

معرفی شاخص جامع سودآوری به منظور ارزیابی ارزش سیستم بازچرخانی زهاب در استان خوزستان

چکیده

با افزایش فشار بر منابع آب شیرین در سراسر جهان، اهمیت استفاده از زهاب کشاورزی به ویژه در مناطق خشک مانند استان خوزستان که با کمبود آب شیرین و دفع بیش از حد زهاب مواجه‌اند، افزایش یافته است. سیستم بازچرخانی زهاب (DWR) شامل جمع‌آوری و ذخیره‌سازی زهاب برای آبیاری تکمیلی، به عنوان راهکاری نویدبخش برای افزایش بهره‌وری آب کشاورزی و کاهش اثرات زیست‌محیطی مطرح شده است. در این مطالعه، اثرات بالقوه DWR بر عملکرد نیشکر در کشت و صنعت امیرکبیر ارزیابی شده و هدف تعیین نسبت معقول بازچرخانی زهاب کشاورزی برای حداکثرسازی منافع اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، شاخص نوآورانه‌ای به نام شاخص جامع سودآوری آب مصرفی (CPCW) معرفی گردید که عواملی نظیر عملکرد محصول، هزینه فرصت، هزینه‌های دفع و پیامدهای زیست‌محیطی را مد نظر قرار می‌دهد. نتایج پژوهش نشان داد که بازچرخانی ۲۳٪ زهاب منجر به کاهش ۱۹٪ عملکرد نیشکر به علت افزایش ۴۵٪ شوری آب آبیاری شده و بالاترین مقدار شاخص حاصل گردید. صرفه‌جویی در منابع آبی، هزینه‌های فرصت را افزایش داده و امکان آبیاری تکمیلی ۲۵۹۱۷ هکتار نخلستان خرما یا ۷۷۸۴۰ هکتار مزارع گندم را فراهم ساخت. برای تطبیق با اولویت‌های کشاورزان، سناریویی با کاهش ۱۵٪ عملکرد محصول و بازچرخانی ۲۰٪ زهاب مورد بررسی قرار گرفت که امکان بازچرخانی ۳۲۳ میلیون مترمکعب زهاب و حفظ ۶۶۶ میلیون مترمکعب آب از رودخانه کارون را به همراه داشت. به طور کلی، راهبرد پیشنهادی DWR در کاهش اثرات زیست‌محیطی دفع زهاب و بهینه‌سازی منابع در مناطق کم‌آب بسیار مؤثر ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: بازچرخانی زهاب، صرفه‌جویی آب، هزینه فرصت، محیط زیست، خوزستان

ABSTRACT

As freshwater resources face increasing pressure worldwide, the significance of utilizing drainage water (DW) has gained prominence, particularly in arid regions such as Khuzestan province, Iran, where water scarcity and excessive agricultural DW disposal present critical challenges. Drainage water recycling (DWR), involving the capture and storage of DW for supplemental irrigation, has emerged as a promising strategy to simultaneously enhance agricultural productivity and mitigate environmental impacts. This theoretical study assessed the potential effects of DWR on sugarcane yield in Amirkabir Agro-industry and aimed to determine the desire proportion of reusable DW that maximizes both economic and environmental benefits. To achieve this, a novel index, the Comprehensive Profitability of Consumed Water (CPCW), was introduced to integrate key factors such as crop yield, opportunity costs, disposal expenses, and environmental implications. Results indicated that recycling 23% of DW led to a 19% reduction in sugarcane yield due to a 45% increase in irrigation water salinity, yielding the highest CPCW index. The associated water savings contributed to increased opportunity costs, enabling supplemental irrigation for 25917 hectares of date orchards or 77840 hectares of wheat fields. To better align with farmers' priorities, an alternative scenario with a 15% yield reduction was examined, corresponding to a 20% DW recycling rate. This approach facilitated the reuse of 323 Mm³ of DW while conserving 666 Mm³ of water from the Karun River. Overall, the proposed DWR strategy demonstrated substantial effectiveness in alleviating the environmental burden of DW disposal while optimizing resource use in water-scarce regions.

Keywords: Drainage water reuse, Agricultural water saving, Cost opportunity, Environment, Khuzestan

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water scarcity is a major challenge in arid and semi-arid regions, exacerbated by population growth, climate change, and heavy reliance on freshwater for agriculture. In Iran, this crisis has led to a reduction in renewable water resources, over-extraction of groundwater, and environmental impacts. Drainage is a common agricultural practice that improves root ventilation and crop productivity but can also lead to water quality degradation through nutrient and chemical runoff. To mitigate these effects, protective practices such as Drainage Water Recycling (DWR) systems are recommended. Khuzestan, a key agricultural region in Iran, faces severe challenges in drainage and water scarcity. The discharge of drainage water from sugarcane fields has caused environmental and political issues. DWR systems can help by collecting and reusing drainage water for supplemental irrigation. These technologies not only preserve water resources but also enhance drainage infrastructure performance and agricultural resilience.

Objective:

This study pursues three main objectives: (1) to predict the impact of using stored drainage water in DWR ponds on sugarcane performance through empirical equations, and to determine an optimal ratio of recycled drainage water to meet the crop's water requirements, (2) to propose a comprehensive index that considers all aspects of the DWR system's effects, including economic and environmental factors, in the decision-making process. This study can serve as a foundation for future research on sustainable agriculture and the use of drainage water in arid and semi-arid regions.

Materials and method:

The theoretical study was conducted to investigating the implications of the DWR system at privately Amirkabir agro-industry farm. This agro-industry spans 12000 ha, comprising 480 plots. It is situated approximately 45 km south of Ahvaz City and west of the Karun River. The salinity levels considered for irrigation and drainage water in this study were 2.5 and 6 ds m⁻¹, respectively. The blending scheme was employed for the reuse of drainage water due to its higher salinity level of 6 ds m⁻¹ compared to the sugarcane salinity threshold of 1.7 ds m⁻¹. The salinity of the irrigation water after blending with different recycled scenarios, namely I₁(10%), I₂ (20%), I₃ (30%), I₄(40%), I₅ (50%), and I₆ (60%), was computed. The comprehensive profitability of consumed water was developed using the benefit-cost ratio, offering an in-depth assessment that takes into account all aspects of the drainage water recycling system. This all-inclusive index was employed to incorporate various critical attributes of DWR system, in terms of crop yield, cost opportunity, disposal cost, and environmental impacts. This index, along with the yield of the studied crops under different scenarios, was calculated to identify the desire scenario.

Results and discussion:

The study revealed that an optimal ratio of 23% for recycled drainage water resulted in a 19% decrease in sugarcane yield, which was associated with a 45% increase in irrigation water salinity, leading to the highest CPCW index. The calculated water savings could be used to supplement irrigation for downstream date orchards (25917 ha) or wheat fields (77840 ha), thus increasing alternate opportunity costs. Additionally, the reduction in drainage disposal costs played a key role in improving the CPCW index. To better align with farmers' priorities, a more moderate 15% decrease in crop yield was considered, leading to a 20% proportion of recycled DW. This approach recycled 323 Mm³ of drainage water and conserved a total of 666 Mm³ of water from the Karun River. In conclusion, the proposed DWR practice was highly effective in significantly mitigating the environmental impacts of DW disposal to downstream water bodies.

Conclusion:

This study evaluates the potential benefits of a drainage water recycling system in arid regions, focusing on water conservation, water quality improvement, and economic advantages. A new index, the Comprehensive Profitability of Consumed Water (CPCW), was used to determine optimal recycling and blending percentages for irrigation. A 20% blending scenario resulted in a water saving of 67 Mm³ and

recycling of 32 Mm³ in the Amirkabir agro-industry. The practice helps mitigate water-related risks and reduces water quality deterioration in receiving bodies. Results indicate that drainage water recycling can be economically beneficial, with predictions based on specific regional conditions. The study highlights the need for regional-scale evaluations and further research to optimize recycling systems and assess long-term economic impacts under future climate scenarios.

Author Contributions

S.K: Data preparation, Software, Methodology, Formal Analysis, Validation, Results Interpretation, Investigation. Writing-original draft preparation, Writing-review and editing, Final report review. **M.P:** Formal Analysis, Validation, Results Interpretation, Writing-review and editing, Supervision. **A.M:** Conceptualization, Methodology, Data Curation, Writing-review, Supervision, Project Administration, Formal Analysis. **A.N.G:** Investigation, Writing-review, Final report review, Writing-original draft preparation. **A.G:** Writing-original draft preparation, Writing-review and editing.

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the ethical issues, including plagiarism, informed consent, misconduct, data fabrication and/or falsification, double publication and/or submission, and redundancies have been completely observed by the author.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بحران آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر خاورمیانه، به یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر تبدیل شده و عواملی همچون رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و وابستگی شدید کشاورزی به منابع آب شیرین، آن را تشدید کرده‌اند (Khairy et al., 2022). در ایران نیز کاهش منابع تجدیدپذیر، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تأثیرات اقلیمی، بحران آب را به سطحی نگران‌کننده رسانده‌اند و پیامدهایی گسترده در ابعاد کشاورزی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌جا گذاشته‌اند (Rasouli et al., 2023). در چنین شرایطی، مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است و به‌کارگیری رویکردهای نوین مانند مدیریت بهینه آب (Mehri et al., 2023) و استفاده از منابع آب نامتعارف (Moursi et al., 2024)، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری و حفظ منابع دارد. یکی از ابزارهای رایج در مدیریت آب کشاورزی، زهکشی است که با حذف آب اضافی و بهبود تهویه خاک، شرایط مساعدی برای رشد گیاه و عملیات زراعی فراهم می‌کند (Skaggs et al., 1994)، اما در صورت طراحی یا بهره‌برداری ناکارآمد، می‌تواند منجر به آلودگی غیرنقطه‌ای منابع آبی از طریق انتقال مواد مغذی، رسوبات و آلاینده‌های شیمیایی شود (Masoomi et al., 2024). این آلودگی‌ها، که ناشی از بیش‌زهکشی و مصرف نادرست نهاده‌های کشاورزی‌اند، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی و ایجاد یوتروفیکاسیون^۱ محسوب می‌شوند (Badrzadeh et al., 2022). در پاسخ به این چالش، به‌کارگیری روش‌های زهکشی حفاظتی مانند زهکشی کنترل‌شده، فیلتراسیون زیستی، پوشش گیاهی در زهکش‌ها و سامانه‌های بازچرخانی زهاب (DWR)، می‌تواند هم‌زمان بهره‌وری آب را افزایش داده و کیفیت منابع را حفظ کند (Mitchell et al., 2023).

یکی از روش‌های نوین زهکشی حفاظتی، سیستم DWR است که با جمع‌آوری زهاب زهکش‌های سطحی و زیرسطحی و رواناب‌ها در حوضچه‌های ذخیره، امکان استفاده مجدد از آن‌ها را به‌عنوان آبیاری تکمیلی در دوره‌های خشک فراهم می‌سازد (Frankenberger et al., 2017). این سیستم، در کنار راهکارهایی مانند زهکشی کنترل‌شده، به افزایش تاب‌آوری اراضی در برابر تغییرات اقلیمی، کاهش خطر سیلاب و بهبود بهره‌وری آب کمک می‌کند (Reinhart et al., 2016). یکی از مزایای کلیدی DWR، کاهش بار آلاینده‌هایی نظیر نیتروژن و فسفر است، زیرا به‌جای تخلیه مستقیم زهاب به منابع پذیرنده، این مواد مغذی در حوضچه‌ها ذخیره شده و از یوتروفیکاسیون جلوگیری می‌شود (Moursi et al., 2023). این سیستم‌ها همچنین موجب بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی، و ارتقاء بهره‌وری آن‌ها از طریق بازگرداندن مواد مغذی به خاک می‌شوند (Kaur et al., 2023). از منظر زیست‌محیطی، این سامانه‌ها قابلیت ایجاد زیستگاه‌های متنوع برای گونه‌های آبی و خشکی را نیز دارند (Frankenberger et al., 2017). مدل‌سازی سیستم‌های DWR با استفاده از DRAINMOD-DWR نشان داده که طراحی بهینه این سامانه‌ها عملکرد آن‌ها را بهبود داده و از بروز کمبود یا ذخیره اضافی آب جلوگیری می‌کند (Moursi et al., 2022). همچنین، مطالعه دیگری با بهره‌گیری از مدل APEX^۲ در ۳۹ ایستگاه آزمایشی، اثربخشی DWR را در کاهش آلودگی و بازیابی عناصر غذایی تأیید کرده است (Doro et al., 2024).

