



Study of the ways and methods of reducing non-revenue water

Seyed Saeid Taghavian¹, Mohsen Najarchi^{2✉}, Mohammad Mahdi Najafizadeh³,
Sayed Yaghoob Zolfegharifar⁴, and Saeid Shabanlou⁵

1. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: saeid.taghaviyan67@yahoo.com
2. Corresponding author Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: najarchi@iauarak.ac
3. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: iranajafizadeh@iauarak.ac.ir
4. Department of Civil Engineering, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran. Email: soojilraynzolfeghary@gmail.com
5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: saeid.shabanlou@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Objective: The main objective of this research is to study and examine the approaches for reducing non-revenue water.

Article history:
Received 07 February 2025
Received in revised form 07 May 2025
Accepted 04 September 2025
Available online 21 March 2026

Method: This study adopted a systematic approach to identify and evaluate reducing non-revenue water. Eleven potential strategies were identified, and method was used to prioritize them. Results showed that leakage management and connections including active and inactive control, continuous monitoring, and pipe repair as the highest priority. This methodology provides framework to focus on the most effective interventions.

Keywords:
water distribution network
non-revenue water,
network analysis,
Vicor,
Aras,
Copeland method

Results: The analysis revealed that pipeline and connection leakages are significant contributors to non-revenue water. The prioritization using the C method showed that leakage management includes inactive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, and pipe repair were ranked highest among all identified strategies. Other strategies, such as pump control to prevent water hammer and pressure waves, the use of reduce physical damage, and the recording of all information related properties, connections, meters, and subsequent changes in customer assigned equal priority. These strategies were ranked lower compared to management measures.

Conclusions: This study evaluated strategies to reduce non-revenue water, highlighting leakage from pipelines and connections as the primary cause. Effective management including active and inactive control, continuous inspection, and pipe repair is essential, while other measures such as pump control, flex and data management offer supportive benefits. Prioritizing targeted leakage management is the most effective approach for reducing water loss and improving operational efficiency.

Cite this article: Taghavian S.S., Najarchi M., Najafizadeh M.M., Zolfegharifar S.Y., & Shabanlou S. (2025) Study of the ways and methods of reducing non-revenue water. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(1), 1-24
<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11769.1156>



Introduction

Non-revenue water is the difference between the net volume of water that enters the network and is consumed. In recent years, the severe shortage of resources and the increase in water production costs have caused the issue of water loss to be considered. Based on this, identifying the ways and means of reducing non-revenue water has double importance. In this regard, the aim of this research was to identify and prioritize the solutions

Method

In this research, based on the main objective of the research, which is to study and investigate the ways and methods of reducing non-revenue water, 11 potential solutions include entering all the information related to the subscriber, owners and contacting and any subsequent changes in the subscriber file, renewal and replacement of materials with new and high quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, connecting and disconnecting valve and one-way valve), planning for regular and permanent reading of subscribers' contour quality of readers, subscribers' contour reading routes and quality control of the read stations, leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair), use of higher precision meters (class meter C instead of class B meter), periodical testing of shared meters, adjustment and uniformity of distribution network pressure in the range of 3 to 5 atmospheres, flexible and rigid connections to reduce physical damage, careful monitoring of contracts and installation of pipes in underground, the use of pressure relief valves (PRV) to reduce the possibility of leakage and pump control to prevent the phenomenon of water hammer. The pressure waves have been identified

Results

After identifying potential non-revenue water reduction solutions, these identified solutions were ranked using multicriteria decision-making techniques (network process analysis method, Vicor method and Aras method) and finally the results obtained were prioritized using the Copeland method. Based on network analysis technique, leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair) and higher precision meters (class C meter instead of class B meter) had the highest priority among other options and the pressure relief valves (PRV) had the third priority. Based on Vicor technique, periodical testing of subscription meters, careful monitoring of contracts and installation of underground pipes had the highest priority among other options, and the solution of periodical renovation and replacement of poor quality materials with new and high quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, connecting and disconnecting valve and one-way valve) had the third priority. Also, based on the Aras phase technique, the leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair) and periodical renovation and replacement of poor quality materials with new and high quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, disconnecting and connecting valve and one-way valve) had the first and second priority among other options, and the solution of careful monitoring of contracts and installation of pipes in underground had the third priority

Conclusions

Finally, the results of the final prioritization with Copeland method showed that measures related to leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement) have a higher priority than other solutions. In other words, it can be stated that the leakage from pipe connections is the most important factor in the occurrence of water revenue loss and since water leakage will happen in any case, the necessary monitoring and dealing with it is the most important solution in reducing revenue water. Also, pump control solutions to prevent the phenomenon of water hammer and pressure waves, the use of flexible connections to reduce physical damage and include information related to the subscriber, property, branching and contour and subsequent changes in the subscriber file had the same priorities and had a higher priority than other solutions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

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

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش آب بدون درآمد

سید سعید تقویان^۱، محسن نجارچی^۲، محمدمهدی نجفی زاده^۳، سید یعقوب ذوالفقاری فر^۴، و سعید شعبانلو^۵

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. saeed.taghaviyan67@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. m-najarchi@iauarak.ac.ir
۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. m-najafizadeh@iauarak.ac.ir
۴. گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران. syzoalfeghary@gmail.com
۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. saeid.shabanlou@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف اصلی این مطالعه بررسی و شناسایی روش‌ها و راهکارهای کاهش آب بدون درآمد است. روش پژوهش: در این پژوهش، ابتدا با مرور و تحلیل جامع، ۱۱ راهکار بالقوه برای کاهش آب بدون درآمد شناسایی شد. برای ارزیابی و اولویت‌بندی این راهکارها، از روش کپلند استفاده شد که امکان مقایسه ساختاریافته بر اساس اثرگذاری، قابلیت اجرا و اهمیت هر راهکار را فراهم می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹	یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدیریت نشت در لوله‌ها و اتصالات شامل کنترل نشت فعال و غیرفعال، بازرسی مستمر، پایش نشت و تعمیر یا تعویض لوله‌ها در اولویت بالاتری نسبت به سایر راهکارها قرار دارد. سایر راهکارها مانند کنترل پمپ برای جلوگیری از پدیده ضربه قوچ، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و ثبت اطلاعات جامع مشترکین تأثیر کمتری بر کاهش آب بدون درآمد دارند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳	نتیجه‌گیری: یافته‌ها تأکید می‌کنند که نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل آب بدون درآمد است و اولویت اصلی در کاهش این هدررفت، مدیریت هدفمند نشت شامل کنترل، پایش و تعمیر لوله‌ها است. سایر اقدامات حمایتی می‌توانند کارایی سیستم را افزایش دهند، اما تأثیر فوری کمتری دارند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱	
کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع آب، آب بدون درآمد، تحلیل شبکه، ویکور، آراس، روش کپلند.	

