Vol. 10, No. 2, Autumn and Winter 2024, pp. 329-343 ISSN (Print): 2538-449X ISSN (Online): 2981-1619

Research Article
OPEN ACCESS
Kharazmi Journal of Earth Sciences
Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

Determining safe groundwater yield in arid regions of Iran (case study: Davarzan aquifer)

Peyman Sudegi[1]*, Rahim bagheri[2]
1. Faculty of Earth science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. Faculty of Earth science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Article info
Article history
Received: 24 October 2024
Accepted: 27 November 2024
Keywords:
Davarzan aquifer, safe yield, Hill method, aquifer storage, remaining life.

Abstract

Safe yield is the amount of water that can be extracted from an aquifer on a sustainable economic basis, considering existing legal rights, without causing significant changes in the quantity and quality of groundwater or creating other adverse effects. The Davarzan alluvial aquifer, covering an area of 703 square kilometers, is the westernmost aquifer in Khorasan Razavi Province, bordered by an ophiolite complex to the north and a salt flat to the south. Continuous groundwater extraction over the years has led to an annual water level decline of 0.36 meters, reducing the accessible and extractable water reserves in this area. Based on groundwater modeling, the safe yield, according to the Hill method, is estimated at 64.3 million cubic meters per year. This yield is 18.3% less than the current average extraction and is considered the maximum safe yield for the aquifer. Calculations estimate the renewable storage in the Davarzan aquifer at approximately 49 million cubic meters per year. Therefore, continuing the current extraction trend, which causes an annual reduction of about 13 million cubic meters, will result in continued groundwater level decline and eventual aquifer depletion in the coming years.

Introduction

Groundwater is an important source of fresh water in Iran, providing water for domestic and irrigation needs. If there is a balance between the recharge and discharge of an aquifer, it can be considered a renewable natural resource. However, if pumping exceeds the total recharge, groundwater mining occurs, and the aquifer is no longer sustainable (Sophocleous, 2005).

Many concepts such as safe yield, optimum yield, and groundwater sustainability are used in the management of groundwater systems (Gau and Liu, 2002). In groundwater management, the concept of safe yield has been used by several hydrogeologists to determine the pumping limits from an aquifer (Sakiyan and Yazicigil, 2004). Safe yield is the rate at which groundwater can be withdrawn from an aquifer without causing undesirable effects (Dottridge and Jaber, 1999; Heath and Spruill, 2003).

The Davarzan desert aquifer in Razavi Khorasan Province is an aquifer with a negative groundwater balance, and the water quality deteriorates significantly towards the south due to its proximity to the salt flat. Water demand has significantly increased in recent years due to urbanization and agricultural development. Therefore, this paper aims to determine the safe yield and estimate the remaining lifespan of the aforementioned desert aquifer by evaluating its hydrogeological characteristics.

Materials and Methods

Application of the Hill method in determining safe groundwater yield

The Hill method is based on measured data of water extraction and changes in the water table elevation in the groundwater aquifer. In this method, the annual changes in groundwater or piezometric level are plotted against the annual average pumping of the aquifer. If the sources supplying the aquifer are stable, the points plotted on this graph can follow a straight line. In this method, the safe yield is equal to the average annual extraction of the region, provided that the annual average water level

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107521
***Corresponding author:** Peyman Sudegi; **E-mail:** sudegi@du.ac.ir
How to cite this article: Sudegi, P., bagheri, R., 2024. Determining safe groundwater yield in arid regions of Iran (case study: Davarzan aquifer). Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(2), 329- 343. http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107521

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

changes are zero. Recorded values over a period should be estimated from the long-term average extraction.

Estimation of groundwater storage and remaining aquifer life

The status of groundwater resources can be examined in three states: total storage, dynamic storage, and static storage. The total storage of the aquifer is obtained from the product of the aquifer's extent, its average thickness, and the average specific yield according to the following relationships:

$$V=A*H*Sy \quad (1)$$

where V is the total storage of the aquifer in cubic meters, A is the area of the alluvial aquifer in square meters, H is the average thickness of the saturated zone in meters, and Sy is the average specific yield.

To obtain the amount of renewable (dynamic) storage, the following equation can be used:

$$dV=(A*dHRe*S) \quad (2)$$

In this equation, dV is the renewable storage in cubic meters, A is the area of the aquifer in square meters, dHRe is the change in the water table during the wet or recharge period (ascending limb of the hydrograph) in meters, and S is the average storage coefficient of the aquifer (dimensionless). The amount of overdraft from storage (dV) is obtained by multiplying the amount of water table decline for a hydrological year or cycle by the area and the storage coefficient of the aquifer as follows:

$$\Delta V = A*(-\Delta H)*S \text{ or } Sy \quad (3)$$

$$dHRe - dHDi = -\Delta H \quad (4)$$

In the above relationships, dHRe is the water table rise in the recharge or wet period (ascending limb of the hydrograph) in meters, dHDi is the water table decline in the discharge or dry period (descending limb of the hydrograph) in meters, ΔH is the water table decline in one hydrological year or a long-term period in meters, A is the area of the aquifer in square meters, and S or Sy are the average storage coefficient or specific yield of the aquifer (dimensionless). The indices Re and Di represent recharge and discharge, respectively.

Results and Discussion

Implementation of the Hill method using initial aquifer pumping values

According to the Hill method definition, the pumping rate that results in zero water level decline is considered safe and appropriate. The annual average decline in water level under current (initial) pumping conditions in the Davarzan aquifer is negative, and there is no pumping rate in the statistical period that would level the water table.It is therefore necessary to implement various scenarios to reduce pumping and achieve a safe pumping rate.

Implementation of the Hill method in modified Pumping In this scenario, initial aquifer withdrawals are reduced by various percentages, and eventually, using the Hill method, the pumping rate at which the average water table slope in the aquifer reaches zero is identified as the safe yield. Accordingly, initial withdrawals were further reduced by 10%, 20%, and 30%. Reductions of 5% and 10% do not stabilize the graph slope. If the annual withdrawal is reduced by 30%, the slope becomes positive, and therefore, the water level increases over time. Thus, a withdrawal rate of 64.3 million cubic meters per year (equivalent to 18.3% of the average withdrawal) is considered the rate at which water table changes become zero.

Estimation of groundwater storage and total lifespan of Davarzan aquifer

Estimation of total storage of Davarzan aquifer

Based on the results, the thickness of the saturated zone in the Davarzan aquifer varies from a minimum of 68 meters to a maximum of 115 meters. The specific yield of the Davarzan aquifer, according to previous results, averages between 4% and 6% (Sudegi et al., 2023). Based on changes in the thickness of the saturated zone and specific yield, the aquifer was divided into five zones, and total storage amounts for each zone was calculated. According to these values, the storage in different zones of the Davarzan aquifer varies from approximately 299 to 856 million cubic meters. The total

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]

[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]

[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

storage of the aquifer, which is the sum of the storage amounts in zones A to E, is estimated to be around 2.8 billion cubic meters.

Calculation of renewable (dynamic) storage

According to the unit hydrograph of the aquifer, the average rise in the water table is about 60 centimeters. For calculation purposes, since the period of water table rise mainly corresponds to autumn to early spring, the discharge from wells and qanats from October to May was considered as discharge during the wet period. Accordingly, the discharge from the Davarzan aquifer during this period is about 28 million cubic meters. Thus, the renewable storage of the Davarzan aquifer is introduced as approximately 49 million cubic meters per year.

Calculation of static storage

After calculating the total and renewable storage of the Davarzan aquifer, the static storage was determined by subtracting the renewable storage from the total storage. Accordingly, the static storage of the studied aquifer was estimated to be around 2.751 billion cubic meters.

