Water Resources and Climate Change
University of Qom
Online ISSN: 3092-6769
https://wrcc.qom.ac.ir/

Groundwater balance analysis for assessing the sustainability of the Izeh plain aquifer using IDW and Thiessen polygon methods

MohammadBagher Eskandari[1]✉ and Niloofar Rahimi[2]

1. Corresponding author, Master's degree graduate, Faculty of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: mohammadbagher.eskandari@alumni.um.ac.ir
2. Master's degree graduate, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: niloofar.rahimi01@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 22 Jan 2026
Revised 11 Mar 2026
Accepted 22 Mar 2026
Published 28 Mar 2026

Keywords:
Hydrogeological Balance,
Natural Aquifer Recharge ,
Interpolation,
Water Resources Management.

ABSTRACT

This research, to quantitatively assess the groundwater sustainability of the Izeh Plain, adopted an integrated approach combining Inverse Distance Weighting (IDW) and Thiessen polygon methods with hydrogeological water balance calculations. Monthly groundwater level data from 10 wells were analyzed in a Geographic Information System (GIS) and a representative hydrograph was extracted. Although comparison of the two methods indicates a very high correlation (with a determination coefficient exceeding 99%) between them, the IDW method demonstrated superior operational accuracy in reconstructing the spatial variations of groundwater levels, with a Mean Absolute Error (*MAE*) of 2.8 cm. The results of the water balance calculations revealed a critical condition of the aquifer: annual effective recharge amounts to approximately 18.9 million cubic meters (MCM) against outflows of 20.2 MCM. This imbalance leads to a net annual deficit of approximately 1.3 MCM, a decrease in the average groundwater level, and the creation of a negative hydrodynamic balance. Finally, the findings suggest that current exploitation exceeds the natural recharge capacity of the aquifer, threatening its long-term sustainability. However, the integration of these simple analytical methods provides a practical tool for monitoring and sustainable management of groundwater resources. Achieving a sustainable balance in the Izeh Plain requires the immediate implementation of strategies to reduce abstraction, balancing measures, and a revision of cropping patterns.

Cite this article: Eskandari MB and Rahimi N. Groundwater balance analysis for assessing the sustainability of the Izeh plain aquifer using IDW and Thiessen polygon methods. Water Resources and Climate Change. (2026); 2(1): 1-12. https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032.

Publisher: University of Qom.
© The Authors.

https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032

Groundwater balance analysis for assessing the sustainability of the Izeh plain aquifer using IDW and Thiessen polygon methods

MohammadBagher Eskandari[1]✉ and Niloofar Rahimi[2]

1. Corresponding author, Master's degree graduate, Faculty of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: mohammadbagher.eskandari@alumni.um.ac.ir
2. Master's degree graduate, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: niloofar.rahimi01@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objective

Despite extensive research on groundwater resources in Iran and numerous studies on interpolation methods, no study has yet conducted an integrated evaluation of the Izeh plain aquifer's stability by combining simple, practical interpolation techniques (Thiessen and IDW) within a GIS framework alongside groundwater budget calculations. Previous research in this domain has either relied on complex numerical and artificial intelligence models or remained confined to separate analyses; consequently, the synergistic combination of these straightforward interpolation methods with balance calculations to simultaneously analyze spatio-temporal variations of water levels and derive an accurate representative hydrograph has been overlooked. This research addresses this gap by presenting a systematic integration of Thiessen and IDW methods in GIS with groundwater budgeting to comprehensively evaluate the stability of the Izeh plain aquifer.

Methodology

Local methods, such as inverse distance weighting (IDW) and radial basis functions (RBF), perform prediction based on a subset of adjacent points and are classified as accurate (Exact Interpolators) in terms of values, meaning that predicted values at the sample locations are equal to the observed values.

In the inverse distance weighting method (IDW), which is known as a deterministic approach in spatial interpolation, the weight of each sample point in determining the value of unknown points is calculated according to the inverse distance from that point to the expected position.

In the applied part of this study, which is focused on the Izeh plain, the IDW method was used for interpolation of groundwater and rainfall data.

For spatial analysis of point data and providing continuous maps of hydrogeological parameters (such as surface water level), deterministic spatial interpolation methods were used.

Spatial-temporal analysis of the hydrogeological variable in the Izeh plain using the IDW interpolation method based on monthly data was performed.

Findings

The infiltration rate was 714 mm at the Izeh station, and with an aquifer area of 313 square meters, the effective infiltration volume was calculated.

Applying an effective diffusivity of 20%, based on previous studies and the dominant lithology of the area (silty sandstone), this volume is estimated to be approximately 18.9 m^3 per year.

Side currents were assessed to estimate lateral flow, initially by determining the hydro field potential using Surfer software.

Subsequently, the hydraulic gradient (i) was calculated based on the difference in water level at the boundaries of the aquifer.

The effective cross-sectional area of flow was obtained by multiplying the distance between streamlines by the effective thickness of the aquifer.

Using a hydraulic conductivity coefficient (k) of 0.22 m^3/day, extracted from previous studies, the discharge of lateral inflow was estimated using Darcy's equation and based on the dimensions of the entrance boundary (750 m), resulting in 69 m^3/day and an approximate annual volume of 295 m^3.

Similarly, the lateral outflow rate was calculated as 76 m^3/day, and the annual volume is close to 824 m^3, considering the dimensions of the output boundary (450 m).

In the remaining portion of the budget, the annual withdrawal from the aquifer, based on official statistics from the regional water organization for 10 wells, was estimated to be 200 m^3.

Conclusion

The results of this research with an integrated and operational approach to assess the stability of the Izeh plain and comparison of simple interpolation methods in hydrogeological analysis.

The results clearly showed that integration of spatial - temporal variations analysis using deterministic methods such as inverse distance weighting and thiessen polygons, provides an effective and efficient tool for monitoring and understanding the dynamic situation of aquifers.

This approach allows the drawing of more accurate representation of hydrograph without requiring complex and expensive numerical modeling.

Quantitative evaluation of different components of the balance revealed the warning of the studied aquifer and showed a negative balance and a continuous drop in the water level.

These conditions confirm the hydrodynamic instability of the reservoir and the increased pressure induced by the operation beyond renewable capacity.

In general, the findings of this study emphasize the necessity of adopting immediate and sustainable management strategies to control the discharge and restoring the balance of this vital resource.

The proposed integrated approach, as an extensible analytical framework, can be used to monitor and evaluate the initial evaluation of other aquifers in the restricted area.

Keywords:
Hydrogeological Balance, Natural Aquifer Recharge, Interpolation, Water Resources Management.

Cite this article: Eskandari MB and Rahimi N. Groundwater balance analysis for assessing the sustainability of the Izeh plain aquifer using IDW and Thiessen polygon methods. Water Resources and Climate Change. (2026); 2(1): 1-12. https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032.

