، از راه کارهای عملی و علمی در زمینه حفظ و احیاء منابع آب زیرزمینی و همچنین افزایش سودناخالص کشاورزان می باشد. حفظ درآمد کشاورزان به ویژه در شرایط اقتصادی کنونی از مسائل مهمی است که در کنار ارائه راهکار برای حل معضل کم آبی می بایست مورد توجه قرار گیرد. زیرا سیاست به کار گرفته شده در تصمیمات اصلی کشاورزی هر منطقه، زمانی کارآ و اثربخش خواهد بود که بتواند در مسیر اصلاح الگوی کشت محصولات کشاورزی علاوه بر مدیریت مصرف آب، حداکثر سازی سود تولیدکنندگان را نیز در نظر بگیرد (پناهی و فلسفیان، ۱۴۰۰).



برنامه‌ریزی ریاضی مثبت موفق می‌شود عناصر پویا مانند هزینه‌ها، قیمت‌ها، یارانه‌ها و غیره را در تابع هدف خود ادغام کند و آن‌ها را به‌طور خودکار محاسبه کند.

میرزاده و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهش خود با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به تحلیل و مقایسه الگوی کشت و سودناخالص کشاورزان دو حالت ناشی از اجرای سیاست‌های قیمتی و غیرقیمتی آب و اجرای سیستم آبیاری تحت فشار در سطح مزارع شهرستان ارزوئیه از توابع استان کرمان پرداختند. نتایج نشان داد که با اتخاذ سیاست قیمتی آب، سطح زیرکشت محصولات با کم‌ترین آب مصرفی، افزایش و دیگر محصولات منتخب با کاهش سطح زیرکشت مواجه شدند. سودناخالص مدل تحت سناریوی ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، ۲۶ درصد کاهش و به طور هم زمان آب مصرفی به میزان ۱۰/۵ درصد کاهش یافت. مقایسه این سیاست با اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای نشان داد که اجرای این سیستم آبیاری نسبت به سطح مشاهده شده، سودناخالص مدل را به میزان ۳۰/۷۵ درصد افزایش و آب مصرفی محصولات منتخب را به میزان ۲۱۰ درصد کاهش می‌دهد.

دهقانی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات سیاست‌های قیمتی و غیرقیمتی آب آبیاری بر الگوی کشت و سود ناخالص کشاورزان بخش شهداد از توابع شهرستان کرمان پرداختند. آن‌ها از مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت با تابع هزینه درجه دوم و تابع تولید با کشت جانشینی ثابت استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که با اتخاذ سیاست قیمتی آب، سطح زیرکشت محصولات که مصرف آب کمتری دارند، افزایش و سطح زیرکشت سایر محصولات منتخب، کاهش یافت. سود ناخالص مدل تحت سناریو ۱۰۰ درصد افزایش هزینه‌های استحصال آب، ۲۶ درصد کاهش یافت. اتخاذ سیاست غیرقیمتی آب آبیاری تحت سناریوی ۱۵ درصد، سبب کاهش سطح زیرکشت همه‌ی محصولات منتخب شد و با اعمال این سناریو، سود ناخالص مدل، ۴۸ درصد کاهش یافت.

حسن‌وند و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای بررسی کاربرد مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به جهت برآورد اثر سناریوی تغییر قیمت و اندازه آب کشاورزی روی الگوی

وقتی که عرضه آب با مشکل روبه‌رو است، توجه به نحوه مصرف آب یعنی طرف تقاضا ظهور و نمود پیدا می‌کند. بنابراین، افزایش فاصله بین توزیع و درخواست برای آب در آینده، نگاه ویژه‌ای به تدابیر اقتصادی در زمینه مدیریت منابع آب و تخصیص بهینه آن را می‌طلبد. (شیرزادی لسکوکلایه و همکاران، ۱۳۹۸).

بنابراین نکته اساسی که در خصوص برداشت از ذخایر محدود آب مطرح است، نبود موازنه بین عرضه و تقاضای آب جهت فعالیت‌های کشاورزی است. در واقع استفاده بیش از حد ذخایر آبی سبب بر هم خوردن تعادل منبع و ناپایداری آن شده است و به همین دلیل ارتقای پایدار کشاورزی را غیر ممکن کرده است؛ بنابراین موازنه کردن تغذیه و استحصال ذخایر آب زیر زمینی ضروری می‌باشد (الهی و همکاران، ۱۳۹۷).

تحقیق حاضر سعی می‌کند تا علاوه بر شناخت وضعیت موجود و آینده‌ی دینامیک کمیت آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد، با توجه الگوی کشت فعلی منطقه، آثار سیاست قیمتی (افزایش هزینه استحصال) آب را بر روی این دینامیک مورد تجزیه تحلیل قرار دهد.

مروری بر پیشینه تحقیق:

مولوجیانی (۲۰۲۲)، در پژوهشی سه مدل برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده برای مدیریت پایدار زمین و مزرعه در منطقه مقدونیه مرکزی یونان را مورد مقایسه قرار داد. مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده وی، راه‌حل بهینه را با توجه به اهداف متفاوت و متضاد محاسبه کردند و همچنین نتایج حاصل از روش‌شناسی برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) و برنامه‌ریزی هدف وزنی (WGP)، از نظر تغییرات زمین کشاورزی پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر مدل، دارای مزایا و معایب منحصر به فردی است که می‌توان از هر یک در موقعیت‌های خاص استفاده کرد. مدل برنامه‌ریزی خطی منجر به بالاترین افزایش حاشیه ناخالص نسبت به مدل‌های PMP و WGP شد اما در رسیدن به اهداف دیگر کشاورزان ناکام بود. وی ثابت کرد که با توجه به ایستابودن مدل LP، استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی در مواردی توصیه می‌شود که ما به دنبال یک هدف منفرد و برای یک فصل رشد خاص باشیم. از طرف دیگر، مدل

پشتیبان، پیش بینی کرد. نتایج نشان داد که سطح ایستابی آب در طول دوره بلندمدت، کاهش خواهد بود.

رهنما و همکاران، ۱۳۹۹ در پژوهشی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت شهداد را بررسی کردند. آن ها در مطالعه خود، با استفاده از مدل MODFLOW، تغییرات سطح ایستابی آبخوان شهداد را شبیه سازی کردند. نتایج بیانگر کاهش سطح ایستابی در قسمت شمال، شرق، جنوب و قسمتی از نواحی مرکزی آبخوان بود.

یکی از نوآوری های پژوهش حاضر، بررسی دینامیک کمیت آب در آبخوان شهداد با استفاده از یک مدل ریاضی بر پایه معادلات دیفرانسیل است. این مدل، فاکتورهایی نظیر نرخ چاه های مستعد خشکسالی، نرخ احیاء طبیعی چاه ها، نرخ احیاء توسط عوامل انسانی (چاه های دچار بحران اقتصادی) و نرخ چاه های خشک شده (چاه های دچار بحران تکنیکی) را در نظر می گیرد. بنابراین در بخش اول این مطالعه سعی بر این است که با استفاده از مدل سازی ریاضی، شرایط موجود و آینده کمیت آب های زیرزمینی آبخوان شهداد را مورد بررسی قرار دهیم. این مدل نشان می دهد که آبخوان مذکور چگونه به عوامل خشکسالی و استخراج بی رویه آب واکنش نشان می دهد. مدل دینامیکی مورد استفاده در بخش اول این پژوهش، بر اساس مدل کرماک و مکن دریک و بر پایه تقسیمات جمعیتی نوشته شده است. در بخش دوم این پژوهش، آثار اعمال سیاست قیمتی آب بر الگوی کشت زراعتکاران دشت شهداد در قالب برنامه ریزی ریاضی مثبت مورد بررسی قرار گرفت و در بخش سوم آثار این تغییر الگوی کشت بر دینامیک کمیت آب های زیرزمینی دشت شهداد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

معرفی مدل و روش پژوهش

شهداد یکی از بزرگ ترین بخش های کشور ایران است که در شهرستان کرمان بین ۵۷ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه طول جغرافیایی و ۲۹ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۵ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است. مساحت این بخش ۲۹۴۵۲/۱۸۳ کیلومتر مربع بوده و در شمال شرق استان کرمان قرار گرفته است. بخش شهداد، با

کشت گیاهان زراعی در شهرستان نکا را انجام دادند؛ در این راستا از روش برنامه ریزی ریاضی مثبت (PMP) برای شبیه سازی واکنش کشاورزان در شهرستان نکا استفاده شد. نتایج به دست آمده بیانگر این بود که رشد قیمت آب کششی بر تقاضای آب ندارد.