Calculation of remaining lifespan of the Davarzan aquifer

Based on the hydrograph of the representative Davarzan aquifer, the annual average decline of the aquifer over the 11-year period (2011-2022) was about 0.36 meters per year, and the amount of overdraft from the aquifer based on the results obtained was estimated to be about 13 million cubic meters. Considering the static storage of approximately 2.751 billion cubic meters, as determined by the aforementioned calculations, the continuation of the current withdrawal trend, which causes an annual storage reduction of about 13 million cubic meters, will lead to a continuous decline in groundwater levels and potentially complete depletion of the aquifer within a maximum of 211 years. This figure holds true provided that, firstly, rainfall and recharge do not decrease over the next 40 years, and secondly, all wells are drilled to the bottom of the aquifer.

Conclusions

Based on the results obtained, the safe yield according to the Hill method was estimated to be 64.3 million cubic meters per year. This extraction is equivalent to 18.3% of the current average withdrawal. According to calculations, the total storage of the Davarzan aquifer is estimated to be around 2.8 billion cubic meters. The renewable storage of the Davarzan aquifer is also estimated to be about 49 million cubic meters per year, and its static storage is estimated to be around 2.751 billion cubic meters. Given the mentioned static storage, continuing the current trend of withdrawal from the aquifer, which causes an annual storage reduction of about 13 million cubic meters, will lead to a continuous decline in groundwater levels and, consequently, complete depletion of the aquifer within a maximum of 211 years. This figure assumes that wells are drilled down to the bedrock of the aquifer and other hydrological components, such as recharge, remain constant.

References

Dottridge, J., Jaber, N.A., 1999. Groundwater resources and quality in northeastern Jordan: Safe yield and sustainability. Applied Geography 19(4), pp.313-323.

Gau, H.S., Liu, C.W., 2002. Estimation of the optimum yield in Yun-Lin area of Taiwan using loss function analysis. Journal of Hydrology 263(1-4), pp.177-187.

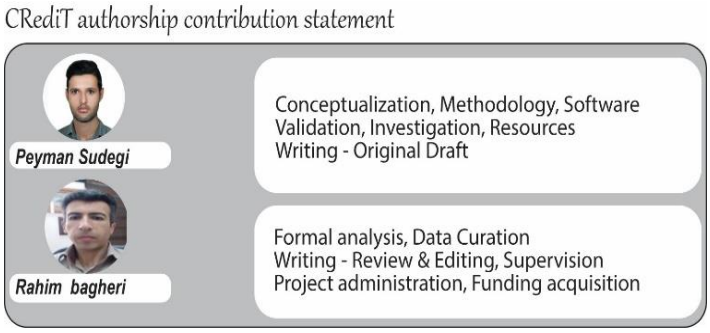
Heath, R.C., Spruill, R.K., 2003. Cretaceous aquifers in North Carolina: analysis of safe yield based on historical data. Hydrogeology Journal 11, pp.249-258.

Sakiyan, J., Yazicigil, H., 2004. Sustainable development and management of an aquifer system in western Turkey. Hydrogeology Journal 12, pp.66-80.

Sophocleous, M., 2005. Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. Hydrogeology Journal 13, pp.351-365.

Sudegi, P., Bagheri, R., Jafari, H., Qishlaqi, A., 2023. Groundwater conceptual pollution model and related human health hazards, the main dilemma of a desert aquifer near ophiolite complex. Environmental Geochemistry and Health 45(6), pp.4025-4042.

CRediT authorship contribution statement



[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]

[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]

[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

جلد ۱۰، شماره ۲، پائیز و زمستان ۱۴۰۳، صفحه ۳۲۹ تا ۳۴۳ شاپا چاپی: ۲۵۳۸-۴۴۹x شاپا الکترونیکی: ۱۶۱۹-۲۹۸۱

Research Article
OPEN ACCESS
Kharazmi Journal of Earth Sciences
Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

تعیین برداشت مطمئن آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران (مطالعه موردی آبخوان داورزن)

پیمان سوده‌گی*[۱]، رحیم باقری[۲]

۱. دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

واژه‌های کلیدی

آبخوان داورزن، برداشت مطمئن، روش هیل، ذخیره‌ی آبخوان، عمر باقی‌مانده.

چکیده

برداشت مطمئن ، مقدار آبی است که می‌توان از آبخوان با یک پایه ثابت اقتصادی و با رعایت مالکیت قانونی موجود، برداشت کرد؛ بدون اینکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت و کمیت آب زیرزمینی ایجاد شود یا اثرات نامطلوب دیگری بوجود آید. آبخوان آبرفتی داورزن با مساحت ۷۰۳ کیلومتر مربع غربی‌ترین آبخوان استان خراسان رضوی است که توسط مجموعه‌ی افیولیتی در شمال و کفه‌ی نمکی در جنوب خود محدود شده است. برداشت مداوم آب زیرزمینی طی سالیان دراز، منجر به افت سالیانه‌ی سطح آب به میزان ۰/۳۶ متر و کاهش ذخیره در دسترس و قابل برداشت آب در این منطقه شده است. بر اساس مدل‌سازی آب زیرزمینی میزان برداشت مطمئن با توجه به روش هیل ۶۴/۳ میلیون متر مکعب در سال برآورد گردید. این برداشت ۱۸/۳ درصد کمتر از میانگین برداشت فعلی است و به عنوان حداکثر میزان برداشت مطمئن در آبخوان در نظر گرفته شد. بر اساس محاسبات انجام شده، ذخیره تجدیدشونده در آبخوان داورزن حدود ۴۹ میلیون مترمکعب در سال برآورد گردید. بنابراین ادامه روند فعلی برداشت از آبخوان که سبب کاهش ذخیره سالانه حدود ۱۳ میلیون مترمکعب از آن می‌گردد، افت ممتد سطح آب زیرزمینی و بنابراین تهی‌شدگی آبخوان طی سال‌های آتی را درپی خواهد داشت.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی منبع مهمی از آب شیرین در ایران است که آب مورد نیاز خانگی و آبیاری را تأمین می‌کند. اگر تعادلی بین تغذیه و برداشت آبخوان وجود داشته باشد می‌تواند به عنوان یک منبع طبیعی تجدیدپذیر در نظر گرفته شود. اگر پمپاژ از مقدار کل تغذیه بیشتر شود، استخراج آب زیرزمینی (groundwater mining) اتفاق می‌افتد و آبخوان دیگر پایدار نیست (Sophocleous, 2005). مدیریت نادرست منابع آب در یک منطقه اثرات منفی از جمله تخلیه آبخوان، کاهش سطح آب زیرزمینی، نفوذ آب دریا در مناطق ساحلی، فرونشست زمین، کاهش کیفیت و مشکلات زیست‌محیطی در سایر آب‌ها (تالاب‌ها، آب‌های سطحی) دارد. علاوه بر این، اثرات اجتماعی و اقتصادی شامل کاهش تولید کشاورزی و توسعه گردشگری و افزایش هزینه‌های مرتبط با چاه‌های پمپاژ عمیق‌تر را در پی دارد (Baalousha, 2016).

