

Assessment of Agricultural Drainage Water Quality for Irrigation Reuse Using Hydrochemical Indices (Case Study: Bavi County, Khuzestan)

Mohamad Dakhili¹  | Javad Zahiri^{2*}  | Mitra Cheraghi³  , Shahram Moradi⁴ 

1. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: mohamad.dakhili1401@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

3. Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: cheraghi.mitra@asnrukh.ac.ir

3. Head of the Water and Wastewater Quality Monitoring and Supervision Center - Khuzestan Water and Sewage Company, Iran. E-mail: sh_moradi76@yahoo.com

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Given the increasing need for water resources in agriculture and the limitation of freshwater resources, the reuse of agricultural drainage water is important as a sustainable solution in water resource management in arid and semi-arid regions. In Bavi County, Khuzestan Province, due to the high volume of agricultural drainage water production, it is essential to evaluate the quality of these waters and investigate their reusability for irrigating crops such as wheat, barley, corn, and legumes. This research aims to assess the quality of drainage water and examine the possibility of its reuse in the hot and dry climatic conditions of southwestern Iran. As an innovative approach towards sustainable agriculture and water resource management, it can contribute to improving management decisions at the regional and national levels.

Materials and Methods

In this study, to evaluate the water quality of agricultural drains in Bavi County. Samples were taken from three drainage collectors located at 950, 1410, and 1770 meters from Karun River, following a factorial experimental design based on a randomized complete block design with two factors: location (at three levels) and time (at three levels December 2023 to February 2024). Physicochemical parameters of the water, including Total Dissolved Solids (TDS), pH, Electrical Conductivity (EC), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+), Chloride (Cl^-), Phosphate (PO_4^{2-}), Nitrate (NO_3^-), Carbonate (CO_3^{2-}), and Bicarbonate (HCO_3^-), were measured. Hydrochemical indices, including Sodium Percentage (SSP), Sodium Adsorption Ratio (SAR), Residual Sodium Carbonate (RSC), Permeability Index (PI), Kelly's Ratio (KR), Magnesium Adsorption Ratio (MAR), and Total Hardness (TH), were used to evaluate irrigation water quality. Additionally, three water quality classification systems (Nejbaur, USSS, and FAO) were employed to analyze water quality and its reusability in irrigation.

Results

Results showed that the average TDS in drain 1 (1992 mg/L) was significantly lower than in drains 2 (3580 mg/L) and 3 (3573 mg/L). Similarly, average values of irrigation quality indices for drain 1—such as SAR (23.59), RSC (1.5), PI (53%), KR (0.97), MAR (0.24), and TH (800 mg/L)—were all markedly lower compared to the other drains and were closer to river water values. The results of this study indicate that Drain 1 has better hydrochemical quality compared to Drains 2 and 3. Furthermore, the ratio of calcium and magnesium ions to sodium in Drain 1 was more favorable, indicating its high potential for reuse in irrigation. In contrast, Drains 2 and 3, due to high salinity and high concentrations of sodium and chloride ions, require remediation measures such as mixing

* Corresponding author

with better quality water or employing saline soil management techniques.

Conclusion

Overall, the results of this research showed that the water from Drains 2 and 3 is unsuitable for irrigating agricultural crops and requires remediation measures such as agricultural gypsum or heavy leaching for their use. In contrast, Drain 1 had better conditions and has the potential for use in irrigating semi-tolerant crops such as wheat, barley, and corn, but requires careful management to prevent salinity and sodicity problems in the soil. This study emphasizes the importance of accurate assessment of agricultural drainage water quality and the use of hydrochemical indices in water and soil resource management, and its results can serve as a basis for management decisions and policies regarding the reuse of drainage water in arid and semi-arid regions of the country.

Author Contributions

First author: Data collection, writing first draft, Second author: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing Original Draft, Third author: Conceptualization, Methodology, Writing - Review & Editing, Fourth author: Writing - Review & Editing.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Assessment of Agricultural Drainage Water Quality for Irrigation Reuse Using Hydrochemical Indices (Case Study: Bavi County, Khuzestan)

ABSTRACT

This study evaluated the quality of drainage water from autumn wheat fields in Bavi County, Khuzestan Province. Monthly water samples were collected from the Karun River between December 2023 and February 2024. Samples were taken from three drainage collectors located at 950, 1410, and 1770 meters, following a factorial experimental design based on a randomized complete block design with two factors: location (at three levels) and time (at three levels). Key physicochemical parameters measured included total dissolved solids (TDS), alkalinity, electrical conductivity, calcium, magnesium, sodium, potassium, chloride, phosphate, nitrate, carbonate, and bicarbonate. To assess the water's suitability for irrigation, several hydrochemical indices were calculated: soluble sodium percentage (SSP), sodium adsorption ratio (SAR), residual sodium carbonate (RSC), permeability index (PI), Kelly's ratio (KR), magnesium adsorption ratio (MAR), and total hardness (TH). Results showed that the average TDS in drain 1 (1992 mg/L) was significantly lower than in drain 2 (3580 mg/L) and drain 3 (3573 mg/L). Similarly, average values of irrigation quality indices for drain 1—such as SAR (23.59), RSC (1.5), PI (53%), KR (0.97), MAR (0.24), and TH (800 mg/L)—were all markedly lower compared to the other drains. These findings indicate that water from drain 1 is suitable for irrigating all plant types—sensitive, semi-sensitive, and tolerant—due to its favorable salinity levels and cation balance. Conversely, the high salinity and elevated sodium and chloride concentrations in water from drains 2 and 3 limit their use to salt-tolerant crops. Irrigation of sensitive or semi-sensitive plants with water from these drains would require careful management and remediation. This study underscores the importance of continuous monitoring of drainage water quality and the implementation of integrated water resource management to promote sustainable water use.

Keywords: Drainage Water Quality, Hydrochemical Indices, Sustainable Agriculture, Water Resource Management

ارزیابی کیفیت زهاب اراضی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های هیدروشیمیایی جهت استفاده مجدد برای آبیاری (مطالعه موردی: شهرستان باوی - خوزستان)

محمد دخیلی^۱، جواد ظهیری^۲ | میترا چراغی^۳ | شهرام مرادی^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه:

Mohamad.dakhili1401@gmail.com

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه:

j.zahiri@asnrkh.ac.ir

۳. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: cheraghi.mitra@asnrkh.ac.ir

۴. مدیر مرکز پایش و نظارت بر کیفیت آب و فاضلاب - شرکت آب و فاضلاب خوزستان. رایانامه: sh_moradi76@yahoo.com

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی کیفیت زهاب‌های تولیدی از اراضی تحت کشت گندم پاییزه در شهرستان باوی استان خوزستان انجام شد. نمونه‌برداری از سه جمع‌کننده زهکش در فواصل ۹۵۰ (زهکش ۱)، ۱۴۱۰ (زهکش ۲) و ۱۷۷۰ (زهکش ۳) متری از رودخانه کارون در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور مکان (در سه سطح) و زمان (در سه سطح دی تا اسفند ۱۴۰۲) اجرا گردید. پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب شامل مواد جامد محلول، قلیائیت، هدایت الکتریکی، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلراید، فسفات، نیترات، کربنات و بی‌کربنات اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های هیدروشیمیایی شامل درصد سدیم (SSP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، کربنات سدیم باقیمانده (RSC)، شاخص نفوذپذیری (PI)، نسبت کلی (KR)، نسبت جذب منیزیم (MAR) و سختی کل (TH) برای ارزیابی کیفیت آب آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد میانگین TDS در زهکش ۱ (۱۹۹۲ میلی‌گرم بر لیتر) به‌طور معناداری کمتر از زهکش‌های ۲ (۳۵۸۰ میلی‌گرم بر لیتر) و ۳ (۳۵۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) بود. میانگین شاخص‌های کیفی زهکش ۱ شامل SAR (۲۳/۵۹)، RSC (۱/۵)، PI (۵۳٪)، KR (۰/۹۷)، MAR (۰/۲۴) و TH (۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به‌طور معناداری کمتر از زهکش‌های دیگر ثبت شد. لذا، آب زهکش ۱ به دلیل شوری و بالا و غلبه سدیم و کلراید، تنها برای گیاهان مقاوم مناسب بوده و استفاده از آن‌ها برای گیاهان حساس و نیمه حساس نیازمند مدیریت و اصلاح است. این مطالعه اهمیت پایش کیفیت زهاب و مدیریت تلفیقی منابع آب برای استفاده پایدار را تأکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: کیفیت زهاب، شاخص‌های هیدروشیمیایی، کشاورزی پایدار، مدیریت منابع آب

مقدمه

با توجه به رشد روزافزون جمعیت، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و محدودیت منابع آب شیرین، استفاده مجدد از زهاب کشاورزی به‌عنوان یک راهکار پایدار در مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. بخش کشاورزی به‌تنهایی مسئول مصرف حدود ۷۰ درصد آب شیرین جهان است (Florides et al., 2024) و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، این نسبت حتی بالاتر است. در این مناطق، محدودیت منابع آب باعث شده است که استفاده مجدد از زهاب به‌عنوان یک ضرورت مطرح شود، اما کیفیت این آب‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی این رویکرد دارد (Alharbi et al., 2024; Zamani et al., 2022). یکی از نگرانی‌های اصلی در ارتباط با زهاب‌های کشاورزی، شوری و تجمع مواد مغذی در آن است. زیرا می‌تواند منجر به تخریب ساختار خاک، کاهش قابلیت نفوذپذیری، کاهش بهره‌وری محصول و حتی ایجاد شرایط برگشت‌ناپذیر در خاک‌های مناطق خشک شود. علاوه بر این، سطح بالای مواد مغذی در آب زهکشی می‌تواند منجر به یوتروفیکاسیون (انباشت مواد مغذی) در هنگام تخلیه به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها شود، فرآیندی که رشد جلبک‌ها را تقویت کرده و سطح اکسیژن را در آب کاهش می‌دهد و به حیات آبیان آسیب می‌رساند (Tanji & Kielen, 2002). کیفیت آب زهکشی به ویژه در مناطقی که آب کمیاب است و برای آبیاری مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار مهم است. به‌عنوان مثال، استفاده مجدد از آب در مناطق خشک و نیمه خشک که منابع آب شیرین محدود است، ضروری است. با این حال، استفاده مجدد از آب زهکشی با کیفیت پایین در آبیاری می‌تواند منجر به افزایش شوری خاک، کاهش حاصلخیزی خاک و پیامدهای نامطلوب محصول شود. بنابراین، پایش و ارزیابی منظم کیفیت زهکشی برای امکان استفاده مجدد ایمن و پایدار از آب در کشاورزی ضروری است (Mutasher et al., 2021). محصولاتی که در معرض سطوح بالای شوری قرار می‌گیرند، اغلب به‌دلیل تنش اسمزی، که مانع جذب آب می‌شود، رشدشان متوقف می‌شود. شوری خاک به ویژه در زمین‌های آبیاری شده در مناطق خشک و نیمه خشک، جایی که تجمع نمک می‌تواند بدون مدیریت فعال خاک و شیوه‌های زهکشی با کیفیت بالا، برگشت‌ناپذیر شود، مشکل‌ساز است (Tanji & Kielen, 2002). بازیافت آب زهکشی می‌تواند راهی مؤثر برای کاهش اثرات محیط‌زیستی آن باشد. کشاورزان با جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب اضافی در مخازن یا حوضچه‌ها، می‌توانند سطح مواد مغذی و آلاینده‌ها را قبل از استفاده مجدد در آبیاری کنترل کنند. این آب بازیافتی، هنگامی که با آب شیرین مخلوط می‌شود، می‌تواند غلظت نمک‌ها و سایر آلاینده‌ها را کاهش داده و آن را برای آبیاری محصول ایمن‌تر کند. چنین شیوه‌هایی به ویژه در مناطق خشک ارزشمند بوده و به مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کنند (Frankenberger, 2018). پایش منظم کیفیت زهاب برای شناسایی آلاینده‌های مضر و ارزیابی مناسب بودن آن برای استفاده مجدد ضروری است. پارامترهای کلیدی مانند هدایت الکتریکی، غلظت مواد مغذی و باقیمانده‌های شیمیایی، شاخص‌های حیاتی کیفیت زهاب کشاورزی هستند. نتایج ارزیابی می‌تواند در تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا آب زهکشی جهت رهاسازی به محیط‌زیست یا استفاده مجدد نیاز به تصفیه دارد یا باید قبل از آبیاری با آب با کیفیت بالاتر رقیق شود، کمک کند. اجرای چارچوب‌های ارزیابی کیفیت می‌تواند به کاهش خطرات محیط‌زیستی و پشتیبانی از شیوه‌های کشاورزی پایدار کمک کند (Reinhart, 2019).