سامریتی و همکاران ۲۰۲۵، در مطالعه ای، ذخیره آب های زیرزمینی آبخوان اوگالالا در ایالات متحده را در یک دوره بلندمدت، تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی، پیش بینی کردند؛ آن ها در این پژوهش، از یک مدل هوش مصنوعی مبتنی بر آب و هوا برای پیش بینی تغییرات جهانی در ذخیره آب های زیرزمینی (GWS) مشتق شده از GRACE استفاده کردند. نتایج نشان داد که عامل حداکثر دما، مهمترین عامل در اثرگذاری بر ذخیره آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است.

بوچزون و همکاران ۲۰۲۵، در مطالعه ای، تغییرات بلندمدت سطح آب های زیرزمینی در جنگل بیالوویژا لهستان را تحت تأثیر تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل آن ها نشان داد که سطح آب های زیرزمینی بین سال های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵، به طور متوسط ۰/۲۱ متر کاهش داشته است. یافته ها نشان داد که فاکتور گرما در منطقه مورد مطالعه، بیشترین تأثیر را بر کاهش سطح آب های زیرزمینی خواهد داشت.

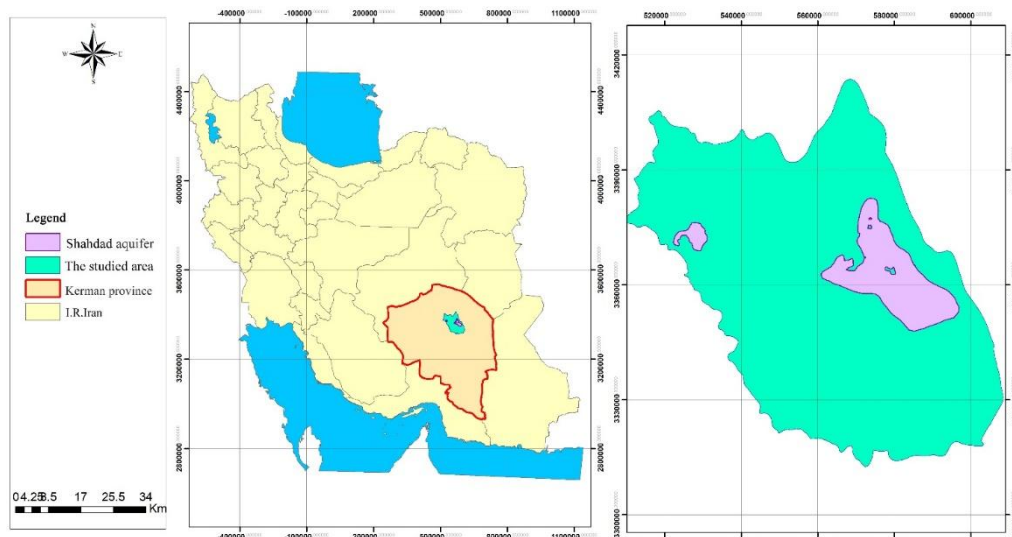
آفریفا و همکاران ۲۰۲۵، در پژوهشی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات سطح آب های زیرزمینی منطقه ای از غنا را مورد بررسی قرار دادند. آن ها برای این هدف، از الگوریتم شبکه های عصبی استفاده کردند. آن ها با استفاده از داده های GWL و متغیرهای اقلیمی (CVs) مانند بارندگی و دما، دینامیک آب های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. طبق یافته های آن ها، GWL در طول ۱۰ سال گذشته در حال رشد بوده است، اما در آینده کاهش خواهد یافت.

شالودگی و بایزیدی (۱۴۰۰) در پژوهش خود، سطح ایستابی آب زیرزمینی آبخوان چهاردولی در شهرستان قروه را با استفاده از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار



مجموع آب در دسترس در منطقه شهداد جهت فعالیت‌های کشاورزی، حدود ۸۵/۲۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده، این مقدار آب در دسترس، از ۱۷۷ چاه عمیق و ۲۲ چاه نیمه‌عمیق (شکل ۲)، ۴۶ قنات دایر و ۸ رودخانه‌ی فصلی استحصال می‌شود. جدول (۱)، تعداد و مقادیر آب استحصال شده از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق (بیشترین منبع مورد استفاده در منطقه شهداد) را نشان می‌دهد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۴۰۳).

میانگین دمای بیشینه ۴۱/۳ و میانگین دمای کمینه ۱۳/۹ درجه سانتیگراد؛ همچنین میانگین بارش ۲۴ میلیمتر در سال، در زمهری مناطق گرم و خشک دارد (سازمان هواشناسی استان کرمان، ۱۳۹۷). مجموع آب قابل برنامه‌ریزی در منطقه شهداد جهت فعالیت‌های کشاورزی، حدود ۷۵/۲۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که از ۱۹۷ چاه در سال ۱۴۰۲ استحصال می‌شود. منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، آبخوان شهداد، واقع در زیر حوضه غرب کویر لوت و به وسعت ۴۷۲ کیلومتر مربع است. ارتفاع این آبخوان از سطح دریا از ۲۷۰ تا ۴۴۰ متر، متغیر است. شکل شماره ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و محدوده آبخوان شهداد در این منطقه را نشان می‌دهد.



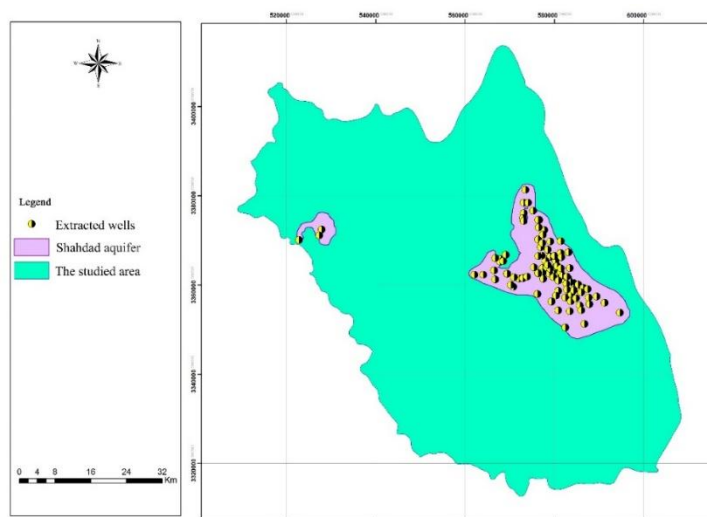
شکل (۱): موقعیت جغرافیایی دشت شهداد در استان کرمان و آبخوان شهداد در دشت شهداد استان کرمان

جدول (۱): اطلاعات مربوط به چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بخش شهداد