مفاهیم بسیاری مانند برداشت مطمئن (safe yiel)،برداشت بهینه (optimum yield) و پایداری آب‌های زیرزمینی (groundwater sustainability) در مدیریت سیستم‌های آب زیرزمینی استفاده می‌شود (Gau and Liu, 2002). در مدیریت آب‌های زیرزمینی، مفهوم

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107521

*نویسنده مسئول: پیمان سوده‌گی sudegi@du.ac.ir

استناد به این مقاله: سودگی، پ.، باقری، ر. (۱۴۰۳). تعیین برداشت مطمئن آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران (مطالعه موردی آبخوان داورزن). مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۳۲۹ تا ۳۴۳. http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107521

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

برداشت مطمئن توسط چندین هیدروژئولوژیست برای تعیین محدودیت‌های پمپاژ از یک سفره زیرزمینی استفاده شده است (Sakiyan and Yazicigil, 2004). برداشت مطمئن نرخی است که در آن آب‌های زیرزمینی می‌توانند از سفره‌های زیرزمینی خارج شوند بدون اینکه اثرات نامطلوب ایجاد کنند (Dottridge and Jaber, 1999; Heath and Spruill, 2003). این میزان به پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، معیارهای اقتصادی و زیستمحیطی و عوامل دیگر بستگی دارد. برداشت مطمئن به یک هدف مدیریت آب زیرزمینی اشاره دارد که تلاش می‌کند تعادل بلندمدتی بین برداشت سالانه آب زیرزمینی و مقدار تغذیه سالانه در یک منطقه ایجاد نموده و آن را حفظ کند (Jacobs and Holway, 2004). تعریف سنتی برداشت مطمئن نرخ پمپاژ را برابر با کل تغذیه فرض می‌کند. وودوریس (Voudouris, 2006) فرض می‌کنند که برداشت مطمئن ۵۰ درصد از کل تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی است.

تحقیقات اخیر نیز بر اهمیت استفاده از مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در تعیین برداشت مطمئن تاکید دارند. این مدل‌ها می‌توانند به تحلیل دقیق‌تر وضعیت آبخوان‌ها و ارائه راهکارهای مدیریت بهینه کمک کنند(Abd-Elmaboud, 2024). همچنین، کاربرد فناوری‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی به سرعت در حال گسترش است و می‌تواند دقت و کارایی در مدیریت این منابع را بهبود بخشد (Wang and Xie., 2022).

تحقیقات اخیر نیز بر اهمیت استفاده از مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در تعیین برداشت مطمئن تاکید دارند. این مدل‌ها می‌توانند به تحلیل دقیق‌تر وضعیت آبخوان‌ها و ارائه راهکارهای مدیریت بهینه کمک کنند (Yeh, 2015). علاوه بر این، کاربرد فناوری‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی به سرعت در حال گسترش است و می‌تواند دقت و کارایی در مدیریت این منابع را بهبود بخشد (Zzaman., 2021). از سوی دیگر، ادغام داده‌های هیدروژئولوژیکی با مدل‌های عددی بهبود یافته می‌تواند به مدیران آب در تصمیم‌گیری‌های بهتر و پایدارتر کمک کند (Zhang, 2024). به کارگیری تکنولوژی‌های پیشرفته در مدیریت منابع آب می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش خطرات مرتبط با برداشت غیرمطمئن آب‌های زیرزمینی منجر شود (Yu et al., 2023).

آبخوان بیابانی داورزن در استان خراسان رضوی یک آبخوان با بیلان آب زیرزمینی منفی است و کیفیت آب به سمت جنوب آن در نتیجه‌ی نزدیکی به کفه‌ی نمکی به طور قابل توجهی بدتر می‌شود. تقاضای آب در نتیجه شهرنشینی و توسعه کشاورزی در سال‌های گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این تقاضا عمدتاً توسط آب‌های زیرزمینی که از آبخوان آبرفتی از طریق چاه‌های متعدد برداشت می‌شود، پاسخ داده می‌شود. این افزایش در برداشت از آب‌های زیرزمینی با دوره‌های خشک‌سالی طولانی همراه شده است. هم افت سطح آب‌های زیرزمینی و هم کاهش کیفیت آب منجر به نگرانی فزاینده‌ای در مورد برداشت مطمئن آبخوان شده است. بنابراین این مقاله با هدف ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی به تعیین برداشت مطمئن آبخوان بیابانی داورزن می‌پردازد.

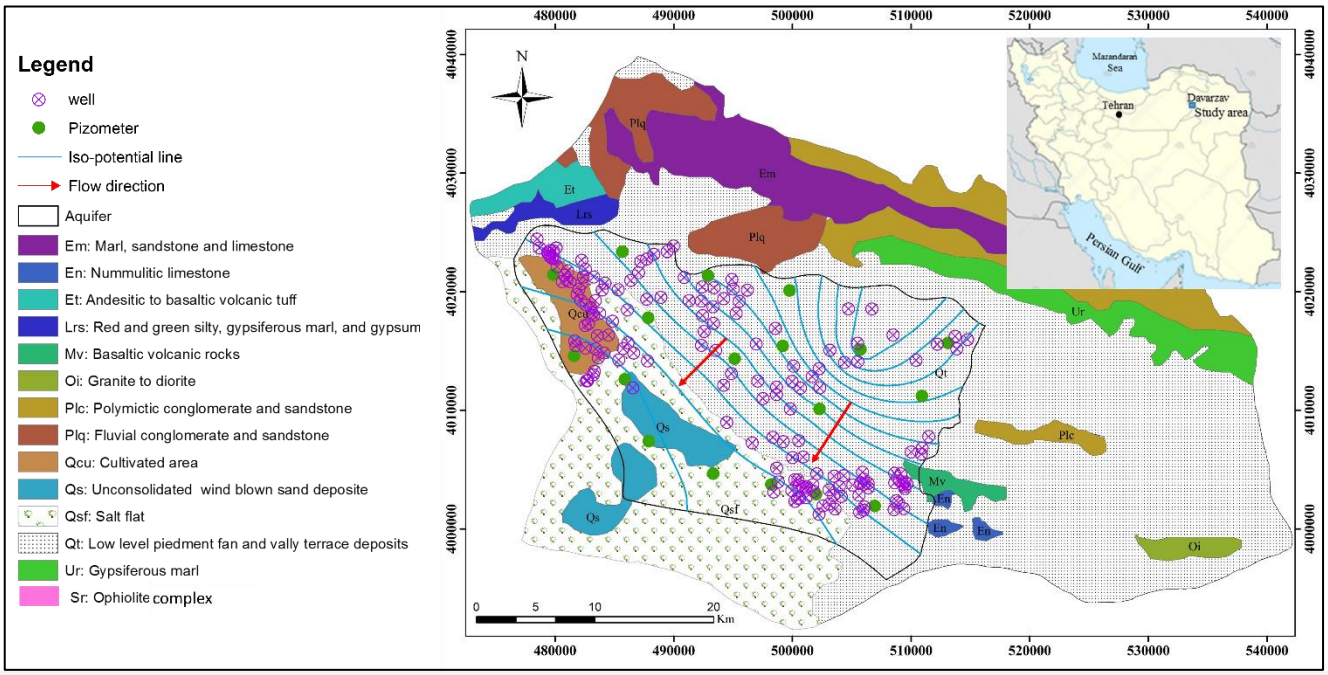
خصوصیات محدوده مورد مطالعه

دشت داورزن، غربی‌ترین دشت استان خراسان رضوی است که بین ´۱۰ °۳۶ تا ´۲۰ °۳۶ عرض شمالی و ´۴۵ °۵۶ تا ´۱۰ °۵۷ طول شرقی واقع شده است. این دشت با وسعت ۴۸۷/۳۵ کیلومتر مربع شکلی نسبتاً کشیده داشته و از شرق به دشت سبزوار، شمال به ارتفاعات جغتای از جنوب به کالشور سبزوار و از غرب به وسیله حوضه آبریز کویر مزینان که بخشی از حوضه‌ی آبریز دشت کویر است، محدود می‌گردد. این دشت قسمتی از زون البرز است که آن را بخشی از ناحیه‌ی چین خورده‌ی ایران مرکزی می‌دانند (Aqanabati, 2004). قدیمی‌ترین سازند منطقه متعلق به کرتاسه است که در ارتفاعات شمالی دشت به صورت مجموعه‌ای از افیولیت ملانژها مشاهده می‌شود. اما به طور کلی