استان خوزستان، با وجود نقش کلیدی در کشاورزی ایران، با چالش‌های جدی در مدیریت زهاب و منابع آب مواجه است. دفع مستقیم زهاب اراضی نیشکر و صنایع وابسته، به‌ویژه در حوضچه‌های تبخیری نزدیک مرز عراق، منجر به آسیب‌های زیست‌محیطی و

^۱Eutrophication

^۲ Drainage water recycling system

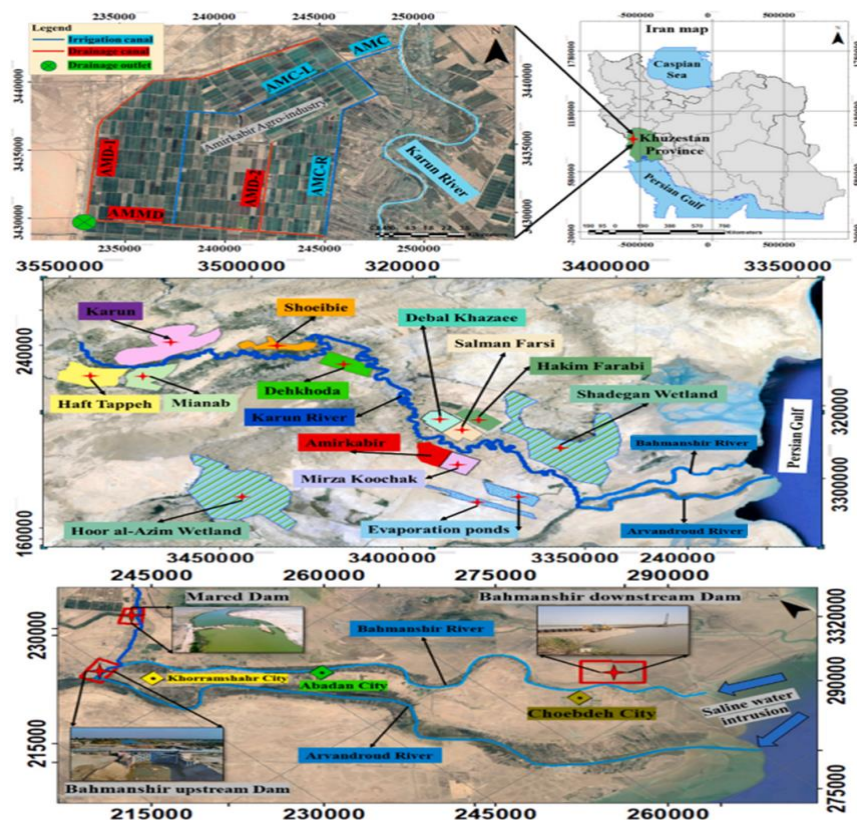
^۳Agricultural policy environmental eXtender

بروز تنش‌های سیاسی شده است (Akram et al., 2013; Mokhtaran et al., 2023). ورود زهاب به تالاب‌ها و رودخانه‌ها نیز باعث افزایش شوری و هدایت الکتریکی، کاهش کیفیت آب، و تهدید اکوسیستم‌های آبی و منابع آبی شرب و کشاورزی منطقه شده است (Almasi et al., 2020). افزون‌براین، زهکش‌های قدیمی منطقه، نه تنها آب آبیاری بلکه بخشی از منابع آب زیرزمینی را نیز تخلیه می‌کنند (Mokhtaran et al., 2020). در این شرایط، استقرار سیستم‌های بازچرخانی زهاب به عنوان راهکاری پایدار، می‌تواند ضمن بهبود بهره‌وری و زیرساخت‌های زهکشی، در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری کشاورزی خوزستان مؤثر باشد. با وجود اهمیت روزافزون بازچرخانی زهاب در کشاورزی مناطق خشک، همچنان خلأ پژوهشی چشمگیری در زمینه امکان‌سنجی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی این سیستم‌ها و نحوه ادغام آن‌ها با سامانه‌های آبیاری وجود دارد. مطالعات موجود، اغلب به صورت محدود به تأثیرات مستقیم این فناوری‌ها بر عملکرد زراعی پرداخته و تأثیر کیفیت‌های متنوع زهاب و شرایط اقلیمی را به طور جامع بررسی نکرده‌اند. در چنین شرایطی، ارزیابی عملکرد سیستم‌های DWR در مناطقی مستعد نظیر خوزستان، با توجه به بحران منابع آب و فشار زیست‌محیطی ناشی از زهاب، از اولویتی ویژه برخوردار است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل اثر پیاده‌سازی سیستم DWR بر عملکرد نیشکر در شرایط اقلیمی و آبی خوزستان، سناریوهای مختلف اختلاط زهاب با آب رودخانه کارون را بررسی می‌کند. این مطالعه دو هدف محوری را دنبال می‌نماید: (۱) پیش‌بینی عملکرد نیشکر تحت سناریوهای مختلف ترکیب زهاب و آب رودخانه با استفاده از مدل‌های تجربی و تعیین نسبت بهینه زهاب در تأمین نیاز آبی، و (۲) توسعه شاخصی ترکیبی و نوآورانه که با تلفیق معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، ابزار تصمیم‌گیری جامعی برای ارزیابی و مقایسه سناریوهای مدیریتی فراهم می‌آورد. این شاخص، با ارائه دیدگاهی یکپارچه و کمی از پیامدهای کاربرد سیستم DWR، می‌تواند به عنوان مبنای علمی مناسبی برای تدوین راهبردهای بهره‌برداری پایدار از زهاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، و ارتقای بهره‌وری آب و مدیریت پایدار اراضی کشاورزی در خوزستان به کار گرفته شود.

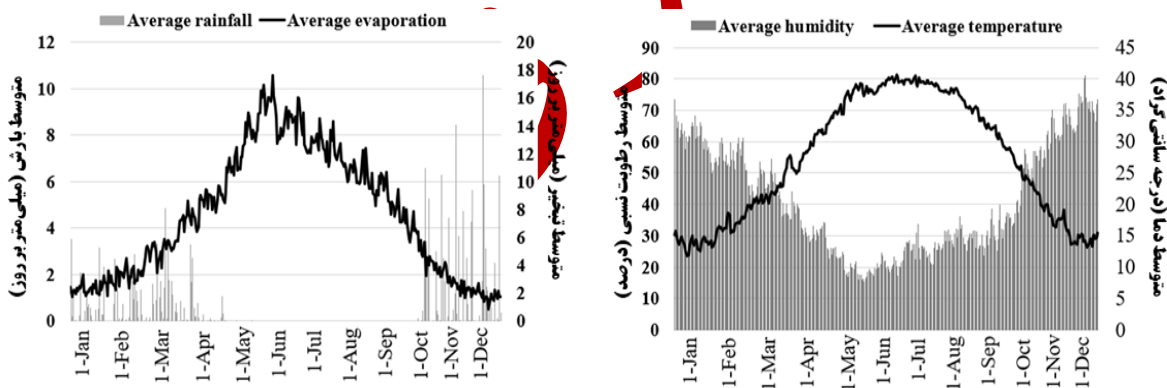
مواد و روش‌ها

مشخصات کشت و صنعت امیرکبیر

مطالعه حاضر به بررسی پیامدهای به کارگیری سیستم DWR در اراضی شرکت کشت و صنعت امیرکبیر واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز، غرب رودخانه کارون (عرض جغرافیایی $31^{\circ} 15'$ تا $31^{\circ} 40'$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ} 12'$ تا $48^{\circ} 30'$ شرقی) می‌پردازد. این مجموعه با وسعت ۱۲۰۰۰ هکتار شامل ۴۸۰ قطعه زراعی است که از این میزان، ۱۰۰۰۰ هکتار تحت کشت نیشکر و ۲۰۰۰ هکتار به صورت آیش مدیریت می‌شود. منبع اصلی تأمین آب این مجموعه، رودخانه کارون است که از طریق کانال اصلی (AMC) به اراضی منتقل شده و در ادامه به دو شاخه AMC-R و AMC-L تقسیم می‌شود (شکل ۱). سیستم آبیاری مورد استفاده، فارو انتها بسته با استفاده از لوله‌های هیدروفلوم کم‌فشار است. برای مدیریت زهاب، از زهکش‌های زیرسطحی با عمق دو متر و فاصله ۴۰ متر بهره گرفته شده است. زهکش‌های فرعی به طول ۵۰۰ متر و شیب ۰/۱ درصد، عمود بر زهکش‌های اصلی طراحی شده‌اند و زهاب جمع‌آوری شده را به زهکش‌های روباز AMD-1، AMD-2 و AMMD هدایت می‌کنند. شوری متوسط آب زیرزمینی حدود شش دسی‌زیمنس بر متر و عمق آن نزدیک به دو متر گزارش شده است (Mokhtaran et al., 2020). داده‌های هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک اهواز طی سال‌های آبی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ گردآوری شده (شکل ۲) و شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی، سرعت باد، تبخیر و ساعات آفتابی است. میانگین بارندگی سالانه ۲۰۱ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده اقلیم خشک منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن است (E, 1926).



شکل ۱. موقعیت ایران، استان خوزستان، منطقه مورد مطالعه، اراضی نیشکر، رودخانه‌ها و تالاب‌های پایین‌دست، سدهای سه‌گانه و محل پیشروی آب شور خلیج فارس



شکل ۲. میانگین روزانه بارندگی، دما، تبخیر و رطوبت نسبی در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در منطقه مورد مطالعه

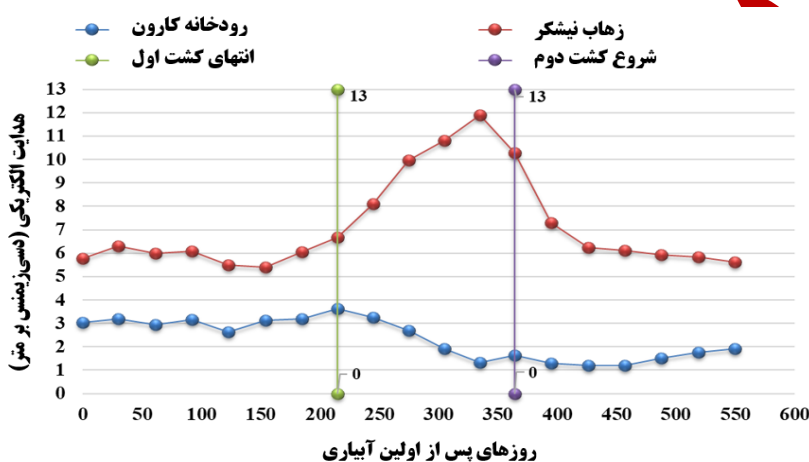
مشخصات خاک و آب اراضی واحد

در این مطالعه، برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله بافت، چگالی ظاهری، تخلخل، و میزان رطوبت در سطوح ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP)، پیش از شروع فصل زراعی نمونه‌برداری‌هایی در سه عمق (۰-۳۰، ۳۰-۹۰، و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر) از قطعات تصادفی زیر کشت نیشکر انجام شد (Mokhtaran et al., 2020). میانگین نتایج در جدول ۱ ارائه شده و نشان‌دهنده بافت ریزدانه با درصد بالای رس و سیلت در خاک‌های منطقه است. کل آب در دسترس با اختلاف میانگین FC و PWP محاسبه شد که به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۶/۵ درصد برآورد گردید.

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در سه عمق نمونه‌برداری

عمق نمونه‌برداری (cm)	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	چگالی ظاهری (gr cm^{-3})	تخلخل (%)	بافت خاک
۰-۳۰	۴۸/۸	۴۹/۲	۱/۸	۱/۵۳	۵۴	SC
۳۰-۹۰	۵۰/۸	۴۵/۲	۳/۸	۱/۷۷	۵۵	SC
۹۰-۱۳۰	۵۴/۸	۴۳/۲	۱/۸	۱/۸۷	۵۲	SCL

بررسی کیفیت آب آبیاری و زهاب برای دوره مارس ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۸ (شکل ۳) نشان داد که میانگین شوری آب آبیاری و زهاب به ترتیب ۲/۵ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر بوده است (Mokhtaran et al., 2023). با توجه به شوری آب زیرزمینی (۶ دسی‌زیمنس بر متر) و همچنین تأثیر فرآیندهای آبیاری و آشفته‌ی بر ترکیب شیمیایی زهاب، نتایج حاکی از آن است که آب زیرزمینی تأثیر قابل توجهی در افزایش شوری زهاب حاصل از سیستم‌های زهکشی زیرسطحی منطقه مورد مطالعه ندارد.