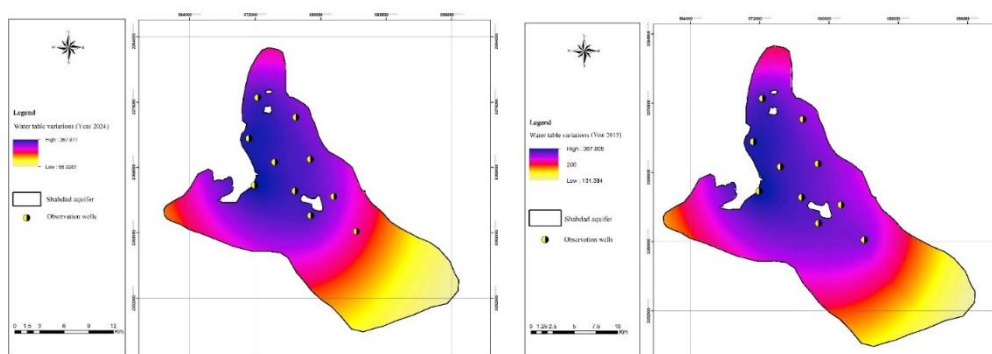
(تخلیه سالانه بر حسب هزار مترمکعب در سال)

ردیف	تعداد	متوسط عمق (متر) حداکثر عمق (متر)	متوسط دبی (لیتر بر ثانیه) حداکثر دبی (لیتر بر ثانیه)	تخلیه سالانه
۱	چاه‌های نیمه عمیق ۲۲	۳۳ ۶۵	۷/۷ ۲۴/۵	۲۲۴۳
۲	چاه‌های عمیق ۱۷۷	۱۳۴ ۲۲۰	۲۰/۴ ۴۷/۱	۶۱۳۴۰

مأخذ: شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۴۰۳



شکل (۲): موقعیت آبخوان شهداد به همراه چاه‌های بهره‌برداری در نرم افزار GIS



شکل (۳) تغییرات سطح ایستابی آب و موقعیت چاه‌های مشاهداتی در آبخوان شهداد

در این مطالعه، یک مدل دینامیکی معرفی می‌شود که روند خشک شدن چاه‌های آب را شرح می‌دهد. در این مدل، چاه‌هایی که احیاء آن‌ها نیازمند صرف هزینه‌های اقتصادی می‌باشد را چاه‌های دچار بحران اقتصادی می‌نامیم. منظور از احیاء چاه‌ها، انجام یک سری عملیات برای از بین بردن عوامل مؤثر در کاهش آبدی چاه‌های آب است که نتیجه آن عملیات، افزایش آب دهی چاه‌ها است. با توجه به اطلاعات مربوط به چاه‌های مورد استحصال (عمق چاه‌ها، میزان استحصال و دبی آب) در آبخوان شهداد در یک بازه

در آبخوان مورد مطالعه، ۱۰ چاه مشاهداتی قرار دارد که تغییرات سطح ایستابی آب در محدوده آبخوان، مربوط به این چاه‌ها می‌باشد (شکل ۳). تغییرات سطح ایستابی آب در آبخوان شهداد، در یک بازه زمانی ده ساله (طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲)، نشان‌دهنده کاهش سطح ایستابی آب در قسمت‌های شمال، جنوب شرق و غرب آبخوان است. بنابراین پیش‌بینی دینامیک کمیت آب‌های زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه ضروری می‌باشد.

ثابت K در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، $S(t) + I(t) + Q(t) + T(t) + R(t) = K$ برای سادگی محاسبات، معادله آخر حذف می‌شود. این مدل به شکل ساده‌تری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta S(I + Q) + \lambda R + m(K - S - I - Q - R) + \eta Q \\ \frac{dI}{dt} = \beta S(I + Q) - (\gamma + \eta_1)I \\ \frac{dQ}{dt} = G_\gamma I - (\mu + \eta)Q \\ \frac{dR}{dt} = \mu Q + \mu_1 I - \lambda R \end{cases} \quad (2)$$

این مدل دو نقطه تعادل دارد. نقطه تعادل عاری از خسارت، $E_0 = (K, 0, 0, 0)$ ، زمانی اتفاق می‌افتد که همه چاه‌های آب مستعد خشکسالی باشند. در این مورد، هنوز هیچ چاهی بحران خشکسالی را تجربه نکرده است.

نقطه تعادل دیگر، نقطه تعادل بومی، $E^* = (S^*, I^*, Q^*, T^*)$ است. در این حالت، چاه‌ها در بحران خشکسالی قرار دارند. مؤلفه‌های E^* عبارتند از $R^* = \frac{G_\gamma I^*}{\mu + \eta}$ و $S^* = \frac{(\gamma + \mu_1)(\mu + \eta)}{\beta(G_\gamma + \mu + \eta)}$ و $I^* = \frac{S^* - K}{Y}$ و $\frac{1}{\lambda}(\frac{\mu G_\gamma}{\mu + \eta} + \mu_1)I^*$ به راحتی می‌توان نشان داد، $Y = -\beta S^* \left(\frac{\mu G_\gamma}{\mu + \eta} + 1 \right) + \frac{(\mu + \eta)G_\gamma}{\mu + \eta}$ ، بنابراین خواهیم داشت: $S^* > 0, Q^* > 0, I^* > 0$ and $R^* > 0$.

رفتار دینامیکی حالت پایدار E_0

در این بخش، با استفاده از مقدار R_0 ، پایداری نقطه تعادل E_0 بررسی می‌شود. اگر $R_0 > 1$ باشد، نقطه تعادل

E_0 به صورت مجانبی پایدار است که با خطی‌سازی سیستم در E_0 ، ماتریس ژاکوبین زیر به دست می‌آید.

$$J(E_0) = \begin{bmatrix} 1 & -\beta K - 1 & -\beta K + \eta - 1 & \lambda - 1 \\ 0 & \beta K - \mu_1 - \gamma & \beta K & 0 \\ 0 & G_\gamma & -\mu - \eta & 0 \\ 0 & \mu_1 & \mu & -\lambda \end{bmatrix} \quad (3)$$

زمانی هفت ساله (۱۳۹۶-۱۴۰۲) مدل ریاضی زیر پیشنهاد شده است. تعداد چاه‌های آب عدد ثابت K در نظر گرفته شد، زیرا به دلیل خشکسالی، اجازه حفر چاه جدید داده نمی‌شود.

مدل دینامیک کمیت آبخوان

در این مدل، چاه‌های آب منطقه به پنج کلاس تقسیم شده‌اند. کلاس اول، $S(t)$ ، تعداد چاه‌های مستعد خشکسالی در زمان t است. برخی از این چاه‌ها دچار خشکسالی شده و با نرخ β وارد کلاس I (چاه‌های دچار خشکسالی) می‌شوند. μ ، کسری از چاه‌های کلاس I است که خشک می‌شوند. این چاه‌ها وارد کلاس R می‌شوند که کلاس چاه‌های خشک شده است. بقیه به دو گروه تقسیم می‌شوند. برخی از آن‌ها به طور خودکار با عوامل طبیعی بهبود می‌یابند (کلاس T). تعدادی از چاه‌های کلاس I دچار بحران اقتصادی (چاه‌هایی که با صرف هزینه احیاء می‌شوند) شده و وارد کلاس Q می‌شوند. کسری از این چاه‌ها بازیابی می‌شوند (η). همچنین، برخی از چاه‌ها با نرخ μ خشک شده و از کلاس Q خارج می‌شوند. چاه‌های آب احیاء شده با نرخ m مستعد خشکسالی می‌شوند. به کشاورزان اجازه داده می‌شود که به میزان چاه‌های خشک شده، چاه‌هایی در نزدیکی چاه قبلی حفر کنند (λ). در این مدل، کسری از γG_γ از کلاس I دچار بحران اقتصادی می‌شود. همچنین، کسری از γF_γ از کلاس I با عوامل طبیعی احیاء می‌شوند که $F = 1 - G$. تمام پارامترهای مدل مثبت و بین صفر و یک هستند. مدل دینامیکی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta S(I + Q) + \lambda R + mT + \eta Q \\ \frac{dI}{dt} = \beta S(I + Q) - (\gamma + \eta_1)I \\ \frac{dQ}{dt} = G_\gamma I - (\mu + \eta)Q \\ \frac{dT}{dt} = F_\gamma I - mT \\ \frac{dR}{dt} = \mu Q + \mu_1 I - \lambda R \end{cases} \quad (1)$$