استناد: تقویان، سید سعید؛ نجارچی، محسن؛ نجفی زاده، محمدمهدی؛ ذوالفقاری فر، یعقوب؛ و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۵). مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش

آب بدون درآمد. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۱)، ۲۴-۱.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11769.1156>



مقدمه

کشور ایران با متوسط بارش سالانه حدود ۲۴۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در زمره مناطقی از جهان است که از موهبت نزولات جوی به‌اندازه کافی بهره‌مند نمی‌باشد (قهرمانی و همکاران، ۱۴۰۱). قسمت عمده مساحت کشور را مناطق خشک و کم آب فراگرفته و لذا از دیرباز آب نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه اقتصادی آن داشته است (قصابی و فتاحی، ۱۴۰۰). نظر به اینکه در گذشته آب به قیمت ارزان و به‌آسانی در دسترس بوده، لذا دستگاه‌های مسئول توزیع آب شهری تا قبل از تشکیل شرکت‌های آب‌وفاضلاب نسبت به کاهش آب بدون درآمد به‌عنوان راه‌حلی برای صرفه‌جویی در منابع آب، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش بازده یا درآمد، توجه کافی نداشته‌اند. در سال‌های اخیر کمبود شدید منابع و افزایش سریع هزینه‌های تولید آب باعث شده که موضوع آب بدون درآمد مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در کنار تأمین آب از منابع جدید باید از هدررفتن آب در مراحل مختلف انتقال، تصفیه، ذخیره و توزیع به‌عنوان یک فعالیت درازمدت و با برنامه‌ریزی مدون جلوگیری کرد (چاویرا و همکاران ۱، ۲۰۲۲).

در طراحی شبکه‌های آب‌رسانی شهری کمیته تحت عنوان آب به‌حساب نیامده (UFW) در محاسبات وارد می‌شود. نشت در شبکه‌های آب‌رسانی شهری یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های آب به‌حساب نیامده بشمار می‌رود. با توجه به محدودیت‌های موجود در تأمین آب مصرفی و هزینه بالای نگهداری سیستم‌ها و منابع آب، می‌توان با بهره‌برداری اصولی و علمی از منابع آب موجود و همچنین جلوگیری از هدررفت آب، نیازها و کمبودهای آبی را به نحوه صحیحی مدیریت کرد. کاهش میزان نشت در سیستم‌های آب‌رسانی را می‌توان یکی از اهداف عمده سازمان‌های تأمین و توزیع آب تصفیه شده به شمار آورد (گوپتا و کولات ۲، ۲۰۱۸). میزان نشت آب در سیستم‌های توزیع آب به طور گسترده‌ای بین کشورها، مناطق و سیستم‌های مختلف، از ۳ تا ۷ درصد در سیستم‌های تحت نظارت در هلند و تا ۵۰ درصد در برخی از کشورهای توسعه‌نیافته یا سیستم‌هایی که کمتر سرویس شده‌اند، متفاوت است (بیوکن و همکاران ۳، ۲۰۰۸). وقوع نشت در شبکه آب باعث توزیع ناهمسان فشار و ناکارآمد انرژی در شبکه و در نتیجه اتلاف انرژی مورد استفاده جهت تأمین آب می‌گردد (پووست و همکاران ۴، ۲۰۱۰).

کاهش مقدار آب بدون درآمد دارای مزایای زیادی است که برخی از آن‌ها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد (لیمبرگر و ویات ۵، ۲۰۱۹؛ ساباله و همکاران ۶، ۲۰۲۳؛ و بزکورت و همکاران ۷، ۲۰۲۲).

- کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای ساخت تأسیسات منابع آب جدید و توسعه سامانه‌های آب‌رسانی
- بالا بردن عمر تأسیسات آب از جمله تجهیزات تصفیه آب، پمپاژ و ...
- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری
- کاهش امکان ورود آلودگی از محل‌های نشت لوله‌ها
- افزایش بازده و کارایی شرکت‌های آب‌وفاضلاب در بخش‌های فنی و مهندسی، بهره‌برداری، مشترکین و ...
- بالا بردن درآمد شرکت‌های آب‌وفاضلاب
- جلب رضایت مشترکین

در چند دهه اخیر مجامع بین‌المللی و کشورهای پیشرفته توجه خاصی به مسئله محدودیت منابع آب و یافتن راه‌حلی در زمینه مقابله با کمبود آب به‌ویژه جلوگیری از تلفات آب معطوف داشته‌اند. موضوع آب بدون درآمد و نشت در سامانه‌های آب‌رسانی و شبکه‌های توزیع آب شهری از مواردی است که در سه دهه اخیر در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته و با برنامه‌ریزی

مدون علمی، تجارب خوبی نیز در خصوص مباحث نظری و موارد اجرایی کاهش آن، حاصل گردیده است (رحمان و همکاران^۱، ۲۰۲۲؛ هوو و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ و استفلباتور و همکاران^۳، ۲۰۲۲).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