از آنجایی که استان خوزستان و شهرستان باوی علاوه بر دارا بودن اراضی کشاورزی گسترده، با چالش‌هایی همچون مدیریت نامناسب آبیاری مواجه هستند، حجم آب مصرفی و به‌تبع آن، میزان زهاب تولیدشده از اراضی کشاورزی در این منطقه بالاست. لذا در صورتی که بتوان از زهاب‌های تولیدشده در کاربری‌های مختلف استفاده کرد، کمک شایانی به مدیریت منابع آب در منطقه خواهد شد. این امر مستلزم تعیین کیفیت زهاب‌های تولیدشده در اراضی کشاورزی بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی است. در این زمینه، مطالعات کمی در خوزستان انجام شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، مطالعه انجام شده توسط **مختاران و همکاران (۱۳۹۹)** می‌باشد که بازچرخانی زهاب مزارع نیشکر جنوب خوزستان را برای کشت برنج بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از زهاب در آبیاری متناوب می‌تواند علاوه بر بهبود بهره‌وری آب، از سدیمی شدن خاک جلوگیری کند و مدیریت شوری خاک را بهبود بخشد. با وجود این مطالعات ارزشمند، در خصوص ارزیابی کیفیت زهاب اراضی کشاورزی شهرستان باوی و قابلیت استفاده

مجدد آن در آبیاری محصولات زراعی منتخب (نظیر گندم، جو، ذرت و حبوبات)، مطالعه‌ای اختصاصی انجام نگرفته است. هدف این پژوهش، پر کردن این خلأ و بهره‌گیری از تجربیات موجود برای ارائه راهکارهای علمی و عملی متناسب با شرایط منطقه است. زهاب‌ها باین مطالعه در ترکیب تحلیل‌های کلاسیک کیفیت آب با نیاز آبی واقعی گیاهان منطقه و تمرکز بر استفاده از زهاب به‌عنوان منبع جایگزین در شرایط اقلیمی گرم و خشک جنوب غرب ایران است. نتایج این مطالعه می‌تواند برای مردم بومی و محلی و نیز در سطح ملی بسیار کاربردی باشد و به مدیران و برنامه ریزان صنعت آب کشور کمک شایانی نماید. همچنین این پژوهش با ارائه رویکردی کاربردی در راستای کشاورزی پایدار، می‌تواند به‌عنوان الگویی برای ارزیابی و مدیریت زهاب در سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

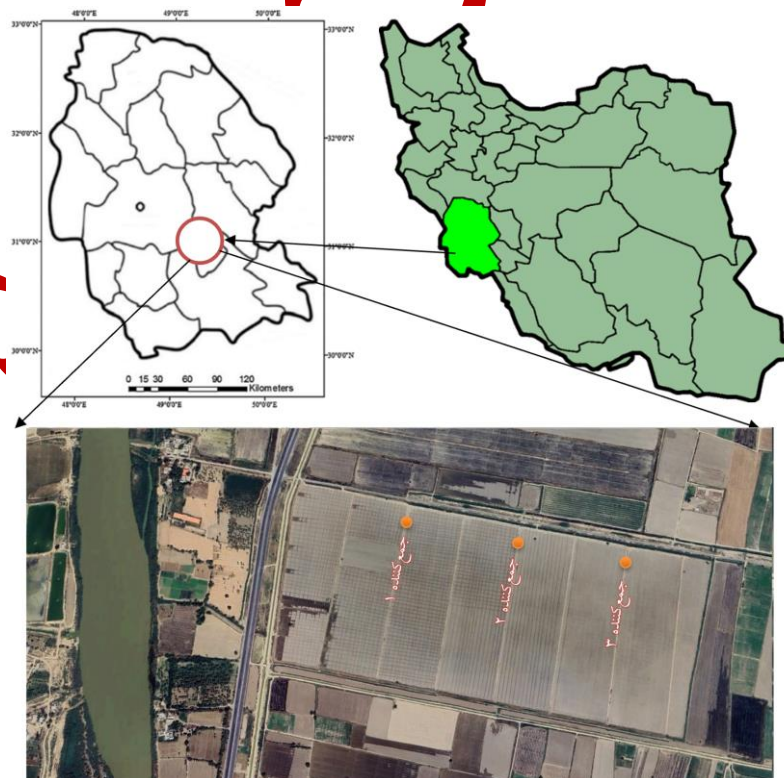
حسن‌پور نوده‌ی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی کیفیت زهاب اراضی شالیزاری در واحد عمرانی F4 شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود به‌منظور استفاده مجدد در آبیاری پرداختند. برهمین اساس غلظت پارامترهای نیتрат، فسفات، آمونیوم، نیاز بیولوژیکی اکسیژن، اکسیژن محلول، کل جامدات و اسیدیته در ۹ مقطع اندازه‌گیری شد. در این پژوهش بیش‌ترین غلظت نیترات، فسفات، آمونیوم و نیاز بیولوژیکی اکسیژن در ماه اردیبهشت و کم‌ترین غلظت اکسیژن محلول و بیش‌ترین غلظت کل جامدات در ماه تیر مشاهده است. کوچک‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با توجه به متوسط دبی و شوری زهاب واحدهای کشت و صنعت نیشکر و صنایع جانبی، طی آزمایشاتی اقدام به بررسی اثر زهاب تولیدی نیشکر بر کیفیت آب تالاب نمودند. نتایج نشان داد که میانگین شوری در طی زمان‌های قبل و بعد از ورود زهاب در نقاط مختلف تفاوت معنی‌داری دارد. علاوه بر این مشخص شد که پس از ورود زهاب به تالاب، میزان شوری آب و املاح آن در تابستان، در اکثر نقاط افزایش یافته است. مختاران و همکاران (۱۳۹۹) بازچرخانی زهاب مزارع نیشکر جنوب خوزستان را برای کشت برنج با هدف بهبود بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش که در کشت و صنعت میرزا کوچک خان انجام شد، دور آبیاری با زهاب نیشکر شامل هرروزه، یک روز در میان و دو روز در میان و ۹ رقم و لاین اصلاحی برنج مقاوم به شوری ارزیابی شد. نتایج نشان داد آبیاری یک روز در میان با متوسط عملکرد ۲۲۴۸ کیلوگرم بر هکتار نسبت به آبیاری هرروزه با ۲۱۴۰ کیلوگرم بر هکتار کارایی بهتری داشت، در حالی که آبیاری دو روز در میان موجب افت شدید عملکرد و افزایش شوری و درصد سدیم قابل تبادل خاک شد. همچنین، در رژیم‌های آبیاری هرروزه و یک روز در میان خاک مزرعه در وضعیت سدیمی قرار نگرفت و تنها شور باقی ماند که دلیل آن زهکشی مناسب و آبیاری کافی در طول فصل رشد بود. Ashour et al. (2021) با هدف ارزیابی امکان استفاده مجدد از زهاب کشاورزی برای آبیاری در استان البحیره مصر، به بررسی جامع این موضوع پرداختند. این پژوهش با در نظر گرفتن اهمیت مدیریت منابع آب در مناطق کم‌آب و پتانسیل زهاب کشاورزی به‌عنوان یک منبع غیرمتعارف، به ارزیابی کیفیت آن و اثرات احتمالی آن بر خاک و محصولات کشاورزی در این منطقه تمرکز نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که تمامی محصولات کشت شده در منطقه از افزایش شوری آب آبیاری متاثر می‌شوند (حتی در شرایط معمول) و عملکرد محصول نیز به‌دلیل افزایش شوری متوسط خاک کاهش می‌یابد نکته قابل توجه این است که غلظت فلزات سنگین در زهاب و آبیاری به حدی نیست که برای خاک و گیاه مشکل‌ساز شود. Giri et al. (2022) به ارزیابی هیدروشیمیایی و کیفیت آب آبیاری در مناطق مرتفع ترانس-هیمالیا در هند پرداختند. در این پژوهش، هفتاد نمونه آب آبیاری از این منطقه جمع‌آوری و به منظور تعیین مشخصات هیدروشیمیایی و کیفیت آن‌ها برای مصارف کشاورزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که آب آبیاری این منطقه به‌طور طبیعی قلیایی است. علاوه بر این، پارامترهای کیفیت آب نشان داد که آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه، علی‌رغم سطوح نسبتاً بالای سختی کل و منیزیم، برای مصارف آبیاری مناسب هستند. نمودار شوری USSL نیز شوری متوسط و خطر سدیم کم را نشان داد. Kara et al. (2023) به بررسی تغییرات برخی شاخص‌های آلودگی و میزان رسوب حمل شده در آب‌های تخلیه کانال زهکشی پس از آبیاری مزارع دشت حرقران در طول فصل آبیاری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که زهاب‌های کشاورزی دشت حران از نظر پنج شاخص آلودگی (pH، هدایت الکتریکی، کدورت، سدیم و نیترات) برای آبیاری مناسب نیستند. با توجه به عملکرد کشاورزی پایدار برای دشت حیران، تصور می‌شود که

نتایج به دست آمده به تصمیم‌گیری اداری در سطوح مختلف مدیریتی کمک کند. (Temesgen et al. (2023 با هدف ارزیابی کیفیت زهاب برای استفاده مجدد در آبیاری در مناطق تحت پوشش آبیاری کولفو و هاره، واقع در جنوب اتیوپی، به بررسی جامعی پرداختند. در این پژوهش، کیفیت زهاب از طریق اندازه‌گیری شاخص‌های مختلف از جمله هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS)، شاخص نفوذپذیری (PI)، شاخص کلی (KI)، درصد سدیم (%Na)، نسبت جذب سدیم (SAR)، نسبت جذب منیزیم (MAR)، شاخص کیفیت آب بر اساس کلرید و سولفات (PS) و کربنات سدیم باقیمانده (RSC) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بر اساس EC و TDS، کیفیت آب زهکشی در این مناطق در دسته‌های متوسط تا عالی برای آبیاری قرار می‌گیرد. همچنین، مقادیر PI و KI نشان‌دهنده مناسب بودن نسبی تا مناسب آب زهکشی برای آبیاری است. اگرچه درصد سدیم و SAR نیز در محدوده ایمن و عالی قرار دارند، اما شاخص PS نشان می‌دهد که کیفیت آب ممکن است از "خوب" تا "زیان‌آور" متغیر باشد. در نهایت، مقادیر RSC نیز حاکی از مناسب بودن آب برای آبیاری است. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که زهاب در مناطق کولفو و هاره پتانسیل استفاده مجدد در آبیاری را دارد، اما نیازمند مدیریت و پایش دقیق کیفیت آب است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