از آنجا که چاه‌های جدید در نزدیکی چاه‌های خشک شده حفر می‌شوند، می‌توان آن‌ها را جایگزین چاه‌های خشک شده دانست. از این‌رو، جمعیت چاه‌های آب

طبق نظریه روث-هورویتز، همه ریشه‌ها منفی هستند و تعادل E_0 به صورت مجانبی پایدار است (دهقانی و همکاران، ۲۰۲۶)

شبیه‌سازی عددی

با استفاده از داده‌های پژوهش حاضر، پارامترهای مدل در جدول ۱ تخمین زده شده‌اند. مقادیر اولیه عبارتند از $T(0) = 1$ و $Q(0) = 4$ و $I(0) = 19$ و $S(0) = 94$ و $R(0) = 4$ (دهقانی و همکاران، ۲۰۲۶)

مقادیر ویژه ماتریس $J(E_0)$ در معادله زیر ارضاء می‌شوند.

$$x^2 + a_1x + a_0 = 0 \quad (4)$$

به طوری که:

$$a_0 = (\mu + \eta)(-\beta K + \gamma - \mu_1) - \beta K G_\gamma \quad (5)$$

$$a_1 = -\beta K + \mu_1 + \gamma + \mu + \eta \quad (6)$$

با استفاده از این فرض که، $R_0 = \frac{\beta K}{\mu_1 + \gamma} < 1$ و از سوی دیگر، $a_1 > 0$ و $\beta K < \mu_1 + \gamma$

$$\begin{aligned} a_0 &= -\beta K(\mu + \eta + G_\gamma) + (\mu + \eta)(\gamma + \mu_1) \\ &> -\gamma(\mu + \eta) + (\mu + \eta)(\gamma + \mu_1) \\ &> 0 \quad (7) \end{aligned}$$

جدول (۲) مقادیر پارامترها برای چهار کلاس ارائه شده در مدل

ردیف	تعاریف	پارامتر	مقدار
۱	نرخ چاه‌های دچار خشکسالی	β	۰/۰۸۴۲۰۸۶۸
۲	کسری از چاه‌های کلاس I که خشک شده‌اند	μ	۰/۱۶۶
۳	کسری از چاه‌های کلاس Q که احیاء شده‌اند	η	۰/۵۴۶۸
۴	میزان چاه‌های احیاء شده که مستعد خشکسالی هستند	m	۱
۵	میزان حفر چاه‌های جدید در نزدیکی چاه‌های خشک شده	λ	۰/۰۱۰۹
۶	کسری از چاه‌های کلاس I که به طور طبیعی احیا شده‌اند	F_γ	۰/۰۵۳۰
۷	کسری از چاه‌های کلاس I که در بحران اقتصادی هستند	G_γ	۰/۳۲۲۰
۸	نرخ ترک کلاس Q	γ	۰/۴

منبع: نتایج پژوهش (دهقانی و همکاران، ۲۰۲۶)

مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت

و اصول معینی به بررسی آثار سناریوهای مورد نظر پرداخت (هاویت و همکاران، ۲۰۱۲).

مدل‌های PMP در کشاورزی بیشتر برای ارزیابی تأثیر تغییرات احتمالی در شرایط بازار و همچنین تأثیر سیاست‌های اعمال شده در این بخش بر الگوی کشت، مصرف آب و پیامدهای آن، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (کورتیگانی و سورینی، ۲۰۰۸). در روش PMP ارائه شده در تحقیق حاضر، فعالیت‌ها در سطح مشاهده شده و مقادیر دوگان محدودیت‌های سیستمی توسط روش غیرخطی واسنجی شده، همانندسازی می‌شوند (هاویت، ۲۰۱۲).

برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) یک مدل برآورد تجربی می‌باشد که همه داده‌های در دسترس را جدا از این که چه اندازه کمیاب می‌باشند بکار می‌برد. فرض روش PMP این است که ترکیب فعالیت مشاهده شده در مزرعه انعکاس‌دهنده انتخاب بهینه مورد نظر کشاورز است (بی‌نیاز و همکاران، ۱۴۰۰). مزیت اصلی مدل‌های PMP فقط کالیبراسیون خودکار مدل‌های بهینه‌سازی است (آریباس و همکاران، ۲۰۲۰). رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی مثبت سنجش مدل‌های برنامه‌ریزی را نسبت به سطح مشاهده شده، امکان‌پذیر می‌کند. مدل‌های PMP به عنوان مدل‌های بهینه‌سازی کالیبره شده شناخته می‌شوند. بنابراین با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تحت قاعده

این محدودیت حاصل جمع مقدار تمام عوامل که به فعالیت‌های زراعی در ناحیه هدف پژوهش اختصاص داده شده و سمت چپ این محدودیت نیاز فعالیت‌های تولیدی به سایر عوامل تولید می‌باشد.

رابطه‌ی (۱۲)، بیان‌کننده محدودیت نیروی کار است که در آن، La_i ، نیروی کار لازم جهت تولید محصول i (بر مبنای نفر ساعت در هکتار) و Tla_r ، تمام نیروی کار در موجود در ناحیه مورد نظری می‌باشد.

رابطه (۱۳)، نشان‌دهنده مثبت بودن سطح فعالیت‌ها می‌باشد و اطمینان می‌دهد که مدل به کار گرفته شده در بالا از نظر فیزیکی، میسر و قابلیت انجام شدن دارد، عکس‌العمل زارعین به سیاست افزایش قیمت آب (افزایش هزینه استحصالی)، بر اساس سناریوهای ۲۵، ۷۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، در سطح دشت شهادت، مورد برآورد قرار گرفت. برای هر کدام از تدابیر بر اساس مدل‌های بیان گردیده، مقدار تغییر در الگوی کشت و سودناخالص زارعین برآورد شد. لازم به تذکر می‌باشد که در مدل حاضر، قیمت نهاده‌ی آب جهت تولید تمام محصولات منتخب، از میزان هزینه‌های برداشت (هزینه برق، حفاظت و مکانیکی) حاصل شده است.

اطلاعات لازم جهت اجرای این تحقیق از سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ فراهم گردید که سطح زیرکشت، عملکرد در واحد سطح محصولات، اندازه ذخایر آب موجود، آب موردنیاز، بهای آب مصرف شده، مخارج تولید و نرخ منطقه‌ای محصولات منتخب در ناحیه مورد پژوهش را شامل می‌شود. این اطلاعات از طریق پرسشنامه، داده‌های اداره جهاد کشاورزی شهادت و شرکت آب منطقه ای استان کرمان اخذ شد.

نتایج و بحث

نتایج بخش اول پژوهش حاضر، حاصل از مدل دینامیکی آبخوان شهادت با استفاده از نرم‌افزار متلب و روش رانگ-کوتا مرتبه چهار، در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودارها تعداد چاه‌ها در هر کلاس را در بلندمدت نشان داده‌اند.

$$\begin{aligned} \text{MAX } \Pi = & \sum_{i=1}^4 p_i Y_i \\ & - \sum_{i=1}^4 \alpha_i x_{i,land} - \frac{1}{2} \gamma_i x_{i,land}^2 \\ & - \sum_{i=1}^4 \sum_{j \neq land}^4 (c_{ij} x_{ij}) \end{aligned} \quad (8)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^4 x_i \leq A_r \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^4 w_i x_i \leq W_r \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^4 k_i x_i \leq TK_r \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^4 La_i \cdot x_i \leq TLa_r \quad (12)$$

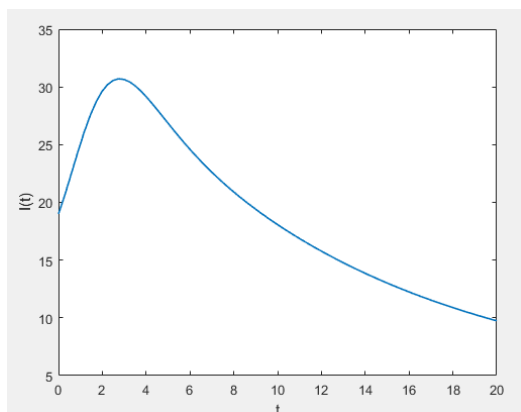
$$x_i \geq 0 \quad (13)$$

رابطه‌ی (۸)، تابع هدف غیرخطی مدل است تابع تولید منطقه‌ای، تابع هزینه درجه دو برای نهاده‌ی زمین و تابع هزینه‌ی خطی برای نهاده‌های دیگر (آب، نیروی کار و سایر عوامل تولید) را شامل می‌شود. در این رابطه Y_i ، تابع تولید محصول i است (تابع تولید CES). نخست تابع تولید برآورد شده در تابع هدف غیرخطی برای حل روش بالا جای‌گزاری می‌گردد. پس از آن با نگاه به تدابیر اتخاذ شده مقدار تغییرات براساس سناریوهای متفاوت، برآورد و بیان می‌گردد.