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

بیش‌ترین مساحت سازندها متعلق به دوران سوم و چهارم زمین‌شناسی است که بیشترین گستردگی مربوط به کواترنر، میوسن و پالئوژن است. رسوبات دوران سوم زمین شناسی بیشتر به صورت کنگلومرای پالئوژن، توف، آندزیت و رسوبات تبخیری گچ و نمک در جنوب و در دامنه‌ی ارتفاعات شمالی دشت رخنمون دارد. نهشته‌های دوران چهارم از مخروط افکنه‌ها، رسوبات آبرفتی و ماسه‌های روان که دامنه‌ها و ارتفاعات و سطح دشت را می‌پوشاند تشکیل شده است. آبخوان دشت داورزن از نوع آزاد بوده و سطح آب در آن توسط شبکه‌ی پیزومتری متشکل از ۱۸ پیزومتر از سال ۱۳۷۰ تا کنون پایش می‌گردد (Sudegi et al, 2023). جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان داورزن از شمال شرق به سمت جنوب غرب است. طبق آخرین آماربرداری سراسری در آبخوان داورزن، ۱۸۵ حلقه چاه، و ۱۱ قنات وجود دارد که منابع آب آبخوان را تخلیه می‌کنند. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده دشت داورزن و موقعیت قرارگیری آبخوان ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی آبخوان داورزن، جهت جریان، موقعیت پیزومترها و چاه‌های کشاورزی.

Fig. 1. Geological map of the Davarzen aquifer, flow direction, location of piezometers and agricultural wells.

مواد و روش‌ها

برداشت مطمئن از آبخوان را می‌توان بر اساس اصل بقای جرم محاسبه کرد. روش به کار گرفته در این مطالعه جهت برآورد برداشت مطمئن، روش هیل است. در این روش تغییرات افت سالیانه تراز آب در مقابل تغییرات برداشت آب ترسیم و برداشتی که تغییرات افت را صفر نشان دهد به عنوان برداشت مطمئن در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مدل عددی MODFLOW سناریوهای مختلف برداشت، اجرا و برداشت مطمئن در آبخوان داورزن تعیین شد. علاوه بر این، بر اساس داده‌های هیدروژئولوژیکی موجود، حجم آبخوان تخمین زده شد و پس از آن باقی‌مانده‌ی عمر آبخوان برآورد گردید. در ادامه ابتدا نحوه‌ی محاسبه‌ی برداشت مطمئن با استفاده از روش هیل توسط مدل عددی MODFLOW بیان می‌گردد و سپس به نحوه‌ی تخمین باقی‌مانده‌ی عمر آبخوان پرداخته می‌شود.

تهیه مدل هیدروژئولوژی آبخوان داورزن

به منظور شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان دشت داورزن، از نرم‌افزار GMS و کد کامپیوتری MODFLOW استفاده شد. این

مدل سه بعدی که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده (USGS) یافته است، بر اساس معادلات تفاضلات محدود عمل می‌کند. در این فرآیند، اطلاعات هندسی و هیدرودینامیکی شامل توپوگرافی سطح زمین، موقعیت و میزان آبدهی چاه‌ها، تراز سطح ایستابی، شرایط مرزی و ضرایب هیدرودینامیکی به سیستم اطلاعات مکانی (ARCGIS) وارد و به مدل MODFLOW منتقل شد. سپس مدل عددی آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW در حالت‌های پایدار و ناپایدار اجرا و بیلان محاسبه شد. مراحل کلیدی شامل شبکه‌بندی، درونیابی، کنترل خطاها، تبدیل مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای، واسنجی و تحلیل حساسیت پارامترها، و بررسی انطباق مقادیر هیدرولیکی محاسبه‌شده و مشاهده‌ای بود.

به کارگیری روش هیل در تعیین برداشت مطمئن آب زیرزمینی

روش هیل مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده برداشت آب و تغییرات ارتفاع سطح ایستابی در سفره‌ی آب زیرزمینی می‌باشد. در این روش نمودار تغییرات سالانه ارتفاع سطح آب زیرزمینی در مقابل میانگین پمپاژ سالانه‌ی آبخوان ترسیم می‌گردد. اگر منابع تامین کننده سفره‌ی آب زیرزمینی ثابت باشد، نقاط ترسیم شده در این نمودار می‌توانند از یک خط مستقیم تبعیت کنند. در این روش برداشت مطمئن، برابر میانگین برداشت سالانه‌ی منطقه است به شرطی که میانگین تغییرات سالیانه ترازهای آب برابر صفر باشد. مقادیر ثبت شده در یک دوره باید از میانگین برداشت دراز مدت تخمین زده شود.

تخمین ذخیره‌ی آب زیرزمینی و برآورد عمر باقیمانده‌ی آبخوان

وضعیت ذخیره منابع آب زیرزمینی را می‌توان در سه حالت ذخیره کل (Total storage)، ذخیره پویا یا دینامیک (Dynamic storage) و ذخیره ایستا یا استاتیک (Static storage) مورد بررسی قرار داد. ذخیره کل آبخوان از حاصل‌ضرب گسترش یا وسعت آبخوان، متوسط ضخامت آن و میزان متوسط ضریب ذخیره آبخوان طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$V=A*H*Sy \quad (۱)$$

که در این معادله V ذخیره کل آبخوان برحسب مترمکعب، A مساحت آبخوان آبرفتی برحسب مترمربع، H متوسط ضخامت آبخوان آبرفتی (منطقه اشباع) برحسب متر، و Sy متوسط آبدهی ویژه است.

برای به‌دست آوردن مقدار ذخیره تجدیدشونده (پویا) چون محاسبه مقادیر انواع تغذیه آبخوان مشکل است، می‌توان از هیدروگراف (آبنمود) معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده کرد. برای این منظور، چنانچه ارتفاع شاخه بالارونده از روی نمودار یا آبنمود قرائت شده، در مساحت آبخوان و متوسط ضریب ذخیره ضرب شود و مقدار تخلیه و برداشت در زمان بالارفتن سطح آب (دوره مرطوب) نیز به آن اضافه شود، مقدار ذخیره تجدیدشونده به‌دست می‌آید. هرچند، محاسبه دقیق میزان تخلیه آسان نیست، ولی برآورد قابل قبولی از مقدار آن به‌ویژه برای دوره مرطوب امکان‌پذیر است.

$$dV=(A*dHRe*S) \quad (۲)$$

در این معادله dV ذخیره تجدیدشونده برحسب مترمکعب، A مساحت آبخوان برحسب مترمربع، dHRe تغییر ارتفاع آبنمود معرف در دوره مرطوب یا تغذیه (شاخه بالارونده نمودار) برحسب متر، S ضریب ذخیره متوسط آبخوان (بدون بعد) و dQ مقدار تخلیه آبخوان (برداشت متوسط چاه، قنات، چشمه، زهکش و تبخیر از آب زیرزمینی) در دوره مرطوب (دوره شاخه بالارونده آبنمود) برحسب مترمکعب می‌باشد.

مقدار اضافه برداشت از ذخیره (ΔV)، با ضرب مقدار افت سطح آب آبخوان برای یک سال آبی یا سیکل هیدرولوژی در مساحت و ضریب ذخیره آبخوان به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta V = A*(-\Delta H)*S \text{ or } Sy \quad (۳)$$

$$dHRe - dHDi = -\Delta H \quad (۴)$$

در روابط فوق dHRe میزان بالارفتن سطح آب زیرزمینی در دوره تغذیه یا مرطوب (شاخه بالارونده آبنمود) برحسب متر، dHDi میزان پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در دوره تخلیه یا خشک (شاخه پایین

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

رونده آبنمود) برحسب متر، ΔH افت سطح آب زیرزمینی در یک سال آبی یا یک دوره طولانی‌مدت هیدرولوژیکی برحسب متر، A مساحت آبخوان برحسب مترمربع و S یا Sy به‌ترتیب ضریب ذخیره متوسط یا متوسط آبدهی ویژه آبخوان (بدون بعد) می‌باشد. اندیس‌های Re و Di به‌ترتیب نشان‌دهنده تغذیه و تخلیه هستند.