Declarations

- **Ethical Approval**

■ The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

- **Competing interests**

■ Conflict of Interest - None

- **Availability of data and materials**

■ Data will be made available on the request.

- **Authors Contributions**

The participation of the authors of Mr. MohammadBagher Eskandari to the final survey of data, guidance, control of results, editing and revision of the article. Ms. Niloofar Rahimi collected and analyzed data and conducted the modeling and statistical analysis steps.

- **Acknowledgements**

■ The authors would like to thank all participants in the present study

- **Funding**

■ This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

تحلیل بیلان آب زیرزمینی برای ارزیابی پایداری آبخوان دشت ایذه با روش IDW و تیسن

محمّدباقر اسکندری[1]✉ و نیلوفر رحیمی[2]

۱. نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: mohammadbagher.eskandari@alumni.um.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: niloofar.rahimi01@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸

کلیدواژه‌ها:
بیلان هیدروژئولوژیک،
تغذیه طبیعی آبخوان،
درون‌یابی،
مدیریت منابع آب.

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی کمی پایداری آبخوان دشت ایذه، رویکردی تلفیقی را اتخاذ کرد که در آن روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله[2] (IDW) و چندضلعی‌های تیسن[3] با محاسبات بیلان هیدروژئولوژیک ترکیب شدند. داده‌های ماهانه سطح آب ۱۰ چاه در سامانه اطلاعات جغرافیایی[4] (GIS) تحلیل شده و یک هیدروگراف نماینده استخراج شد. اگرچه مقایسه دو روش نشان‌دهنده همبستگی بسیار بالایی میان آن‌ها است، اما روش IDW با میانگین خطای مطلق ۲/۸ سانتی‌متر، دقت عملیاتی برتری در بازسازی تغییرات مکانی سطح آب از خود نشان داد. نتایج محاسبات بیلان، وضعیت بحرانی آبخوان را آشکار ساخت: ورودی‌های مؤثر سالانه حدود ۱۸/۹ میلیون مترمکعب در مقابل خروجی‌های ۲۰/۲ میلیون مترمکعب است. این عدم تعادل منجر به کسری خالص سالانه حدود ۱/۳ میلیون مترمکعب، افت متوسط سطح آب و ایجاد بیلان هیدرودینامیکی منفی شده است. در نهایت، یافته‌ها حاکی از آن است که بهره‌برداری فعلی فراتر از توان تغذیه طبیعی آبخوان رفته و پایداری بلندمدت آن را تهدید می‌کند. با این حال، تلفیق این روش‌های تحلیلی ساده، ابزاری کاربردی برای پایش و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. تحقق تعادل پایدار در دشت ایذه مستلزم اجرای فوری راه بردهای کاهش برداشت، اقدامات تعادل‌بخشی و بازنگری در الگوی کشت است.

استناد: اسکندری محمدباقر، رحیمی نیلوفر. تحلیل بیلان آب زیرزمینی برای ارزیابی پایداری آبخوان دشت ایذه با روش IDW و تیسن. *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۵؛ ۲(۱): ۱-۱۲. https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032

[2] Inverse Distance Weighting
[3] Thiessen
[4] Geographic Information System

ناشر: دانشگاه قم.
© نویسندگان.
شناسه دیجیتال: https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032

۱- مقدمه

آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی آب شیرین، نقش کلیدی در تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و حفظ زیست‌بوم‌ها ایفا می‌کند. پایداری این منابع به فرآیند تغذیه[۴] آبخوان‌ها وابسته است که خود به‌شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم و الگوهای توسعه اراضی قرار دارد [۱]. در این میان، آبخوان‌های کم‌عمق به‌دلیل نزدیکی به سطح زمین، به‌ویژه در برابر نوسانات بارش و آلودگی‌های سطحی آسیب‌پذیر هستند [۲]. رشد شتابان شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری به بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان، فشار مضاعفی بر چرخه آب‌شناسی وارد کرده و لزوم مطالعه دقیق تأثیرات آن را اجتناب‌ناپذیر ساخته است [۳]. برآورد دقیق تغذیه آبخوان مستلزم در نظرگیری مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی پیچیده مانند بافت خاک، پوشش زمین و اجزای مختلف بیلان آب است.

پیش‌بینی دقیق تغییرات مؤثر بر منابع آب، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم، راه‌کاری حیاتی برای کاهش خسارات و مدیریت ریسک محسوب می‌شود. اگرچه مدل‌های آب‌شناسی ابزارهای کارآمدی هستند، عملکرد آنها به‌شدت به کیفیت و تراکم داده‌های ورودی، از جمله داده‌های بارش، وابسته است. معضل اصلی در بسیاری از مناطق از جمله ایران، کمبود و پراکندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی است که استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. روش‌های مرسومی مانند کریجینگ[۵] در شرایط کمبود داده اغلب با عدم‌قطعیت بالایی مواجه هستند. در این میان، روش IDW به‌دلیل سادگی و ایجاد سطوح پیوسته، حتی در شرایط پراکندگی داده‌ها از پایداری نسبی برخوردار است. با این حال، ارزیابی نظام‌مند و مقایسه‌ای عملکرد این روش در مقابل روش‌های رایج، به‌ویژه در ادغام با محاسبات بیلان آب زیرزمینی، یک خلاء پژوهشی محسوس است. پر کردن این خلاء می‌تواند به انتخاب روش بهینه درون‌یابی، افزایش دقت پیش‌بینی‌های آب‌شناسی، بهبود سامانه‌های هشدار سریع و در نهایت مدیریت مؤثرتر منابع آب در مناطق با داده‌های کم کمک شایانی نماید [۴ و ۵].

پیشینه تحقیق در دو حوزه کاربرد روش‌های درون یابی در علم آب‌شناسی و مطالعات منابع آب در منطقه مورد مطالعه دسته‌بندی شده است. مطالعات متعددی به ارزیابی روش‌های درون‌یابی در علم آب‌شناسی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، احمد و همکاران با مقایسه روش‌های IDW، توابع پایه شعاعی[۶] (RBF) و کریجینگ ساده برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در قطر، عملکرد بهتر روش IDW را گزارش کردند [۶]. فنگ[۷] و همکاران نیز در حوضه‌های آبریز کوچک و متوسط چین با شبکه ایستگاه‌های پراکنده، IDW را به‌عنوان روشی قابل اعتماد برای درون‌یابی بارش معرفی نمودند [۷]. از سوی دیگر، آنتوناکس[۸] و لامبراکیس[۹] در مطالعه‌ای وسیع بر روی سطح آب زیرزمینی، کوکریجینگ معمولی را با استفاده از ارتفاع به‌عنوان متغیر کمکی، مناسب‌ترین روش تشخیص دادند که نشان‌دهنده تأثیر شرایط محلی بر انتخاب روش بهینه است [۸]. در زمینه تغذیه آبخوان، کیسیکی[۱۰] و همکاران با استفاده از مدل WetSpass و درون‌یابی IDW، نرخ تغذیه را در حوضه‌ای در تانزانیا برآورد کردند و بر ضرورت شناخت دقیق این نرخ برای مدیریت پایدار تأکید نمودند [۹]. در حوزه مطالعات ایران، پژوهش‌هایی مانند مدل‌سازی عددی با نرم‌افزارها یا استفاده از شبکه‌های

---

[۴] Recharge

[۵] Kriging

[۷] Fang

[۸] Antonakos

[۹] Lambrakis

[۱۰] Kisiki

عصبی برای پیش‌بینی سطح آب بر روش‌های پیچیده یا تحلیل‌های تک‌بعدی متمرکز بوده‌اند [۱۰ و ۱۱].