ملاثنای یکی از شهرستان‌های استان خوزستان و مرکز شهرستان باوی است که در ۲۵ کیلومتری شهر اهواز و در امتداد شرق رود کارون واقع شده و دارای زمین‌های حاصلخیز و باغ‌های میوه و کشتزارهای وسیع مدرنیزه است. آمار بلندمدت هواشناسی نشان می‌دهد که این منطقه با میانگین بارندگی سالانه ۲۶۹ میلی‌متر، از مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود (عبدشاهی و همکاران، ۱۳۹۹). منطقه مورد مطالعه دارای وسعت ۹۱/۷۳ هکتار بوده که به ۷ قطعه ۱۲ هکتاری تقسیم شده است و به صورت کرتی آبیاری سطحی می‌شود. این محدوده در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه و سه جمع‌کننده زهکش مورد استفاده در مطالعه حاضر

عملیات زراعی و زهکشی

کلیه عملیات زراعی نظیر شخم، بذرپاشی، کوددهی، سم‌پاشی، وجین و برداشت گندم مطابق با روش متداول و مورد استفاده زارعین منطقه انجام شد. با توجه به شرایط آب و هوایی، بهترین زمان برای کشت پاییزه گندم در استان خوزستان، اواسط آبان تا اواسط آذرماه می‌باشد. در این بازه زمانی، دما به میزان کافی کاهش می‌یابد و بارندگی‌های پاییزی نیز به مرطوب شدن خاک و جوانه‌زدن بذرها کمک می‌کند. از اینرو در تاریخ ۲۰ آذرماه ۱۴۰۲ کشت گندم به صورت مستقیم انجام شد. به دلیل بارندگی‌های منطقه در این زمان، زمین حالت گل‌آلود داشت و رطوبت خاک سبب جوانه‌زنی بذرها شد. پس از آن، بارندگی‌های دیگری نیز رخ داد و آبیاری سطحی از تاریخ ۳ اسفندماه تا ۱۰ اسفندماه به‌عنوان مکمل انجام شد. در طول فصل کشت، کودهای پایه شامل فسفات آمونیوم، اوره و پتاس به خاک اضافه گردید. اوج دوره آبیاری و سبزی‌نگی گندم در منطقه مورد مطالعه، بهمن و اسفندماه است. از ابتدای فروردین ماه، گیاه به تدریج وارد مرحله زردی و خشک شدن می‌شود و محصول تا اوایل اردیبهشت ماه آماده برداشت است. تاریخ برداشت محصول در این مطالعه ۱۵ اردیبهشت بود. علف‌کش توفوردی نیز در طول فصل کشت استفاده شد. شایان ذکر است که در صورت عدم انجام آبیاری، زهکش‌ها خشک هستند و سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از زهکش‌های فرعی قرار دارد.

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری از آب زهکش‌ها به صورت ماهانه از دی تا اسفندماه سال ۱۴۰۲ از سه جمع‌کننده با فواصل ۹۵۰ (جمع‌کننده شماره ۱)، ۱۴۱۰ (جمع‌کننده شماره ۲) و ۱۷۷۰ (جمع‌کننده شماره ۳) متری از رودخانه کارون انجام شد. نمونه‌برداری با سه تکرار برای هر جمع‌کننده و در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور مکان (در سه سطح) و زمان (در سه سطح) انجام شد. برای نمونه‌برداری آب، از ظروف یک لیتری استفاده شد که ابتدا اسیدشویی شده و سپس با آب مقطر شسته شدند. در هر نقطه نمونه‌برداری، هر بطری ابتدا با نمونه آب مورد نظر پر و خالی شده و سپس نمونه نهایی از همان آب پر شد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه‌برداری از جمع‌کننده‌های اصلی زهکش‌ها انجام شده است و هر جمع‌کننده نمایانگر ترکیبی از زهاب جمع‌آوری شده از چندین زهکش فرعی و مزارع تحت پوشش می‌باشد. نمونه‌های آب برای انجام آنالیزهای فیزیکوشیمیایی به آزمایشگاه شیمی اداره آب و فاضلاب استان خوزستان منتقل شدند و بر اساس روش‌های استاندارد (APHA، ۱۹۹۹)، پارامترهای مواد جامد محلول (TDS)، قلیائیت (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، کلراید (Cl^-)، فسفات (PO_4^{2-})، نیترات (NO_3^-)، کربنات (CO_3^{2-}) و بی‌کربنات (HCO_3^-) سنجش شدند.



شکل ۲. نمونه‌برداری از جمع‌کننده‌های زهکش در منطقه مورد مطالعه

ارزیابی کیفیت زهاب کشاورزی

کیفیت آب آبیاری از طریق مجموعه‌ای از شاخص‌های هیدروشیمیایی شامل درصد سدیم (SSP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، کربنات سدیم باقیمانده (RSC)، شاخص نفوذپذیری (PI)، نسبت کلی (KR)، نسبت جذب منیزیم (MAR) و سختی کل (TH) مورد

ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها هر یک بینش‌های خاصی درباره جنبه‌های مختلف کیفیت آب ارائه می‌دهند و به‌صورت جمعی در تحلیل خطرات احتمالی مرتبط با سدیم، منیزیم و سختی کلی آب نقش دارند. به عنوان مثال، SAR و SSP میزان سدیم موجود در آب را بررسی کرده و اثرات آن بر ساختار خاک و نفوذپذیری را مشخص می‌کنند، در حالی که شاخص‌هایی مانند RSC و PI به ارزیابی پتانسیل قلیایی شدن و تأثیر کاتیون‌های اصلی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌پردازند. همچنین، نسبت جذب منیزیم (MAR) در شناسایی خطرات ناشی از غلظت بالای منیزیم مؤثر است و سختی کل (TH) می‌تواند بر سلامت گیاهان و عملکرد سیستم‌های آبیاری اثرگذار باشد (Rajashekara et al., 2023). این شاخص‌ها با استفاده از فرمول‌های استاندارد و بر اساس داده‌های شیمیایی حاصل از نمونه‌های زهاب اندازه‌گیری شده محاسبه شدند. جدول ۱ فرمول‌های دقیق مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های کیفیت آب مناسب برای آبیاری را نشان می‌دهد.

جدول ۱. فرمول شاخص‌های کیفیت آب آبیاری

پارامتر	فرمول
درصد سدیم (SSP)	$SSP = (Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) \times 100$
نسبت جذب سدیم (SAR)	$SAR = Na^+ / \sqrt{((Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2)}$
کربنات سدیم باقیمانده (RSC)	$RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
شاخص نفوذپذیری (PI)	$PI = (Na^+ + \sqrt{(HCO_3^-)}) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+) \times 100$
نسبت کلی (KR)	$KR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
نسبت جذب منیزیم (MAR)	$MAR = Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
سختی کل (TH)	$TH = (2.5 \times Ca^{2+}) + (4.1 \times Mg^{2+})$

طبقه‌بندی‌های کیفیت آب آبیاری

برای ارزیابی کیفیت آب زهکش‌های کشاورزی جهت استفاده مجدد در آبیاری، از سه نظام طبقه‌بندی رایج شامل سیستم نژباور^۱، طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری ایالات متحده^۲ (USSL) و دستورالعمل‌های فائو^۳ (FAO) بهره‌گرفته شد. طبقه‌بندی نژباور، که بر اساس شرایط اقلیمی و خاکی منطقه و ویوودینا در صربستان توسعه یافته است، کل جامدات محلول (TDS) و نسبت یون‌های کلسیم و منیزیم به سدیم را به عنوان شاخص‌های اصلی در نظر می‌گیرد و به طور خاص برای مناطق با اقلیم گرم و خاک‌های حساس به شوری کاربرد دارد (جدول ۲) (Vranešević et al., 2024). طبقه‌بندی USSL، که به‌طور گسترده در مطالعات جهانی کاربرد دارد، بر مبنای دو پارامتر هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) عمل می‌کند و با تلفیق این دو شاخص، خطر شوری و سدیمی شدن خاک را ارزیابی می‌نماید (Richards et al., 1954). دستورالعمل‌های فائو نیز با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی مانند شوری، میزان سدیم، بیکربنات، سمیت عناصر و تأثیر بر نفوذپذیری خاک، به عنوان مرجعی جامع در مدیریت منابع آب آبیاری شناخته می‌شوند (Ayers & Westcot, 1985). استفاده همزمان از این سه طبقه‌بندی، امکان مقایسه و تحلیل چندوجهی کیفیت آب را فراهم می‌آورد و به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در خصوص امکان یا عدم امکان استفاده مجدد از زهاب کمک می‌کند.

جدول ۲. طبقه‌بندی نژباور برای اهداف آبیاری

غلظت یون‌ها (meq/L)	مقدار مواد جامد محلول (mg/L)	کلاس	نوع آب
$(Ca + Mg + K) / Na > 3$	کمتر از ۷۰۰	I _a	آب مناسب
$(Ca + Mg) / Na > 3$	کمتر از ۷۰۰	I _b	
$(Ca + Mg) / Na > 1$	کمتر از ۷۰۰	II	آب خوب
$(Ca + Mg) / Na > 3$	بین ۷۰۰ تا ۳۰۰۰	III _a	آب نیازمند آزمایش

¹ Neugebauer

² United States Salinity Laboratory

³ Food and Agriculture Organization

III _b	بین ۷۰۰ تا ۳۰۰۰	(Ca + Mg) / Na > ۱
IV _a	کمتر از ۷۰۰	(Ca + Mg) / Na < ۱
IV _b	بین ۷۰۰ تا ۳۰۰۰	(Ca + Mg) / Na < ۱
IV _{c,d,e}	بیشتر از ۳۰۰۰	بدون توجه به غلظت یون‌ها

دو طبقه بندی دیگری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته و به طور گسترده مورد قبول هستند، طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری ایالات متحده (USSL) و طبقه بندی فائو (FAO) می‌باشند. طبقه بندی USSL به بررسی رابطه بین شوری و SAR می پردازد (جدول ۳)، در حالی که فائو تجزیه و تحلیل های دقیقی را ارائه می دهد و شوری، نفوذپذیری و سمیت یون‌های خاص را در نظر می‌گیرد. این طبقه‌بندی‌ها به دسته‌بندی آب برای آبیاری بر اساس خطرات بالقوه شور شدن و قلیایی شدن کمک می‌کنند (Richards et al., 1954).