بحث

تعیین برداشت مطمئن در آبخوان داورزن

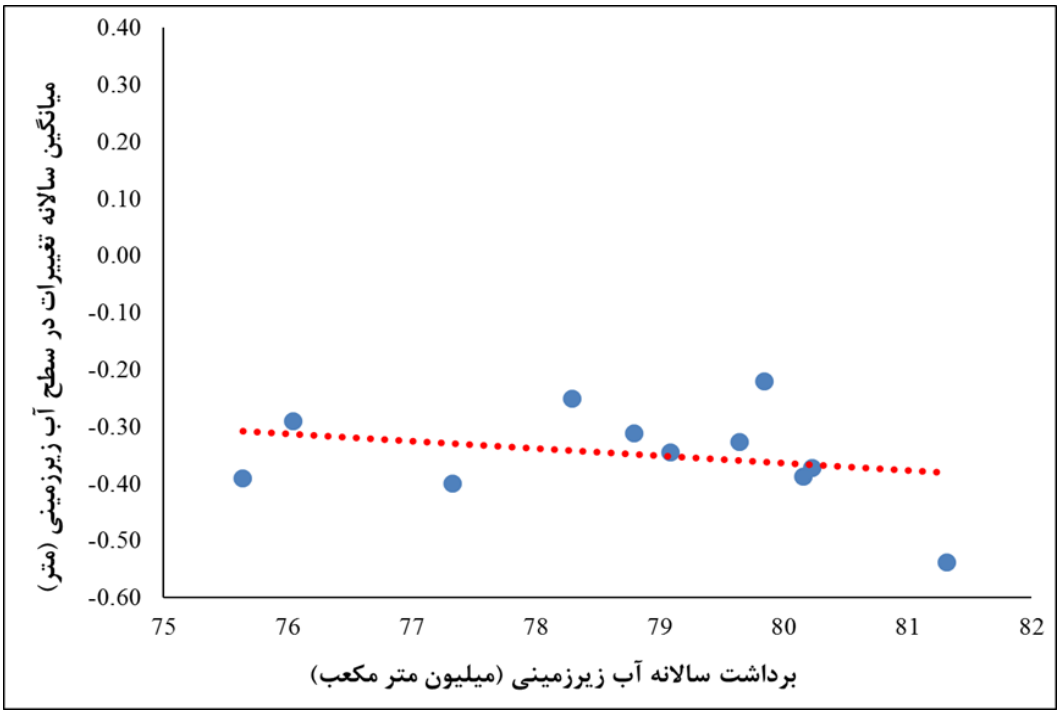
همانگونه که قبل‌تر ذکر شد برداشت مطمئن مقدار آبی است که می‌توان از آبخوان برداشت کرد بدون اینکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت و کمیت آب زیرزمینی ایجاد شود یا اثرات نامطلوب دیگری بوجود آید. طبق این تعریف و بر اساس روش هیل پمپاژ سالانه در آبخوان داورزن در برابر تغییرات متوسط سالانه سطح پیزومتری رسم شد. پمپاژی که در آن، متوسط تغییرات سطح آب سالانه برابر صفر باشد، برداشت مطمئن نامیده می‌شود.

پیاده‌سازی روش هیل با استفاده از مقادیر پمپاژهای اولیه آبخوان

برای یافتن تغییرات افت آب در مقابل مقدار برداشت، پمپاژهای اولیه آبخوان به صورت واقعی و بدون تغییر در طول دوره مدل‌سازی (۱۴۰۰-۱۳۸۹) در نظر گرفته شد و برای هر ۱۵۹ چاه پمپاژ موجود در آبخوان در ۱۳۲ گام زمانی و به صورت مترمکعب بر روز وارد مدل Modflow شد. بعد از اجرای مدل، تراز آب در مقیاس ماهانه برای تمام سلول‌ها استخراج شد. برای استفاده از روش هیل و تعیین برداشت مطمئن که به صورت سالانه تعیین می‌شود، برای هر سال آبی، برداشت روزانه هر چاه به برداشت ماهانه تبدیل شد و سپس مجموع پمپاژها در آن سال آبی به دست آمد و تغییرات سالانه سطح آب مشخص شد. برای به دست آوردن آن در هر سال آبی، مقدار تراز آب هر ماه از تراز آب در ماه قبل از آن کسر شد و سپس مجموع این اختلافات برای آن سال آبی به دست آمد که این مقدار، تغییرات سطح آب در آن سال آبی را نشان می‌دهد. بعد از پایان این مرحله، مقادیر پمپاژ سالانه و نیز افت سالانه سطح آب مربوط به آن برای ۱۲ سال آبی موجود در مقابل هم رسم شدند. در شکل ۲ مقادیر پمپاژ اولیه و افت تراز آب در تمام سال‌های آبی دوره مورد مطالعه در مقابل هم ترسیم شده‌اند.

بنابر تعریف روش هیل، پمپاژی که افت سطح آب صفر را نشان دهد، پمپاژ مناسب و مطمئن از سطح آب است. میانگین سالانه تغییرات سطح آب در شرایط اعمال پمپاژهای موجود (اولیه) در آبخوان داورزن منفی است، و پمپاژی که شیب سطح آب آبخوان را افقی کند، در طول دوره‌ی آماری وجود ندارد (شکل ۲). لذا لازم است سناریوهای مختلفی برای کاهش پمپاژ و رسیدن آن به پمپاژ مطمئن اجرا کرد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]



شکل ۲- تغییرات سالانه سطح ایستابی نسبت به برداشت آب زیرمینی.

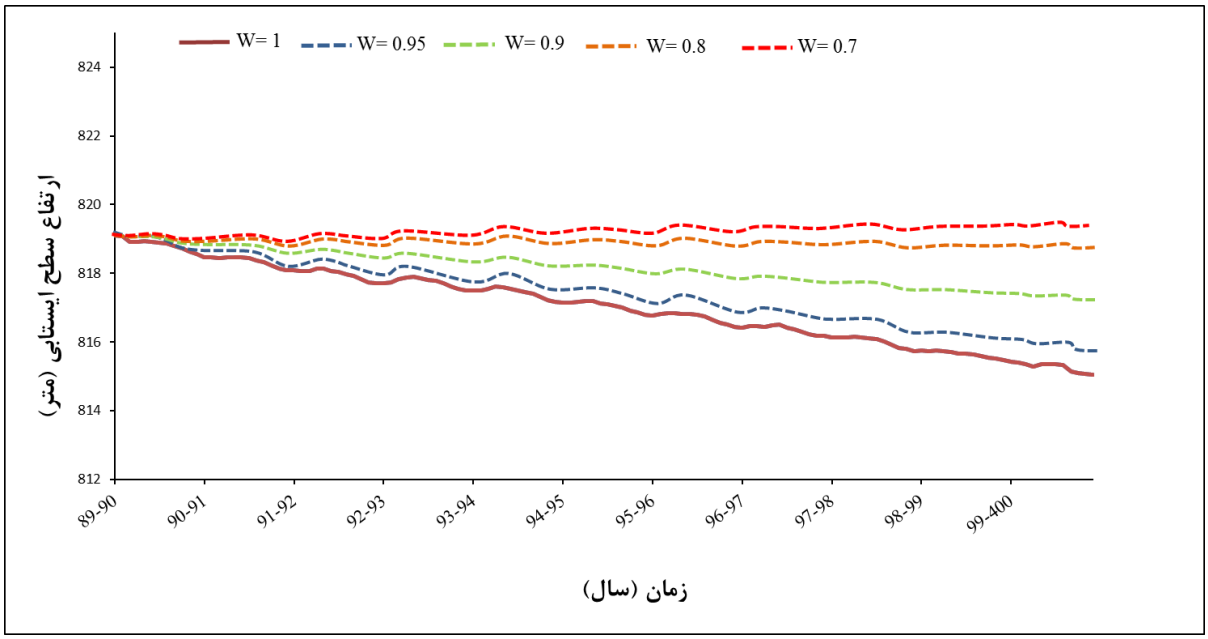
Fig. 2. Annual water- table fluctuations vs. groundwater extraction.