شکل ۳. تغییرات اندازه‌گیری شده مقادیر مختلف شوری آب آبیاری و زهاب تولیدی از فروردین ۱۳۹۵ تا اواسط شهریور ۱۳۹۷

مشخصات کشت و صنعت‌های نیشکر

کشت نیشکر در استان خوزستان عمدتاً در ده واحد کشت و صنعت متمرکز است که شامل امیرکبیر، میرزا کوچک خان، سلمان فارسی، حکیم فارابی، دعبل خزاعی در جنوب، و شعبیه، کارون، میان‌آب، هفت‌تپه و دهخدا در شمال منطقه می‌باشند (شکل ۱). با توجه به شباهت‌های ساختاری و عملیاتی این واحدها، نتایج این پژوهش که بر کشت و صنعت امیرکبیر متمرکز بوده، قابلیت تعمیم به سایر واحدهای مشابه را دارد. تفاوت اصلی این واحدها در وسعت اراضی زیر کشت نیشکر و محل تخلیه زهاب است (جدول ۲). در حالی که در گذشته زهاب تمام واحدها مستقیماً به رودخانه کارون تخلیه می‌شد، در سال‌های اخیر برخی از کشت و صنعت‌ها با توجه به کاهش کیفیت و کمیت آب این رودخانه، روش‌های جایگزینی اتخاذ کرده‌اند. به عنوان نمونه، کشت و صنعت‌های امیرکبیر و میرزا کوچک خان زهاب خود را از طریق ایستگاه‌های پمپاژ به حوضچه‌های تبخیری با مساحت ۴۲۰۰۰ هکتار و ظرفیت ۳۵۰ میلیون مترمکعب منتقل می‌کنند، که این حوضچه‌ها به یک چالش زیست‌محیطی مهم تبدیل شده‌اند (Mokhtaran et al., 2023).

مشخصات رودخانه کارون

رودخانه کارون با طول ۹۵۰ کیلومتر، به عنوان طولانی‌ترین رودخانه ایران، منبع اصلی تأمین آب آبیاری کشت و صنعت‌های نیشکر و آب شرب استان خوزستان محسوب می‌شود. این رودخانه از شهرهای اهواز، آبادان و خرمشهر عبور کرده و پیش از ورود به خلیج فارس به شاخه‌های بهمن شیر و اروندرود تقسیم می‌شود (شکل ۱). بررسی داده‌های ده‌ساله دبی تنظیم‌شده تا سپتامبر ۲۰۱۵ (گزارش مهندسين

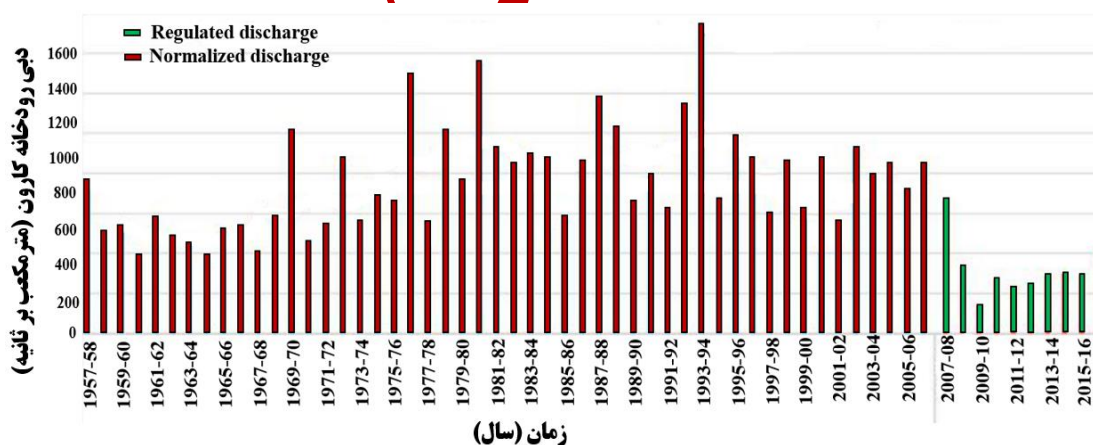
مشاور خاک تهران) نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۷، دبی رودخانه با روندی کاهشی همراه بوده است (شکل ۴). علت اصلی این کاهش، برداشت‌های سنگین در بالادست و تداوم دوره‌های خشکسالی گزارش شده است (AB Khak Tehran Engineers, 2019). میانگین دبی رودخانه در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷، ۳۲۰/۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده که بر اساس مدت‌زمان فصل رشد نیشکر محاسبه شده است. به عبارت دیگر، دبی رودخانه کارون در بالادست کشت و صنعت امیرکبیر برابر با میانگین ماهانه ایستگاه هیدرومتری اهواز در فصل کشت نیشکر در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. موقعیت تخلیه زهاب تولیدی و سطح زیرکشت در هر یک از کشت و صنعت‌های نیشکر

کشت و صنعت	سطح زیرکشت (ha)	محل دفع زهاب	کشت و صنعت	سطح زیرکشت (ha)	محل دفع زهاب
کارون	۲۶۰۰	رودخانه دز	دهخدا	۱۲۰۰	تالاب هورالعظیم
میاناب	۳۳۰۰	رودخانه دز	دعبل خزاعی	۱۲۰۰	تالاب شادگان
هفت‌تپه	۱۲۰۰۰	رودخانه دز	سلمان فارسی	۱۲۰۰	تالاب شادگان
شعبیه	۱۵۰۰۰	رودخانه کارون	حکیم فارابی	۱۲۰۰	تالاب شادگان
میرزاکوک‌چکان	۱۲۰۰۰	حوضچه‌های تبخیری	امیرکبیر	۱۲۰۰۰	حوضچه‌های تبخیری

مشکل پیشروی آب شور و کمبود آب شرب

پیشروی آب شور از خلیج فارس به رودخانه‌های بهمن‌شیر و اروندرود، تحت تأثیر اقلیم خشک، کاهش دبی رودخانه‌های بالادست، و برداشت‌های گسترده کشاورزی، به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی منطقه تبدیل شده است. کاهش دبی رودخانه کارون موجب برهم خوردن تعادل هیدرولیکی، افزایش شوری، افت کیفیت آب شهری و کشاورزی، و آسیب به مزارع گندم و نخلستان‌ها شده است. در راستای مقابله با این وضعیت، سه سد توسط شرکت SWECO در سال ۱۹۷۵ برای جلوگیری از نفوذ آب شور و حفظ کیفیت آب طراحی شد (Turk, 2001). با این حال، به دلیل هزینه‌های بالا و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از سدسازی، این پژوهش به ارزیابی اثربخشی استفاده از سیستم بازچرخانی زهاب در بهبود کیفیت آب آبیاری و آشامیدنی پرداخته و عملکرد آن را با سدهای موجود مقایسه کرده است.



شکل ۴. سری زمانی دبی نرمال‌شده و تنظیم‌شده رودخانه کارون در ایستگاه اهواز طی دوره ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۷

مشکلات نخلستان‌های خرما و مزارع گندم در پایین‌دست

نخلستان‌های آبادان و خرمشهر و مزارع گندم آبیاری‌شده در پایین‌دست رودخانه کارون با بحران کم‌آبی و شوری مواجه هستند. این وضعیت عمدتاً ناشی از برداشت گسترده آب برای کشت نیشکر در بالادست و تأثیرات تغییرات اقلیمی است. افزایش شوری خاک و آب، بر اثر نفوذ آب شور از خلیج فارس، کاهش جریان ورودی رودخانه و تخلیه زهاب کشاورزی، منجر به کاهش کیفیت منابع آبی و

خشکیدگی نخل‌ها شده است. این عوامل به کاهش عملکرد و بهره‌وری محصولات، به‌ویژه گندم که محصولی راهبردی در منطقه است، انجامیده و چالش‌های جدی برای معیشت کشاورزان ایجاد کرده‌اند (Mokhtaran et al., 2020).

شرایط اقتصادی محصولات مورد مطالعه

استان خوزستان با دارا بودن زمین‌های حاصلخیز، قطب تولید محصولات کشاورزی در ایران محسوب می‌شود و در سطح زیرکشت نیشکر و گندم رتبه نخست و در تولید خرما رتبه چهارم کشور را دارد. عملکرد این محصولات در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۶۵۰۰، ۶۸۱۳ و ۳۰۸۳ کیلوگرم در هکتار برای نیشکر، گندم و خرما گزارش شده است که مبنای ارزیابی اقتصادی سناریوهای بازچرخانی زهاب قرار گرفتند. در تحلیل نیشکر، علاوه بر شکر، محصولات جانبی نظیر باگاس و ملاس نیز در نظر گرفته شدند که به‌ترتیب ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵٪ از سودآوری را تشکیل می‌دهند. طبق گزارش شرکت امیرکبیر، ۴۵٪ از درآمد فروش شکر صرف هزینه‌های تولید می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به هزینه‌های تولید گندم و خرما در مناطق آبادان و خرمشهر استخراج و در تحلیل اقتصادی لحاظ گردید. تمامی محاسبات به دلار (با نرخ تبدیل ۱ دلار برابر ۲۵۰۰۰ ریال) انجام شد تا امکان مقایسه‌پذیری و ارزیابی دقیق سناریوها فراهم شود. در این مطالعه، با لحاظ درصدهای مشخص شده برای هر سناریوی اختلاط، ابتدا درآمد ناخالص و هزینه‌ها محاسبه و سپس درآمد خالص هر سناریو جهت تحلیل اقتصادی استخراج شد. در بخش تولید خرما، نخلستان‌های اصلی استان خوزستان عمدتاً در آبادان (۱۱۳۳۴ هکتار) و خرمشهر (۱۴۰۸ هکتار) قرار دارند. همچنین سطح زیرکشت گندم در این شهرستان‌ها به ترتیب ۳۰۵ و ۷۰۰۳ هکتار گزارش شده است. اطلاعات مربوط به هزینه‌های تولید گندم و خرما جمع‌آوری و در جدول ۳ ارائه شده است. سپس هزینه تولید، درآمد خالص و نسبت سود به هزینه برای سه محصول نیشکر، گندم و خرما بررسی و مقایسه گردید. هدف این تحلیل، ارزیابی تأثیر سناریوهای مختلف بازچرخانی زهاب بر درآمد و بهره‌وری اقتصادی محصولات مذکور است.

تبخیر و تعرق محاسبه‌شده محصولات

برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع روزانه (ET_0)، از نرم‌افزار CropWat و روش پنمن موتیث (Allen et al., 1998) استفاده شد. تبخیر و تعرق نیشکر (ET_c) نیز با روش ضریب گیاهی یک‌جزئی و ضریب گیاهی اصلاح‌شده متناسب با منطقه (Sheini, 2020) محاسبه گردید. همچنین نیاز آبی خرما و گندم در مناطق آبادان و خرمشهر با استفاده از مدل ملی نیاز آبی (ابزار آنلاین) برآورد شد.

جدول ۳- هزینه‌های کلی تولید محصولات کشاورزی برای محصولات غالب منطقه مورد مطالعه در استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۲۳)

خرما		گندم	
نوع هزینه	هزینه ($US\$ ha^{-1}$)	نوع هزینه	هزینه ($US\$ ha^{-1}$)
گردافشانی	۱۷۴	هزینه شخم	۳۲
بهسازی زمین	۱۰۰	هزینه بذرپاشی و مرزبندی	۲۴
برداشت	۷۱۶	هزینه بذر و حمل و نقل	۱۶۰
آرایش خوشه	۴۶۰	هزینه کارگر	۲۸
هرس	۲۰۴	هزینه کود و حمل و نقل	۹۶
تهیه کود	۱۶۰	هزینه خرید سم و سم‌پاشی	۴۰
پخش کود	۸۰	هزینه برداشت و حمل تا سیلو	۱۰۰
جمع	۱۸۹۴	جمع	۴۸۰

حجم ناخالص آبیاری و دور آبیاری محاسبه‌شده

حجم ناخالص آبیاری، دور و تعداد دفعات آبیاری در طول فصل بر اساس نیاز آبی محصولات محاسبه شد. دور آبیاری ماهانه با توجه به کل آب در دسترس و تبخیر و تعرق محصول تعیین گردید. حجم ناخالص آبیاری با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

رابطه ۱)

$$d_g = \frac{d_n - P_{eff}}{E_a} \times 10$$

که در آن d_g عمق ناخالص آبیاری (میلی متر)، d_n عمق خالص آبیاری (میلی متر)، P_{eff} بارش مؤثر (میلی متر)، E_a راندمان کل سیستم آبیاری (درصد) می باشد. راندمان کل آبیاری با توجه به راندمان انتقال (۹۲٪)، توزیع (۹۸٪) و کاربرد (۶۰٪)، برابر با ۵۴٪ در نظر گرفته شد (Sheini Dashtgol, 2020). بارش مؤثر نیز با روش USDA-SCS برآورد شد.