جدول ۳. طبقه بندی USSL برای اهداف آبیاری

کلاس CS	S1 (سدیم کم) (SAR:0-10)	S2 (سدیم متوسط) (SAR:10-18)	S3 (سدیم زیاد) (SAR:18-26)	S4 (سدیم خیلی زیاد) (SAR>26)
C1 (شوری کم) EC(μS/cm)<250&TDS(ppm)<150	آب مناسب/خوب	متوسط تا خوب	متوسط	متوسط تا ضعیف
C2 (شوری متوسط) EC(μS/cm):250-750&TDS(ppm):150-500	متوسط تا خوب	متوسط	متوسط تا ضعیف	ضعیف
C3 (شوری زیاد) EC(μS/cm):750-2250&TDS(ppm):500-1500	متوسط	متوسط تا ضعیف	ضعیف	خیلی ضعیف
C4 (شوری خیلی زیاد) EC(μS/cm)>2250&TDS(ppm)>1500	متوسط تا ضعیف	ضعیف	خیلی ضعیف	آب نامناسب

اساس این طبقه بندی‌ها، تجزیه و تحلیل مشکلات بالقوه شور شدن و قلیایی شدن، یعنی تجزیه و تحلیل غلظت کل نمک در آب و سدیم، یا نسبت آن به کاتیون های دو ظرفیتی (Ca^{2+} و Mg^{2+}) است. طبقه‌بندی فائو تجزیه و تحلیل های دقیق تری را ارائه می دهد (جدول ۴). طبقه‌بندی فائو به شوری که بر دسترسی آب برای گیاه تاثیر می‌گذارد، نفوذپذیری که بر سرعت نفوذ آب به خاک تاثیر می‌گذارد، و سمیت یون‌های خاص مانند Na^+ و Cl^- می‌پردازد. این طبقه بندی یک مزیت اضافی دارد زیرا فهرستی از گیاهانی را نیز شامل می‌شود که حساس، نیمه حساس یا مقاوم به وجود یون‌های خاص ذکر شده هستند (Ayers & Westcot, 1985). در منطقه مورد مطالعه، برخی از گیاهان کشت شده عبارتند از: لوبیا و ذرت به عنوان گیاهان حساس؛ گوجه فرنگی، هویج و گندم به عنوان گیاهان نیمه حساس؛ چغندر قند و جو به عنوان گیاهان مقاوم.

جدول ۴. طبقه‌بندی فائو برای اهداف آبیاری

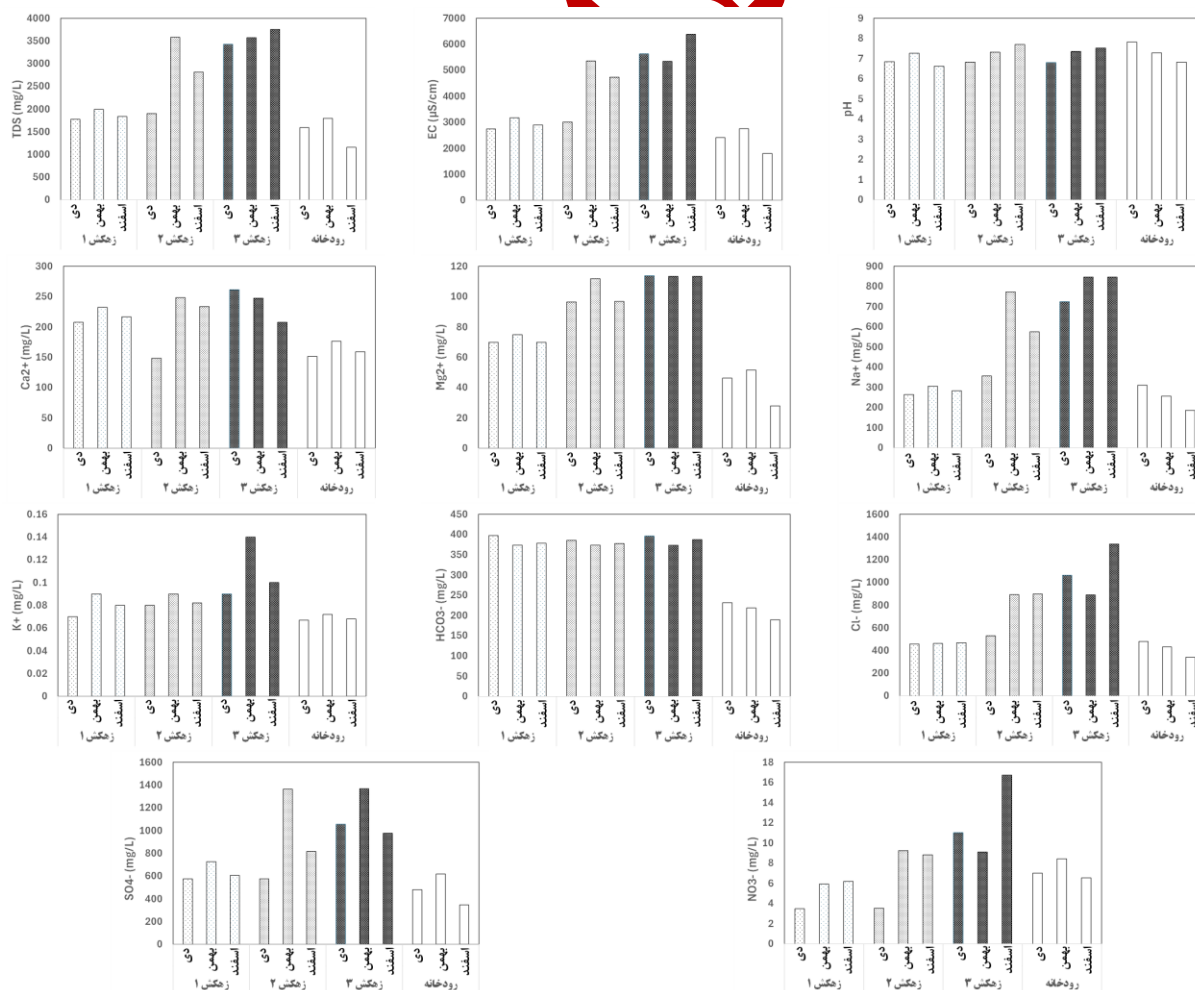
نوع تاثیر	پارامتر	بدون تاثیر	تأثیر کم تا متوسط	میزان تاثیر	تأثیر شدید
تأثیر بر رشد محصول	شوری				
	هدایت الکتریکی (ECw)، (دسی‌زیمنس بر متر)	<۰/۷	۰/۷ - ۳		>۳
	کل مواد جامد محلول (TDS)، (میلی گرم بر لیتر)	<۴۵۰	۴۵۰ - ۲۰۰۰		>۲۰۰۰
	سمیت یون‌های خاص سدیم (Na^+) در آبیاری	SAR<۳	۳< SAR < ۹		SAR>۹
	کلراید (Cl^-) در آبیاری (میلی گرم بر لیتر)	<۱۱۳	۱۱۳-۲۸۲		>۲۸۲
تأثیر بر نرخ نفوذ					
	SAR				سدیمی شدن - اثر یون های سدیم که توسط SAR در مقابل ECw بیان می شود.

< ۰/۲	۰/۲ - ۰/۳	> ۰/۷	۰ تا ۳
< ۰/۳	۱۳/۲ - ۰/۳	> ۱/۲	۶ تا ۳
< ۰/۵	۱/۹ - ۰/۵	> ۱/۹	۱۲ تا ۶
< ۱/۳	۲/۹ - ۱/۳	> ۲/۹	۲۰ تا ۱۲
< ۱/۹	۵ - ۱/۹	> ۵	۴۰ تا ۲۰

یافته‌های پژوهش

ارزیابی کیفیت زهاب کشاورزی بر اساس ویژگی‌های هیدروشیمیایی

پارامترهای شیمیایی آب شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH) و غلظت یون‌های اصلی (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کلراید، سولفات و نیتрат) برای زهکش‌های مختلف و رودخانه در بازه زمانی دی تا اسفند ماه در شکل ۳ ارائه شده است. مقایسه میانگین پارامترهای هیدروشیمیایی بین زهکش‌های مختلف و رودخانه نشان می‌دهد که کیفیت آب زهکش ۱ در ماه‌های دی، بهمن و اسفند، هم از نظر میزان شوری (TDS و EC) و هم از نظر غلظت یون‌های اصلی، شرایط بهتری نسبت به زهکش‌های ۲ و ۳ دارد. بررسی دقیق داده‌ها نشان می‌دهد که TDS و EC زهکش ۱ (به ترتیب ۱۹۹۲ میلی‌گرم بر لیتر و ۲۹۳۶ میکروزیمنس بر سانتیمتر) در بازه قابل قبول برای آبیاری گیاهان مقاوم به شوری متوسط قرار دارد (Hejase et al., 2021). این در حالی است که مقادیر زهکش‌های ۲ و ۳ به دلیل شوری بالا، پتانسیل شور شدن تدریجی خاک را دارند که می‌تواند به افت ۳۰ تا ۵۰ درصدی عملکرد گیاهان حساس به شوری منجر شود (Wang et al., 2023).



شکل ۳. پارامترهای شیمیایی آب برای جمع‌کننده‌های مختلف و رودخانه

مقادیر TDS و EC زهکش ۱ شباهت بیشتری به مقادیر رودخانه دارد، به طوری که در دی‌ماه، TDS رودخانه برابر ۱۵۹۰ میلی‌گرم بر لیتر و در زهکش ۱ برابر ۱۷۷۶ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شده است. به طور کلی داده‌ها نشان می‌دهد زهکش ۱ از نظر پارامترهای کیفی مورد بررسی (شوری، نسبت یون‌ها، میزان نیترات) شباهت قابل توجهی به آب رودخانه دارد و نسبت به زهکش‌های ۲ و ۳ کیفیت مناسب‌تری دارد. مقادیر TDS در زهکش ۱ به طور معناداری پایین‌تر از سایر زهکش‌ها بوده و نزدیک به مقادیر TDS رودخانه ثبت شده است (جدول ۵). این یافته‌ها مطابق با مطالعات قبلی نظیر مطالعه انجام شده توسط Niswonger et al. (2017) است که نشان داده‌اند میزان TDS پایین‌تر در زهاب‌های کشاورزی می‌تواند نشانگر پتانسیل بیشتر برای استفاده مجدد در آبیاری باشد. هدایت الکتریکی (EC) نیز الگوی مشابهی دارد؛ EC در زهکش ۱ میانگین ۲۹۳۶ میکروزیمنس بر سانتیمتر بوده که نسبت به زهکش‌های ۲ (۴۳۳۳ میکروزیمنس بر سانتیمتر) و ۳ (۵۴۶۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر) به طور قابل توجهی کمتر است. این سطح پایین‌تر از شوری، استفاده مجدد از زهاب زهکش ۱ را برای آبیاری محصولات زراعی مقاوم به شوری بدون نیاز به مدیریت سنگین آب یا اصلاح خاک ممکن می‌سازد (Ayers & Westcot, 1985). مقادیر pH در تمامی منابع آب مورد بررسی در دامنه قابل قبول برای آبیاری (۵/۴ تا ۸/۵) قرار دارد (Ayers & Westcot, 1985). به طور خاص، pH زهکش ۱ در محدوده ۶/۶۲ تا ۷/۲۶ ثبت شده است که نشان‌دهنده شرایط نسبتاً خنثی آب است.