طبق پژوهش‌های انجام‌گرفته چندین عامل مختلف در وقوع نشت یا آب بدون درآمد در سیستم توزیع آب دخیل هستند که در میان آن‌ها عمق قرارگیری لوله‌ها، قطر و همچنین طول عمر لوله‌ها، و از همه مهم‌تر فشار دارای نقش کلیدی‌تر هستند؛ لذا دیگر عوامل قابل‌چشم‌پوشی هستند. به عبارتی در بسیاری از پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه نشت‌یابی شبکه‌های آب‌رسانی و مطالعه شبکه تنها عامل فشار در نظر گرفته شده است (مجیدی خلیل‌آباد و همکاران^۴، ۲۰۱۸؛ و فانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۹). در زمینه آب بدون درآمد و کاهش مقدار آن پژوهش‌های گسترده‌ای صورت‌گرفته است که از میان آنها می‌توان به تحقیقاتی نظیر فارلی و لیمبرجر^۶ (۲۰۰۵) در رابطه با برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی‌های کاهش آب بدون درآمد اشاره کرد. لیمبرجر و مارینم^۷ (۲۰۰۶) به بررسی چالش کاهش آب بدون درآمد در کشورهای درحال توسعه با تمرکز بر نقش بخش خصوصی پرداختند.

ورمرسچ و ریزو^۸ (۲۰۰۸) طراحی برنامه عملیاتی برای کنترل آب غیر درآمدی را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر موارد فوق می‌توان به مطالعاتی چون اولویت‌بندی استراتژی‌های مؤثر برای ارزیابی اولیه آب بدون درآمد (لیمبرجر، ۲۰۱۰)، بررسی وضعیت آب بدون درآمد در کشورهای مختلف (مک کنزی و همکاران^۹، ۲۰۱۲)، بررسی و امکان‌سنجی کاهش آب بدون درآمد از طریق مدیریت فشار در شبکه توزیع آب (کاناکودیس و گودلاس^{۱۰}، ۲۰۱۶)، اشاره کرد. برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه شناسایی و کاهش آب بدون درآمد و مدیریت نشت از شبکه‌ها با استفاده از مدل‌سازی و ابزار DSS و یا بهره‌گیری از ابزارهای دیجیتال و روش‌های میدانی انجام‌گرفته است (گونگور - دمیرسی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸؛ سیسمان و کیزیلوز^{۱۲}، ۲۰۲۰؛ لایی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۰؛ فاروک و همکاران^{۱۴}، ۲۰۲۱؛ کاسیدی و همکاران^{۱۵}، ۲۰۲۱؛ و چاویرا و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۲).

با استفاده از روش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی یکی دیگر از راهکارهای دیگر مورد استفاده برای برآورد آب بدون درآمد باهدف مدیریت پایدار در شبکه‌های آب‌رسانی شهری است (تابش و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۸؛ سیسمان و کیزیلوز، ۲۰۲۰؛ ناسارا و همکاران^{۱۸}، ۲۰۲۱؛ و چاویرا و همکاران، ۲۰۲۲).

در برخی از تحقیقات استفاده از مدل‌های هیبریدی با ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های هوش مصنوعی مختلف برای نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب باعث افزایش دقت در پیش‌بینی مقدار و محل نشت در این شبکه‌ها شده است (الویسی و

1. Rahman et al
2. Hu et al
3. Steffelbauer et al
4. Majidi Khalilabad et al
5. Fang et al
6. Farley & Liemberger
7. Liemberger & Marinm
8. Vermersch & Rizzo
9. McKenzie et al
10. Kanakoudis & Gonelas
11. Güngör-Demirci et al
12. Şişman & Kızılöz
13. Lai et al
14. Farouk et al
15. Cassidy et al
16. Chawira et al
17. Tabesh et al
18. Nasara et al

فرانچینی^۱، ۲۰۰۹؛ جین و ژوو^۲، ۲۰۱۴؛ لیجوان و همکاران^۳، ۲۰۱۲؛ و شکفته و همکاران^۴، ۲۰۲۰). یکی از روش های پرکاربرد در زمینه تخمین میزان و محل نشت که به دلیل ساختار چندلایه خود و همچنین امکان اتصال آن به الگوریتم های فرا کاوشی در مقایسه با سایر روش های هوش مصنوعی همواره دارای دقت مناسبی بوده است روش MLP است (جانگ و چویی^۵، ۲۰۱۷؛ شراوانی و همکاران^۶، ۲۰۱۹؛ روجک و استودزینسکی^۷، ۲۰۱۹؛ پرز و همکاران^۸، ۲۰۲۰؛ و فلاحی و همکاران^۹، ۲۰۲۱).

خوشبختانه این امر مهم بیش از یک دهه است که در کشور ایران نیز مورد توجه قرار گرفته و ابتدا در قالب طرح ملی تحقیق، توسعه و بهسازی تأسیسات توزیع آب شهری در طول برنامه دوم توسعه و سپس به وسیله دفاتر نظارت بر کاهش آب بدون درآمد در شرکت های آب و فاضلاب کشور به امر مطالعه و کاهش تلفات آب بدون درآمد پرداخته شده است. براین اساس به کارگیری روش هایی که متضمن پیشگیری از هدررفت و میزان تلفات آب باشد ضرورت دارد. برای ایجاد وحدت رویه در مطالعات آب بدون درآمد و هدایت مطالعات و عملیات اجرایی تا وصول به اهداف نهایی، در این تحقیق علاوه بر تعریف اجزای آب بدون درآمد، روش هایی به منظور شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب بدون درآمد و راهکارهای کاهش آن ارائه شده است. براین اساس اهداف این تحقیق شامل بررسی روش های مختلف تلفات آب در شبکه آبرسانی و انتخاب بهترین روش جهت برآورد دقیق تلفات آب در شبکه و نهایتاً افزایش سرویس دهی تأسیسات آب شرب از کنترل و استحصال میزان تلفات آب موجود در شبکه است

روش پژوهش

از آنجاکه هدف این تحقیق بررسی روش ها و شیوه های کاهش آب بدون درآمد است، براین اساس راهکارهای کاهش آب بدون درآمد شناسایی شده و در نهایت اولویت بندی می شوند. برای تعیین اولویت این راهکارها از روش های متنوعی می توان استفاده کرد که در این تحقیق از روش های تحلیل فرایند شبکه ای، آر اس فازی، ویکورفازی و روش کپ-لند برای جمع بندی و نهایی سازی اولویت ها استفاده شده است.