سناریوهای بازچرخانی زهاب

در این مطالعه، برای استفاده مجدد از زهاب، روش اختلاط انتخاب شد؛ زیرا شوری زهاب (شش دسی زیمنس بر متر) بالاتر از آستانه تحمل نیشکر (۱/۷ دسی زیمنس بر متر) است. شوری آب آبیاری پس از اختلاط با شش سناریوی مختلف زهاب بازیافتی، از جمله I_1 (۱۰٪)، I_2 (۲۰٪)، I_3 (۳۰٪)، I_4 (۴۰٪)، I_5 (۵۰٪) و I_6 (۶۰٪) با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد:

$$EC_{Mix} = (EC_{IW} \times X_{IW}) + (EC_{DW} \times X_{DW}) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن EC_{mix} شوری محاسبه شده آب آبیاری پس از اختلاط (دسی زیمنس بر متر)، EC_{IW} و EC_{DW} به ترتیب شوری اندازه گیری شده رودخانه کارون و زهاب تولیدی (دسی زیمنس بر متر)، X_{IW} و X_{DW} به ترتیب درصد اختلاط در نظر گرفته شده رودخانه کارون و زهاب در هر سناریو (درصد) می باشد.

در این پژوهش، مدیریت یکسانی در زمینه آبیاری، کوددهی و سایر عملیات زراعی برای تمامی تیمارها اعمال شد تا اثرات متغیرهای مدیریتی به حداقل برسد؛ بنابراین، تنها متغیر مورد بررسی در این مطالعه، کیفیت آب آبیاری در سناریوهای مختلف اختلاط می باشد. کیفیت و میزان زهاب تولید شده تحت تأثیر راهبردهای مدیریتی شبکه آبیاری قرار دارد، و درصدهای ارائه شده در این پژوهش بسته به اعمال روش های مدیریتی جایگزین و بهینه سازی شده، قابل تغییر هستند. تغییرات نسبی در این پارامترها بر اساس میزان تنش شوری وارد شده به گیاه تخمین زده شد. در نهایت، عملکرد نسبی در هر سناریو با استفاده از معادله (۳) محاسبه گردید.

$$Y_r = 100 - b (EC_e - a) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن a و b به ترتیب آستانه شوری محصول (دسی زیمنس بر متر) و میزان کاهش عملکرد به ازای هر واحد افزایش نمک بالاتر از آستانه شوری هستند و Y_r عملکرد نسبی محاسبه شده در هر سناریو اختلاط (درصد) می باشد. پارامترهای a و b برای محصول نیشکر طبق گزارش FAO 56 (Allen et al., 1998) به ترتیب ۱/۷ و ۵/۹ در نظر گرفته شدند. هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_e) برای لایه های بالایی خاک تحت شرایط موجود و سناریوهای اختلاط، بر اساس معادله (۴) محاسبه شد (Smith & Hancock, 1986).

$$EC_e = EC_{IW} \times \left(\frac{\ln LR}{LR - 1} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن EC_e هدایت الکتریکی عصاره اشباع در لایه های بالایی خاک (دسی زیمنس بر متر) و LR نیاز آبیاری (درصد) می باشد. در این مطالعه نیاز آبیاری با توجه به شرایط موجود کشت و صنعت امیرکبیر برابر با ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است.

شاخص جامع سودآوری آب مصرفی

در این پژوهش، برای تعیین نسبت اختلاط زهاب با آب رودخانه کارون و ارزیابی اقتصادی سیستم بازچرخانی زهاب، شاخص جامع سودآوری آب مصرفی (CPCW) معرفی و به کار گرفته شده است. این شاخص نسبت سود خالص و منافع زیست محیطی حاصل از

بازچرخانی زهاب را به مجموع هزینه‌های تأمین و مدیریت آب (شامل هزینه آب متعارف و دفع زهاب) محاسبه می‌کند. نوآوری CPCW در نظر گرفتن همزمان منافع اقتصادی مستقیم و منافع غیرمستقیم زیست‌محیطی است، برخلاف شاخص‌های سنتی که معمولاً تنها به یک جنبه توجه دارند. همچنین، این شاخص با پوشش هزینه‌های مرتبط با آب و زهاب، دیدگاهی جامع به چرخه بازچرخانی منابع آبی ارائه می‌دهد و برای سیاست‌گذاری در مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی کاربرد دارد. به طور خلاصه، CPCW مفاهیمی چون بهره‌وری اقتصادی آب^۵، شاخص هزینه اثربخشی^۶ و نسبت منافع به هزینه‌های زیست‌محیطی^۷ را تلفیق کرده و ابزاری نوین برای تحلیل یکپارچه فراهم می‌کند. رابطه شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CPCW = \frac{NFB + OC}{IWC + DWC} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن CPCW شاخص جامع سودآوری آب مصرفی (درصد)، NFB سود خالص محاسبه‌شده نیشکر در سناریوهای مختلف اختلاط زهاب بازیافتی (دلار)، OC^۸ هزینه فرصت محاسبه‌شده در هر سناریو اختلاط (دلار)، IWC هزینه محاسبه‌شده آب شیرین مورد استفاده برای آبیاری در هر سناریو (دلار)، DWC^۹ هزینه محاسبه‌شده دفع زهاب تولیدی (دلار) می‌باشد.

نسبت فایده به هزینه (BCR) که نسبت منافع کل به هزینه‌های کل را نشان می‌دهد، پایه نظری شاخص CPCW است (Boardman et al., 2018). بهره‌وری اقتصادی آب به عنوان نسبت سود به حجم آب مصرفی در کشاورزی کاربرد دارد و تحلیل هزینه‌اثربخشی نیز برای ارزیابی گزینه‌های مدیریتی با اهداف زیست‌محیطی و محدودیت‌های اقتصادی استفاده می‌شود (Hanley & Spash, 1996). نوآوری شاخص CPCW در این است که علاوه بر در نظر گرفتن منافع زیست‌محیطی کاهش آلودگی آب از طریق بازچرخانی زهاب، هزینه‌های فرصت اجرای این سیستم را نیز وارد می‌کند. این شاخص به طور همزمان بخش کشاورزی، کیفیت منابع آب، آب شرب و سایر مصرف‌کنندگان آب را در نظر گرفته و می‌تواند با توجه به شرایط هر منطقه به‌سازی شود. این جامع‌نگری، CPCW را به ابزاری کاربردی برای تحلیل و ارزیابی سیستم‌های بازچرخانی زهاب در سطوح مختلف تبدیل می‌کند.

تعریف هزینه فرصت و بررسی سناریوهای جایگزین

در این پژوهش، هزینه فرصت به عنوان درآمد بالقوه از بهینه‌سازی مصرف آب تعریف شده است. به جای تخصیص صرف آب به نیشکر، گزینه‌های جایگزین با بازدهی اقتصادی و زیست‌محیطی بالاتر بررسی شده‌اند، از جمله: (۱) آبیاری محصولات با ارزش‌تر مثل گندم و خرما، (۲) تأمین آب برای مناطق شادگان، آبادان، خرمشهر و روستاهای اطراف، (۳) کاهش هزینه‌های ساخت سدهای سه‌گانه برای کنترل نفوذ آب شور، و (۴) کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از تبخیر و تخلیه زهاب در منابع سطحی.

ارزیابی هزینه دفع زهاب و استانداردهای زیست‌محیطی

هزینه دفع زهاب کشاورزی از دو رویکرد بررسی شده است:

^۵Economic Water Productivity

^۶Cost-effectiveness Analysis

^۷Environmental BCR

^۸Net farmer's benefit

^۹Opportunity Cost

^{۱۰}Irrigation Water Cost

^{۱۱}Drainage Water Disposal Cost

- ردپای آب خاکستری: میزان آب شیرین مورد نیاز برای کاهش آلودگی زهاب تا سطحی استانداردهای زیست محیطی (Hoekstra et al., 2011)
- بیلان آب و شوری: محاسبه میزان آب لازم جهت ترکیب با زهاب برای کنترل سطح شوری پیش از تخلیه به رودخانه کارون. بر اساس رویکرد دوم، (رابطه ۶) بیان می کند که چه مقدار آب باید با زهاب ترکیب شود تا شوری تخلیه شده در حد قابل قبول باقی بماند. سطح شوری قابل قبول برای تخلیه به منابع آب سطحی، معمولاً ۱۰ درصد اضافی از شوری اولیه رودخانه در نظر گرفته می شود.

$$\frac{((Q_{\text{River}} - Q_{\text{abs}}) \times EC_{\text{River}}) + (Q_{\text{Outlet}} \times EC_{\text{Outflow}})}{(Q_{\text{River}} - Q_{\text{abs}}) + Q_{\text{Outlet}}} \leq \frac{(Q_{\text{River}} - Q_{\text{abs}}) \times EC_{\text{Allowable}}}{Q_{\text{River}} - Q_{\text{abs}}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن Q_{River} نرخ جریان رودخانه کارون پیش از برداشت آب توسط ایستگاه پمپاژ امیرکبیر ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، $Q_{\text{Absorption}}$ دبی محاسبه شده برداشت آب کشت و صنعت امیرکبیر از رودخانه کارون ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، Q_{Outflow} دبی زهاب خروجی از کشت و صنعت به رودخانه کارون پس از بازچرخانی ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، EC_{River} شوری اندازه گیری شده رودخانه کارون (dS m^{-1})، $EC_{\text{Allowable}}$ شوری قابل قبول محاسبه شده پس از بازچرخانی (dS m^{-1})، EC_{Outlet} شوری زهاب در خروجی است که در این پژوهش معادل $(EC_{\text{River}} \times 1/1)$ برای تخلیه به منابع آب سطحی (dS m^{-1})، EC_{dw} است (dS m^{-1}) می باشد. بنابراین، با استفاده از شاخص CPCW، میزان سودآوری اقتصادی و تأثیرات زیست محیطی بازچرخانی زهاب به طور همزمان ارزیابی شده است. در نهایت، حجم آب مورد نیاز از رودخانه کارون برای رقیق سازی زهاب تولیدی در هر سناریو بر اساس معیارهای شوری قابل قبول محاسبه گردید.

نتایج و بحث

مدیریت آبیاری

همان طور که گفته شد، نیاز خالص آبیاری نیشکر با نرم افزار Cropwat و خرما و گندم با سامانه ملی نیاز آب محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن راندمان آبیاری، حجم ناخالص آبیاری هر محصول تعیین گردید که در جدول ۴ به تفصیل آمده است. زهاب تولیدی کشت و صنعت امیرکبیر برابر با ۱۶۱۸۲ مترمکعب در هکتار برآورد شد که حجم قابل توجهی است. با توجه به شروع تولید زهاب از نیمه دوم اسفند، محاسبات از اول اسفند تا ۲۱ مهر انجام گرفت. دور آبیاری، حجم و تعداد دفعات آبیاری ماهانه نیز در جدول ۵ آمده که نشان می دهد مجموعاً ۲۳ بار آبیاری در طول دوره کشت صورت گرفته است.

جدول ۴. مقدار حجم خالص و ناخالص آبیاری برای محصولات خاص در منطقه مورد مطالعه

محصول	منطقه	حجم خالص آبیاری (مترمکعب در هکتار)	حجم ناخالص آبیاری (مترمکعب در هکتار)
نیشکر	امیرکبیر	۱۸۹۹۶	۳۵۱۷۸
خرما	آبادان	۱۳۶۴۲	۳۴۷۹۶
گندم	آبادان	۴۹۴۸	۸۹۸۵
خرما	خرمشهر	۱۲۷۳۲	۳۳۱۵۰
گندم	خرمشهر	۴۲۴۷	۷۷۰۸

مدیریت حوضچه بازچرخانی زهاب و استفاده پایدار

با توجه به حساسیت گیاه نیشکر به شوری، در مراحل اولیه رشد (دو آبیاری اول) از اختلاط زهاب با رودخانه کارون صرف نظر شد و از سومین آبیاری به بعد، سناریوهای اختلاط زهاب اعمال گردید. در جدول ۶ عملکرد نسبی محاسبه شده، شوری آب آبیاری پس از

اختلاط و شوری عصاره اشباع خاک در هر یک از سناریوهای اختلاط ارائه شده است. قابل ذکر است که در سناریو شرایط موجود (I_0)، عملکرد نسبی نیشکر به دلیل شوری آب آبیاری ($2/5$ دسی‌زیمنس بر متر) و شوری عصاره اشباع ($3/82$ دسی‌زیمنس بر متر) کمتر از 100% محاسبه شده است؛ در حالی که آستانه تحمل شوری نیشکر طبق گزارش Allen et al. (1998) برابر با $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. با استفاده از تابع تولید، عملکرد محاسبه شده برابر با 88% از عملکرد پتانسیل (با فرض تأمین کامل آب آبیاری از رودخانه کارون بدون اختلاط) به دست آمد (جدول ۶-a). از این رو، عملکرد نسبی 88% به عنوان عملکرد مبنا در نظر گرفته شد و سایر سناریوهای اختلاط نسبت به این عملکرد مقایسه گردید. افزایش تدریجی درصد اختلاط زهاب منجر به کاهش عملکرد به میزان 3% ، 6% ، 9% ، 13% ، 16% و 19% نسبت به سناریو شرایط موجود گردید (جدول ۶-b). نتایج نشان می‌دهد که حتی در صورت استفاده مجدد 60% زهاب بازیافتی، کاهش عملکرد نیشکر در اولین دوره استفاده مجدد (آبیاری سوم) تنها به 19% (کاهش عملکرد نسبی از 84% به 69%) خواهد رسید (جدول ۶-b).