غلظت سدیم (Na^+) در زهکش‌های ۲ و ۳ بسیار بالاتر از زهکش ۱ است؛ به طوری که در بهمن‌ماه غلظت Na^+ در زهکش ۲ و ۳ به ترتیب ۷۷۲/۸ و ۸۴۶/۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده است در حالی که در زهکش ۱ برابر ۳۰۵/۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. این سطوح بالای سدیم می‌تواند موجب افزایش نسبت جذب سدیم (SAR) شده و منجر به کاهش نفوذپذیری خاک گردد (Rengasamy, 2010). میزان کلراید (Cl^-) نیز در زهکش‌های ۲ و ۳ بالاتر است و نشان‌دهنده افزایش خطر تجمع نمک در خاک در اثر استفاده از این آب‌ها برای آبیاری می‌باشد (Qadir et al., 2000). از منظر نیترات (NO_3^-)، زهکش‌های ۲ و ۳ غلظت بالاتری نسبت به زهکش ۱ دارند. بیشترین مقدار نیترات در اسفندماه برای زهکش ۳ (۱۶/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده که می‌تواند خطر آلودگی نیتراتی خاک و آب زیرزمینی را در پی داشته باشد (Spalding and Exner, 1993). غلظت سولفات (SO_4^{2-}) نیز در زهکش‌های ۲ و ۳ بسیار بالاتر از زهکش ۱ است. به عنوان نمونه در بهمن‌ماه، غلظت سولفات در زهکش ۲ برابر با ۱۳۶۴/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر بوده، در حالی که در زهکش ۱ معادل ۷۲۶/۸۲ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شده است. مقادیر بالای سولفات می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی مانند سمیت برای گیاهان حساس شود (Tanji & Kielen, 2002). نتایج مشابهی توسط Li et al., (2024) گزارش شده است که نشان می‌دهد غلظت‌های بالای نیترات در زهاب کشاورزی عامل اصلی آلودگی نیتراتی آب‌های زیرزمینی در مناطق کشاورزی چین بوده است.

جدول ۵. تحلیل آماری پارامترهای کیفیت آب بر اساس آزمون ANOVA و آزمون تعقیبی Tukey

پارامتر	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری (Sig.)
TDS	۲۵۹۸۴۳۵/۳۰۸	۱۲/۲۲۷	**۰/۰۰۲
EC	۷۱۷۴۶۸۵/۴۱۷	۱۴/۰۲۷	**۰/۰۰۱
pH	۰/۱	۰/۵۸۸	۰/۶۴
Ca^{2+}	۳۱۵۹/۳۶۱	۳/۱۵۹	۰/۰۸۶
Mg^{2+}	۳۰۸۷/۸۹۳	۵۱/۷۶۲	**۰/۰۰۰
Na^+	۲۰۴۴۰۲/۴۷۳	۱۵/۵۳۶	**۰/۰۰۱
K^+	۰/۰۰۱	۴/۳۳۴	*۰/۰۴۳
HCO_3^-	۲۱۵۵۰/۳۲۷	۱۰۸/۷۷۴	**۰/۰۰۰
Cl^-	۲۹۸۵۲۱/۱۴۷	۱۱/۹۰۰	**۰/۰۰۳
SO_4^{2-}	۲۵۳۳۰۹/۷۰۷	۴/۳۸۹	*۰/۰۴۲
NO_3^-	۲۷/۲۲۳	۳/۷۵۵	۰/۰۶۰

** تفاوت بسیار معنی‌دار؛ * تفاوت معنی‌دار

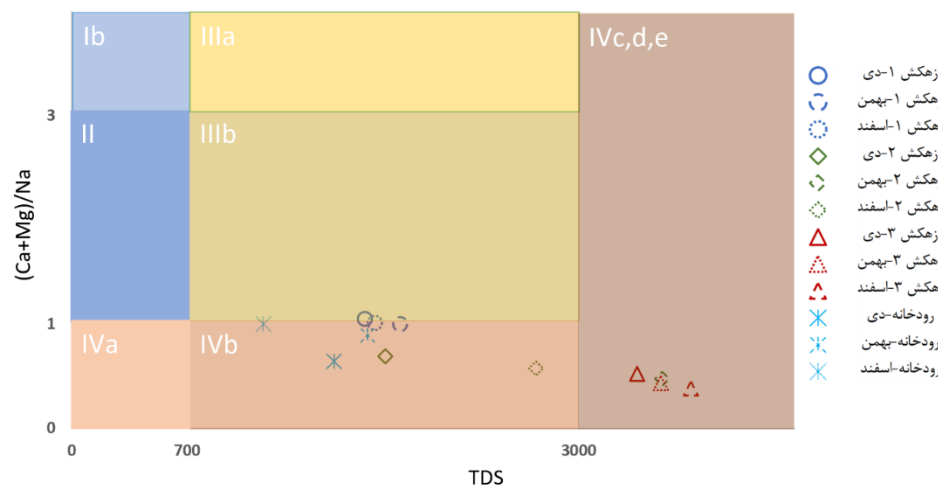
ارزیابی کیفیت زهاب کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی کیفیت آب آبیاری

مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از سنجش پارامترهای کیفی آب در نمونه‌های زهکش با شاخص نژباور نشان می‌دهد که آب زهکش‌های ۲ و ۳ در طبقه IVd و آب زهکش ۱ در طبقه IIb قرار دارند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان کل جامدات محلول (TDS) در اکثر نمونه‌های زهکش‌های ۲ و ۳ به طور قابل توجهی بالاتر از ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر بوده است. این میزان بالا براساس طبقه‌بندی نژباور نشان‌دهنده کیفیت پایین آب برای مصارف آبیاری است. نسبت $(Ca+Mg)/(Na+K)$ در این نمونه‌ها عمدتاً کمتر از ۱ بود که این خود بیانگر غالب بودن سدیم و پتاسیم در ترکیب یونی آب است و تأثیر منفی آن بر ساختمان خاک و رشد گیاهان را تقویت می‌کند (Ayers & Westcot, 1985). چنین شرایطی باعث کاهش نفوذپذیری خاک، تجمع نمک‌ها در منطقه ریشه و در نهایت کاهش عملکرد محصولات کشاورزی خواهد شد.

در مقابل، نمونه‌های مربوط به زهکش ۱ و آب رودخانه در ماه‌های مختلف دی، بهمن و اسفند دارای مقادیر پایین‌تر TDS و مقدار نسبتاً بالاتری از $(Ca+Mg)/(Na+K)$ بودند. اگرچه مقدار TDS در این نمونه‌ها هنوز بالاتر از حد مطلوب برای آب‌های مناسب برای آبیاری بود ($>700 \text{ mg/L}$)، اما نسبت $(Ca+Mg)/(Na+K)$ در مواردی به بیش از ۰/۸ رسید. بر اساس استانداردهای ارائه شده توسط Rhoades et al. (1992)، این وضعیت نشان‌دهنده آب‌هایی با کیفیت متوسط بوده که در صورت مدیریت مناسب، مانند شستشوی دوره‌ای خاک یا انتخاب گونه‌های مقاوم به شوری، می‌توانند در آبیاری مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین زهکش ۱ در مقایسه با سایر زهکش‌ها پتانسیل بهتری برای استفاده مجدد در کشاورزی دارد.

به طور کلی یافته‌های این مطالعه مشابه با نتایج سایر تحقیقات است. Grattan (2002) نشان داد که آب‌های با نسبت پایین $(Ca+Mg)/(Na+K)$ مستعد ایجاد مشکلات سدیمی در خاک هستند که برای زراعت مضر است. علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه اهمیت توجه به هر دو پارامتر TDS و نسبت کاتیونی در تعیین کیفیت آب آبیاری را تأیید می‌کند، زیرا تنها توجه به شوری یا نسبت کاتیونی به تنهایی نمی‌تواند ارزیابی دقیقی از تأثیرات آب بر خاک و گیاه ارائه دهد. لذا مدیریت جامع منابع آب کشاورزی نیازمند پایش همزمان این شاخص‌ها و استفاده از تکنیک‌های اصلاحی مناسب خواهد بود.

علاوه بر این، تحقیقی توسط Yan et al. (2023) نشان داد که کاهش نسبت $(Ca+Mg)/(Na+K)$ به زیر ۰/۵ می‌تواند منجر به افزایش شاخص نفوذناپذیری خاک شود و کارایی استفاده از آب در مزارع را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین یافته‌های Liu et al. (2023) بیانگر آن است که تغییرات شدید در TDS و نسبت کاتیونی طی فصل‌های مختلف سال، کیفیت آب زهکشی شده را تحت تأثیر قرار داده و مدیریت بهینه زهکش‌ها می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری آبیاری ایفا کند. بر این اساس، نتایج این پژوهش نیز مؤید این است که کنترل دقیق این دو شاخص برای بهبود بهره‌وری آب و سلامت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک حیاتی است.



شکل ۴. کلاس نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی نژباور

نتایج پایش ماهانه کیفیت آب زهکش‌ها و رودخانه نشان داد که شوری و میزان سدیمی شدن به‌طور قابل توجهی در اکثر نمونه‌ها بالا است (جدول ۶). مطابق با جدول طبقه‌بندی USSSL، زهکش‌های شماره ۲ و ۳ در تمامی ماه‌های دی، بهمن و اسفند در طبقه C4 (شوری خیلی زیاد) قرار گرفتند. این زهکش‌ها دارای مقادیر هدایت الکتریکی بین ۳۱۰۰ تا ۳۶۰۰ میکروموس بر سانتیمتر بودند که نشانگر ریسک بسیار بالا برای استفاده مستقیم در آبیاری محصولات کشاورزی حساس است. در مقابل، زهکش ۱ در هر سه ماه با EC بین ۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ میکروموس در طبقه C3 (شوری زیاد) بر اساس طبقه‌بندی USSSL قرار داشت و کیفیت نسبی بهتری را نسبت به سایر زهکش‌ها نشان داد. رودخانه نیز طی ماه‌های دی و بهمن در طبقه C3 قرار داشت اما در اسفند به علت افزایش بارندگی و کاهش املاح، به طبقه C2 (شوری متوسط) منتقل شد. شوری بالا موجب کاهش پتانسیل آب خاک (به دلیل افزایش پتانسیل اسمزی منفی) شده و در نتیجه توانایی گیاه برای جذب آب از خاک را محدود می‌کند (Rhodes et al., 1996).

از نظر سدیمی شدن، نتایج نشان داد که زهکش‌های ۲ و ۳ در تمامی ماه‌ها در طبقه S4 (سدیم خیلی زیاد) قرار داشتند که به معنی پتانسیل بالایی تخریب ساختار خاک در اثر پراکندگی ذرات ریز و کاهش نفوذپذیری آب در خاک است. این یافته‌ها منطبق بر الگوهای مطرح شده توسط Ayers & Westcot (1985) می‌باشد که بیان داشته‌اند سطوح بالای سدیم محلول، حتی در حضور شوری بالا، می‌تواند منجر به سخت‌شدگی خاک، کاهش تهویه و محدودیت‌های شدید در توسعه ریشه شود. زهکش ۱ با غلظت‌های سدیم در محدوده ۲۵۰-۲۷۰ میلی گرم بر لیتر در طبقه S2 (سدیم متوسط) طبقه‌بندی شد که نشان‌دهنده خطر متوسط سدیمی شدن بوده و در شرایط مدیریت شده (مانند افزودن گچ کشاورزی یا کاربرد تکنیک‌های آبشویی) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. رودخانه نیز طی ماه‌های دی و بهمن در طبقه S3 (سدیم زیاد) قرار داشت و در اسفند به طبقه S2 منتقل شد.