با وجود پژوهش‌های گسترده بر منابع آب زیرزمینی در ایران و نیز مطالعات متعدد در مورد روش‌های درون یابی، ارزیابی یکپارچه پایداری آبخوان دشت ایذه با ادغام روش‌های درون‌یابی ساده و کاربردی (تیسن و IDW) در محیط GIS و محاسبات بیلان آب زیرزمینی انجام نشده است. مطالعات پیشین در این دشت، یا از مدل‌های پیچیده عددی و هوش مصنوعی استفاده کرده‌اند و یا به تحلیل‌های جداگانه اکتفا نموده‌اند و ترکیب این روش‌های ساده درون‌یابی با محاسبه بیلان برای تحلیل همزمان تغییرات زمانی-مکانی سطح آب و ترسیم هیدروگراف معرف دقیق را نادیده گرفته‌اند. این شکاف به‌ویژه برای دشت‌های کوچک و کشاورزی‌محوری مانند دشت ایذه که وابستگی کاملی به آبخوان آزاد دارند، محسوس است.

این پژوهش در ادغام یکپارچه و نظام‌مند روش‌های درون‌یابی تیسن و IDW در محیط GIS با محاسبات بیلان آب زیرزمینی برای ارزیابی پایداری آبخوان دشت ایذه است. برخلاف مطالعات پیشین که بر مدل‌های پیچیده یا تحلیل‌های جداگانه متمرکز بودند، این مطالعه با تلفیق تحلیل تغییرات زمانی-مکانی سطح آب از طریق درون‌یابی با مؤلفه‌های بیلان، اقدام به ترسیم هیدروگراف معرف دقیق‌تری می‌کند که نیاز به مدل‌سازی‌های پرهزینه و پیچیده را کاهش می‌دهد. این رویکرد ساده، کم‌هزینه و عملیاتی، ابزاری کاربردی برای مدیران محلی فراهم می‌آورد و قابلیت تعمیم به سایر دشت‌های مشابه کشاورزی‌محور ایران را دارا است.

در این پژوهش، ارزیابی یکپارچه پایداری آبخوان دشت ایذه از طریق ادغام روش‌های درون‌یابی و محاسبه بیلان انجام می‌شود که به‌شرح زیر هستند:

(الف) ترسیم هیدروگراف معرف دقیق برای آبخوان دشت ایذه با استفاده از ادغام داده‌های سطح آب و روش‌های درون‌یابی تیسن و IDW در محیط GIS.

(ب) محاسبه بیلان آب زیرزمینی آبخوان با تعیین دقیق‌تر مؤلفه‌های ورودی (نفوذ بارش و جریان جانبی) و خروجی (برداشت از چاه‌ها و جریان خروجی) و تعیین میزان کسری یا مازاد سالانه.

(پ) مقایسه عملکرد دو روش درون‌یابی تیسن و IDW در پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی و تأثیر آن بر دقت محاسبات بیلان، به‌منظور شناسایی روش بهینه در شرایط خاص دشت ایذه.

(ت) ارائه تحلیل کمی از روند افت سطح آب و وضعیت پایداری آبخوان و تدوین راه‌کارهای عملی برای مدیریت پایدار منابع آب، تعادل‌بخشی آبخوان، بهینه‌سازی برداشت و سیاست‌گذاری کشاورزی پایدار در دشت ایذه و مناطق مشابه.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه پژوهش، دشت آبرفتی ایذه را در شمال‌شرق استان خوزستان (جنوب‌غرب ایران) مورد بررسی قرار می‌دهد. این دشت به‌طور کامل متکی به منابع آب زیرزمینی برای تأمین آب شرب شهری و روستایی است. آبخوان ایذه با مساحت تقریبی ۱۱۰ کیلومتر مربع، در محدوده‌ای میان طول‌های جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی قرار دارد. اقلیم منطقه معتدل و نیمه‌مرطوب است. میانگین بارندگی در یک دوره چهل‌ساله (سال‌های آبی ۱۳۶۲–۱۳۶۳ تا ۱۴۰۲–۱۴۰۳) حدود ۵۹۹ میلی‌متر بوده که توزیع فصلی آن به‌صورت ۵۰ درصد در زمستان، ۳۱ درصد در پاییز، ۱۸ درصد در بهار و کم‌تر از ۱ درصد در تابستان است. فعالیت اصلی اقتصادی در این منطقه کشاورزی است و دو تالاب مهم، یعنی تالاب میانگران در بخش شمالی و تالاب بندان در بخش جنوبی دشت واقع شده‌اند (شکل ۱). در پی خشک‌سالی‌های پیوسته و برداشت فشرده از آبخوان‌های آبرفتی و آهکی اطراف، تالاب بندان خشکیده و تالاب میانگران نیز تنها در

سال‌های پربارش و فصول مرطوب آبگیری می‌کند. دامنه ارتفاعی در دشت از حدود ۸۱۵ متر در دریاچه میانگران (شمال) تا ۱۹۰۰ متر در ارتفاعات شرقی متغیر است. آبخوان شهری مورد مطالعه نیز در محدوده ارتفاعی ۸۸۰ متر (جنوب‌غرب شهر) تا ۸۲۵ متر (شمال شهر و مجاورت تالاب میانگران) قرار دارد. از دیدگاه زمین‌شناسی، این منطقه در پهنه زاگرس جای گرفته است.