جدول ۵. حجم آبیاری ماهانه، تعداد دفعات آبیاری و فاصله آبیاری برای محصول نیشکر

فصل	دوره آبیاری (روز)	حجم آبیاری (متر مکعب در هکتار)	دفعات آبیاری
۱ اسفند - ۱۹ اسفند	۲۵	۷۸۶	۱
۲۱ اسفند - ۲۰ فروردین	۱۴	۱۰۷۸	۲
۲۱ اردیبهشت - ۲۰ فروردین	۱۲	۱۰۸۹	۳
۲۲ اردیبهشت - ۲۱ خرداد	۷	۱۱۴۴	۴
۲۲ خرداد - ۲۲ تیر	۷	۱۲۲۷	۴
۲۳ تیر - ۲۲ مرداد	۸	۱۱۹۹	۴
۲۳ مرداد - ۲۲ شهریور	۱۰	۱۰۹۰	۳
۲۳ شهریور - ۱۲ مهر	۱۷	۱۰۷۵	۲

علاوه بر این، محاسبات نشان داد که استفاده مستمر از زهاب در آبیاری، حتی با درصدهای اختلاط ثابت، منجر به کاهش تدریجی کیفیت آب آبیاری در دوره‌های بعدی می‌شود. این کاهش کیفیت، به‌ویژه با افزایش شوری زهاب بازچرخانی شده، تأثیر مستقیمی بر عملکرد محصول دارد (جدول ۶-c). برای مثال، اگر در آبیاری چهارم نیز همان درصد اختلاط 60% زهاب استفاده شود، شوری زهاب تولیدی از آبیاری سوم (که برابر با $11/5$ دسی‌زیمنس بر متر است) وارد چرخه آبیاری بعدی می‌شود. در حالی که شوری اولیه زهاب در آبیاری سوم برابر با $6/6$ دسی‌زیمنس بر متر بود، این افزایش تدریجی در شوری منجر به افت چشمگیر عملکرد نسبی نیشکر خواهد شد؛ به‌طوری که عملکرد در آبیاری سوم 69% محاسبه شده، اما در آبیاری چهارم به 39% کاهش یافته است. این روند کاهش عملکرد به دلیل تجمع تدریجی املاح در خاک و افزایش شوری آب آبیاری در صورت تداوم درصد اختلاط، در تمامی مراحل بعدی نیز تکرار می‌شود. برای مقابله با این چالش، به جای افزایش درصد آبیاری که نیازمند مصرف بیشتر آب شیرین است، در این پژوهش از رویکرد تغییر درصد اختلاط زهاب استفاده شد. با اصلاح درصد بازچرخانی زهاب در هر نوبت آبیاری، امکان استفاده پایدار از زهاب بدون افت کیفیت آب آبیاری و عملکرد محصول فراهم شد. نتایج حاصل از این رویکرد نشان داد که تغییرات هدفمند در درصد اختلاط می‌تواند از انباشت نمک در خاک جلوگیری کرده و پایداری سیستم آبیاری را حفظ کند. در نهایت، درصدهای اختلاط اصلاح شده برای استفاده مجدد از زهاب در شش نوبت آبیاری به‌ترتیب برابر با $I_1 (8\%)$ ، $I_2 (13\%)$ ، $I_3 (16\%)$ ، $I_4 (19\%)$ ، $I_5 (22\%)$ و $I_6 (23\%)$ محاسبه شدند. این اصلاحات موجب شد شوری آب آبیاری در محدوده قابل قبول باقی مانده و عملکرد نیشکر در طول دوره آبیاری حفظ شود (جدول ۶-d). همچنین، نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش عملکرد نیشکر ناشی از افزایش درصد زهاب بازیافتی، حجم آب مصرفی از رودخانه کارون به ترتیب به میزان 7% ، 12% ، 16% ، 18% ، 20% و 22% نسبت به سناریوی شرایط موجود کاهش یافته است. این کاهش حجم آب مصرفی به‌ویژه در شرایط بحرانی کمبود آب رودخانه کارون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، محاسبات

نشان داد که حجم زهاب خروجی از کشت و صنعت امیرکبیر برای سناریوهای مورد بررسی به ترتیب ۸٪، ۱۳٪، ۱۶٪، ۱۹٪، ۲۲٪ و ۲۳٪ کاهش یافته است؛ که این کاهش پتانسیل کاهش اثرات منفی ناشی از آلودگی‌های غیرنقطه‌ای بر کشاورزی را داراست. همچنین، نتایج افزایش قابل توجهی در حجم آب شیرین مورد نیاز برای رقیق‌سازی که با پارامتر هزینه دفع (ردپای آب خاکستری) مرتبط است، با افزایش درصد زهاب بازیافتی نشان می‌دهد.

جدول ۶. شوری محاسبه‌شده آب آبیاری و زهاب تولیدی، عصاره اشباع خاک و عملکرد نسبی نیشکر در هر سناریو اختلاط

سناریوهای اختلاط	پارامترهای محاسبه‌شده					
	$X_{Karun\ River} (\%)$	$X_{DW} (\%)$	$EC_{IW} (ds\ m^{-1})$	$EC_e (ds\ m^{-1})$	$EC_{DW} (ds\ m^{-1})$	$Y_r (\%)$
(a) آبیاری اول و دوم (بدون اختلاط)						
I_0	۱۰۰	۰/۰	۲/۵	۳/۸۲	۶/۰	۸۸
(b) رویداد آبیاری سوم						
I_1	۹۰	۱۰	۲/۸	۴/۳۵	۷/۱۲	۸۴
I_2	۸۰	۲۰	۳/۲	۴/۸۹	۸/۰۰	۸۱
I_3	۷۰	۳۰	۳/۵	۵/۴۲	۸/۸۸	۷۸
I_4	۶۰	۴۰	۳/۹	۵/۹۶	۹/۷۵	۷۵
I_5	۵۰	۵۰	۴/۲۵	۶/۴۹	۱۰/۶۳	۷۲
I_6	۴۰	۶۰	۴/۶	۷/۰۰	۱۱/۵۰	۶۹
(c) رویداد آبیاری چهارم با درصدهای اختلاط اولیه						
I_1	۹۰	۱۰	۲/۹۶	۴/۵۲	۷/۴	۸۳
I_2	۸۰	۲۰	۳/۶	۵/۵	۹/۰۰	۷۸
I_3	۷۰	۳۰	۴/۴	۶/۷۴	۱۱/۰۰	۷۰
I_4	۶۰	۴۰	۵/۴۰	۸/۲۵	۱۳/۵۰	۶۱
I_5	۵۰	۵۰	۶/۵۶	۱۰/۰۲	۱۶/۴۰	۵۱
I_6	۴۰	۶۰	۷/۹۰	۱۲/۰۶	۱۹/۸۰	۳۹
(d) رویداد آبیاری چهارم تا ۲۳ با درصدهای اختلاط اصلاح‌شده						
I_1	۹۲	۸	۲/۸	۴/۳۵	۷/۱۳	۸۴
I_2	۸۷	۱۳	۳/۲	۴/۸۹	۸/۰۰	۸۱
I_3	۸۴	۱۶	۳/۵	۵/۴۲	۸/۸۸	۷۸
I_4	۸۱	۱۹	۳/۹	۵/۹۶	۹/۷۵	۷۵
I_5	۷۸	۲۲	۴/۲۵	۶/۴۹	۱۰/۶۳	۷۲
I_6	۷۷	۲۳	۴/۶	۷/۰۰	۱۱/۵۰	۶۹

جدول ۷. مقادیر حجم‌های مختلف محاسبه‌شده در سناریوهای مختلف اختلاط

سناریوهای اختلاط	پارامترهای محاسبه‌شده (واحد: مترمکعب بر هکتار)				
	$V_{consumption}$	V_{reuse}	$V_{saved\ water}$	$V_{outflow}$	$V_{dilution}$
I_0	۳۵۱۷۸	۰	۰	۱۶۱۸۲	۲۱۰۳۶۶
I_1	۳۲۶۵۷	۱۲۲۴	۲۵۲۱	۱۴۹۵۷	۲۶۱۷۵۵
I_2	۳۰۹۳۸	۲۰۵۹	۴۲۳۹	۱۴۱۲۲	۲۹۶۵۷۳
I_3	۲۹۶۹۱	۲۶۶۵	۵۴۸۶	۱۳۵۱۶	۳۳۱۱۶۱
I_4	۲۸۷۴۵	۳۱۲۴	۶۴۳۲	۱۳۰۵۷	۳۶۵۶۰۳
I_5	۲۸۰۰۳	۳۴۸۵	۷۱۷۵	۱۲۶۹۶	۳۹۹۹۴۶
I_6	۲۷۴۰۵	۳۷۷۵	۷۷۷۳	۱۲۴۰۶	۴۳۴۲۱۸

ارزیابی اقتصادی بازچرخانی زهاب

در سناریوی شرایط موجود، میزان تولید نسبی شکر، باگاس و ملاس به ترتیب برابر با ۶۵۰۰، ۱۹۵۰۰ و ۳۲۵۰ کیلوگرم در هکتار محاسبه شده است. این مقادیر برای تمامی سناریوهای اختلاط مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند (جدول ۸). مطابق انتظار، افزایش شوری آب آبیاری به کاهش عملکرد محصولات منجر شده است. همچنین محاسبات اقتصادی ارائه شده در جدول ۹ نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، نخلستان‌های خرما ارزش اقتصادی قابل توجهی نسبت به سایر محصولات ارزیابی شده از خود نشان می‌دهند. به‌ویژه، مصرف آب قابل توجه توسط نیشکر از رودخانه کارون موجب خشکی نخلستان‌های خرما در مناطق پایین دست شده است. در نتیجه، نسبت سود به هزینه کشت خرما حدود ۱/۳۷٪ بیشتر از نیشکر محاسبه شده است.