ترکیب تحلیل شوری و سدیمی شدن نشان می‌دهد که زهکش‌های ۲ و ۳، به دلیل همزمانی شوری خیلی زیاد (C4) و سدیمی شدن خیلی زیاد (S4)، برای استفاده مستقیم در کشاورزی بدون عملیات تصفیه و اصلاحی به شدت نامناسب هستند. این آب‌ها تنها پس از انجام فرآیندهایی نظیر آبشویی سنگین، اضافه کردن مقادیر زیادی گچ زراعی، بهبود زهکشی خاک و انتخاب گیاهان فوق‌العاده مقاوم به شوری و سدیم، قابل استفاده محدود می‌باشند. از سوی دیگر، زهکش ۱ و آب رودخانه در اسفند ماه با توجه به قرارگیری در طبقات C2-C3 و S2، پتانسیل بالاتری برای استفاده در کشت محصولات نیمه‌مقاوم مانند گندم، جو و ذرت را دارا هستند. این نتایج مطابق مطالعات Kijne et al. (2003) اهمیت استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمد مانند آبیاری قطره‌ای در مناطق با کیفیت آب پایین را به‌خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۶. طبقه‌بندی کیفی نمونه‌های زهکش‌ها و رودخانه بر مبنای استاندارد USSSL

نمونه	طبقه شوری	طبقه سدیمی شدن	نتیجه کلی
زهکش ۱	دی EC(μS/cm)=2400&TDS(ppm)=1536 (C4)	(S3) SAR=22.45	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S3)
بهمن	EC(μS/cm)=2100&TDS(ppm)=1344 (C4)	(S3) SAR=24.69	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S3)
اسفند	EC(μS/cm)=2000&TDS(ppm)=1280 (C4)	(S3) SAR=23.64	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S3)
زهکش ۲	دی EC(μS/cm)=3200&TDS(ppm)=2048 (C4)	(S4) SAR=32.21	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
بهمن	EC(μS/cm)=3400&TDS(ppm)=2176 (C4)	(S4) SAR=57.59	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
اسفند	EC(μS/cm)=3100&TDS(ppm)=1984 (C4)	(S4) SAR=44.73	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
زهکش ۳	دی EC(μS/cm)=3300&TDS(ppm)=2112 (C4)	(S4) SAR=52.91	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
بهمن	EC(μS/cm)=3600&TDS(ppm)=2304 (C4)	(S4) SAR=63.02	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
اسفند	EC(μS/cm)=3200&TDS(ppm)=2048 (C4)	(S4) SAR=66.81	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)
رودخانه	دی EC(μS/cm)=2700&TDS(ppm)=1728 (C4)	(S4) SAR=31.22	آب نامناسب برای آبیاری (C4, S4)

آب نامناسب برای آبیاری (C4, S3)	(S3) SAR=19.26	EC(μ S/cm)=2500&TDS(ppm)=1600 (C4)	بهمن
آب مناسب برای آبیاری با مدیریت مناسب	(S2) SAR=24.69	EC(μ S/cm)=1800&TDS(ppm)=1152 (C3)	اسفند

بر اساس طبقه‌بندی سازمان فائو (FAO) که به ارزیابی کیفیت آب برای استفاده در کشاورزی پرداخته، آب‌ها براساس شاخص‌هایی چون شوری، سدیمی شدن و سمیت یون‌های خاص نظیر Na^+ و Cl^- طبقه‌بندی می‌شوند. در تحلیل داده‌های مطالعه حاضر، آب‌های موجود در زهکش‌های مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در شوری و میزان سدیمی شدن هستند ($P < 0.05$). برای مثال، در آب خروجی از زهکش ۱، شوری (با استفاده از EC و TDS) در سطحی پایین‌تر قرار دارد و زهاب خروجی در کلاس I (آب بدون مشکل از نظر شوری) قرار می‌گیرد. این آب‌ها می‌توانند به‌طور معمول بدون نیاز به اقدامات ویژه برای آبیاری استفاده شوند. در مقابل، آب خروجی از زهکش ۲ و زهکش ۳ که EC بالاتری دارند، به‌ویژه در ماه‌های اسفند، شوری بالاتر و غلظت بالاتری از Na^+ و Cl^- را نشان می‌دهند. این آب‌ها در کلاس II و III از نظر شوری قرار دارند و برای استفاده در کشاورزی نیاز به تدابیر خاصی دارند. این نتایج با نتایج مطالعه Mateo-Sagasta and Burke (2011) همخوانی دارد که تأکید می‌کند آب‌هایی با شوری کم تا متوسط می‌توانند به‌طور مؤثر در آبیاری کشاورزی استفاده شوند بدون اینکه نیاز به اقدامات خاصی برای کاهش شوری باشد. در مورد سدیمی شدن و نفوذ آب، طبق طبقه‌بندی FAO، آب‌هایی که دارای Na^+ زیاد و SAR بالا هستند، ممکن است برای آبیاری در خاک‌های با زهکشی ضعیف مشکلاتی در نفوذ آب ایجاد کنند. زهکش ۲ و زهکش ۳ که دارای غلظت بالاتری از Na^+ هستند، در معرض خطر سدیمی شدن خاک قرار دارند. این امر می‌تواند به کاهش نفوذ آب و در نتیجه به کاهش بهره‌وری گیاهان منجر شود. آب این زهکش‌ها به دلیل سدیمی شدن بالا و شوری زیاد باید با تدابیر خاصی مانند استفاده از آب‌های با SAR پایین‌تر یا به‌کارگیری سیستم‌های زهکشی مناسب، مدیریت شوند. در حالی که زهکش ۱ که دارای Na^+ و SAR کمتری است، به‌طور کلی مشکلی از نظر نفوذ آب ندارد و برای آبیاری مناسب‌تر است.

در نهایت، سمیت ناشی از یون‌های Na^+ و Cl^- نیز یکی دیگر از فاکتورهای مهم در ارزیابی کیفیت آب است. در این مورد، در منطقه مورد مطالعه غلظت Na^+ و Cl^- در زهکش ۲ و زهکش ۳ بالا است (به‌ویژه در ماه‌های اسفند)، که می‌تواند برای گیاهان حساس سمی باشد. در مقابل، زهکش ۱ که غلظت Na^+ و Cl^- آن پایین‌تر است، برای استفاده در آبیاری مناسب‌تر است. با توجه به طبقه‌بندی فائو (Ayers & Westcot, 1985) و نتایج حاصل از مطالعه حاضر، می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت استفاده مجدد زهاب اراضی کشاورزی شهرستان باوی برای آبیاری محصولات منتخب ارائه داد. آب خروجی از زهکش ۱، برای آبیاری کلیه گیاهان منطقه اعم از حساس (مانند لوبیا و ذرت)، نیمه حساس (گندم، گوجه‌فرنگی و هویج) و مقاوم (جو و چغندرقد) مناسب ارزیابی می‌شود. با این حال، حتی در این شرایط، توصیه می‌شود پایش‌های دوره‌ای کیفیت آب و خاک به منظور جلوگیری از تجمع تدریجی املاح انجام گیرد. در مقابل، آب خروجی از زهکش‌های ۲ و ۳ به دلیل داشتن مقادیر بالاتر شوری و سدیم، صرفاً برای آبیاری گیاهان مقاوم به شوری و سدیم مانند جو و چغندرقد قابل توصیه است. استفاده از این زهاب برای گیاهان حساس و نیمه حساس بدون به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی (نظیر شستشوی خاک، تلفیق با آب شیرین، یا استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی مانند گچ کشاورزی برای کاهش اثرات سدیم) می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصول، افت جوانه‌زنی و اختلال در رشد گیاهان شود. به‌ویژه حبوبات و ذرت، که نسبت به شوری و سمیت یون‌های خاص (Na^+ و Cl^-) حساس‌تر هستند، بیشترین آسیب را متحمل خواهند شد.

ارزیابی شاخص‌های کیفی آب شامل SSP، SAR، RSC، PI، KR، MAR و TH در زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و رودخانه طی ماه‌های دی، بهمن و اسفند نشان داد که کیفیت آب زهکش‌ها به‌طور کلی در وضعیت مناسبی برای استفاده مجدد در آبیاری قرار ندارند (جدول ۷). مقادیر SSP در کلیه زهکش‌ها و در تمام ماه‌ها بین $48/80\%$ تا $72/51\%$ ثبت شد که از حد مطلوب 40% بالاتر بود. مقادیر بالای SSP باعث کاهش نفوذپذیری خاک شده و مشکلات فیزیکی در رشد گیاهان ایجاد می‌کند (Todd & Mays, 2004).

جدول ۷. شاخص‌های کیفی آب شامل SSP, SAR, RSC, PI, KR و MAR و TH

پارامتر	زهکش ۱			زهکش ۲			زهکش ۳			رودخانه		
	دی	بهمن	اسفند	دی	بهمن	اسفند	دی	بهمن	اسفند	دی	بهمن	اسفند
SSP	۴۸/۸۰	۴۹/۹۱	۴۹/۷۰	۵۹/۲۸	۶۸/۲۲	۶۳/۵۰	۶۵/۸۹	۷۰/۱۲	۷۲/۵۱	۶۱/۰۹	۵۳/۰۱	۴۹/۹۰
SAR	۲۲/۴۵	۲۴/۶۹	۲۳/۶۴	۳۲/۲۱	۵۷/۵۹	۴۴/۷۳	۵۲/۹۱	۶۳/۰۲	۶۶/۸۱	۳۱/۲۲	۲۴/۰۹	۱۹/۲۶
RSC	۱/۹۶	۱/۰۹	۱/۵۱	۲/۳۱	۰/۲۲	۰/۷۷	۰/۳۴	۰/۲۱	۱/۰۹	۰/۵۵	-۰/۶۱	۰/۰۳
PI	۵۲/۴۷	۵۲/۰۵	۵۳/۱۱	۶۲/۵۴	۶۹/۹۲	۶۵/۶۵	۶۷/۷۰	۷۱/۷۱	۷۴/۱۹	۶۴/۰۸	۵۶/۰۵	۵۳/۵۸
KR	۰/۹۵	۱	۰/۹۹	۱/۴۶	۲/۱۵	۱/۷۴	۱/۹۳	۲/۳۵	۲/۶۴	۱/۵۷	۱/۱۳	۱
MAR	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۵
TH	۸۰۰/۴	۸۸۸	۸۱۶/۲۷	۷۶۳/۵۱	۱۰۸۰	۹۱۳/۴۵	۱۱۱۳/۳۵	۱۰۷۹	۱۱۴۶/۶۷	۵۶۴/۵۵	۶۴۸/۵۲	۵۰۸