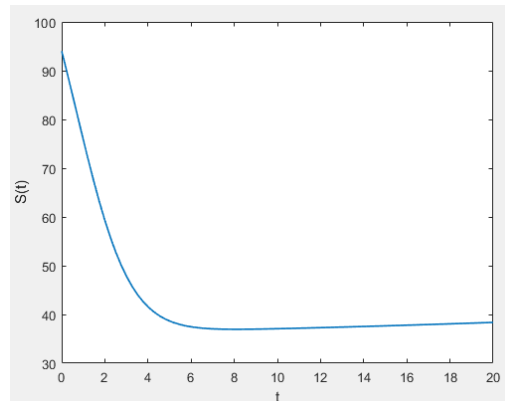
رابطه‌ی (۹)، نشان دهنده محدودیت سطح زیرکشت محصولات کشاورزی است که در آن A_r ، تمام مساحت کشت شده در ناحیه هدف پژوهش می‌باشد.

رابطه‌ی (۱۰)، بیان‌کننده محدودیت مختص به نهاده‌ی آب است که در آن W_i ، نیاز آبی محصول i (بر حسب مترمکعب در هکتار) و W_r ، تمام آب قابل استحصال ناحیه هدف می‌باشد. این محدودیت بر این فرض استوار است که آب سالیانه، جهت ناحیه هدف قابل استحصال است.

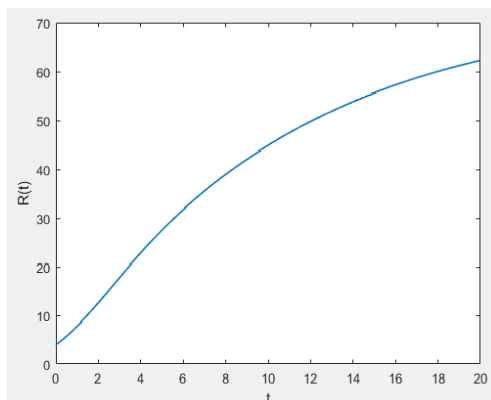
رابطه‌ی (۱۱)، محدودیت سایر عوامل تولید را نشان می‌دهد که در آن k_i ، ضریب فنی این عوامل در واحد سطح محصول i و TK_r ، تمام عوامل تولید (مجموع نهاده‌های بذر، کود و سم) موجود در ناحیه هدف پژوهش است. در حقیقت سمت راست



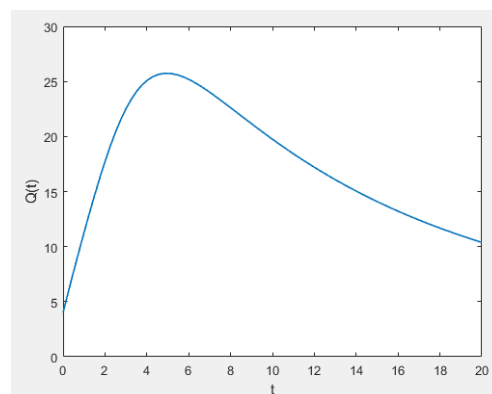
ب) منحنی جواب چاه‌های دچار خشکسالی



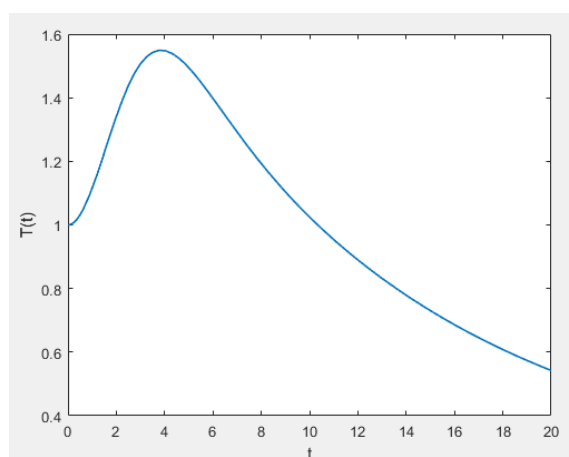
الف) منحنی جواب چاه‌های مستعد خشکسالی



د) منحنی جواب چاه‌های خشک شده



ج) منحنی جواب چاه‌های دچار بحران اقتصادی



ه) منحنی جواب چاه‌های احیاء شده با عوامل طبیعی

شکل (۴): نتایج مدل دینامیکی کمیت آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد



تبعات سنگینی بر کشاورزی منطقه خواهد داشت؛ علاوه بر این، کاهش استحصال آب از آبخوان شهداد، خسارات جبران ناپذیری بر تغذیه طبیعی آبخوان خواهد داشت. در واقع، خشک شدن چاه‌های بهره‌برداری به معنی کاهش سطح ایستابی آب در آبخوان است که این امر تغذیه طبیعی آبخوان را دچار اختلال می‌کند.

تأثیر سیاست افزایش قیمت آب روی الگوی کشت

نتایج بخش دوم پژوهش حاضر، حاصل از مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت با استفاده از نرم‌افزار گمز و بیان می‌شود. اعمال سیاست افزایش قیمت آب، موجب افزایش سطح زیرکشت محصولات جو آبی و سیر می‌شود. به این صورت که سطح زیرکشت جو آبی از ۷۹۸ هکتار در سال پایه، بر اساس سناریوهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، به ترتیب به ۸۰۴، ۸۳۳، ۸۳۶ و ۸۷۸ هکتار افزایش یافته است. در واقع با اجرای این سیاست تحت سناریوهای مذکور، سطح زیرکشت محصول جو آبی به ترتیب با افزایش ۰/۷۵، ۴/۳۹، ۴/۷۶ و ۱۰/۰۳ درصدی روبه‌رو می‌شود. سطح زیرکشت محصول سیر از مقدار مشاهده شده ۳۸۱ هکتار در سال پایه، تحت سناریوهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب به ترتیب به ۴۴۲، ۴۴۹، ۴۵۷ و ۴۹۱ هکتار افزایش می‌یابد. درصد افزایش سطح زیرکشت محصول سیر تحت سناریوهای بیان شده به ترتیب ۱۶/۰۱، ۱۷/۸۵، ۱۹/۹۵ و ۲۸/۸۷ می‌باشد. سطح زیرکشت محصولات جو آبی و یونجه نسبت به سال پایه کاهش یافت (جدول ۳).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به میزان استفاده از چاه‌های موجود، تعداد چاه‌های مستعد در طول چهار سال از ۹۴ به ۴۰ کاهش یافته است. پس از آن، ثابت می‌ماند. زیرا برخی از چاه‌هایی که در سال‌های گذشته دچار بحران خشکسالی شده‌اند، احیا می‌شوند. علی‌رغم این که این چاه‌ها به چاه‌های مستعد خشکسالی اضافه می‌شوند اما نرخ احیاء پایین است. از این‌رو، تعداد کمی از چاه‌ها احیاء می‌شوند و تعداد چاه‌های مستعد برای سال‌ها حدود ۴۰ حلقه چاه باقی می‌ماند (شکل ۴. الف)

تعداد چاه‌های خسارت‌دیده از خشکسالی در سال‌های اولیه افزایش می‌یابد. زیرا تعداد چاه‌های فعال زیاد است. پس از سال چهارم، تعداد آن‌ها کاهش و بعد از سال چهارم، تعداد چاه‌های بهره‌برداری کاهش می‌یابد. بعد از ۲۰ سال حدود ۱۰ چاه فعال خواهد بود (شکل ۴. ب). به تبع کاهش نرخ در کلاس I، نرخ چاه‌ها در کلاس Q نیز روند کاهشی به خود می‌گیرد. روند مشابهی برای چاه‌هایی که دچار بحران تکنیکی (کلاس R) می‌شوند، رخ خواهد داد. تعداد آن‌ها پس از ۲۰ سال حدود ۱۰ چاه خواهد بود؛ در این حالت نمودار چاه‌های خشک شده صعودی است که نشان دهنده خشک شدن تعداد زیادی از چاه‌ها پس از ۲۰ سال می‌باشد.