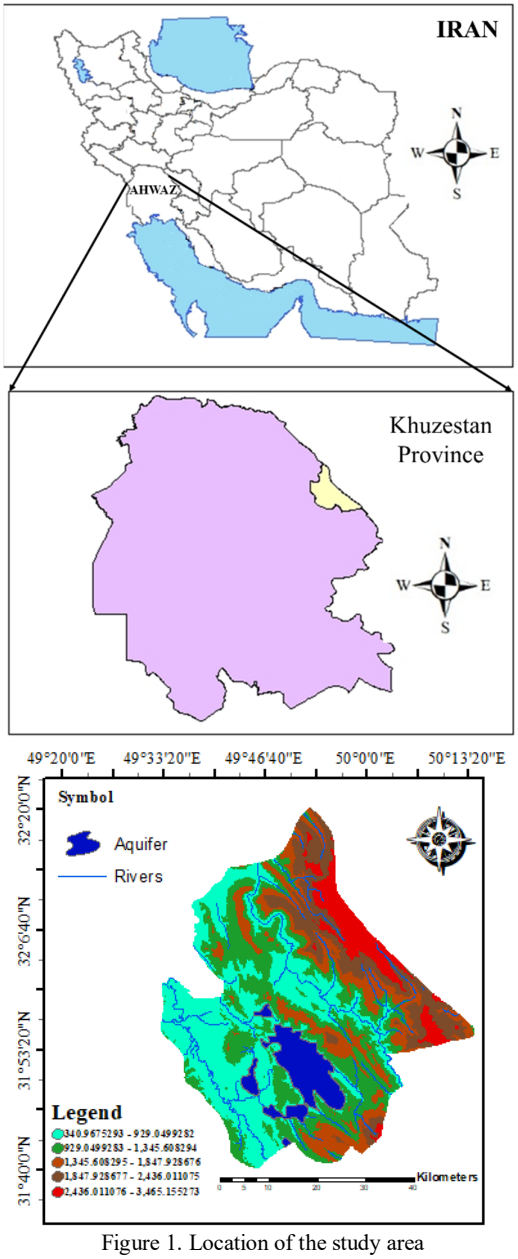

Figure 1. Location of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در زاگرس چین‌خورده قرار دارد و دشت ایذه یک پولیه کارستی است که عوارض و پدیده‌های ژئومورفولوژیک کارست در آن گسترش چشمگیری دارند. این دشت در یک ناودیس بسته با محور شمال‌غربی–جنوب‌شرقی واقع شده که بخش دماغه‌ای آن به شکل نعل‌اسبی، تالاب بندان را محصور کرده است. سنگ‌های منطقه از کرتاسه زیرین تا عهد حاضر رخنمون دارند و قدیمی‌ترین آنها آهک‌های ضخیم‌لایه سازند داریان–فهلیان است که در نهایت توسط آبرفت‌های دوران حاضر پوشیده شده‌اند. رسوبات آبرفتی در حاشیه دشت درشت‌دانه و خرده‌سنگی بوده و به سمت مرکز به رس و سیلت تبدیل می‌شوند. به‌دلیل ماهیت کارستی، وجود سازندهای آهکی و برداشت گسترده از آبخوان سازند آسماری، سطح آب زیرزمینی از حدود ۸۴۹ متر در مناطق تغذیه‌ای جنوب و غرب به کم‌تر از ۷۸۵ متر در ناحیه تخلیه‌ای شرقی کاهش می‌یابد. جهت جریان به‌طور کلی از جنوب شهر ایذه به سمت تالاب میانگران در شمال و غرب است. در جنوب‌شرق، الگوی جریان از سازند آسماری به سمت تالاب بندان، به‌دلیل پمپاژ از ۱۰ چاه شرب در ناودیس، معکوس شده و اکنون از تالاب به سمت آبخوان آهکی جریان دارد [۱۲].

۴- مواد و روش‌ها

برای تبدیل داده‌های نقطهٔ مشاهداتی به سطوح پیوسته و پیش‌بینی مقادیر پارامتر در نقاط اندازه‌گیری نشده، از روش‌های درون‌یابی مکانی استفاده شد. این روش‌ها به‌طور عمده به دو گروه اصلی قطعی و زمین‌آماری تقسیم می‌شوند [۸]. روش‌های قطعی برپایهٔ میزان تشابه بین نقاط مجاور استوارند و به‌طور معمول همبستگی مکانی و شاخصی برای سنجش دقت برآوردها ارائه نمی‌دهند. در مقابل، روش‌های زمین‌آماری از خودهمبستگی مکانی داده‌ها بهره برده و با ارائه معیارهای

دقت، امکان ارزیابی عدم‌قطعیت را فراهم می‌کنند. در این مطالعه، تمرکز بر روی روش‌های قطعی محلی بوده است (شکل ۲).

- داده‌های کمی سطح آب زیرزمینی: تراز ارتفاعی و تراز سطح آب زیرزمینی از ۱۰ چاه مشاهده‌ای فعال در دشت ایذه، طی دوره آماری مشخص به‌صورت ماهانه از سازمان آب و برق استان خوزستان و اداره کل حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب منطقه‌ای خوزستان اخذ شد.
- داده‌های بیلان آبخوان: شامل مقادیر بارش سالانه (از ایستگاه هواشناسی ایذه)، برداشت سالانه از چاه‌های بهره‌برداری (از آمار سازمان آب منطقه‌ای)، و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان (ضریب هدایت هیدرولیکی (جدول ۱) [۱۲]، ضخامت آبخوان، سنگ‌شناسی) از مطالعات پیشین و آزمایش‌های پمپاژ انجام‌شده در منطقه به‌دست آمد.

تمام داده‌ها ابتدا در Excel سازمان‌دهی و کنترل شدند. موارد مشکوک (مانند مقادیر پرت یا گمشده) با استفاده از روش میانگین متحرک و مقایسه با داده‌های مجاور اصلاح یا حذف شدند.

جدول ۱- مقادیر هدایت هیدرولیکی

Table 1. Hydraulic conductivity values

Material	Maximum	Minimum	Average
Clay	0.05	0.0	0.02
Sand Clay	0.12	0.03	0.07
Silt	0.19	0.03	0.18
Fine Sand	0.28	0.10	0.21
Medium Sand	0.32	0.15	0.26
Coarse Sand	0.35	0.20	0.27
Gravel Sand	0.35	0.20	0.25
Fine Gravel	0.35	0.21	0.25
Medium Gravel	0.26	0.13	0.23
Coarse Gravel	0.26	0.12	0.22

۴-۱- تعیین مرز هیدروژئولوژیکی آبخوان

مرز آبخوان دشت ایذه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران، داده‌های چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای میدانی تعیین شد. این مرز در نرم‌افزار Google Earth Pro با فرمت مخصوص ترسیم و سپس به‌صورت Shapefile به محیط نرم‌افزاری ArcMap وارد شد. مساحت نهایی آبخوان ۱۱۰/۳ کیلومتر مربع محاسبه شد که با مطالعات قبلی [۱۳] همخوانی دارد.

۴-۲- روش‌های درون‌یابی و تهیه هیدروگراف معرف

روش‌های قطعی خود به دو دسته سراسری و محلی تقسیم می‌شوند. روش‌های محلی، مانند IDW و RBF، پیش‌بینی را براساس زیرمجموعه‌ای از نقاط مجاور انجام می‌دهند و در زمرهٔ درون‌یاب‌های دقیق[۱۱] قرار می‌گیرند، به این معنی که مقادیر پیش‌بینی‌شده در مکان‌های نمونه با مقادیر مشاهده‌شده برابر است.