۱. تحلیل فرایند شبکه ای

فرایند تحلیل شبکه ای یک تئوری ریاضی است که به طور سیستماتیک با انواع وابستگی ها سروکار داشته و به طور موفقیت آمیزی در زمینه های گوناگون به کار گرفته شده است. این روش از سوی ساعتی توسعه یافت تا اولویت هایی را برای تصمیم ها، بدون آن که فرضیاتی درباره رابطه سلسله مراتبی یک سویه میان سطوح تصمیم انجام گیرد، فراهم آورد. روش تحلیل شبکه ای بر اساس تحلیل مغز انسان برای مسائل پیچیده با ساختار غیر رده ای و به منظور اصلاح روش سلسله مراتبی ارائه شده است. در این روش برای مدل کردن مسئله شبکه ای که گره های موجود در این شبکه معادل، هدف معیارها و گزینه ها است، رسم می شود. بردارهای جهت داری که این گره ها را به هم وصل می کنند نشان دهنده جهت اثر گره ها بر یکدیگر است. فرایند تجزیه و تحلیل شبکه ای مسئله تصمیم گیری را با به کارگیری دیدگاه سیستمی توأم با بازخورد، مدل سازی می کند (سپاهی و تیمور^{۱۰}، ۲۰۱۰).

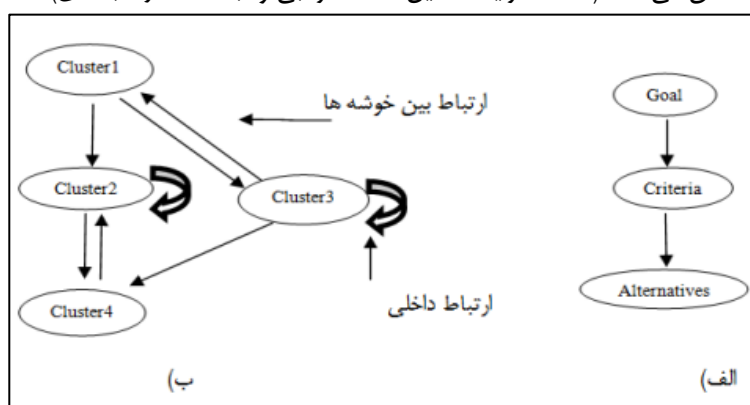
فرایند تحلیل شبکه ای نظریه جدیدی است که فرایند تحلیل سلسله مراتبی را برای پرداختن به وابستگی در بازخورد توسعه می دهد و به این منظور از رهیافت ابر ماتریس استفاده می کند. اگر چه هم فرایند تحلیل شبکه ای و هم فرایند تحلیل سلسله مراتبی اولویت ها را با انجام مقایسات زوجی اتخاذ می کنند، اما تفاوت هایی میان آنها وجود دارد. اولین تفاوت آن است که فرایند تحلیل سلسله مراتبی

1. Alvisi & Franchini
2. Jin & Zhou
3. Lijuan et al
4. Shekofteh et al
5. Jang & Choi
6. Shrivani et al
7. Rojek & Studzinski
8. Pørez et al
9. Fallahi et al
10. Sipahi & Timor

حالت خاصی از فرایند تحلیل شبکه‌ای است، چرا که فرایند تحلیل شبکه‌ای وابستگی درون خوشه‌ای وابستگی (درونی و میان خوشه‌ای وابستگی) برونی را در نظر می‌گیرد. دومین تفاوت آن است که فرایند تحلیل شبکه‌ای ساختاری غیرخطی دارد. به‌طور کلی مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی چهارچوب تصمیم‌گیری است که رابطه‌ای یک‌سویه و سلسله‌مراتبی را میان سطوح تصمیم در نظر می‌گیرد. در عوض فرایند تحلیل شبکه‌ای نیازی به این ساختار اکیداً سلسله‌مراتبی و عمودی ندارد.

تکنیک تحلیل شبکه فازی با چارچوب جامع و فراگیر تمامی تعاملات و روابط میان سطوح تصمیم‌گیری را که تشکیل یک ساختار شبکه‌ای می‌دهد، می‌تواند در نظر گیرد. خوشه‌ها معرف سطوح تصمیم‌گیری هستند و کمان‌ها تعاملات میان سطوح تصمیم‌گیری را نشان می‌دهند. جهت کمان‌ها وابستگی را مشخص می‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار سلسله‌مراتبی حالت خاص و ویژه‌ای از ساختار شبکه‌ای است. شکل ۱ مقایسه ساختار سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای را نشان می‌دهد. (الف - فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و ب - ساختار شبکه‌ای).



شکل ۱. مقایسه ساختار سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای (سپاهی و تیمور، ۲۰۱۰)

ساده‌ترین شبکه از تعدادی خوشه به همراه عناصر درون آنها ساخته می‌شود. در مواردی که عناصر یک خوشه روی همه یا برخی عناصر خوشه دیگر اثر می‌گذارند یا از آنها اثر می‌پذیرند، ارتباطی بین دو خوشه ایجاد می‌شود که آن را وابستگی بیرونی می‌نامیم. وابستگی دوسویه بین دو خوشه، به‌عنوان چرخه بازخورد بیان می‌شود و هنگامی که عناصر به عناصر درون خوشه خودشان مرتبط می‌شوند، وابستگی درونی وجود دارد. کاربرد وابستگی‌های درونی و بیرونی در حقیقت بهترین روشی است که می‌توان در شناسایی و معرفی مفاهیم تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری در میان خوشه‌ها و عوامل، باتوجه به یک عامل خاص، مورد استفاده قرارداد (سپاهی و تیمور؛ ۲۰۱۰).