جدول ۸. عملکرد فراورده‌های نیشکر در سناریوهای مختلف اختلاط در کشت و صنعت امیرکبیر

سناریوهای اختلاط / محصول	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)					
	I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
شکر	۶۵۰۰	۶۲۹۵	۶۰۹۰	۵۸۸۵	۵۶۸۰	۵۴۷۵
باگاس	۱۹۵۰۰	۱۸۸۸۵	۱۸۳۷۰	۱۷۶۵۵	۱۷۰۴۰	۱۶۴۲۵
ملاس	۳۲۵۰	۳۱۴۱	۳۰۴۵	۲۹۴۳	۲۸۴۰	۲۷۳۸

جدول ۹. کل هزینه تولید، قیمت فروش و نسبت سود به هزینه برای محصولات غالب در منطقه مطالعاتی

محصول	هزینه (US\$ ha ⁻¹)	قیمت فروش (US\$ kg ⁻¹)	نسبت درآمد خالص به هزینه
نیشکر	۲۱۴۱	۱/۳۴	۳/۲۲
خرما	۱۸۹۶	۱/۲۸	۴/۵۹
گندم	۴۸۰	۰/۶	۳/۸۵

شاخص جامع سودآوری آب مصرفی

شاخص CPCW به عنوان یک شاخص جامع در نظر گرفته شده که تمامی تأثیرات بالقوه سیستم بازچرخانی زهاب را در منطقه مطالعه ارزیابی می‌کند. پارامتر هزینه آب مصرفی (IWC) در هر سناریو از حاصل ضرب حجم آب برداشت شده از رودخانه کارون (متناسب با درصد اختلاط) در بهره‌وری اقتصادی نیشکر محاسبه شده است. در این پژوهش، ارزش هر مترمکعب آب برابر با بهره‌وری اقتصادی نیشکر در شرایط شرایط موجود ($0.135 \text{ US\$ m}^{-3}$) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که افزایش درصد اختلاط زهاب بازیافتی موجب کاهش هزینه آب مصرفی می‌شود، که یکی از مزایای مهم این سیستم، کاهش برداشت آب و اثرات مثبت آن بر منابع پایین دست محسوب می‌شود (جدول ۱۰). هزینه فرصت (OC) به درآمد بالقوه‌ای اشاره دارد که می‌توان از طریق صرفه‌جویی در مصرف آب و تخصیص آن به مصارف اقتصادی سودآورتر در پایین دست کسب کرد. تعیین ارزش اقتصادی واحد آب برای تأمین آب شهری، مصرف خانگی و حفاظت از جریان رودخانه کارون (جهت بی‌نیازی از ساخت سدهای پرهزینه) چالش برانگیز است. بنابراین، هزینه فرصت در این مطالعه بر اساس ضرب مقدار آب صرفه‌جویی شده در هر سناریو در بهره‌وری اقتصادی آب نخلستان‌های خرما محاسبه شده است. شایان ذکر است که هر یک از این رویکردها می‌تواند در تعیین این پارامتر مد نظر قرار گیرد که پژوهش‌های بیشتری در این رابطه ضروری می‌باشد، گرچه در اینجا تنها تحلیل مختصری از تأثیرات سیستم DWR ارائه شده است. بهره‌وری اقتصادی آب خرما در مناطق آبادان و خرمشهر به ترتیب برابر با $0.275 \text{ US\$ m}^{-3}$ و $0.29 \text{ US\$ m}^{-3}$ محاسبه شد. علاوه بر این، بهره‌وری اقتصادی گندم در این مناطق به ترتیب $0.152 \text{ US\$ m}^{-3}$ و $0.158 \text{ US\$ m}^{-3}$ محاسبه شد. به همین دلیل، بهره‌وری اقتصادی نخلستان‌های خرما در

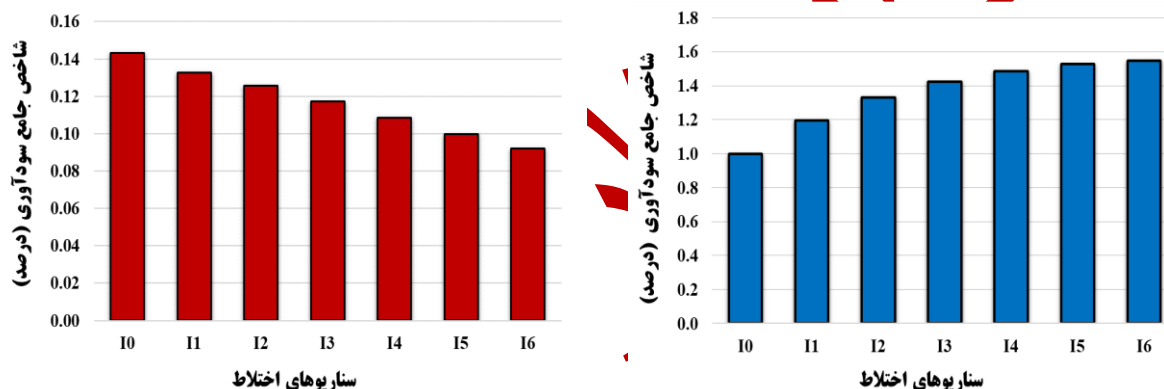
منطقه خرمشهر به دلیل بالاترین ارزش اقتصادی به عنوان شاخص مرجع برای پارامتر هزینه فرصت در این مطالعه انتخاب شد. نتایج نشان داد که بهره‌وری اقتصادی خرما از بهره‌وری محاسبه شده برای نیشکر بیشتر است و اهمیت حفظ و تخصیص آب به منابع پایین دست را تأکید می‌کند. در نهایت، نتایج نشان داد که هزینه فرصت با افزایش درصد زهاب باز یافتی افزایش می‌یابد (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. نتایج پارامترهای مورد ارزیابی در شاخص جامع سودآوری آب مصرفی در سناریوهای مختلف اختلاط (واحد: $\text{US\$ m}^{-3}$)

سناریوهای اختلاط	هزینه برداشت آب کارون	هزینه فرصت	هزینه دفع زهاب (رد پای آب خاکستری)	هزینه دفع زهاب (بیان آب و خودپالایی)
I ₀	۴۷۶۲	۰	۲۸۴۷۶	۰
I ₁	۴۴۳۱	۷۴۳	۳۵۴۳۲	۰
I ₂	۴۱۸۸	۱۲۵۰	۴۰۱۴۵	۰
I ₃	۴۰۱۹	۱۶۱۷	۴۴۸۲۷	۰
I ₄	۳۸۹۱	۱۸۹۶	۴۹۴۸۹	۰
I ₅	۳۷۹۱	۲۱۱۵	۵۴۱۳۸	۰
I ₆	۳۷۱۰	۲۲۹۱	۵۸۷۷۷	۰

درآمد خالص نیشکر (NFB) به عنوان سومین پارامتر ارزیابی شده، تحت تأثیر افزایش شوری آب آبیاری کاهش می‌یابد. در سناریوهای مختلف اختلاط زهاب، درآمد خالص نیشکر از ۴۷۶۲ دلار در هکتار در شرایط موجود (I₀) تا ۳۴۵۵ دلار در هکتار در سناریوی ۲۳٪ اختلاط زهاب (I₆) کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود کاهش درآمد نیشکر در مناطق بالادست، آبیاری نخلستان‌های خرما موجب افزایش قابل توجه درآمد در پایین دست می‌شود. این افزایش از منظر اقتصادی، با جلوگیری از ساخت سدهای پرهزینه، کاهش اثرات زیست محیطی و تأمین آب آشامیدنی برای شهرهایی نظیر اهواز، آبادان و خرمشهر، سودآورتر تلقی می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت شاخص جامع سودآوری در مقیاس کلان تأکید دارند و نشان می‌دهند که ارزیابی اقتصادی باید علاوه بر کاهش درآمد نیشکر، مزایای بالقوه سایر مصارف آب را نیز در نظر بگیرد. همچنین، کاربرد این شاخص در سایر مطالعات بسته به نوع محصول، روش و مدیریت بازچرخانی زهاب، و کیفیت و کمیت زهاب باز یافتی متغیر خواهد بود. دفع زهاب کشت و صنعت نیشکر به حوضچه‌های تبخیر، رودخانه کارون، تالاب شادگان و هورالعظیم انجام می‌شود. در این پژوهش، هزینه‌های مرتبط با دفع زهاب (DWC) به رودخانه کارون بررسی شد. نتایج نشان داد که در رویکرد WF_{Gray}، هزینه دفع زهاب به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این افزایش ناشی از شوری بالاتر زهاب تولیدی (بیش از حد مجاز $2/75 \text{ dS m}^{-1}$) است که نیاز به حجم بیشتری از آب رودخانه برای رقیق سازی و بهبود کیفیت زهاب را ایجاد می‌کند. در مقابل، نتایج رویکرد بیان آب-غلظت نشان داد که با توجه به بیشتر بودن دبی رودخانه کارون نسبت به دبی زهاب خروجی، در این مطالعه فرض بر آن نهاده شده است که رقیق سازی جریان آلاینده در رودخانه به حدی است که منجر به کاهش قابل توجه غلظت آلاینده‌ها و در نتیجه حذف نیاز به پرداخت هزینه‌های دفع یا تصفیه زهاب می‌شود. بر این اساس، هزینه دفع زهاب برابر با صفر در نظر گرفته شده است. با این حال، باید توجه داشت که توان خودپالایی رودخانه تنها به نسبت دبی‌ها وابسته نیست، بلکه عوامل متعدد دیگری همچون ظرفیت اکسیژن محلول، زمان ماند جریان، نرخ تجزیه بیوشیمیایی مواد آلی، نوع و شدت آلودگی، و شرایط زیستی بستر رودخانه در این فرآیند نقش کلیدی دارند (Chapra, 2008). بنابراین، اگرچه در این مطالعه برای ساده سازی تحلیل اقتصادی و براساس شرایط هیدرولوژیکی موجود، هزینه دفع زهاب صفر فرض شده است، اما نتیجه گیری قطعی درباره وجود یا عدم وجود خودپالایی نیازمند انجام مطالعات تفصیلی کیفیت آب و مدل سازی دقیق بیوشیمیایی است (جدول ۱۰).

به‌طور کلی، نتایج محاسبات نشان داد که در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص CPCW دارد و نقش کلیدی در تعیین این پارامتر ایفا می‌کند. این شاخص بینش‌های ارزشمندی ارائه می‌دهد که می‌تواند در ارزیابی پایداری سیستم بازچرخانی زهاب مؤثر باشد. در رویکرد دفع اولیه، به‌دلیل هزینه‌های بالای رقیق‌سازی زهاب، مقدار شاخص کاهش یافت. سناریوی شرایط موجود با مقدار ۰/۱۴۳ بالاترین مقدار شاخص را داشت، در حالی که از سناریو اول تا سناریو ششم به‌ترتیب کاهش‌های ۸٪، ۱۴٪، ۲۲٪، ۳۳٪، ۴۳٪ و ۵۶٪ مشاهده شد (شکل ۵). در مقابل، در رویکرد بیلان آب-غلظت، با افزایش درصد بازچرخانی زهاب، مقدار شاخص افزایش یافت. میزان این افزایش در سناریوهای اول تا چهارم به‌ترتیب ۱۶٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۳۳٪ و در سناریوهای پنجم و ششم ۳۵٪ محاسبه شد (شکل ۵). در این رویکرد، سناریوی ششم با ۲۳٪ اختلاط زهاب، بالاترین مقدار شاخص را نشان داد. بنابراین، این شاخص نشان می‌دهد که استفاده مجدد از زهاب، به‌ویژه در درصدهای بالاتر، سودآوری منطقه را افزایش می‌دهد. در صورتی که زهاب تولیدشده توسط کشت و صنعت امیرکبیر مستقیماً به حوضچه‌های تبخیر هدایت شود، هزینه دفع آن صفر در نظر گرفته می‌شود. باین‌حال، برای به‌آورد دقیق هزینه دفع در حوضچه‌های تبخیر، نیاز به تحلیل‌های جامع‌تری وجود دارد. درنهایت، این شاخص قابلیت گنجاندن طیف گسترده‌ای از پارامترهای مؤثر را دارد و انجام مطالعات تکمیلی جهت بهبود و توسعه آن ضروری است.



شکل ۵. شاخص جامع سودآوری آب مصرفی در دو رویکرد (چپ: نتایج رویکرد پدای آب خاکستری، راست: نتایج رویکرد تعادل آب و غلظت)

به‌منظور تضمین پذیرش گسترده و حفظ رفاه اقتصادی کشاورزان، حداکثر کاهش مجاز عملکرد نیسکر ۱۵٪ تعیین شد. بر این اساس، نسبت معقول اختلاط زهاب بازیافتی ۲۰٪ و آب متعارف منطقه ۸۰٪ محاسبه گردید تا این حد مجاز رعایت شود. مقایسه وضعیت موجود و شرایط پس از اجرای سیستم بازچرخانی زهاب در کشت و صنعت امیرکبیر در جدول ۱۱ ارائه شده است و نشان‌دهنده تأثیرات این سیستم بر بهره‌وری آب و عملکرد محصول می‌باشد.