پیاده‌سازی روش هیل در پمپاژهای تغییریافته

در این سناریو برداشت‌های اولیه آبخوان با درصدهای مختلف کاهش یافته و در نهایت با استفاده از روش هیل، پمپاژی که در آن متوسط شیب سطح آب در آبخوان به صفر برسد، به عنوان برداشت مطمئن معرفی می‌شود. در مرحله اول، میانگین برداشت توسط چاه‌ها در طول دوره‌ی آماری (۱۳۲ گام زمانی) ۵ درصد کاهش یافت. سپس نمودار مقادیر سطح آب در برابر گام‌های زمانی رسم شد. از آنجایی که شیب اولیه سطح آب در آبخوان منفی است، نیاز است تا پمپاژها به میزان بیشتری نسبت به پمپاژهای اولیه کاهش یابند. بنابراین بار دیگر پمپاژهای اولیه با درصدهای بیشتری (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) کاهش یافت و مجدداً مدل اجرا و ترازهای جدید استخراج شد. در شکل ۳ تغییرات تراز آب نسبت به برداشت‌های مختلف در مقابل زمان ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود کاهش ۵ و ۱۰ درصدی برداشت منجر به ثابت شدن شیب نمودار نمی‌شود. کاهش ۲۰ درصدی در میزان برداشت سالیانه باعث افقی شدن نمودار شده و تغییرات تراز آب نیز ببشتر از صفر می‌گردد. چنانچه میزان برداشت سالیانه ۳۰ درصد کاهش یابد، شیب نمودار مثبت شده و بنابراین تراز آب نسبت به زمان افزایش می‌یابد. شکل ۴ میانگین تغییرات تراز آب نسبت به سناریوهای مختلف برداشت را نشان می‌دهد. همانطور که قبل‌تر ذکر شد، بر اساس روش هیل برداشتی مطمئن است که تغییرات تراز آب در آن صفر باشد. با توجه به شکل ۴، برداشت به میزان ۶۴/۳ میلیون متر مکعب در سال (۱۸/۳ درصد کمتر از میانگین برداشت) برداشتی است که تغییرات تراز آب در آن صفر می‌شود و بنابراین این عدد را می‌توان به عنوان حداکثر میزان برداشت مطمئن در آبخوان در نظر گرفت.

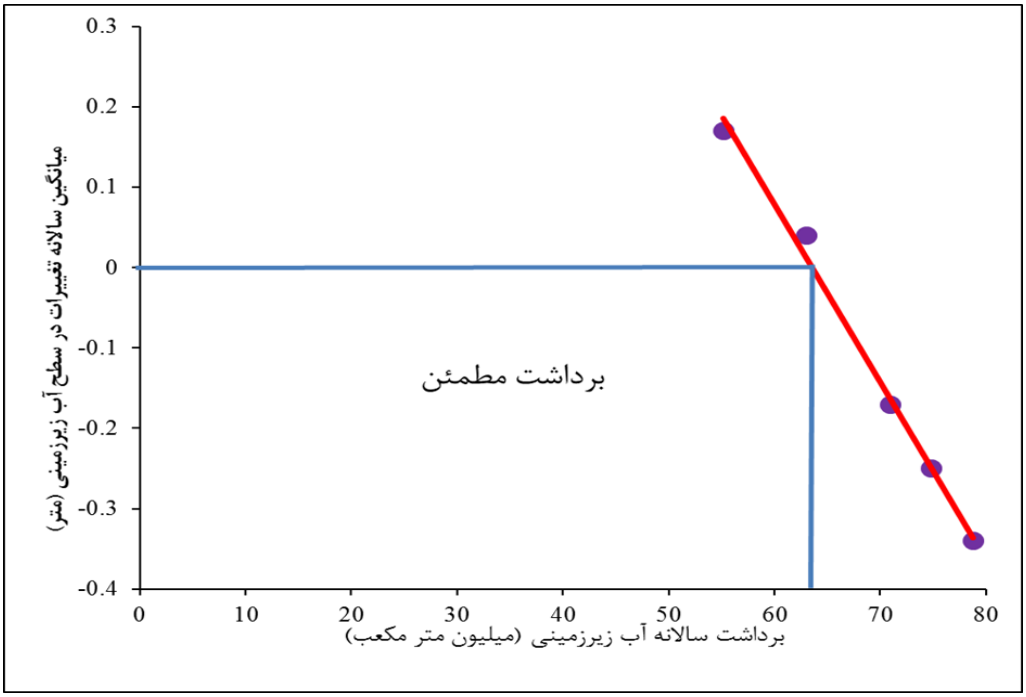
[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]



شکل ۳- تغییرات سطح استابی نسبت به سناریوهای مختلف برداشت (w تغییرات سناریوهای برداشت را نشان می‌دهد).

Fig. 3. Water- table fluctuations vs. different extraction scenarios (w indicates the changes in extraction scenarios).



شکل ۴- تعیین برداشت مطمئن در آبخوان داورزن.

Fig. 4. Determining the safe yield in the Daruzen aquifer.

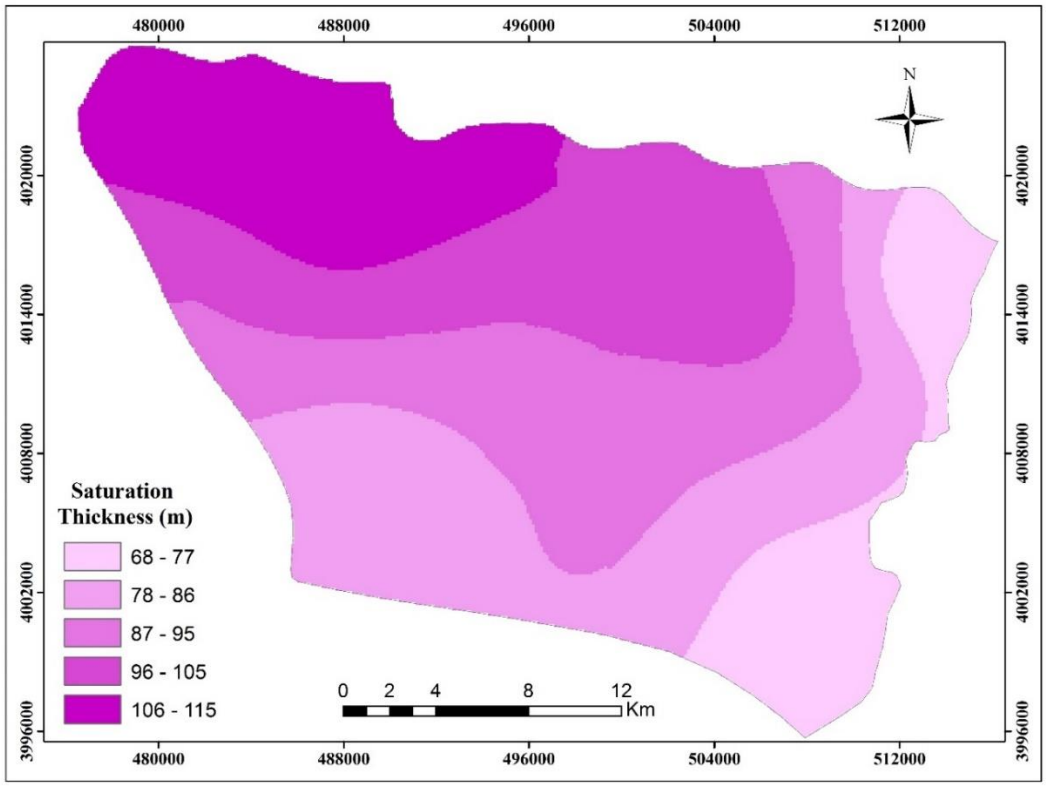
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