در مرحله مدل‌سازی، هدف تصمیم‌گیری، شاخص‌های تصمیم‌گیری و گزینه ممکن، مشخص می‌شود. از طریق مقایسه زوجی می‌توان وزن نسبی معیارها و زیر معیارها را مشخص کرد. مقایسه زوجی عناصر در هر سطح، باتوجه به اهمیت نسبی آن نسبت به معیار، کنترل شبیه روش سلسله‌مراتبی انجام می‌شود. در چنین مقایسه‌هایی، یک معیار نسبی از ۱ تا ۹ جهت مقایسه دو عامل به کار می‌رود. در مرحله بعد، وزن‌های داخلی شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها که در مرحله مدل‌سازی مشخص شده بودند، محاسبه می‌شود. در این مرحله وابستگی‌های درونی و بازخوردی مدنظر می‌باشند. نکته مهم در قضاوت‌ها و مقایسه‌های زوجی، کنترل سازگاری آنها است. این مهم به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های کلان اهمیت فراوانی دارد، زیرا افراد ممکن است در قضاوت‌های خود به‌صورت ضدونقیض عمل کنند. در حالت کلی میزان ناسازگاری کمتر از ۰/۱ در ماتریس‌های مقایسات زوجی قابل قبول است. نسبت سازگاری CR هر ماتریس محاسبه می‌گردد که در آن CI شاخص سازگاری ماتریس مقایسه زوجی بوده و با استفاده از بزرگ‌ترین مقدار بردار ویژه λ_{max} و بعد آن n برآورد می‌گردد (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

نرخ ناسازگاری توسط نرم‌افزار برای هر ماتریس مقایسه زوجی محاسبه و ارائه می‌شود که اگر از ۰/۱ فراتر رود آن قضاوت ناسازگار است، و در نحوه قضاوت باید تجدیدنظر شود. سوپرماتریس برای تجزیه و تحلیل وابستگی‌های داخلی میان اجزای سیستم به کار

می‌رود. اجزای سوپرماتریس از ماتریس های مقایسات زوجی وابستگی های درونی حاصل شده و در آن جای گذاری می‌شوند. هر ارزش غیر صفر در ستون سوپرماتریس، نشانگر اهمیت نسبی وزن حاصل شده از ماتریسهای مقایسات زوجی وابستگی های درونی می باشد (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

یک سوپرماتریس در حقیقت یک ماتریس جزء بندی شده است که در آن هر بخش از ماتریس رابطه میان ۲ گره، سطح تصمیم گیری را در کل مسئله تصمیم گیری نشان می‌دهد. فرم استاندارد یک سوپرماتریس که توسط ساعتی (۱۳۹۶) معرفی شده است در جدول ۱ قابل مشاهده است که C بیانگر گره‌ها و e بیانگر عناصر درون گره‌ها است. بردارهای W درون ماتریس نیز بردارهای وزنی حاصل از مقایسات زوجی عناصر گره‌ها با یکدیگر است (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

جدول ۱. ساختار کلی سوپرماتریس (Saaty et al., 2013).

		C ₁				C ₂				==	C _N			
		C ₁₁	C ₁₂	"."	C _{1N}	C ₂₁	C ₂₂	-	C _{2N}		c _{N1}	C _{N2}	-	C _{NN}
C ₁	C ₁₁									...	W _{1N}			
	C ₁₂													
	...													
	e _{1N}													
C ₂	e ₂₁	W ₂₁				W ₂₂				...	W _{2N}			
	e ₂₂													
	...													
	C _{2N}													
!		--			
C _N	e _{N1}	W _{N1}				W _{N2}				--	W _{nn}			
	e _{N2}													
	...													
	e _{NN}													

همان‌طور که ذکر شد هریک از خوشه‌های مدل در مدل‌سازی تحلیل شبکه‌ای دارای سه وضعیت سوپرماتریس غیروزنی ماتریس حاوی اولویت‌ها که از مقایسه دودویی به‌دست‌آمده است وزنی (عناصر ماتریس در وزن خوشه ضرب می‌شود وحدی از به توان رساندن ماتریس وزن‌دار تا زمانی که همه عناصر برابر شوند و به پاسخ برسد به دست می‌آید) هستند لازم به ذکر است که درایه‌های صفر موجود در ماتریس این مطلب را می‌رساند که عامل متناظر موجود در ستون این سوپرماتریس روی دیگر عوامل تأثیرگذار نبوده

است؛ زیرا دارای رابطه‌ی تعاملی با یکدیگر نیستند (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳). در نهایت وزن کلی هر کدام از جایگزین‌ها با ضرب کردن وزن‌های به‌دست‌آمده از هر کدام از مراحل پیشین مشخص شده و باتوجه‌به آن تصمیم نهایی اتخاذ می‌شود.

۲. تکنیک آراس

نمونه بارزی از مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره مربوط به رتبه‌بندی تعداد متناهی از گزینه‌های تصمیم‌گیری است که هر یک از آنها به‌وضوح برحسب ضوابط تصمیم‌گیری متفاوت که باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود، توصیف شده است. مطابق روش آراس، مقدار یک تابع، مطلوبیت مجموعه بازده نسبی کارایی نسبی یک گزینه ممکن، به‌طور مستقیم متناسب با اثر نسبی ارزش‌ها و وزن معیارهای اصلی که در یک پروژه مطرح شده است، را تعیین می‌کند.