[۱۱] Exact Interpolators

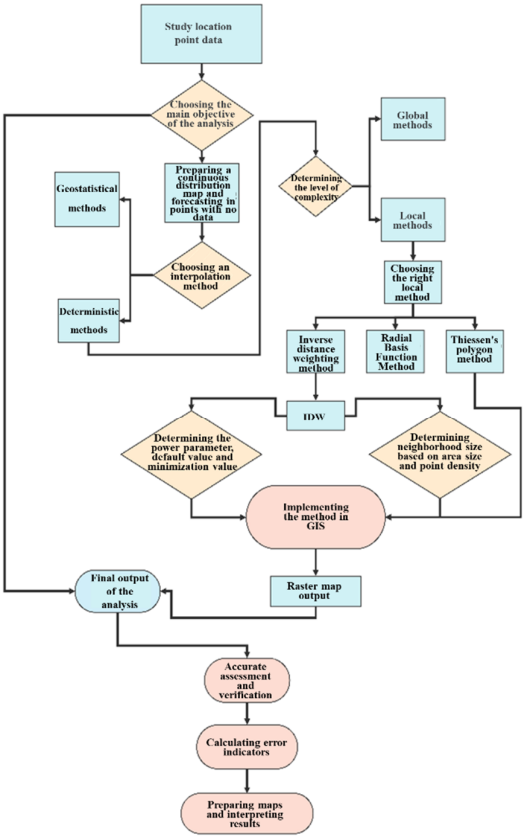

Figure 2. General chart of the research process

شکل ۲- نمودار کلی روند انجام تحقیق

۴-۳- روش IDW

در روش IDW که به‌عنوان یک رویکرد قطعی در درون‌یابی مکانی شناخته می‌شود، به‌صورت وزن هر نقطه نمونه در تعیین مقدار نقاط مجهول، متناسب با معکوس فاصله آن نقطه تا موقعیت مورد پیش‌بینی محاسبه می شود.

بر این اساس، نقاطی که در مجاورت نزدیک‌تری قرار دارند، سهم بیش‌تری در نتیجه نهایی خواهند داشت. فرمول کلی این روش به‌شرح زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$Z(\mathcal{T}_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z_i \cdot w_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, w_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (۱)$$

که در آن، $Z(\mathcal{T}_0)$ = مقدار برآوردشده در نقطه مجهول؛ z_i = مقدار مشاهده‌شده در نقطه i؛ d_i = فاصله اقلیدسی نقطه i تا نقطه مجهول؛ p = توان فاصله (p=2)، هستند.

این فرمول بیان‌گر آن است که با افزایش فاصله d_i، وزن w_i به‌سرعت کاهش یافته و سهم نقطه مربوطه در برآورد نهایی، کاسته می‌شود.

انتخاب مقدار بهینه p به‌طور معمول از طریق روش‌های اعتبارسنجی متقابل و با هدف کمینه‌سازی خطای برآورد صورت می‌پذیرد.

۴-۴- روش چندضلعی‌های تیسن

این روش یک روش قطعی و غیردرون‌یاب است که برای تخصیص مقادیر به نواحی بدون‌داده استفاده می‌شود.

در این روش، با اتصال نقاط معلوم به یکدیگر و رسم عمودمنصف این خطوط، چندضلعی‌هایی ایجاد می شود. فرض بر این است که مقدار هر نقطه معلوم برای کل چندضلعی پیرامون آن نماینده است.

از این روش اغلب برای تعیین مناطق نفوذ ایستگاه‌ها و تهیهٔ نقشه‌های اولیهٔ توزیع مکانی استفاده می شود [۱۵].

$$\bar{3}_t = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i \times A_i)}{A_T} \quad (۲)$$

که در آن، 3_t = میانگین تراز سطح آب در زمان t؛ h_i = تراز آب چاه i؛ A_i = مساحت پلی‌گون چاه i، و A_T = مساحت کل آبخوان، هستند.

انتخاب روش بهینه درون‌یابی در هیدروژئولوژی، مستلزم شناخت دقیق ویژگی‌ها و محدودیت‌های هر رویکرد است.

جدول ۲ با مقایسه دو روش چندضلعی تیسن و IDW از منظر ابعاد کلیدی نظیر نوع الگوریتم، میزان نیاز به پارامترسازی، مبانی محاسباتی، حساسیت مکانی، کاربردهای عملی و کیفیت خروجی، چارچوبی شفاف برای تصمیم‌گیری فراهم می‌کند.

این مقایسه به پژوهشگران کمک می‌کند تا براساس اهداف خاص مطالعه و ماهیت داده‌های موجود، مناسب‌ترین ابزار تحلیلی را انتخاب نمایند.

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های روش چندضلعی تیسن و روش وزن‌دهی معکوس فاصله

Table 2. Comparison of Thiessen polygon method and inverse distance weighting method

Specifications	Thiessen's Polygon Method	Inverse distance weighting method
Method type	Non-interpolative and deterministic	Interpolation and accurate
Parameterization	Parameterless	Requires parameterization
Computational basis	Nearest neighbor area allocation	Weighted average based on distance
Sensitivity to point arrangement	Very sensitive	Average with parameter adjustment
Application in hydrogeology	Area-representative hydrograph calculation and initial averaging	Preparation of water level alignment maps and continuous spatial analyses
Suitable for	Qualitative data, fast calculations	Continuous quantitative data
Uncertainty	Does not quantify uncertainty	Does not quantify uncertainty
Nature of output	Discrete and stepped surface	Continuous and smooth surface
Mathematical basis	Analytical geometry	Local statistics

۴-۵- پیاده‌سازی و تحلیل مکانی

تمامی تحلیل‌های مکانی و درون‌یابی‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام پذیرفت.

در بخش کاربردی این مطالعه که بر روی دشت ایذه متمرکز است، از روش IDW برای درون‌یابی داده‌های نقطه‌ای سطح آب زیرزمینی و بارش استفاده شد.

انتخاب این روش به‌دلیل سادگی، سرعت، و تناسب آن برای متغیرهایی با توزیع پیوسته مانند بارش روزانه بود [۱۶].

پارامترهای بهینه‌شده (p=2 و اندازهٔ همسایگی ۱۲ کیلومتر) برای منطقه اعمال شد.

هم‌چنین، برای تحلیل اولیه و تعیین حوضهٔ نفوذ ایستگاه‌های بارش، از روش چندضلعی تیسن بهره گرفته شد [۱۷].

صحت‌سنجی روش‌های به‌کاررفته با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع[۱۲] و محاسبهٔ شاخص‌های خطای میانگین مطلق[۱۳] (*MAE*) و جذر میانگین مربعات خطا[۱۴] (*RMSE*) انجام شد.