جدول ۱۱. مقایسه شرایط قبل و بعد از احداث سیستم بازچرخانی زهاب در منطقه مورد مطالعه

پارامتر	واحد	سناریو شرایط موجود (بدون بازچرخانی زهاب)	سناریو نهایی انتخابی (۲۰ درصد بازچرخانی)
شوری آب آبیاری	dS m^{-1}	۲/۵	۴/۱۱
شوری زهاب تولیدی	dS m^{-1}	۶/۰	۱۰/۲۷
حجم آب برداشتی از رودخانه	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	۳۵۱۷۸	۲۸۵۱۵
حجم زهاب تولیدی	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	۱۶۱۸۲	۱۶۱۸۲
حجم زهاب بازیافتی	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	۰	۳۳۳۷
حجم آب صرفه‌جویی‌شده	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	۰	۶۶۶۳
حجم زهاب خروجی از کشت و صنعت	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	۱۶۱۸۲	۱۲۹۴۶

پیامدهای و مزایای سیستم بازچرخانی زهاب

عملکرد گیاه

این پژوهش با هدف بهبود عملکرد محصولات زراعی و ارتقای کیفیت و کمیت آب در سامانه‌های بازچرخانی زهاب انجام شد. نتایج نشان داد که اگرچه اجرای این سیستم ممکن است عملکرد نیشکر را تا حدود ۱۵ درصد کاهش دهد (از ۶۵۰۰۰ به ۵۵۲۵۰ کیلوگرم در هکتار)، اما این کاهش در شرایط واقعی ممکن است کمتر باشد و به عواملی چون مدیریت نامناسب آبیاری، راندمان پایین و آبشویی‌های سنگین بستگی دارد. از سوی دیگر، استفاده مجدد از زهاب می‌تواند با افزایش عملکرد محصولات پایین‌دست مانند گندم و خرما و تخصیص بهینه منابع آبی متعارف، مزایای قابل توجهی به همراه داشته باشد. مطالعات متعددی تأثیر مثبت DWR بر عملکرد محصولات را تأیید کرده‌اند؛ به‌ویژه زمانی که علاوه بر زهاب زیرسطحی، رواناب سطحی و بارندگی نیز در فرآیند ذخیره‌سازی لحاظ شود، کیفیت آب بهبود یافته و آبیاری تکمیلی با این منابع، عملکرد را تثبیت یا افزایش می‌دهد (K. Nelson et al., 2021). در ایالت‌های میسوری و اوهایو، اجرای DWR موجب افزایش چشمگیر عملکرد ذرت (۱۴ تا ۵۰ درصد) و سویا (۷ تا ۲۹ درصد) نسبت به سیستم‌های زهکشی آزاد و بدون زهکشی شد (J. Allred et al., 2014; K. A. Nelson & Smoot, 2012). همچنین مدل‌سازی‌ها نیز مزایای عملکردی این سیستم‌ها را تأیید کرده‌اند (Reinhart et al., 2019). بنابراین، پژوهش حاضر یک کاربرد نوین برای سیستم‌های بازچرخانی زهاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهد. با این حال، باید توجه داشت که نتایج مربوط به شاخص و تغییرات عملکرد محصولات وابسته به شوری آب آبیاری و در نتیجه، شوری زهاب زهکشی‌شده است. این متغیرها حساسیت بالایی به پارامترهای ورودی دارند. علاوه بر این، تغییر نوع محصول می‌تواند به طور قابل توجهی شرایط را تغییر داده و بسته به آستانه تحمل شوری محصول، وضعیت را از کاهش عملکرد به افزایش عملکرد تبدیل کند.

کیفیت و کمیت آب

در این مطالعه، با استفاده از تحلیل‌های بیلان آب، پتانسیل به‌کارگیری سیستم DWR در واحدهای کشت و صنعت نیشکر بررسی شده است؛ هرچند هیچ یک از واحدهای موجود (از جمله امیرکبیر، میرزا کوچک، سلمان فارسی و سایر واحدها) در حالی حاضر به این سامانه مجهز نیستند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که در صورت اجرای این سیستم در چهار واحد جنوبی، پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب رودخانه کارون حدود ۳۳۳ میلیون مترمکعب در یک فصل زراعی خواهد بود که با تعمیم به پنج واحد بالادستی دیگر، این مقدار به حدود ۶۶۶ میلیون مترمکعب می‌رسد. در این تحلیل، نقش مخازن ذخیره‌سازی نیز لحاظ شده که علاوه بر نگهداری زهاب برای آبیاری‌های آتی، منجر به کاهش تخلیه زهاب و کاهش بار آلودگی در پایین‌دست می‌گردد. به‌طور کلی، اجرای DWR در ۱۰ واحد نیشکر، قابلیت بازچرخانی حدود ۳۳۳ میلیون مترمکعب زهاب را طی فصل رشد نیشکر فراهم می‌سازد. این سیستم همچنین می‌تواند موجب بازچرخانی عناصر مغذی مانند نیتروژن و فسفر و کاهش تلفات آن‌ها گردد؛ اگرچه این جنبه در مطالعه حاضر بررسی نشده است. مطالعات پنج‌ساله در انتاریو، کانادا نشان داده‌اند که اجرای سیستم DWR باعث کاهش ۴۱٪ تلفات نیترات و ۱۲٪ تلفات کل فسفر در مقایسه با زهکشی آزاد شده است (Tan & Zhang, 2011; Yang et al., 2007). همچنین، مطالعه مدل‌سازی در آیووا و ایندیانا نشان داد که اجرای سیستم DWR می‌تواند تلفات نیترات را ۲۴ تا ۳۷ درصد و تلفات فسفر محلول را ۲۱ تا ۳۹ درصد کاهش دهد (Reinhart et al., 2019). علاوه بر این، سیستم DWR پتانسیل کاهش بار نیتروژن به میزان ۴۷٪، بار فسفر به میزان ۳۰٪ و بار رسوبات را به میزان چشمگیر ۸۷٪ از اراضی کشاورزی به منابع آب سطحی دارد (Moursi et al., 2023). همچنین، یک مطالعه

مدل‌سازی دیگر نشان داد که شبیه‌سازی سیستم DWR با مدل APEX و بخش اصلاح‌شده مخزن، منجر به کاهش ۶۶٪ در رسوبات، کاهش تلفات نیتروژن به میزان ۲۳٪ برای فرم معدنی و ۷۳٪ برای فرم آلی، و کاهش تلفات فسفر به میزان ۲۲٪ برای فرم محلول و ۷۹ درصد برای فرم انتقال‌یافته توسط رسوبات شده است (Doro et al., 2024). انجام تحقیقات بیشتر برای ارزیابی تأثیر سیستم DWR طراحی‌شده در این مطالعه بر کاهش بار آلودگی ضروری است.

حوضچه‌های تبخیری

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای جلوگیری از تخلیه مستقیم زهاب واحدهای امیرکبیر و میرزا کوچک به رودخانه کارون، زهاب این مزارع به حوضچه‌های تبخیری (EVPs) منتقل می‌شود. گرچه EVPs با هدف کاهش آلاینده‌های سمی طراحی شده‌اند، اما مطالعات متعدد نگرانی‌هایی در خصوص نفوذ عمقی، تبخیر آلاینده‌ها، و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها مطرح کرده‌اند (Amoatey et al., 2021; Izady et al., 2017; Kavvadias et al., 2017). این نگرانی‌ها شامل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، غرقابی شدن اراضی (Izady et al., 2020)، تجمع نمک‌ها و فلزات سنگین مانند بور، آرسنیک و سلیوم (Tanji & Kielen, 2002)، و انتشار آلاینده‌های هوا با اثر بر اکوسیستم و سلامت عمومی می‌شود (ALNabhani et al., 2016; Lyman et al., 2018). با توجه به موقعیت حساس منطقه در مرز با عراق، کاهش اثرات منفی این حوضچه‌ها ضرورتی دوچندان دارد. نتایج این مطالعه نشان داد که با اجرای سیستم DWR، می‌توان حدود ۳۸٪ از زهاب ورودی به این حوضچه‌ها (معادل ۶۴ میلیون مترمکعب) را مجدداً مورد استفاده قرار داد. این مقدار تنها ۲۰ درصد از کل زهاب بازچرخانی‌شده از دو واحد مذکور را تشکیل می‌دهد و بخش زیادی از زهاب همچنان وارد حوضچه‌ها می‌شود. هرچند این کاهش حجم می‌تواند نرخ تبخیر را افزایش داده و منجر به تشدید شوری و تجمع فلزات سنگین گردد. این اثرات بالقوه، نیازمند ارزیابی‌های تکمیلی با استفاده از مدل‌های انتقال جرم، تعادل شیمیایی و تحلیل چرخه عمر هستند. در این مطالعه، هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از افزایش شوری به‌صورت کمی محاسبه نشده اما به‌طور کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، پژوهش‌های آینده باید تأثیر سیستم DWR بر کاهش بار آلودگی و نوسانات شوری حوضچه‌ها، و همچنین امکان استفاده جایگزین از اراضی اشغال‌شده توسط EVPs را ارزیابی کنند.

رودخانه‌های و تالاب‌های طبیعی

پیاده‌سازی سیستم بازچرخانی زهاب کشاورزی، حتی با بازچرخانی تنها ۲۰ درصد از زهاب، موجب افزایش دبی رودخانه کارون به میزان ۱۹ مترمکعب بر ثانیه شده است. بر اساس منابع موجود، در صورتی که دبی رودخانه کارون در شرایط فعلی بین ۵ تا ۱۰ مترمکعب بر ثانیه افزایش یابد، نیازی به ساخت سدهای سه‌گانه به‌منظور جلوگیری از پیشروی آب شور خلیج فارس نخواهد بود. این افزایش دبی می‌تواند در شرایط فعلی، نیاز به احداث سدهای سه‌گانه برای جلوگیری از پیشروی آب شور خلیج فارس را از بین ببرد و امکان جریان طبیعی رودخانه به خلیج فارس را فراهم کند. پیشروی آب شور پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی فراوانی مانند کاهش کیفیت آب شرب در شهرهای آبادان و خرمشهر، رسوب‌گذاری و افت ظرفیت کشتیرانی به همراه دارد. همچنین، ساخت سدهای بزرگ با تغییر در اکوسیستم رودخانه، الگوی جریان آب در پایین‌دست، و احتمال جابجایی جوامع محلی، چالش‌هایی را در توازن بین توسعه و محیط‌زیست به وجود می‌آورد. در این میان، با اجرای سیستم DWR و ذخیره‌سازی ۶۶۶ میلیون مترمکعب آب، می‌توان حدود ۲۵۹۱۷ هکتار نخلستان خرما یا ۷۷۸۳۹ هکتار زمین زیر کشت گندم را آبیاری کرد، که با سطح زیر کشت این محصولات در آبادان و خرمشهر مطابقت دارد و

می‌تواند آن‌ها را از تنش آبی ناشی از خشکسالی مصون دارد. از سوی دیگر، مطالعات متعددی به بررسی تأثیرات زهاب کشاورزی بر تالاب‌های شادگان و هورالعظیم پرداخته‌اند. طی یک دهه اخیر، کاهش ورودی آب شیرین به این تالاب‌ها به دلیل توسعه طرح‌های آبیاری در بالادست، منجر به برهم خوردن تعادل اکولوژیکی و تهدید معیشت جوامع محلی شده است (Almasi et al., 2020). اگرچه بخشی از نیاز آبی تالاب‌ها با زهاب کشاورزی تأمین شده، اما کیفیت پایین این آب‌ها موجب افزایش شوری، سیلاب‌های فصلی، بادهای نمک‌دار و آسیب‌های اقتصادی و زیست‌محیطی گردیده است (Mohamadi et al., 2019). در این میان، استفاده از علف‌کش آترازین در مزارع نیشکر نیز به آلودگی قابل‌توجهی دامن زده و در فصل تابستان، غلظت این سم از حد استاندارد فراتر رفته است (Almasi et al., 2020). همچنین شوری آب در تابستان به‌طور میانگین از ۱۷/۷ به ۵۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافته و مواد معلق، یون‌های فسفات، TSS و TDS نیز روند صعودی نشان داده‌اند (Koochekzadeh et al., 2019). ارزیابی‌های کیفی در ده ایستگاه پایش در هورالعظیم نشان داده‌اند که کشاورزی اصلی‌ترین منبع آلودگی این تالاب‌ها است (Chambari et al., 2008). در این راستا، اجرای سیستم DWR و انحراف زهاب از مسیر رودخانه کارون، به‌عنوان راهکاری مؤثر جهت بهبود کیفیت آب تالاب‌های شادگان و هورالعظیم، می‌تواند از روند یوتروفیکاسیون این اکوسیستم‌ها جلوگیری کند. این اقدام شامل کاهش ۹۷ میلیون مترمکعب زهاب و تخصیص ۱۹۹ میلیون مترمکعب آب از رودخانه کارون برای شادگان است. همچنین با اجرای این سیستم در واحد کشت و صنعت دهخدا، ۶۷ میلیون مترمکعب آب متعارف ذخیره شد که می‌توان آن را برای تأمین نیاز آبی تالاب هورالعظیم به‌کار گرفت. با این حال، تحقق کامل این طرح نیازمند زیرساخت‌های لازم برای جمع‌آوری و انتقال زهاب، هماهنگی میان نهادهای مرتبط، دسترسی به اطلاعات دقیق هیدرولوژیکی و کیفی، و مشارکت فعال بهره‌برداران محلی است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعه حاضر به بررسی کارایی سیستم بازچرخانی زهاب (DWR) از منظر صرفه‌جویی در مصرف آب، بهبود کیفیت منابع آبی، و مزایای اقتصادی در یک منطقه خشک می‌پردازد. در این راستا، شاخصی تحت عنوان سودآوری جامع آب مصرفی معرفی شد که ضمن ارزیابی بهره‌وری اقتصادی آب، هزینه فرصت استفاده‌های جایگزین از آب ذخیره‌شده را نیز در نظر می‌گیرد. در سناریوی مطلوب بازچرخانی، اختلاط ۲۰ درصدی زهاب منجر به صرفه‌جویی ۶۷ میلیون مترمکعب آب و بازچرخانی ۳۲ میلیون مترمکعب زهاب در کشت و صنعت امیرکبیر شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم بازچرخانی زهاب یک راهکار نوین و مؤثر در حفظ منابع آبی استان خوزستان محسوب می‌شود. این روش نه تنها باعث کاهش مخاطرات کمبود آب برای تولیدات کشاورزی می‌شود، بلکه در کاهش بار آلودگی منابع پذیرنده نیز تأثیر قابل‌توجهی دارد. همچنین، تحلیل شاخص سودآوری جامع، توجه اقتصادی بازچرخانی را اثبات کرده و نشان داد که عوامل مختلفی همچون نوع محصول، اقلیم، کیفیت زهاب، دسترسی به آب متعارف، و نحوه بهره‌برداری بر کارایی آن تأثیر دارند. علاوه بر این، یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی در مقیاس منطقه‌ای به‌جای تحلیل‌های محدود در سطح مزرعه تأکید دارند؛ لذا، برای بهینه‌سازی شاخص سودآوری جامع آب مصرفی در سیستم‌های بازچرخانی زهاب، انجام مطالعات تکمیلی جهت ارزیابی مزایای اقتصادی منطقه‌ای در مواجهه با تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های آتی، بهینه‌سازی ظرفیت مخازن ذخیره زهاب بر اساس بیلان آبی، و تعیین درصد بهینه بازچرخانی زهاب ضروری خواهد بود. همچنین، برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود مدل‌سازی شرایط بازچرخانی زهاب به‌عنوان آبیاری تکمیلی و تحلیل کیفیت زهاب تولیدی تحت سناریوهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار DRAINMOD مورد بررسی قرار گیرد، زیرا این رویکرد می‌تواند در بهینه‌سازی مدیریت آب و ارتقای بهره‌وری کشاورزی مؤثر باشد.