شاخص SAR در زهکش‌ها مقادیر بسیار بالایی را نشان داد. براساس استانداردهای FAO، SAR بالای ۹ خطر تجمع سدیم در خاک را افزایش داده و نیاز به تمهیداتی مانند افزودن مواد اصلاح‌کننده خاک را ضروری می‌کند (Ayers & Westcot, 1985). مقادیر RSC در زهکش‌ها بسیار متغیر و عمدتاً بالاتر از محدوده مجاز (۱/۲۵ میلی اک‌ی‌والان بر لیتر) بود؛ به‌ویژه در زهکش ۲ در دی‌ماه که مقدار ۲/۳۱ میلی اک‌ی‌والان بر لیتر به دست آمد. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد، این مقدار در محدوده کلاس دوم (RSC) بین ۱/۲۵ تا ۲/۵ میلی اک‌ی‌والان بر لیتر قرار می‌گیرد که به عنوان کیفیت مشکوک یا دومین کلاس کیفی تعریف می‌شود. آب‌هایی با RSC در این بازه، ممکن است در بلندمدت باعث بروز مشکلاتی در خاک مانند تجمع سدیم، افزایش pH و در نهایت کاهش حاصلخیزی خاک شوند. همچنین اگر RSC از ۲/۵ میلی اک‌ی‌والان بر لیتر بیشتر شود، آب در طبقه سوم قرار می‌گیرد که برای آبیاری نامناسب در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند منجر به ته‌نشینی Na_2CO_3 در خاک و کاهش زهکشی داخلی شود (Bhat, 2018). نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب زهکش‌ها نسبت به آب رودخانه پایین‌تر است و استفاده از این آب‌ها بدون انجام اصلاحات می‌تواند به مرور زمان باعث شور شدن خاک و کاهش عملکرد محصولات کشاورزی شود. این یافته‌ها اهمیت پایش مداوم کیفیت آب زهکش‌ها برای برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت منابع آب را برجسته می‌کند (Bhat, 2018). مقادیر شاخص نفوذپذیری (PI) در این مطالعه برای زهکش‌ها و آب رودخانه در بازه ۵۲/۴۷ تا ۷۴/۱۹ درصد متغیر بود. بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط Doneen (1964)، آب‌های دارای PI بین ۲۵ تا ۷۵ درصد در گروه دوم قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده کیفیت خوب آب برای آبیاری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آب در تمامی نقاط نمونه‌برداری در زهکش‌ها، در این محدوده قرار گرفته و بنابراین از نظر شاخص نفوذپذیری، مناسب برای آبیاری ارزیابی می‌شود. مقادیر بالاتر PI بیانگر این است که نسبت سدیم به سایر کاتیون‌های کلسیم و منیزیم به حلی نیست که منجر به انسداد منافذ خاک و کاهش نفوذ آب شود (Bhat, 2018). در این مطالعه حتی بیشترین مقدار ثبت شده برای PI (۷۴/۱۹٪) در زهکش ۳ در اسفندماه همچنان در حد مجاز و مناسب قرار دارد. به طور کلی، قرار گرفتن تمام نمونه‌ها در طبقه دوم (۲۵-۷۵٪) تأیید می‌کند که آب زهکش‌های منطقه با وجود برخی مشکلات کیفی در سایر شاخص‌ها، از نظر نفوذپذیری خاک برای آبیاری مناسب است و خطر قابل توجهی برای کاهش سرعت نفوذ آب به خاک ایجاد نمی‌کند. این نتایج با مطالعات مشابه در مناطق کشاورزی دارای اقلیم نیمه‌خشک مطابقت دارد (Bhat, 2018).

مقادیر نسبت کلی (KR) در این مطالعه بین ۰/۹۵ تا ۲/۶۴ متغیر بود. آب‌های با KR کمتر از ۱ برای آبیاری مناسب‌اند، در حالی که آب‌های با KR بیشتر از ۱ نشان‌دهنده نسبت بالای سدیم به کلسیم و منیزیم هستند که می‌تواند منجر به ایجاد مشکلات نفوذپذیری در خاک شود (Kelly, 1963). بررسی داده‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در زهکش ۱ طی همه ماه‌ها (دی، بهمن، اسفند)، در مرز حد مجاز قرار دارند و به طور کلی، آب این زهکش وضعیت نسبتاً مناسبی برای آبیاری دارد. در زهکش ۲ و زهکش ۳، مقادیر KR در بیشتر ماه‌ها بالاتر از ۱ بوده است که نشان‌دهنده خطر نسبی بالاتر در ارتباط با تجمع سدیم در خاک است و می‌تواند مشکلاتی نظیر قلیانیت خاک و کاهش نفوذپذیری را تشدید کند. به طور کلی، نتایج این شاخص نشان می‌دهد که آب زهکش‌ها به ویژه در زهکش ۲ و ۳ در معرض خطرات ناشی از نسبت بالای سدیم قرار دارند که می‌تواند اثرات منفی بر کیفیت خاک و

بهره‌وری زراعی داشته باشد. این موضوع اهمیت پایش مستمر کیفیت آب و به کارگیری روش‌های مدیریتی مانند استفاده از گچ یا بهبود زهکشی خاک را برجسته می‌کند (Bhat, 2018).

MAR به عنوان یک شاخص کلیدی در تعیین کیفیت آب برای آبیاری شناخته می‌شود، زیرا مقادیر بالای آن می‌تواند منجر به مشکلاتی چون آسیب به ساختار خاک و کاهش نفوذپذیری آن شود. به طور خاص، MAR بالاتر از $\frac{1}{3}$ برای استفاده در آبیاری ممکن است تهدیداتی برای خاک و محصولات کشاورزی به همراه داشته باشد (Safiur Rahman et al., 2017). در داده‌های به دست آمده از این پژوهش، زهکش ۱ کمترین مقادیر MAR را در ماه‌های مختلف را دارد که نشان‌دهنده کیفیت نسبی مناسب این زهکش برای استفاده در آبیاری است. این در حالی است که زهکش ۲ و زهکش ۳ در برخی ماه‌ها به ویژه در ماه‌های دی و اسفند مقادیر بالای MAR را نشان داده‌اند که می‌تواند برای خاک و رشد گیاهان مضر باشد. از اینرو زهکش ۲ و زهکش ۳ نمی‌توانند به طور کامل به عنوان منبع مناسبی برای آبیاری در نظر گرفته شوند. استفاده از این منابع آبی می‌تواند به تدریج ساختار خاک را تغییر دهد و بر نفوذپذیری آن تأثیر منفی بگذارد (Safiur Rahman et al., 2017).

بررسی مقادیر سختی کل (TH) در این پژوهش نشان داد که زهکش ۱ در ماه‌های دی، بهمن و اسفند سختی کل بالایی دارد. این مقادیر حاکی از این است که آب‌های این زهکش در محدوده آب‌های «سخت» قرار می‌گیرند (Rawat et al., 2018). در حالی که سختی آب‌های زهکش ۲ در ماه‌های بهمن و اسفند بیشتر از محدوده «سخت» بوده و به مرز «بسیار سخت» می‌رسد. همچنین آب زهکش ۳ در ماه‌های مختلف به طور قابل توجهی در محدوده «بسیار سخت» قرار دارد و استفاده از این منابع برای آبیاری به دلیل خطرات بالقوه‌ای که به تجهیزات آبیاری و خاک وارد می‌کند، باید محدود گردد (Khalid et al., 2018). در مناطقی که سختی کل آب‌ها بالاتر از ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر است، ممکن است نیاز به استفاده از افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل سختی و جلوگیری از خوردگی تجهیزات آبیاری و آسیب به خاک باشد. در مطالعه حاضر، زهکش ۲ و زهکش ۳ به دلیل سختی بسیار بالا، نیاز به توجه ویژه دارند تا از اثرات منفی آن‌ها بر روی خاک و سیستم‌های آبیاری جلوگیری شود (Soucek et al., 2011).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زهکش‌ها و رودخانه شامل مواد جامد محلول (TDS)، قلیائیت (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، پتاسیم (K^{+})، کلراید (Cl^{-})، فسفات (PO_4^{2-})، نیترات (NO_3^{-})، کربنات (CO_3^{2-}) و بی‌کربنات (HCO_3^{-}) اندازه‌گیری شدند. همچنین شاخص‌های هیدروشیمیایی شامل درصد سدیم (SSP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، کربنات سدیم باقیمانده (RSC)، شاخص نفوذپذیری (PI)، نسبت کلی (KR)، نسبت جذب منیزیم (MAR) و سختی کل (TH) برای ارزیابی کیفیت آب آبیاری مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج نشان داد که میزان TDS در زهکش‌های ۲ و ۳ به طور قابل توجهی بالاتر از حد مجاز برای آب‌های آبیاری قرار داشت و این امر بیانگر شوری زیاد آب و نیاز به مدیریت ویژه برای جلوگیری از اثرات منفی آن بر خاک و گیاهان است. در مقابل، زهکش ۱ و رودخانه در برخی ماه‌ها دارای مقادیر TDS پایین‌تری بودند که نشان‌دهنده کیفیت بهتر برای استفاده در آبیاری محصولات کشاورزی بود، هرچند که همچنان نیاز به مدیریت بهینه وجود داشت. همچنین، در تمامی نمونه‌ها، نسبت $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ در محدوده‌های غیرمطلوب قرار داشت که نشان‌دهنده غالب بودن سدیم در ترکیب یونی آب بوده و نیاز به اصلاحات در زمینه مدیریت منابع آبی و خاکی را نشان می‌دهد. پارامترهای کلیدی نظیر کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC) و غلظت یون‌های اصلی در زهکش ۱ در سطح پایین‌تری قرار داشته و مقادیر آن‌ها به آب رودخانه نزدیک‌تر بوده است. به ویژه، میزان شوری (TDS و EC) در زهکش ۱ پایین‌تر بوده و مقدار pH آن نیز در دامنه مناسب برای آبیاری قرار داشته است که این ویژگی‌ها پتانسیل استفاده مجدد این زهاب در آبیاری را با حداقل اقدامات اصلاحی فراهم می‌آورد.

از نظر شاخص‌های هیدروشیمیایی، درصد سدیم (SSP) و نسبت جذب سدیم (SAR) در اکثر نمونه‌ها در سطحی قرار داشت که خطر بالای سدیمی شدن خاک را مطرح می‌کرد. این نتایج با طبقه‌بندی‌های USSSL و نژباور هم‌خوانی دارد، جایی که زهکش‌های ۲ و ۳ در اکثر ماه‌ها در طبقه‌بندی‌های C4S4 (شوری و سدیمی خیلی زیاد) قرار گرفتند که نشان‌دهنده کیفیت نامناسب برای

آبیاری است. در مقابل، زهکش ۱ و رودخانه در برخی ماه‌ها در طبقات شوری متوسط (C3) و سدیمی متوسط (S2) قرار داشتند که امکان استفاده در آبیاری را فراهم می‌کند، اما همچنان نیازمند مراقبت و مدیریت است. در مقابل، برای زهکش‌های ۲ و ۳ پیشنهاد می‌شود اقدامات اصلاحی از قبیل اختلاط با منابع آب با کیفیت بالاتر، استفاده از خاک‌شویی هدفمند و یا انتخاب گیاهان بسیار مقاوم به شوری مد نظر قرار گیرد تا از بروز مشکلات درازمدت خاک و کاهش عملکرد محصولات جلوگیری شود. همچنین، شاخص‌های کربنات سدیم باقیمانده (RSC) و شاخص نفوذپذیری (PI) در نمونه‌ها نیز بیانگر مشکلات در زمینه نفوذپذیری خاک و احتمال کاهش کارایی آبیاری در برخی زهکش‌ها بودند. بنابراین، استفاده از این آب‌ها در کشاورزی نیازمند اصلاحات ویژه‌ای مانند بهبود زهکشی خاک و استفاده از روش‌های آبشویی برای کاهش اثرات منفی سدیم است.