هیدروگراف معرف با استفاده از مقادیر میانگین ماهانه هر دو روش ترسیم شد. برای ارزیابی دقت، شاخص‌های آماری *MAE*، *RMSE* و ضریب تبیین (R^2) محاسبه شد. نتایج مقایسه در جدول ۳ و شکل ۳ ارائه شده است.

برای تحلیل فضایی داده‌های نقطه‌ای و تهیه نقشه‌های پیوسته از پارامترهای هیدروژئولوژیک (مانند تراز سطح آب زیرزمینی) و درون‌یابی مکانی قطعی استفاده شد.

انتخاب این روش‌ها مبتنی‌بر سادگی، کارایی، و تناسب آن‌ها با اهداف مطالعه، ماهیت داده‌ها و در دسترس بودن در GIS بود.

[۱۲] Cross-Validation

[۱۳] Mean Absolute Error

[۱۴] Root Mean Square Error

جدول ۳- مقادیر حاصل از روش وزن دهی معکوس فاصله و تیسن

Table 3. The values obtained from the inverse distance weighting method and thiessen polygon method

Month	The value obtained from the Thiessen polygon	Value obtained from inverse distance weighting	The difference between the two methods
April	830.4218923	827.2	3.221892307
May	832.41645	829.4	3.016449958
June	832.3259623	829.34	2.985962293
July	832.1746086	829	3.174608557
August	832.0066987	829.16	2.846698711
September	832.0523217	828.98	3.072321678
October	831.9600282	828.67	3.290028192
November	832.0391674	829.12	2.919167406
December	833.5960556	830.6	2.996055578
January	833.5545939	830.45	3.104593931
February	833.8183047	830	3.818304749
March	833.8421578	830.2	3.642157774

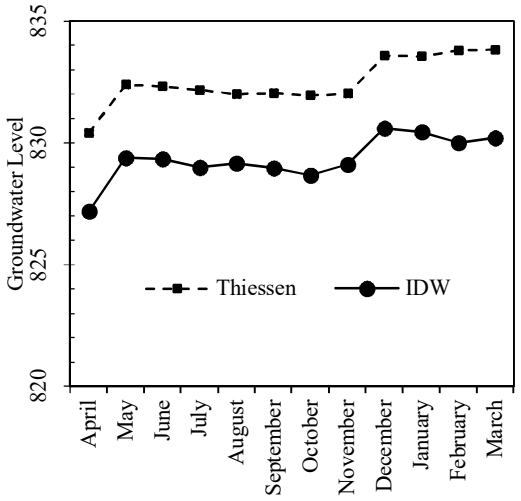

Figure 3. Comparison of ground water unit hydrograph of izeh plain with Thiessen and idw methods

شکل ۳- مقایسه هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت ایذه با دو روش تیسن و IDW

در این بخش، مبانی نظری، منطق انتخاب، و رویه اجرای دو روش اصلی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، روش چندضلعی‌های تیسن و روش IDW به‌تفصیل شرح داده شد.

تحلیل فضایی-زمانی متغیر هیدروژئولوژیک در دشت ایذه با استفاده از روش درون‌یابی IDW و براساس داده‌های ماهانه انجام شد.

خروجی این فرآیند، تولید ۱۲ نقشه هم‌ارز ماهانه بود که الگوی پراکنش مکانی پارامتر را به‌صورت کمی و بصری آشکار می‌سازد.

پردازش داده‌ها نشان‌دهنده واریاسیون مکانی-زمانی قابل‌توجه در مقادیر این متغیر طی دوره مطالعاتی است (شکل ۴).

در فاز نخست سال (نیمه اول)، مقادیر در یک دامنه باریک و با ثبات نسبی (۸۲۷ تا ۸۳۰ واحد) نوسان داشته و مقادیر اوج و حضیض آن به‌ترتیب در ماه‌های اردیبهشت (۸۲۹/۴ واحد) و فروردین (۸۲۷/۲ واحد) ثبت شد.

در مقابل، در فاز دوم (نیمه دوم سال)، روندی افزایشی و معنادار، به‌ویژه در ماه‌های سرد سال مشهود است، به‌طوری‌که بیشینه‌های مطلق سالانه در ماه‌های آذر (۸۳۰/۶ واحد) و دی (۸۳۰/۴ واحد) رخ داده‌اند.

این تغییرپذیری ماهانه، که به‌وضوح در نقشه‌های هم‌ارز بازتاب یافته، وجود یک الگوی نوسان فصلی سازمان دهی‌شده را در توزیع مکانی پارامتر تأیید می‌کند. چنین الگویی را می‌توان به‌طور مستقیم به تأثیر عوامل کلان‌مقیاس جوی یا فرآیندهای آب‌شناسی وابسته به فصل در منطقه نسبت داد.

۴-۶- محاسبه بیلان آب زیرزمینی

بیلان آبخوان براساس بارش برآورد شده و نرخ تبخیر و تعرق با رابطه (۳) محاسبه شد:

$$\delta S = (B_r + Q_{in} + Y) - (Q_{out} + V + Z) \qquad (۳)$$

که در آن، B_r = حجم نفوذ بارش؛ Q_{in} = جریان ورودی جانبی؛ Y = بازگشت آبیاری (در این پژوهش به‌دلیل نبود داده دقیق، صفر فرض شد)؛ Q_{out} = جریان خروجی

جانبی؛ V = برداشت از چاه‌ها، و Z = تبخیر-تعرق از سطح آبخوان (صفر فرض شد)، هستند.

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- نفوذ بارش

با توجه به میانگین بارش سالانه ۷۱۴ میلی‌متر در ایستگاه ایذه و مساحت آبخوان معادل ۱۳۲/۷۱۵/۳۱۳ متر مربع، حجم نفوذ مؤثر بارش به آبخوان محاسبه شد. با اعمال ضریب نفوذ مؤثر ۲۰ درصد که برپایه مطالعات پیشین و لیتولوژی غالب منطقه (ماسه‌سنگ سیلتی) تعیین شده است، این حجم به‌طور تقریبی معادل ۱۸۹/۵۱۷/۴۶۷ مترمکعب در سال برآورد می‌شود.

۵-۲- جریان‌های جانبی

برای برآورد جریان‌های جانبی، در گام نخست میدان هیدروپتانسیل با استفاده از نرم‌افزار Surfer ترسیم شد (شکل ۵). سپس، گرادیان هیدرولیکی (i) از طریق اختلاف تراز سطح آب در چاه‌های واقع بر مرزهای آبخوان محاسبه شد.

سطح مقطع مؤثر جریان (A) از حاصل‌ضرب فاصله بین خطوط جریان در ضخامت مؤثر آبخوان (۷۰ متر) به دست آمد.