- AB Khak Tehran Consulting Engineers. (2019). *Revising the studies of the pumping station and the main channel of Kausar*.
- Akram, M., Azari, A., Nahvi, A., Bakhtiari, Z., & Safaei, H. (2013). Subsurface drainage in khuzestan, iran: Environmentally revisited criteria. *Irrigation and Drainage*, 62. <https://doi.org/10.1002/ird.1774>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56, 26–40.
- Almasi, H., Takdastan, A., Jaafarzadeh, N., Babaei, A. A., Tahmasebi Birgani, Y., Cheraghian, B., Saki, A., & Jorfi, S. (2020). Spatial distribution, ecological and health risk assessment and source identification of atrazine in Shadegan international wetland, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111569.
- ALNabhani, K., Khan, F., & Yang, M. (2016). Scenario-based risk assessment of TENORM waste disposal options in oil and gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 55–66.
- Amoatey, P., Izady, A., Al-Maktoumi, A., Chen, M., Al-Harthy, I., Al-Jabri, K., Msagati, T. A. M., Nkambule, T. T. I., & Baawain, M. S. (2021). A critical review of environmental and public health impacts from the activities of evaporation ponds. *Science of The Total Environment*, 796, 149065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149065>
- Badrzadeh, N., Samani, J. M. V., Mazaheri, M., & Kuriqi, A. (2022). Evaluation of management practices on agricultural nonpoint source pollution discharges into the rivers under climate change effects. *Science of The Total Environment*, 838, 156643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156643>
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* (5th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI: 10.1017/9781108235594>
- Chambari, S., Bagher, S. M., Jafarzadeh Haghghi, N., & Khoshnod, R. (2008). Determination of Water Quality Pollution of Hoor al-Azim Wetland Based on Water Quality Parameters. *Determination of Water Quality Pollution of Hoor Al-Azim Wetland Based on Water Quality Parameters*, 1–9. <https://civilica.com/doc/37162>
- Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
- Doro, L., Wang, X., & Jeong, J. (2024). Simulating Agricultural Water Recycling Using the APEX Model. *Environments*, 11(11), 244.
- E, D. E. M. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *Meteorologie*, 2, 449–459. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105976088402816>
- Frankenberger, J., Reinhart, B., Nelson, K., Bowling, L., Hay, C., Youssef, M., Strock, J., Jia, X., Helmers, M., & Allred, B. (2017). *Questions and Answers about Drainage Water Recycling for the Midwest*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33619.78883>
- Hanley, N., & Spash, C. (1996). *Cost benefit analysis and the environment*.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. *Daugherty Water for Food Global Institute: Faculty Publications*. <https://digitalcommons.unl.edu/wffdocs/77>
- Izady, A., Nikoo, M. R., Bakhtiari, P. H., Baawain, M. S., Al-Mamari, H., Msagati, T. A. M., Nkambule, T. T. I., Al-Maktoumi, A., Chen, M., & Prigent, S. (2020). Risk-based Stochastic Optimization of Evaporation Ponds as a Cost-Effective and Environmentally-Friendly Solution for the Disposal of Oil-Produced Water. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101607. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101607>
- Izady, A., Sanikhani, H., Abdalla, O., Chen, M., & Kisi, O. (2017). Impurity effect on clear water evaporation: toward modelling wastewater evaporation using ANN, ANFIS-SC and GEP techniques. *Hydrological Sciences Journal*, 62(11), 1856–1866. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1356023>
- J. Allred, B., L. Gamble, D., B. Clevenger, W., A. LaBarge, G., L. Prill, G., J. Czartoski, B., R. Fausey, N., & C. Brown, L. (2014). Crop Yield Summary for Three Wetland Reservoir Subirrigation Systems in Northwest Ohio. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(6), 889–903. <https://doi.org/10.13031/aea.30.10501>
- Kaur, H., Nelson, K. A., Singh, G., Veum, K. S., Davis, M. P., Udawatta, R. P., & Kaur, G. (2023). Drainage water management impacts soil properties in floodplain soils in the midwestern, USA. *Agricultural Water Management*, 279, 108193. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108193>
- Kavvadias, V., Elaipoulos, K., Theocharopoulos, S., & Soupios, P. (2017). Fate of Potential Contaminants Due to Disposal of Olive Mill Wastewaters in Unprotected Evaporation Ponds. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 98(3), 323–330. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1922-4>
- Khairy, S., Shaban, M., Negm, A. M., Eldeen, O. W., & Ramadan, E. M. (2022). Drainage water reuse strategies: Case of El-Bats drain, Fayoum Governorate, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101681.
- Koochekzadeh, A., Hoveizeh, H., & Yazdipour, A. (2019). The Effect of Waste Water of Sugarcane Farms during

- Growing Season on the Water Quality of Shadegan Lagoon. *Journal of Water and Soil Science*, 22, 291–299.
- Lyman, S. N., Mansfield, M. L., Tran, H. N. Q., Evans, J. D., Jones, C., O'Neil, T., Bowers, R., Smith, A., & Keslar, C. (2018). Emissions of organic compounds from produced water ponds I: Characteristics and speciation. *Science of The Total Environment*, 619–620, 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.161>
- MasoomiBalsi, M., Kosari, S., Parsinejad, M., Yazdani, M., & Navabian, M. (2024). Removal or reduction of nitrogen and phosphorous pollutants from paddy fields drainage water in vegetated drainage ditches. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375972.669702>
- Mehri, A., Mohammadi, A. S., Ebrahimian, H., & Boroomandnasab, S. (2023). Evaluation and optimization of surge and alternate furrow irrigation performance in maize fields using the WinSRFR software. *Agricultural Water Management*, 276, 108052. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108052>
- Mitchell, M. E., Newcomer-Johnson, T., Christensen, J., Crumpton, W., Dyson, B., Canfield, T. J., Helmers, M., & Forshay, K. J. (2023). A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural systems in the United States Corn Belt Region. *Journal of Environmental Management*, 348, 119220.
- Mohamadi, M., choobkar, nasrin, Rezaie manesh, M., & Kakoolki, S. (2019). Rehabilitation of Shadegan Lagoon, Aquaculture Opportunity and Dust Inhibiting with Khuzestan Sugarcane Industry Drainage. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 7(4), 29–40. <https://doi.org/10.22069/japu.2019.15109.1442>
- Mokhtaran, A., Sepehri, S., Gilani, A. A., Ebadi, A. A., & Jalali, S. (2023). Improving Rice Production Sustainability by Planting Salinity-Tolerant Rice Cultivars and Reusing Agricultural Drainage Water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(4), 04023002. <https://doi.org/10.1061/JIEDHIRENG-9898>
- Mokhtaran, A., Tavoosi, M., Varjavand, P., & Sepehri Sadeghian, S. (2020). Investigation of the Effects of Sugarcane Drainage Water for Quinoa Cultivation in Southern Khuzestan on Crop Yield and Soil Salinity and Sodictiy Changes. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(3), 337–354.
- Moursi, H., Youssef, M. A., & Chescheir, G. M. (2022). Development and application of DRAINMOD model for simulating crop yield and water conservation benefits of drainage water recycling. *Agricultural Water Management*, 266, 107592. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107592>
- Moursi, H., Youssef, M. A., & Poole, C. (2024). The Effect of Drainage and Subirrigation From a Small Drainage Water Recycling Reservoir on Corn and Soybean Yields in Eastern North Carolina. *Journal of the ASABE*, 67(1), 13–25. <https://doi.org/10.13031/ja.15536>
- Moursi, H., Youssef, M. A., Poole, C. A., Castro-Bolinaga, C. E., Chescheir, G. M., & Richardson, R. J. (2023). Drainage water recycling reduced nitrogen, phosphorus, and sediment losses from a drained agricultural field in eastern North Carolina, U.S.A. *Agricultural Water Management*, 279, 108179.
- Nelson, K. A., & Smoot, R. L. (2012). Corn Hybrid Response to Water Management Practices on Claypan Soil. *International Journal of Agronomy*, 2012, 925408. <https://doi.org/10.1155/2012/925408>
- Nelson, K., Kjaersgaard, J., Reinhart, B., Frankenberger, J., Willison, R., Gunn, K., Lee, C., Abendroth, L., Bowling, L., & Niaghi, A. R. (2021). *Corn Yield Response to Drainage Water Recycling using Subirrigation*.
- Rasouli, M. M., Valipour, E., & Ketabchi, H. (2023). Groundwater Resources Withdrawal and Depletion Estimation Methods (Part 2: An Overview of the World and Iran Condition). *Water and Irrigation Management*, 13(2), 407–427.
- Reinhart, B., Frankenberger, J., Abendroth, L., Ahiablame, L., Bowling, L., Brown, L., Helmers, M., Jaynes, D. B., Jia, X., Kladvik, E., Nelson, K., Strock, J., Youssef, M., & Mn. (2016). *Drainage Water Storage for Improved Resiliency and Environmental Performance of Agricultural Landscapes*.
- Reinhart, B., Frankenberger, J., Hay, C., & Helmers, M. (2019). Simulated water quality and irrigation benefits from drainage water recycling at two tile-drained sites in the U.S. Midwest. *Agricultural Water Management*, 223, 105699. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105699>
- Sheini Dashtgol. (2020). *Principles of Applied Water Management in Sugarcane*. Sugarcane Development and By-Products Industries Research and Training Institute of Khuzestan.
- Skaggs, R. W., Brevé, M. A., & Gilliam, J. W. (1994). Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24(1), 1–32.
- Smith, R. J., & Hancock, N. H. (1986). Leaching requirement of irrigated soils. *Agricultural Water Management*, 11(1), 13–22. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(86\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(86)90032-6)
- Tan, C. S., & Zhang, T. Q. (2011). Surface runoff and sub-surface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(3), 349–359. <https://doi.org/10.4141/cjss09086>
- Tanji, K. K., & Kielen, N. C. (2002). Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas. *FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129929404>
- Turk, A. (2001). *Driving Force by Kpile Method and Pile Loading Test, Concrete Piles*.

Yang, C.-C., Prasher, S. O., Wang, S., Kim, S. H., Tan, C. S., Drury, C., & Patel, R. M. (2007). Simulation of nitrate-N movement in southern Ontario, Canada with DRAINMOD-N. *Agricultural Water Management*, 87(3), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.009>

فیلر استثنای نشده