نتایج پیش‌بینی مدل به خوبی نشان می‌دهد که ادامه روند فعلی استحصال آب از آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد، باعث خشک شدن اکثر چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۴۱۶ خواهد شد که معادل کاهش ۷۱ درصدی در استحصال آب خواهد بود. این کاهش در میزان برداشت آب،

جدول (۳): تغییرات ایجاد شده در سطح زیرکشت محصولات منتخب بر اساس سیاست افزایش قیمت آب

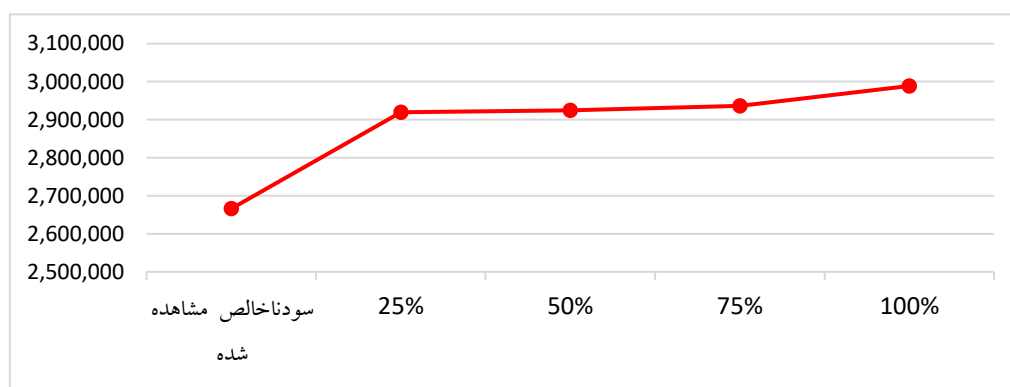
ردیف	محصول	سطح زیرکشت مشاهده شده	میزان تغییرات	افزایش هزینه استحصال تحت سناریوهای مختلف
۱	جو آبی	۷۹۸	مقدار	۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪
			درصد	۸۰۴، ۸۳۳، ۸۳۶، ۸۷۸
۲	گندم آبی	۶۷۳	مقدار	۰/۷۵، ۴/۳۹، ۴/۷۶، ۱۰/۰۳
			درصد	۶۵۹، ۶۴۲، ۶۵۱، ۶۵۹
۳	سیر	۳۸۱	مقدار	-۲/۰۸، -۴/۶۱، -۳/۲۷، -۲/۰۸
			درصد	۴۴۲، ۴۴۹، ۴۵۷، ۴۹۱
۴	یونجه	۱۰۷۴	مقدار	۱۶/۰۱، ۱۷/۸۵، ۱۹/۹۵، ۲۸/۸۷
			درصد	۱۰۲۱، ۱۰۰۲، ۹۸۲، ۹۰۱
				-۴/۹۳، -۶/۷۰، -۸/۵۷، -۱۶/۱۱

منبع: نتایج پژوهش

تأثیر سیاست افزایش قیمت آب بر سودناخالص

بر اساس نمودار (۵) ملاحظه می‌گردد که سود ناخالص مدل با اتخاذ سیاست افزایش قیمت آب تحت سناریوهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، روند افزایشی داشته و این افزایش با اعمال سناریوی ۱۰۰٪ افزایش قیمت آب، به

بالاترین سطح خود می‌رسد. به طوری که سودناخالص مدل، از ۲۶۶۶۰۳۷ میلیون ریال در سال پایه به ۲۹۸۸۷۶۴ میلیون ریال تحت سناریوی ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، افزایش می‌یابد.

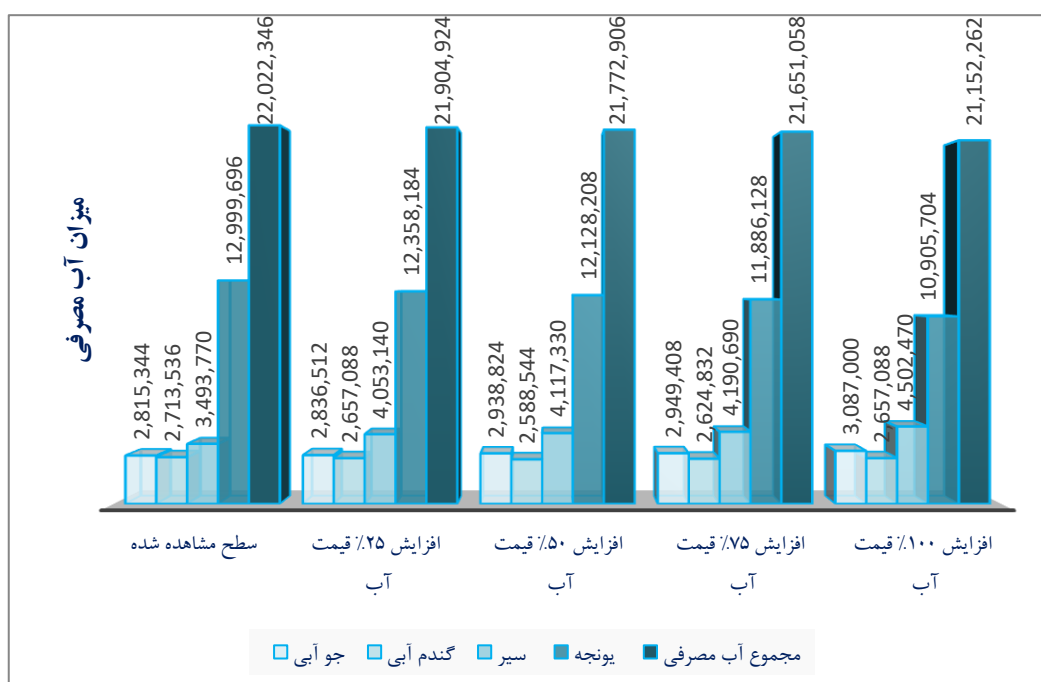


شکل (۵): روند تغییرات سود ناخالص مدل با اتخاذ سیاست افزایش قیمت آب

منبع: نتایج پژوهش

مصرفی محصولات منتخب به ترتیب ۰/۵۳، ۱/۱۳، ۱/۶۹ و ۳/۹۵ درصد، کاهش می‌یابد.