با استفاده از هر یک از این روش‌ها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌توان مسئله را به‌صورت تصمیم‌گیری تک‌معیاره به‌صورت مناسب تبدیل کرد و براین‌اساس بسیاری از آنها به‌سادگی حل می‌شوند (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

روش آراس^۲ توسط زاوادسکاز و تورسکی در سال ۲۰۱۰ طراحی شد و می‌تواند به‌عنوان یکی از جدیدترین، مؤثرترین و درعین‌حال ساده‌ترین روش‌ها در تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد‌استفاده قرار گیرد. روش آراس برای حل مسائل تصمیم‌گیری مختلف به‌کار برده می‌شود. این روش همچنین می‌تواند به‌شکل فازی و خاکستری طراحی شود که به آراس فازی و آراس خاکستری نام‌گذاری شده‌اند. فرایند حل مسئله با استفاده از روش آراس می‌تواند به‌طور خیلی دقیق با استفاده از گام‌های زیر شرح داده شود:

(۱) گام اول - تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری: اولین گام در حل هر مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره، تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است. در تصمیم‌گیری چندمعیاره، از مسئله بهینه‌سازی گسسته هر مسئله‌ای که باید حل شود، با ماتریس تصمیم‌گیری به‌شکل زیر نمایش داده می‌شود که برای m گزینه ممکن ارزیابی شده (ردیف) روی معیار معین (ستون) تنظیم می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$X = \begin{bmatrix} X_{01} & \cdots & X_{0j} & \cdots & X_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mj} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; \quad j = \overline{1, n} \quad (1)$$

در این ماتریس: m تعداد گزینه‌ها، n تعداد معیار معین هر گزینه تصمیم‌گیری، X_{ij} ارزشی که مقدار کارایی گزینه در شرایط معیار را بیان می‌کند، X_0 مقدار بهینه معیار است.

(۲) گام دوم - تعیین مقدار بهینه‌ی هر معیار: بعد از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، گام بعدی در این روش تعیین مقدار بهینه هر معیار است. اگر مقدار بهینه معیار برای تصمیم‌گیرندگان مشخص نبود آنگاه:

$$X_{0j} = \max_i X_{ij} \quad (2) \quad \text{اگر مقدار ماکزیمم برتری داشت:}$$

$$X_{0j} = \max_i X_{ij}^* \quad (3) \quad \text{اگر مقدار مینیمم برتری داشت:}$$

که در آن X_{0j} مقدار بهینه گزینه i در ارتباط با معیار j است. مقادیر بیشینه به معنی مجموعه‌ای از معیارهای از نوع سود است؛ یعنی جهت و سوی بهینگی بیشینه‌سازی است و مقادیر کمینه به معنی مجموعه‌ای از معیارهای از نوع هزینه است. یعنی جهت و سوی بهینگی کمینه‌سازی است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

معمولاً مقادیر عملکرد کارایی x_i و وزن معیارها W به‌عنوان ورودی در ماتریس تصمیم‌گیری نمایش داده می‌شود. معیارها همچنین مقادیر و وزن‌های اولیه معیارها به‌وسیله کارشناسان و خبرگان تعیین می‌شود. اطلاعات به‌دست‌آمده می‌توانند به‌وسیله اشخاص

ذی نفع با توجه به اهداف و فرصت‌های آنان تصحیح شوند، سپس تعیین اولویت‌های گزینه‌ها است که در چند مرحله (گام) انجام می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

(۳) گام سوم - محاسبه ماتریس تصمیم نرمال: معمولاً معیارها، اهمیت اندازه و مقیاسهای متفاوتی دارند هدف گام بعدی این است که از معیارهای نسبی به مقادیر ارزشهای وزن دهی شده برسد به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از ابعاد مختلف، معیارها از نسبت (نرخ) ارزش بهینه استفاده شده است نظریه های مختلفی در توصیف نسبت (نرخ) ارزش بهینه وجود دارد با این حال مقادیر با استفاده از نرمال سازی ماتریس تصمیم‌گیری در بازه یا فاصله [۰ و ۱] ترسیم شده است. در گام سوم مقادیر اولیه همه معیارها نرمال می‌شود. مقادیر X_i که با استفاده از فرمولهای زیر محاسبه می‌گردد ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده X را معین می‌کند (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_{01} & \cdots & \bar{X}_{0j} & \cdots & \bar{X}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{X}_{i1} & \cdots & \bar{X}_{ij} & \cdots & \bar{X}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{X}_{m1} & \cdots & \bar{X}_{mj} & \cdots & \bar{X}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i=\overline{0,m}; \quad j=\overline{1,n} \quad (4)$$

معیاری که ارزش موردنظر ترجیحی آن بیشینه است به شکل زیر نرمال می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}} \quad (5)$$

معیاری که ارزش ترجیحی آن کمینه است با استفاده از گام زیر نرمال می‌شود:

$$X_{ij} = \frac{1}{X_{ij}^*}; \quad \bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}} \quad (6)$$

هنگامی که مقادیر بدون مقیاس (نرمال) هر معیار مشخص شد در اصل همه معیارهایی که در ابتدا مقیاس‌های متفاوتی داشتند می‌توانند با یکدیگر مقایسه شوند.

(۴) گام چهارم - محاسبه ماتریس تصمیم نرمال وزن دار: گام چهارم تعریف (معین کردن) ماتریس نرمال وزن دار شده X است. فقط وزن‌های کاملاً سنجیده به درستی تعیین شده باید استفاده گردد. زیرا وزن‌ها همیشه ذهنی هستند و در جواب مسئله تأثیر دارند ارزش وزن W_j معمولاً به وسیله روش ارزیابی کارشناس تعیین می‌گردد. مجموع وزن‌های W_j باید به شکل زیر محدود شوند.

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (7)$$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{01} & \cdots & \hat{X}_{0j} & \cdots & \hat{X}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{X}_{i1} & \cdots & \hat{X}_{ij} & \cdots & \hat{X}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{X}_{m1} & \cdots & \hat{X}_{mj} & \cdots & \hat{X}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i=\overline{0,m}; \quad j=\overline{1,n} \quad (8)$$

مقادیر وزن داده شده نرمال شده تمام معیارها به شکل زیر محاسبه می‌گردد (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$\hat{X}_{ij} = \bar{X}_{ij} w_j; \quad i=\overline{0, m} \quad (9)$$

که در آن W_j وزن اهمیت معیار است و X مقدار نرمال شده از معیار Z است.

(۵) گام پنجم تعیین مقادیر بهینه برای هر گزینه:

تعیین مقادیر تابع بهینگی برای هر گزینه می‌تواند به صورت مجموع مقادیر نرمال وزن دار به روش زیر محاسبه گردد.

$$s_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} ; i=0, m \quad (10)$$

که در آن S مقدار بهینه تابع به‌ازای گزینه A است.