با استفاده از ضریب هدایت هیدرولیکی (K) معادل ۰/۲۲ متر بر روز که از مطالعات پیشین استخراج شده بود (جدول ۱)، دبی جریان ورودی جانبی با رابطه دارسی و براساس ابعاد مرز ورودی (۷۵۰ متر) حدود ۶۹/۳ مترمکعب در روز و حجم سالانه آن به‌طور تقریبی ۲۵/۲۹۵ مترمکعب برآورد شد.

به‌همین ترتیب، دبی جریان خروجی جانبی با در نظر گرفتن ابعاد مرز خروجی (۴۵۰ متر) حدود ۷۶/۲۳ مترمکعب در روز و حجم سالانه آن نزدیک به ۲۷/۸۲۴ مترمکعب محاسبه شد.

در بخش دیگر بیلان، میزان برداشت سالانه از آبخوان براساس آمار رسمی سازمان آب منطقه‌ای و برای ۱۰ حلقه چاه مجاز بهره‌برداری، معادل ۲۰/۱۴۵/۲۰۰ مترمکعب تعیین شد.

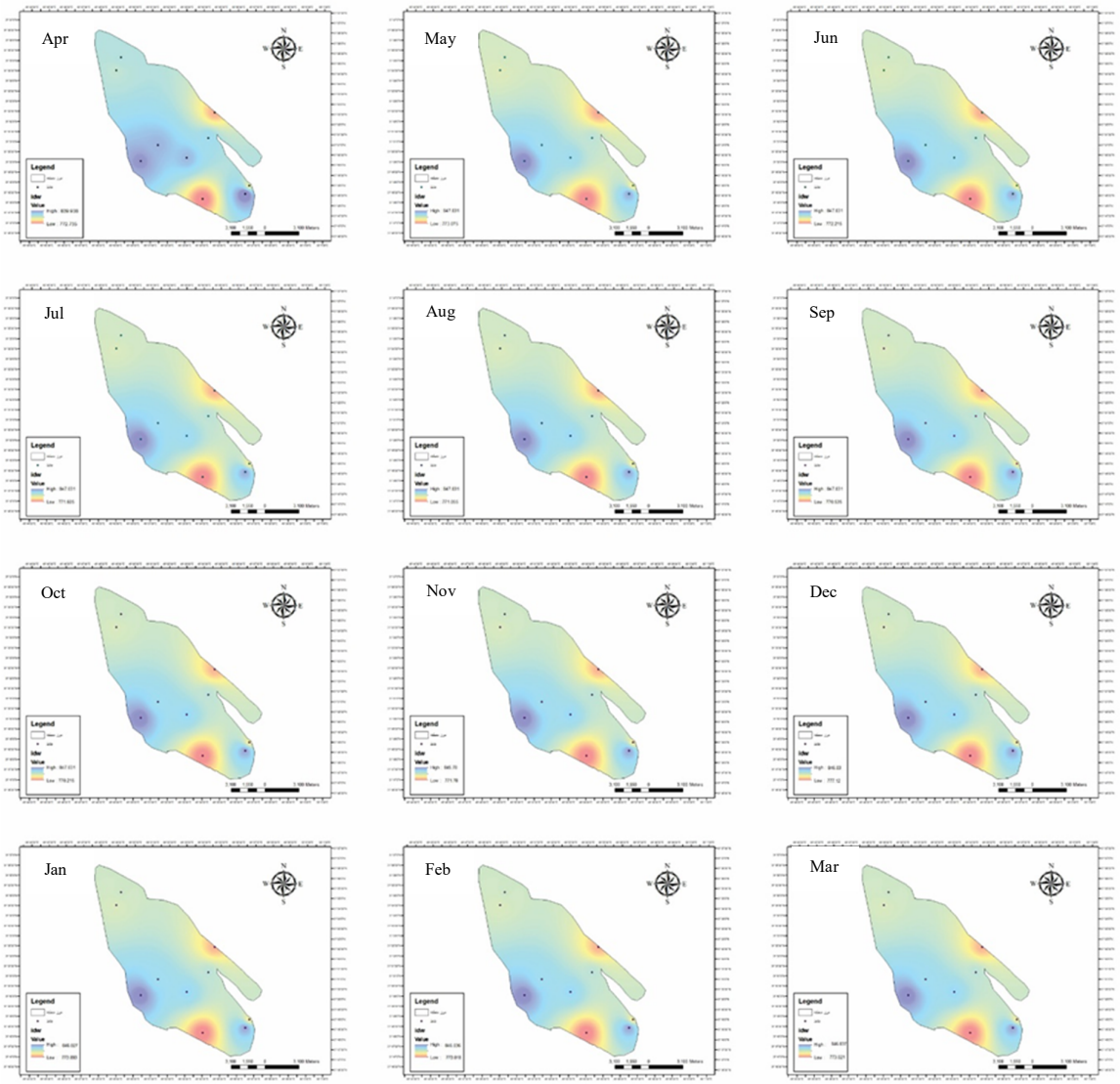

Figure 4. Images depicted in the GIS, from the left to right, April to March, respectively.

شکل ۴- تصاویر ترسیم‌شده در GIS، به‌ترتیب از بالا چپ به راست، ماه فروردین تا اسفند

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی یکپارچه و عملیاتی، به ارزیابی پایداری آبخوان دشت ایذه و مقایسه روش‌های درون‌یابی ساده در تحلیل‌های هیدروژئولوژیک پرداخت.

نتایج به‌وضوح نشان داد که ادغام تحلیل تغییرات مکانی-زمانی سطح آب، با استفاده از روش‌های قطعی مانند وزن‌دهی معکوس فاصله و چندضلعی‌های تیسن، با محاسبات بیلان آب زیرزمینی، ابزاری کارآمد و مقرون به‌صرفه برای پایش و درک وضعیت پویای آبخوان‌ها فراهم می‌کند.

این رویکرد، امکان ترسیم هیدروگراف معرف دقیق‌تر را بدون‌نیاز به مدل‌سازی‌های عددی پیچیده و پرهزینه میسر می‌سازد.

ارزیابی کمی مؤلفه‌های مختلف بیلان، وضعیت هشداردهنده آبخوان مورد مطالعه را آشکار نمود و حاکی از وجود یک بیلان منفی و افت مستمر سطح آب بود.

این شرایط، ناپایداری هیدرودینامیکی مخزن و فشار فزاینده ناشی از بهره‌برداری فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر آن را تأیید می‌کند.