نمودار (۶) نشان دهنده این است که با اعمال سیاست افزایش قیمت آب (افزایش هزینه استحصال) تحت سناریوهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، مقدار مجموع آب



شکل (۶): مقایسه میزان آب مصرفی محصولات منتخب با اتخاذ سیاست افزایش قیمت آب



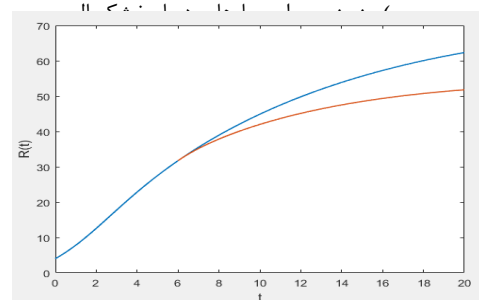
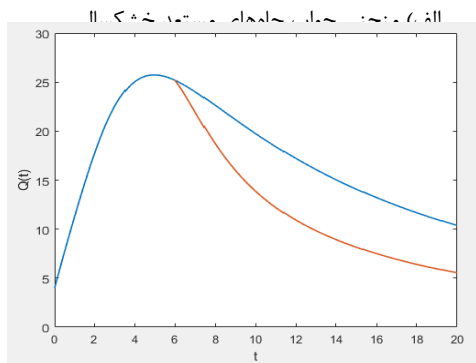
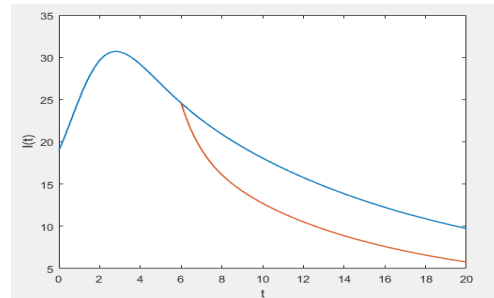
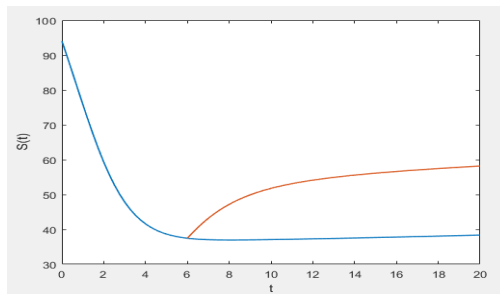
منبع: نتایج پژوهش

و نرخ چاه‌های کلاس T که با عوامل طبیعی احیاء شده‌اند، کاهش می‌یابد (نمودار ۷. ج و د). طبق نمودار (۷. ه)، پس از اعمال سیاست قیمتی آب، تعداد چاه‌های خشک شده از ۶۲ چاه به ۵۱ چاه کاهش می‌یابد.

نتایج مدل، به خوبی نشان می‌دهد که اعمال سیاست قیمتی آب در دشت شهداد ادامه روند فعلی استحصال آب از آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد که باعث خشک شدن اکثر چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۴۱۶ خواهد شد را بهبود بخشیده و کاهش ۷۱ درصدی استحصال آب (معادل ۴۶/۸ میلیون مترمکعب) در بازه زمانی بیست سال را به ۵۶ درصد (۳۶/۹ میلیون مترمکعب) می‌رساند. این صرفه‌جویی ۱۵ درصدی در میزان برداشت آب، بر حفظ و احیاء آبخوان شهداد از طریق افزایش سطح ایستابی و تسریع در فرآیند تغذیه طبیعی آبخوان، تأثیر بسزایی خواهد داشت.

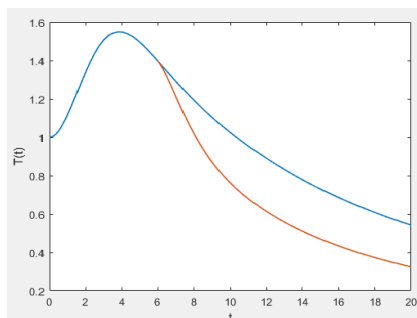
نتایج مدل دینامیکی آبخوان شهداد پس از اعمال سیاست افزایش ۱۰۰ درصدی قیمت آب

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با توجه به اعمال سیاست قیمتی تحت سناریوی ۱۰۰ درصد افزایش قیمت آب، نرخ احیاء چاه‌ها افزایش یافته است. از این‌رو، نسبت به قبل از اعمال سیاست قیمتی تعداد بیشتری از چاه‌ها احیاء می‌شوند و تعداد چاه‌های مستعد با سیری صعودی به ۵۹ حلقه چاه در سال بیستم می‌رسد (نمودار ۷. الف). به دنبال افزایش نرخ چاه‌ها در کلاس S، نرخ چاه‌ها در کلاس I کاهش می‌یابد به طوری که تعداد چاه‌های دچار خشکسالی در انتهای بازه‌ی زمانی بیست ساله به ۶ چاه می‌رسد (نمودار ۷. ب). به دنبال کاهش نرخ چاه‌های کلاس I، نرخ چاه‌های کلاس Q که با عوامل انسانی احیاء شده‌اند



د) منحنی، جواب چاه‌های خشک شده

ج) منحنی جواب چاه‌های دچار بحران اقتصادی



شکل (۷): نتایج مدل دینامیکی کمیت آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد پس از اعمال سیاست قیمتی آب
(ه) منحنی جواب چاه‌های احیاء شده با عوامل
منبع: نتایج پژوهش

نتایج:

مدل دینامیکی کمیت آب‌های زیرزمینی آبخوان شهداد، نشان می‌دهد که روند فعلی برداشت آب از این آبخوان در بازه زمانی بیست ساله، منجر به آسیب‌های جدی به این آبخوان خواهد شد. به طوری که ادامه روند فعلی استحصال آب در این منطقه، باعث خشک شدن اکثر چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۴۱۶ خواهد شد که معادل کاهش ۷۱ درصدی در استحصال آب خواهد بود. بنابراین اعمال سیاست‌هایی در جهت مدیریت مصرف آب در دشت شهداد ضروری است. اعمال سیاست افزایش قیمت آب از طریق افزایش هزینه استحصال آب، یکی از سیاست‌هایی است که الگوی کشت منطقه را به سمت افزایش سطح زیرکشت محصولات هدایت می‌کند که علاوه بر کاهش مصرف آب، سودناخالص کشاورزان منطقه را نیز افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اعمال این سیاست در دشت شهداد، علاوه بر کاهش چهار درصدی مصرف آب، سود ناخالص کشاورزان منطقه را به میزان ۱۲ درصد افزایش می‌دهد. اعمال این میزان از صرفه جویی آب در مدل دینامیکی کمیت آب آبخوان باعث شد که در بازه زمانی بیست ساله، ۱۵ درصد آب به چرخه آب آبخوان برگردد. که این میزان تقریباً معادل ۹/۸ میلیون مترمکعب خواهد بود. این مطالعه، رابطه بین میزان استحصال آب از چاه‌های بهره‌برداری و دینامیک آب‌های زیرزمینی را به خوبی بیان می‌کند. پیوندهای قوی بین پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل ریاضی مورد استفاده در این پژوهش، صحت پیش‌بینی‌های مدل و اعتبار ورودی‌های مدل را نشان

می‌دهد. از آنجا که مدل مورد استفاده در مطالعه حاضر بر پایه تقسیمات جمعیتی نوشته شده است، شکاف نظری و عملی بودن پژوهش را به خوبی پر کرده است؛ به طوری که سیستم دینامیکی حاصل را قابل اعتماد کرده و این امکان برای اعمال سیاست‌های کارآمد مانند سیاست قیمتی آب را در راستای بهبود دینامیک آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌سازد.

پیشنهادهات

قیمت آب کشاورزی در بخش شهداد باید به قیمت واقعی آن نزدیک شود. از طرفی اقلیم گرم و خشک دشت شهداد و از طرف دیگر منابع آب آبیاری منطقه که به صورت مالکیت قطعی در اختیار کشاورزان قرار دارد، آب‌های زیرزمینی این منطقه را با خطر جدی روبه‌رو ساخته است. تنها هزینه‌ای که کشاورزان منطقه در طول سال جهت مصرف آب پرداخت می‌کنند، هزینه برق مصرفی و تعمیرات پمپ‌های آب می‌باشد؛ از این‌رو بهترین راه برای رسیدن قیمت آب آبیاری به قیمت اقتصادی آن در کوتاه مدت حذف یارانه‌های برق مصرفی در بخش کشاورزی می‌باشد. با در نظر گرفتن نتایج پژوهش حاضر، در نتیجه‌ی حذف یارانه برق مصرفی و در پی آن بالابردن هزینه استحصال آب، به تدریج کشاورزان منطقه خود را با وضعیت جدید هماهنگ کرده و از طریق تغییر الگوی کشت، در حفظ و احیاء منابع آب زیرزمینی مشارکت خواهند کرد. اعمال سیاست‌های غیر قیمتی و استفاده از روش‌های نوین آبیاری و ترویج صحیح این روش‌ها علاوه بر این که ایجاد پایداری در کمیت آب‌های زیرزمینی را سرعت می‌بخشد؛



مانند منابع آب زیرزمینی هستند. برای افزایش دقت و کاهش هر چه بیشتر شکاف نظری و عملی بودن این پژوهش، ثبت دقیق و مستمر اطلاعات چاه‌های مشاهداتی و بهره‌براری در همه مناطق کشور ضروری است.