بزرگ‌ترین مقدار بهترین است و کمترین آن بدترین با توجه به روند محاسبه شده، تابع بهینگی S دارای یک رابطه مستقیم و متناسب با مقادیر x_{ij} و وزن‌های W از معیارهای بررسی شده و تأثیر نسبی آنها روی نتیجه ی نهایی است بنابراین بیشترین مقدار (ارزش) تابع بهینگی S اثر بخش ترین متغیر است. اولویت‌های گزینه‌ها می‌تواند با توجه به مقدار S تعیین گردد. در نتیجه استفاده از این روش برای ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های تصمیم‌گیری مناسب است.

(۶) گام ششم محاسبه درجه مطلوبیت هر گزینه: در مورد ارزیابی گزینه‌ها نه تنها تعیین بهترین رتبه اهمیت دارد بلکه مهم است که کیفیت مطلوبیت نسبی هر گزینه مطرح شده نیز مشخص شود به همین منظور از درجه مطلوبیت هر گزینه استفاده می‌گردد درجه مطلوبیت هر گزینه (آلترناتیو به وسیله مقایسه‌ی متغیر که تجزیه و تحلیل شده است با حالت ایده آل یعنی S مشخص می‌گردد معادله مورد استفاده برای محاسبه درجه ی مطلوبیت K_i از یک گزینه A به صورت زیر است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} ; i=0, m \quad (11)$$

که در آن S_i و S_0 مقادیر بهینه معیار به دست آمده از معادله است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

(۷) گام هفتم رتبه‌بندی گزینه‌ها و یا انتخاب مؤثرترین آنها: روشن است که ارزشهای محاسبه شده در بازه صفر تا ۱ هستند و می‌تواند به صورت صعودی مرتب شوند که به ترتیب اولویت مرتب شده اند کارایی نسبی مختلط هر گزینه ممکن می‌تواند با توجه به مقدار ارزشهای تابع مطلوبیت مشخص گردد (پاراماسیوام و همکاران^۱، ۲۰۲۰). گزینه‌های مطرح شده با غربالگری ها رتبه‌بندی می‌گردد به عنوان مثال گزینه با مقدار بزرگ‌تر K برتری و رتبه بیشتری دارد و گزینه با بزرگ‌ترین مقدار K_i در بهترین مکان و رتبه قرار دارد بنابراین انتخاب بهترین گزینه می‌تواند با استفاده از فرمول زیر صورت پذیرد (پاراماسیوام و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\{A_i | \max_i K_i\} A^* = ; i=1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

۳. تکنیک ویکور

اپریکوویت و تزنگ در سال ۱۹۸۸ روش ویکور را ارائه و سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ این روش را توسعه دادند. این روش که مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در شرایطی که فرد تصمیم‌گیرنده قادر به شناسایی و بیان برتری‌های یک مسئله در زمان شروع و طراحی آن نیست این روش می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری مطرح شود (گول و همکاران^۲، ۲۰۱۶).

مراحل روش حل تکنیک ویکور به شرح زیر است:

اگر در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره n معیار و m گزینه وجود داشته باشد به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از این روش مراحل روش به شرح ذیل است (گول و همکاران، ۲۰۱۶):

(۱) مرحله اول تشکیل ماتریس تصمیم: با توجه به تعداد معیارها تعداد گزینه‌های ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \dots & \dots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن X_{ij} عملکرد گزینه $i = 1, 2, \dots, n$ در رابطه با معیار $j = 1, 2, \dots, n$ است.

(۲) مرحله دوم بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم:

در این مرحله سعی می‌شود معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بی بعد تبدیل شوند و ماتریس F به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{in} \\ \vdots & \dots & \dots \\ f_{m1} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در این ماتریس:

$$f_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (15)$$

(۳) مرحله سوم تعیین بردار وزن معیارها: در این مرحله باتوجه به ضریب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، برداری به صورت

زیر تعریف می‌شود:

$$w = w_1, w_2, \dots, w_n \quad (16)$$

(۴) مرحله چهارم: تعیین بهترین و بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر معیار: بهترین مقدار برای معیارهای مثبت و منفی

به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_j^* = \max_i f_{ij} \quad (17)$$

$$f_j^- = \min_i f_{ij} \quad (18)$$

بدترین مقدار برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_j = \min_i f_{ij} \quad (19)$$

$$f_j^+ = \max_i f_{ij} \quad (20)$$

(۵) مرحله پنجم: محاسبه مقدار سودمندی S و مقدار تأسف R : مقادیر S و R باتوجه به روابط زیر محاسبه می‌شوند (مردانی و همکاران^۱، ۲۰۱۶):

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (21)$$

$$R_i = \max \left\{ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right\}$$

که w مقدار وزن موردنظر برای معیار است.

در روش برنامه‌ریزی توافقی اگر پارامتر P مساوی یک باشد همان مقدار S به دست می‌آید:

$$L(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} = S_i \quad (22)$$

در روش برنامه‌ریزی توافقی اگر پارامتر P مساوی f_{CO} شد همان مقدار R_i به دست می‌آید:

$$L_\infty(A_i) = \max \left[w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \right] \quad (23)$$

(۶) مرحله ششم: محاسبه شاخص ویکور (مقدار Q): مقدار Q باتوجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود (مردانی و همکاران: ۲۰۱۶):

$$Q_i = V \left[\frac{S_i - S^-}{S^* - S^-} \right] + (1-V) \left[\frac{R_i - R^-}{R^* - R^-} \right] \quad (24)$$

$$S^- = \min S_i \quad S^* = \max S_i \quad R^- = \min R_i \quad R^* = \max R_i$$

(۷) مرحله هفتم: مرتب کردن گزینه‌ها بر اساس مقادیر S ، R و Q : در این مرحله باتوجه به مقادیر S ، R و Q گزینه‌ها در سه گروه از کوچکتر به بزرگتر مرتب می‌شوند. در نهایت گزینه‌ای به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که در هر سه گروه به عنوان گزینه برتر شناخته شود لازم به ذکر است که در گروه Q گزینه‌ای به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که بتواند دو شرط زیر را ارضاء کند:

شرط (۱): اگر گزینه‌های A_1 و A_2 به ترتیب اولین و دومین گزینه برتر در گروه و n بیانگر تعداد گزینه‌ها باشد رابطه زیر برقرار باشد (مردانی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{n-1} \quad (25)$$

شرط (۲): گزینه A_1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به عنوان رتبه برتر شناخته شود. زمانی که شرط اول برقرار نباشد مجموعه‌ای از گزینه‌ها به عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شود. بیشترین مقدار m باتوجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود (مردانی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$Q(A_m) - Q(A_1) < \frac{1}{n-1} \quad (26)$$

زمانی که شرط دوم برقرار نباشد دو گزینه A و A_2 به عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شوند.