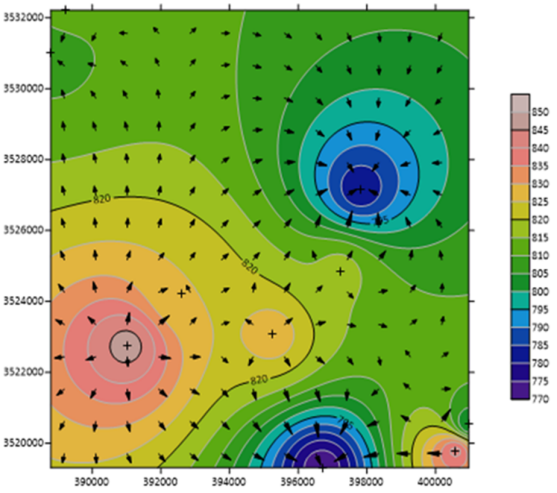

Figure 5. Map of the contours and flow lines of the study area

شکل ۵- نقشه خطوط تراز و خطوط جریان منطقه مورد مطالعه

به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه بر ضرورت اتخاذ راه‌بردهای مدیریتی فوری و پایدار برای مهار روند تخلیه و احیای تعادل این منبع حیاتی تأکید دارد.

روش تلفیقی ارائه‌شده، به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی قابل تعمیم، می‌تواند برای پایش و ارزیابی اولیه سایر آبخوان‌های کشاورزی‌محور در مناطق با محدودیت داده، مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به کسری قابل توجه بیلان آب زیرزمینی دشت ایذه (حدود ۱/۱۹ میلیون مترمکعب در سال)، به‌منظور حرکت به سمت تعادل هیدروژئولوژیک و پایداری بلندمدت این منبع حیاتی، اجرای راه‌کارهای زیر ضروری است:

(الف) بهینه‌سازی مصرف در بخش کشاورزی: آموزش و ترویج روش‌های آبیاری نوین، اصلاح الگوی کشت و توسعه کشت‌های کم‌آب‌بر.

(ب) نظارت و کنترل برداشت: تشدید نظارت بر مجوزهای بهره‌برداری، نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌ها و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز.

(پ) مدیریت یک‌پارچه منابع آب: تدوین و اجرای طرح جامع تعادل‌بخشی آبخوان با مشارکت کلیه ذی نفعان.

(ت) مدیریت بهره‌برداری: تدوین و اعمال سقف مجاز بهره‌برداری پویا براساس نوسانات سالانه تغذیه آبخوان.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

آقای محمّدباقر اسکندری به بررسی نهایی داده‌ها، راهنمایی، کنترل نتایج، ویرایش و بازبینی متن مقاله پرداخت. خانم نیلوفر رحیمی داده‌ها را جمع‌آوری و تحلیل نمود و مراحل مدل‌سازی و تحلیل آماری را انجام داد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این پژوهش مراتب تشکر و قدردانی خود را از سازمان آب منطقه‌ای استان خوزستان از در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز را اعلان می‌دارد. هم

چنین، از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و
علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

[1] Gurdak JJ, Hanson RT, McMahon PB, Bruce BW, McCray JE, Thyne GD, Reedy RC. Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA. Vadose Zone Journal. 2007; 6(3): 533-547. https://doi.org/10.2136/vzj2006.0087.
[2] Thomas BF, Famiglietti JS, Landerer FW, Wiese DN, Molotch NP, Argus DF. GRACE groundwater drought index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. Remote Sensing of Environment. 2017; 198: 384-392. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026.
[3] Minnig M, Moeck C, Radny D, Schirmer M. Impact of urbanization on groundwater recharge rates in Dübendorf, Switzerland. Journal of Hydrology. 2018; 563: 1135-1146. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol. 2017.09.058.
[4] Di Curzio D, Di Giovanni A, Lidori R, Montopoli M, Rusi S. Comparing rain gauge and weather RaDAR data in the estimation of the pluviometric inflow from the Apennine Ridge to the Adriatic Coast (Abruzzo Region, Central Italy). Hydrology. 2022; 9(12): 225. https://doi.org/10.3390/hydrology9120225.
[5] De Vera A, Alfaro P, Terra R. Operational implementation of satellite-rain gauge data merging for hydrological modeling. Water. 2021; 13(4): 533. https://doi.org/10.3390/w13040533.
[6] Ahmad AY, Saleh IA, Balakrishnan P, Al-Ghouti MA. Comparison GIS-Based interpolation methods for mapping groundwater quality in the state of Qatar. Groundwater for Sustainable Development. 2021; 13: 100573. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100573.
[7] Feng D, Chen Y, Jiang P, Ni J. Research on optimizing rainfall interpolation methods for distributed hydrological models in sparsely networked rainfall stations of watershed. Water. 2025; 17(22); 3: 237. https://doi.org/10.3390/w17223237.
[8] Antonakos A, Lambrakis N. Spatial interpolation for the distribution of groundwater level in an area of complex geology using widely available GIS tools. Environmental Processes. 2021; 8(3): 993-1026. https://doi.org/10.1007/s40710-021-00529-9.
[9] Kisiki CP, Ayenew T, Mjemah IC. Estimation of groundwater recharge variability using a GIS-based distributed water balance model in Makutupora basin, Tanzania. Heliyon. 2023; 9(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15117.
[10] Rajabi K, Nikbakht Shahbazi A, Fathian H, Zohrabi N. Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code. Iran-Water Resources Research. 2021; 16(4): 112-126. https://doi.org/20.1001.1.17352347.1399.16.4.8.8 [In Persian].
[11] Nadiri AA, Yousefzadeh S. A comparison of the performance of artificial neural network, fuzzy logic and adaptive neuro-fuzzy inference systems models in the estimation of aquifer hydraulic conductivity. A case study: Maraghe-Bonab Aquifer. Hydrogeomorphology. 2017; 4(10): 21-40 [In Persian].
[12] Morris DA, Johnson AI. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60. US Government Printing Office; 1967.
[13] Mehrabinejad A, Kalantari N, Alijani F, Mohammadi H. Zoning of denitrification with emphasis on hydrochemistry in the urban aquifer of Izeh, Northeast Khuzestan. Journal of Water and Sustainable Development. 2025; 12(1): 46-63. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i1.2401-1401 [In Persian].
[14] Taghizadeh-Mehrjardi R, Minasny B, Sarmadian F, Malone BP. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. Geoderma. 2014; 213: 15-28. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.020 [In Persian].
[15] Croley II TE, Hartmann HC. Resolving Thiessen polygons. Journal of Hydrology. 1985; 76(3-4): 363-379. https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90143-X.
[16] Mushtaha AM, Van Camp M, Walraevens K. Quantification of recharge and runoff from rainfall using new GIS tool: Example of the Gaza Strip Aquifer. Water. 2019; 11(1): 84. https://doi.org/10.3390/w11010084.

[17] Bahtiar R, Wijayanto Y, Budiman SA, Saputra TW. Perbedaan karakteristik sebaran spasial hujan di kabupaten jember menggunakan metode inverse distance weighted (IDW) dan poligon thiessen. Jember, Indonesia: Berkala Ilmiah Pertanian. 2022; 5(1): 1–5.