سودناخالص کشاورزان را نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این مطالعه، مآخذ ارزشمندی برای مدیران منابع آب کشور و محققانی است که به دنبال پیاده‌سازی راه‌حل‌های محاسباتی پیشرفته برای سیستم‌های دینامیکی

منابع

الهی، مهدی؛ وکیل پور، محمدحسن و نجفی علمدارلو، حامد. (۱۳۹۷). تأثیر قیمت و سهمیه‌بندی آب در راستای مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت کبودر آهنگ. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، دوره ۳۲، شماره ۲، صص ۲۸۳-۲۶۷.

باقری، علی (۱۳۹۲). مقدمه‌ای بر اصول هیدرولوژی در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب. کارگاه حقوق آب، دانشگاه تربیت مدرس.

پناهی، علی و فلسفیان، آزاده. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت شبستر تحت شرایط محدودیت آب. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، دوره دهم، شماره ۴، صص ۳۵-۴۷.

پناهی، مهدی، میثاقی، فرهاد و عسگری، پریسا (۱۳۹۷). شبیه‌سازی و تخمین نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از GMS (بررسی موردی دشت زنجان). فصلنامه علوم محیطی. دوره ۱۶، شماره ۱، صص ۱-۱۴.

دهقانی، علی؛ امیرتیموری، سمیه و زارع مهرجردی، محمدرضا. (۱۳۹۸). آثار سیاست‌های افزایش قیمت آب آبیاری و کاهش آب در دسترس بر بهره‌وری آب محصولات کشاورزی (مطالعه موردی: بخش شهداد، شهرستان کرمان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۶، جلد ۱۳، صص ۱۶۷۱-۱۶۶۱.

دهقانی، علی؛ امیرتیموری، سمیه و زارع مهرجردی، محمدرضا. (۱۳۹۸). کاربرد الگوریتم جامعه مورچگان در بهینه‌سازی الگوی کشت (شهداد، شهرستان کرمان). نشریه اقتصاد کشاورزی، شماره ۴، جلد ۱۳، صص ۸۷-۱۰۳.

رهنما، محمدباقر، سهرابی پور، ندا و بارانی، غلامعباس. (۱۳۹۹). بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان شهداد. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. دوره ۱۴، شماره ۵، صص ۱۶۶۳-۱۶۵۰.

زارع مهرجردی، محمدرضا (۱۳۸۷). ارزش‌گذاری آب‌های زیرزمینی در بخش کشاورزی: مطالعه موردی شهر کرمان. رساله دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

شیرزادی لسکوکلایه، سمیه؛ مردانی نجف‌آبادی، مصطفی و شاهنظری، علی. (۱۳۹۸). مدیریت مصرف و توزیع آب در اراضی شبکه آبیاری و زهکشی تجن با تأکید بر پایداری منابع آب. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۳، شماره ۴.

حسن‌وند، مریم؛ جولایی، رامتین؛ کرامت‌زاده، علی و اشراقی، فرشید (۱۳۹۷). کاربرد مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به منظور تحلیل اثر سیاست تغییر قیمت و مقدار آب کشاورزی بر الگوی کشت محصولات زراعی شهرستان نکا. نشریه اقتصاد کشاورزی، جلد ۱۲، شماره ۳، صص ۷۳-۹.

صباحی، محمود و پرهیزکاری، ابوذر. (۱۳۹۲). تحلیل اثرات اقتصادی و رفاهی تشکیل بازار آب آبیاری در اسان قزوین. مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی. دوره ۲۷، شماره ۴، صص ۳۳۸-۳۵۰.

محمدجانی، اسماعیل و یزدانیان، نازنین. (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت بحران کشور و الزامات مدیریت آن. نشریه روند (روند پژوهش‌های اقتصادی). دوره ۲۱، شماره ۶۶-۶۵، صص ۱۴۴-۱۱۷.

Dehghani, A., Zare Mehrjerdi, M. R., Waezizadeh, T., Amirtaimoori, S., & Zounemat-Kermani, M. (2026). Groundwater Dynamics Modeling (case study: Shahdad Aquifer; Kerman Province), preprint.

Arribas, I., Louhichi, K., Perni, A., Vila, J., & Gomez-y-Paloma, S. (2020). Modelling agricultural risk in a large scale positive mathematical programming model. International Journal of Computational Economics and Econometrics, 10(1), 2-32.

Afrifa, S., Zhang, T., Appiahene, P., Zhao, X., Varadarajan, V., Darkwah, T., Geng, Y., Gramfi, D., & Owusua, O. (2025). Impact of Climate Change on Groundwater Level Changes: An Evaluation Based on Deep Neural Networks, H2Open Journal, 7(2), 199-221.



- Boczon, A., Wrobel, M., & Kowalska, A. (2025). Long-Term Changes in Groundwater Levels in the Białowieża Forest, Poland, Under Climate Change. *Environmental and Earth Sciences journal* 20(1), 220-2232.
- Brown, A., & Matlock, M. (2011). A review of Water Scarcity Indices and Methodologies. University of Arkansas, the Sustainability Consortium.
- Brauer, F. (2008). *Mathematical epidemiology*. Springer.
- Driessche, P. V. D. (2017). Reproduction numbers of infectious disease models, *Infect Dis Model.* 2(3):288-303. doi: 10.1016/j.idm.06.002.
- Development, 27(4), 338-350.
- He, L., Tyner, W.E., Doukkali, R. and Siam, G. (2006). Policy options to improve water allocation efficiency: analysis on Egypt and morocco. *Water international*. 31: 320-337.
- Howitt, R.E., Medellin-Azuara, J., MacEwan, D. and Lund, R. (2012). Calibrating disaggregates economic models of agricultural production and water management. *Science of the Environmental Modeling and Software*. 38: 244-258.
- <https://doi.org/10.1186/s12874-024-02209-2>.
- <https://www.irimo.ir>
- Izadi, M., & Waezizadeh, T. (2024). Stability analysis and numerical evaluations of a COVID-19 model with vaccination. *BMC Medical Research Methodology*, 24(97), 1-19.
- Moulogianni, C., (2022). Comparison of Selected Mathematical Programming Models Used for Sustainable Land and Farm Management, *Land* 2022, 11, 1293.
- Omidinia, T., Mirabbasi, R., Tabatabaee, S.H. (2017). Studying groundwater level fluctuations in the Barkhar Plain of Isfahan using GMS software, 3rd International conference on Reserch in Science and Technology, Berlin, Germany.
- Shalodegi, A., & Byzed, M. (2021). Predicting the groundwater level of Chahardoli aquifer in Qorveh city using artificial neural network and support vector machine, *New Findings in Applied Geology*, 16(31), 163-175.
- Sumriti, P., & Hon-Jay, C. (2025). Long-term projections of global groundwater storage under future climate change scenarios using deep learning. *Science of The Total Environment*. 10(9), Page 1810-43.
- Waezizadeh, T., & Ebrahimi, N. (2022). Dynamical model for COVID-19 in a population, *J. Mahani Math. Res. Cent.* 11(1), 25-34.