نتایج حاصل از استفاده از سه سیستم طبقه‌بندی کیفیت آب (نژباور، USSL و فائو) به‌طور کلی نشان داد که آب زهکش‌های ۲ و ۳ برای استفاده در آبیاری محصولات کشاورزی نامناسب است و تنها پس از انجام اقدامات اصلاحی مانند استفاده از گچ کشاورزی یا آبشویی سنگین، امکان استفاده محدود از آن‌ها وجود خواهد داشت. زهکش ۱ و رودخانه، به ویژه در ماه‌های اسفند، وضعیت بهتری داشتند و پتانسیل استفاده در آبیاری محصولات نیمه‌مقاوم مانند گندم، جو و ذرت را دارند، اما همچنان نیاز به مدیریت دقیق برای جلوگیری از مشکلات مرتبط با شوری و سدیمی شدن خاک وجود دارد.

در مجموع، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که ارزیابی دقیق کیفیت زهاب‌های کشاورزی با استفاده از شاخص‌های هیدروشیمیایی نقش بسیار مهمی در مدیریت پایدار منابع آب و خاک دارد. نتایج به دست آمده می‌تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های مربوط به استفاده مجدد از زهاب‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد. در راستای تکمیل این پژوهش، به عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود اثرات بلندمدت استفاده از زهاب‌های کشاورزی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شود، همچنین کارایی گیاهان مقاوم به شوری در شرایط مختلف آبیاری با زهاب ارزیابی گردد. از سوی دیگر، شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی شامل اختلاط زهاب با منابع آب با کیفیت بالاتر، کاربرد روش‌های اصلاحی مانند گچ‌دهی و آبشویی، و تحلیل اقتصادی استفاده مجدد از زهاب نیز می‌تواند به توسعه سیاست‌های پایدار در مدیریت منابع آب و خاک کمک نماید. افزون بر این، اثرات زیست‌محیطی استفاده از زهاب بر کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی با بهره‌گیری از مدل‌سازی و ردیابی هیدروشیمیایی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست منابع

حسن‌پور نوده‌ی، مهسا؛ نوابیان، مریم و اسمعیلی ورکی، مهدی. (۱۳۹۸). ارزیابی کیفیت زهاب اراضی شالیزاری برای استفاده مجدد در آبیاری و تخلیه به محیط‌زیست) مطالعه موردی: واحد عمرانی F ۴ شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. (نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۴)، ۹۱۸-۹۰۹.

عبدشاهی، عباس؛ مردانی نجف‌آبادی، مصطفی و زینالی، منیره. (۱۳۹۹). تعیین الگوی بهینه کشت محصولات کشاورزی در شهرستان ملاثانی: کاربرد مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار. اقتصاد کشاورزی و توسعه، ۲۸(۱۱۱)، ۱۷۵-۲۰۴.

کوچک‌زاده، احمد؛ هویزه، حمید و یزدی‌پور، عبدالرحمن. (۱۳۹۷). اثر زهاب تولیدشده در فصل رشد نیشکر بر کیفیت آب تالاب شادگان. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۴)، ۲۹۱-۲۹۹.

مختارن، علی؛ گیلانی، عبدالعلی؛ عبادی، علی اکبر؛ شایان، محمدعلی و صانعی دهکردی، خدیجه. (۱۳۹۹). بازچرخانی زهاب مزارع نیشکرجنوب خوزستان برای کشت برنج با هدف بهبود بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۱(۷۸)، ۱۳۹-۱۵۶.

REFERENCES

Abdeshahi, A., Mardani Najafabadi, M., & Zeinali, M. (2020). Determining the optimal cropping Pattern of agricultural crops in mollasani county of Iran: Application of Robust Multi-Objective

- Optimization Model. *Agricultural Economics and Development*, 28(3), 175-203. <https://doi.org/10.30490/aead.2020.304989.1090>. (In Persian).
- Alharbi, S., Felemban, A., Abdelrahim, A., & Al-Dakhil, M. (2024). Agricultural and technology-based strategies to improve water-use efficiency in arid and semiarid areas. *Water*, 16(13), 1842. <https://doi.org/10.3390/w16131842>
- Al-humairi, B., & Shamkhi, N. (2023). Assessing drainage water quality for irrigation using the water quality index and DataFit software. *Water Supply*, 23(6), 2349–2358. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.121>
- Ashour, E., Zeidan, B., & Elshemy, M. (2021). Assessment of agricultural drainage water reuse for irrigation in El-Behira Governorate, Egypt. *Water Science*, 35(1), 135-153. <https://doi.org/10.1080/23570008.2021.1982336>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29, p. 174). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bhat, M. A. (2018). An overview of the assessment of groundwater quality for irrigation. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 9(1), 1.
- Doneen, L. D. (1964). *Water quality for agriculture*. Department of Irrigation, University of California, Davis.
- Florides, F., Giannakoudi, M., Ioannou, G., Lazaridou, D., Lamprinidou, E., Loukoutos, N., Spyridou, M., Tosounidis, E., Xanthopoulou, M., & Katsoyiannis, I. A. (2024). Water reuse: A comprehensive review. *Environments*, 11(4), 81. <https://doi.org/10.3390/environments11040081> (MDPI)
- Frankenberger, J. (2018, March). Managing water to increase resiliency of drained agricultural landscapes. In *Sustainable Seminar Series*.
- Giri, A., Bharti, V. K., Kalia, S., Kumar, K., & Khansu, M. (2022). Hydrochemical and quality assessment of irrigation water at the trans-himalayan high-altitude regions of Leh, Ladakh, India. *Applied Water Science*, 12(8), 197. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01716-1>
- Hasanpour Nodehi, M., Navabian, M. and Esmaeili Varaki, M. (2019). Assessment of agricultural drainage water for safe reuse in irrigation purposes and discharge to environment (Case study: unit F4 of Sefiedrod irrigation and drainage network). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(4), 909-918. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1598.13.4.5.7>. (In Persian).
- Hejase, C. A., Weitzel, K. A., Stokes, S. C., Graubeger, B. M., Young, R. B., Arias-Paic, M. S., ... & Dionysiou, D. D. (2021). Opportunities for treatment and reuse of agricultural drainage in the United States. *ACS ES&T Engineering*, 2(3), 292-305. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00277>
- Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Bibi, I., Sarwar, T., Shah, A. H., & Niazi, N. K. (2018). A review of environmental contamination and health risk assessment of wastewater use for crop irrigation with a focus on low and high-income countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 895. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050895>
- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. J. (Eds.). (2003). *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (Vol. 1). CABI.
- Koochekzadeh, A., Hoveizeh, H., & Yazdipour, A. R. (2019). The effect of waste water of sugarcane farms during growing season on the water quality of Shadegan Lagoon. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 22(4), 291-299. <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.4.291>. (In Persian).
- Li, L., Li, P., He, S., Wang, D., Tian, Y., & Niu, L. (2024). Groundwater nitrate pollution source apportionment under varying land use/land cover patterns. *Exposure and Health*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12403-024-00666-0>
- Mateo-Sagasta, J., & Burke, J. (2011). *Agriculture and water quality interactions: A global overview* (SOLAW Background Thematic Report-TR08, 46). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Mokhtaran, A., Gilani, A., Ebadi, A. A., Shayan, M. A., & Sanei Dehkordi, K. (2020). Reuse of sugarcane drainage water for rice cultivation in south Khuzestan to improve water productivity in irrigation and drainage networks. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(78), 139-156. (In Persian).

- Mutasher, A. K. A., Al-Saadi, R. J. M., & Al-Mohammed, F. M. (2021). Assessment and management of drainage water quality for reuse in irrigation projects. *Smart Science*, 9(2), 80–102.
- Niswonger, R. G., Morway, E. D., Triana, E., & Huntington, J. L. (2017). Managed aquifer recharge through off-season irrigation in agricultural regions. *Water Resources Research*, 53(8), 6970–6992.
- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2000). Amelioration strategies for saline soils: A review. *Land Degradation & Development*, 11(6), 501–521.
- Rajashekara, S. S., Nagaraju, D., Nagaraju, P., Nagesh, P. C., & Anjanappa, S. (2023). Hydrogeochemical and water quality index (WQI) evaluated in Beedanahalli watershed T. Narasipura Taluk, Mysore District, Karnataka, India. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 620–631. <https://doi.org/10.15421/112355>
- Rawat, K. S., Singh, S. K., & Gautam, S. K. (2018). Assessment of groundwater quality for irrigation use: A peninsular case study. *Applied Water Science*, 8, 233. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0866-8>(SpringerLink)
- Reinhart, B. D., Frankenberger, J. R., Hay, C. H., & Helmers, M. J. (2019). Simulated water quality and irrigation benefits from drainage water recycling at two tile-drained sites in the US Midwest. *Agricultural Water Management*, 223, 105699. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105699>
- Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613–620.
- Rhodes, J. D., Thain, J. F., & Wildon, D. C. (1996). The pathway for systemic electrical signal conduction in the wounded tomato plant. *Planta*, 200(1), 50–57. <https://doi.org/10.1007/BF00196648>
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). U.S. Government Printing Office.
- Safiur Rahman, M., Saha, N., Islam, A. T., Shen, S., & Bodrud-Doza, M. (2017). Evaluation of water quality for sustainable agriculture in Bangladesh. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 385. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3543-x>(SpringerLink)
- Soucek, D. J., Linton, T. K., Tarr, C. D., Dickinson, A., Wickramanayake, N., Delos, C. G., & Cruz, L. A. (2011). Influence of water hardness and sulfate on the acute toxicity of chloride to sensitive freshwater invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(4), 930–938. <https://doi.org/10.1002/etc.454>
- Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). Occurrence of nitrate in groundwater—a review. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 392–402.
- Szabolcs, I. (1967). The influence of irrigation water of high sodium carbonate content on soils. *Agrokémia és Talajtan*, 16, 1–15.
- Tanji, K. K., & Kielen, N. C. (2002). *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas* (No. 61, pp. xiv+188). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Temesgen, E., Gulie, G., & Akili, D. (2023). Evaluation of drainage water quality for irrigation reuse in Kulfo and Hare irrigation command areas, southern Ethiopia. *Water Practice & Technology*, 18(10), 2329–2340.
- Temesgen, E., Gulie, G., & Akili, D. (2023). Evaluation of drainage water quality for irrigation reuse in Kulfo and Hare irrigation command areas, southern Ethiopia. *Water Practice & Technology*, 18(10), 2329–2340. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.146>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- Vranešević, M., Zemunac, R., Grabić, J., & Salvai, A. (2024). Hydrochemical characteristics and suitability assessment of groundwater quality for irrigation. *Applied Sciences*, 14(2), 615. <https://doi.org/10.3390/app14020615>
- Wang, H., Zheng, C., Ning, S., Cao, C., Li, K., Dang, H., ... & Zhang, J. (2023). Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation. *Agricultural Water Management*, 286, 108383. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108383
- Zamani, M. G., Moridi, A., & Yazdi, J. (2022). Groundwater management in arid and semi-arid regions. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 362. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09546-w>(SpringerLink)