تخمین ذخیره‌ی آب زیرزمینی و برآورد کل عمر آبخوان داورزن

برآورد ذخیره کل آبخوان داورزن

مساحت آبخوان داورزن براساس نقشه محدوده آبخوان در نرم‌افزار Arc map حدود ۷۰۳ کیلومتر مربع می‌باشد. ضخامت زون اشباع آبخوان (شکل ۵)، بر اساس تفاضل نقشه‌ی هم ضخامت آبرفت و نقشه‌ی هم‌عمق آب آبخوان داورزن محاسبه شد. براساس نتایج به دست آمده، ضخامت زون اشباع در آبخوان داورزن از حداقل ۶۸ تا حداکثر ۱۱۵ متر متغیر است. میزان آبدهی ویژه آبخوان داورزن نیز براساس نتایج قبلی به طور متوسط بین ۴ الی ۶ درصد تعیین شده است (Sudegi et al., 2022). بر اساس تغییرات ضخامت زون اشباع و آبدهی ویژه، آبخوان به ۵ زون تقسیم شد و مقادیر ذخیره‌ی کل برای هر زون محاسبه شد (شکل ۶). با توجه به این مقادیر، ذخیره آبخوان داورزن در زون‌های مختلف از حدود ۲۹۹ تا ۸۵۶ میلون‌متر مکعب متغیر است. کل ذخیره‌ی آبخوان که حاصل جمع مقادیر ذخیره در زون‌های A تا E است نیز حدود ۲/۸ میلیارد مترمکعب برآورد شد (جدول ۱).



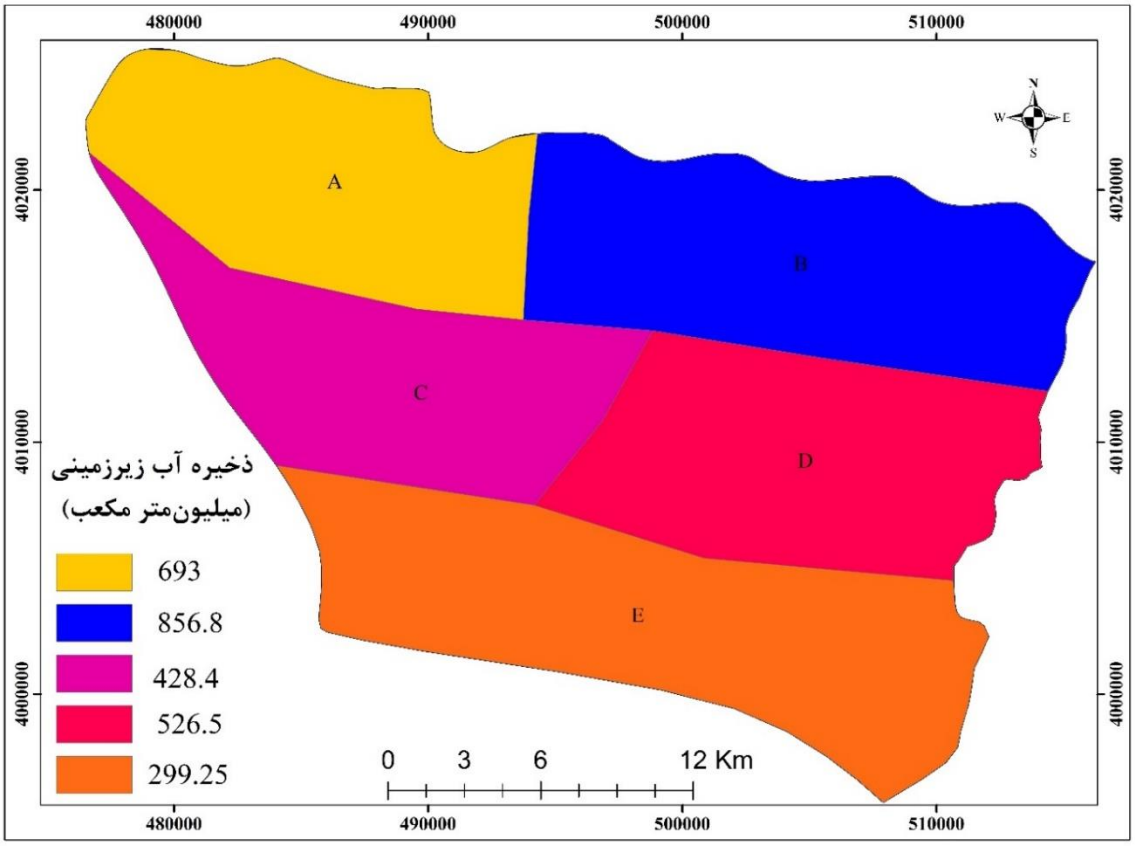
شکل ۵- تغییرات مکانی ضخامت زون اشباع در آبخوان داورزن.

Fig. 5. Spatial distribution of the saturated zone thickness in the Davarzen aquifer.

جدول ۱- محاسبه ذخیره کل آبخوان داورزن.

Table 1. Calculation of the total storage of the Darvezen aquifer.

زون	مساحت (کیلومتر مربع)	آبدهی ویژه	ضخامت زون اشباع (متر)	ذخیره کل (میلیون متر مکعب)
Zone A	171	0.05	110	693
Zone B	135	0.07	80	856.8
Zone C	119	0.04	90	428.4
Zone D	126	0.05	78	526.5
Zone E	153	0.025	70	299.25
کل ذخیره آبخوان (میلیارد متر مکعب)				**2.8**



شکل ۶- تخمین مقدار کل ذخیره آبخوان داورزن در بخش‌های مختلف.

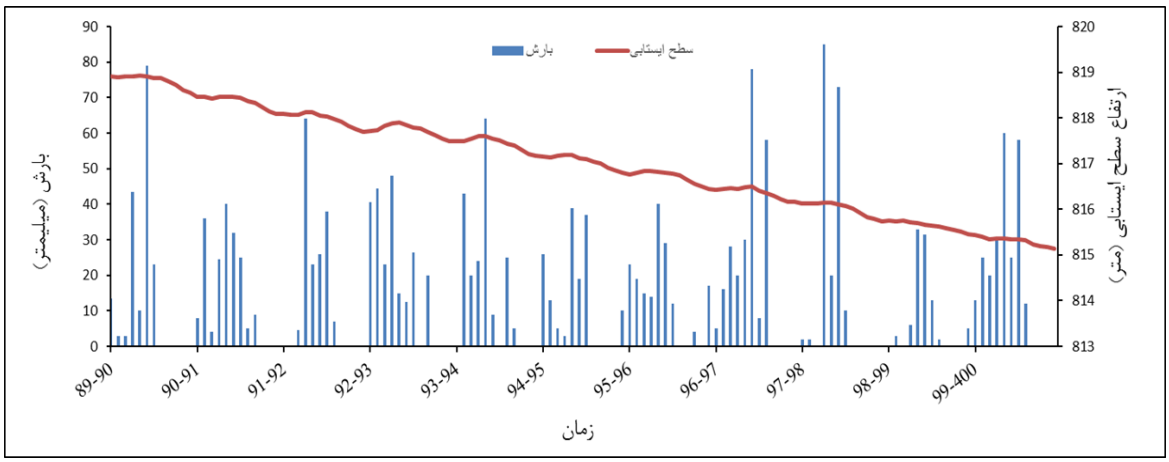
Fig. 6. Estimation of the total storage amount of the Darvzen aquifer in different parts.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]

محاسبه ذخیره تجدیدشونده (پویا)

متوسط بالاآمدگی سالانه سطح ایستابی در آبخوان داورزن بر اساس میزان بالاآمدگی در دوره ۱۱ ساله (مهر ۸۹ تا شهریور ۱۴۰۰) محاسبه شده است. طبق بررسی هیدروگراف واحد آبخوان، متوسط بالاآمدگی سطح ایستابی حدود ۶۰ سانتی‌متر بوده است (شکل ۷). جهت محاسبه میزان تخلیه در دوره مرطوب (دوره بالاآمدن سطح آب زیرزمینی) از نتایج آماربرداری مدیریت منابع آب (آخرین آماربرداری در سال ۹۷) استفاده شده است. با توجه به اینکه دوره بالاآمدن سطح آب زیرزمینی عمدتاً مربوط به پاییز تا اویل بهار می‌باشد، میزان تخلیه چاه‌ها و قنوات در بازه مهر تا اردیبهشت به‌عنوان تخلیه در دوره مرطوب در نظر گرفته شده است. بر این اساس میزان تخلیه آبخوان داورزن در این بازه حدود ۲۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. بنابراین ذخیره تجدیدشونده آبخوان داورزن با توجه به معادله ۴ حدود ۴۹ میلیون مترمکعب در سال معرفی می‌گردد.



شکل ۷- هیدروگراف معرف آبخوان داورزن.

Fig. 7. Unit hydrograph of the Davarzen aquifer.

محاسبه ذخیره استاتیک (ایستا)

پس از محاسبه ذخیره کل و ذخیره تجدید شونده آبخوان داورزن، میزان ذخیره استاتیک از طریق کسر ذخیره تجدید شونده از ذخیره کل تعیین شد. بر این اساس ذخیره استاتیک آبخوان مورد مطالعه حدود ۲/۷۵۱ میلیارد متر مکعب برآورد گردید.

محاسبه عمر باقی‌مانده آبخوان داورزن

بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان داورزن، میانگین افت سالیانه آبخوان در طول دوره‌ی ۱۱ ساله (۱۴۰۰ - ۸۹) حدود ۰/۳۶ متر در سال و مقدار اضافه برداشت از آبخوان بر اساس نتایج به دست آمده حدود ۱۳ میلیون متر مکعب محاسبه شد (Sudegi et al., 2023). با توجه به ذخیره استاتیک حدود ۲/۷۵ میلیارد متر مکعبی آبخوان که بر اساس محاسبات فوق‌الذکر تعیین گردید، ادامه روند فعلی برداشت از آبخوان که سبب کاهش ذخیره سالانه حدود ۱۳ میلیون مترمکعب از آن می‌گردد، افت ممتد سطح آب زیرزمینی و بنابراین تهی‌شدگی آبخوان طی سال‌های آتی را درپی خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

آبخوان داورزن بین ارتفاعات افیولیتی در شمال آن و کفه‌ی نمکی در جنوب محصور شده است. هیدروگراف معرف آبخوان داورزن، نشان دهنده‌ی میانگین افت ۰/۳۶ متر در سال برای دوره‌ی ۱۱ ساله می‌باشد. با توجه به افت ممتد سطح آب و وابستگی فزاینده‌ی کشاورزی و مصارف خانگی به آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ی داورزن، پژوهش حاضر با هدف

تعیین برداشت مطمئن و تخمین باقی‌مانده‌ی عمر آبخوان انجام پذیرفت. بر اساس نتایج به دست آمده میزان برداشت مطمئن بر اساس روش هیل ۶۴/۳ میلیون متر مکعب در سال برآورد گردید. این برداشت ۱۸/۳ درصد کمتر از میانگین برداشت فعلی است. عدد مذکور به عنوان حداکثر میزان برداشت مطمئن در آبخوان در نظر گرفته شد. بر اساس محاسبات انجام شده ذخیره کل آبخوان داورزن حدود ۲/۸ میلیارد مترمکعب برآورد شد. ذخیره تجدیدشونده آبخوان داورزن نیز حدود ۴۹ میلیون مترمکعب در سال و ذخیره استاتیک آن حدود ۲/۷۵ میلیارد متر مکعب برآورد گردید. با توجه به ذخیره استاتیک ذکر شده ادامه روند فعلی برداشت از آبخوان که سبب کاهش ذخیره سالانه حدود ۱۳ میلیون مترمکعب از آن می‌گردد، افت ممتد سطح آب زیرزمینی و بنابراین تهی‌شدگی آبخوان سال‌های آتی را درپی خواهد داشت.

References

Abd-Elmaboud, M.E., Saqr, A.M., El-Rawy, M., Al-Arifi, N. and Ezzeldin, R., 2024. Evaluation of groundwater potential using ANN-based mountain gazelle optimization: a framework to achieve SDGs in East El Oweinat, Egypt. Journal of Hydrology: Regional Studies 52, p.101703.

Aqanabati, S.A., 2004. Geology of Iran Vol 2, Tehran: Publisher. (in Persian)

Baalousha, H.M., 2016. Groundwater vulnerability mapping of Qatar aquifers. Journal of African Earth Sciences 124, pp.75-93.

Dottridge, J., Jaber, N.A., 1999. Groundwater resources and quality in northeastern Jordan: Safe yield and sustainability. Applied Geography 19(4), pp.313-323.

Gau, H.S., Liu, C.W., 2002. Estimation of the optimum yield in Yun-Lin area of Taiwan using loss function analysis. Journal of Hydrology 263(1-4), pp.177-187.

Heath, R.C., Spruill, R.K., 2003. Cretaceous aquifers in North Carolina: analysis of safe yield based on historical data. Hydrogeology Journal 11, pp.249-258.

Jacobs, K.L., Holway, J.M., 2004. Managing for sustainability in an arid climate: lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA. Hydrogeology Journal 12, pp.52-65.

Sakiyan, J., Yazicigil, H., 2004. Sustainable development and management of an aquifer system in western Turkey. Hydrogeology Journal 12, pp.66-80.

Sophocleous, M., 2005. Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. Hydrogeology Journal 13, pp.351-365.

Sudegi, P., Bagheri, R., Jafari, H., Qishlaqi, A., 2022. Temporal changes in groundwater level decline in Davarzani aquifer, western Khorasan Razavi province. 25th Conference of the Geological Society Shahrood University of Technology. (in Persian)

Sudegi, P., Bagheri, R., Jafari, H., Qishlaqi, A., 2023. Groundwater conceptual pollution model and related human health hazards, the main dilemma of a desert aquifer near ophiolite complex. Environmental Geochemistry and Health 45(6), pp.4025-4042.

Voudouris, K.S., 2006. Groundwater balance and safe yield of the coastal aquifer system in NEastern Korinthia, Greece. Applied Geography 26(3-4), pp.291-311.

Wang, X., Xie, H., 2018. A review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. Water 10(5), p.608.

Yeh, W.W., 2015. Optimization methods for groundwater modeling and management. Hydrogeology Journal 23(6), p.1051.

Yu, Q., Jiang, L., Wang, Y., Liu, J., 2023. Enhancing streamflow simulation using hybridized machine learning models in a semi-arid basin of the Chinese loess Plateau. Journal of Hydrology 617, p.129115.

Zhang, J., 2024. Integrating coupled simulation of surface water and groundwater with Artificial Intelligence. Doctoral dissertation University of Leeds.

Zzaman, M.R.U., 2021. Application of different remote sensing and GIS based multi-criteria approaches in mapping potential recharge zones of groundwater in the north-west of Bangladesh. Journal of Hydrology: Regional Studies 48, p.101703.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-06-26]
[DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.2.2.6]
[DOI: 10.22034/KJES.2024.10.2.107521]