۴. استراتژی‌های اولویت‌بندی کپ‌لند

در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است از چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شود که نتایج این روش‌ها همیشه یکسان نیستند در این مواقع سؤالی که مطرح می‌شود آن است که کدام گزینه باید انتخاب شود؟ در چنین وضعیتی باید از روش‌های مختلف ادغام از جمله روش میانگین رتبه‌ها روش بردا و روش کپ‌لند استفاده کرد.

• روش میانگین رتبه‌ها

در این روش برای هر گزینه میانگین حسابی رتبه‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره تعیین می‌شود و بر این اساس گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. بدیهی است که گزینه‌های با میانگین حسابی بالاتر در اولویت خواهند بود (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

• روش بردا

در این روش برای تصمیم‌گیری ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف تصمیم‌گیری تعداد ارجحیت گزینه‌ای بر گزینه دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن گزینه دیگری باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ گذاشته می‌شود و در صورتی که رأی اکثریت وجود نداشت و یا آرا با هم مساوی باشند، در ماتریس مقایسه زوجی عدد صفر گذاشته می‌شود. عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و عدد صفر به منزله آن است که ستون بر سطر ارجحیت دارد (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

پس از مقایسه زوجی ماتریس مقایسه زوجی شکل خواهد گرفت مجموع عناصر هر سطر تعداد مسلط شدن هر گزینه را نشان می‌دهد و گزینه‌ها بر اساس تعداد مسلط شدن اولویت‌بندی می‌شوند (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

• روش کپ‌لند

این روش اصلاح شده روش بردا است با این تفاوت که در اولویت‌بندی علاوه بر تعداد مسلط شدن (مجموع عناصر هر سطر) تعداد مغلوب شدن مجموع عناصر هر ستون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد بدین منظور گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شوند (فاوردین و همکاران، ۲۰۰۲).

یافته‌های پژوهش

۱. تأیید راهکارهای بالقوه شناسایی شده

نتایج به دست آمده از آزمون نشان می‌دهد که تمامی راهکارهای در نظر گرفته شده در کاهش آب بدون درآمد مورد تأیید قرار گرفته است. جدول شماره ۲ ضرایب بارهای عاملی، ضریب تعیین تعدیل شده، عدد معناداری و نتایج مربوط به هر راهکار مطرح شده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج حاصل از ارزیابی متغیرهای تحقیق

شناسه	راهکارهای کاهش آب بدون درآمد	ضرایب بارهای عاملی	ضریب تعیین تعدیل شده	معنی‌داری	نتیجه
A1	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس B به جای کنتور C)	۰/۸۹۱	۰/۷۹	۳۴/۰۲۱	تأیید
A2	نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک طرفه)	۰/۹۰۴	۰/۸۱۳	۳۸/۳۴۶	تأیید
A3	تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک	۰/۸۵۶	۰/۷۲۹	۲۴/۸۷۳	تأیید
A4	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	۰/۹۰۳	۰/۸۱۲	۳۹/۸۶۳	تأیید
A5	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	۰/۷۸	۰/۶۰۲	۱۴/۲۶۱	تأیید
A6	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	۰/۷۲۷	۰/۵۲	۱۰/۸۴۷	تأیید
A7	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	۰/۶۸۱	۰/۴۵۴	۸/۸۱	تأیید
A8	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	۰/۳۸	۰/۳۸	۶/۴۸۷	تأیید
A9	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	۰/۶۱۹	۰/۳۷۳	۷/۳۰۷	تأیید
A10	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	۰/۷۱۶	۰/۵۰۴	۹/۸۷۴	تأیید
A11	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دائمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیبه‌های خواندن کنتور و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	۰/۷۸۷	۰/۶۱۳	۱۵/۵۰۸	تأیید

می‌توان با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۲)، به بررسی برخی از راهکارهای کاهش آب بدون درآمد پرداخت. به عنوان نمونه: تجزیه و تحلیل آماری در راستای تأثیر استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B) بر کاهش آب بدون درآمد، نشان می‌دهد که عدد معنی‌داری برابر ۳۴/۰۲۱ است و چون این مقدار بزرگ‌تر از ۱/۹۶ است، از این رو این تأثیر مورد تأیید قرار می‌گیرد. از طرفی چون عدد معنی‌داری به دست آمده مثبت است، این اثر مستقیم است همچنین ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۷۹۰ به دست آمده است و نشان می‌دهد که این روش توانسته است ۷۹ درصد از تغییرات آب بدون درآمد را تبیین و توجیه نماید.

همچنین تجزیه و تحلیل آماری در راستای تأثیر برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دائمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیبه‌های خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده بر کاهش آب بدون درآمد، نشان می‌دهد که عدد معنی‌داری برابر ۱۵/۵۰۸ است و چون این مقدار بزرگ‌تر از ۱/۹۶ است، از این رو این تأثیر مورد تأیید قرار می‌گیرد. از طرفی چون عدد معنی‌داری به دست آمده مثبت است، این اثر مستقیم است هم چنین ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۶۱۳ به دست آمده است و نشان می‌دهد که این راهکار توانسته است حدود ۶۰ درصد از تغییرات آب بدون درآمد را تبیین و توجیه نماید.

۲. رتبه‌بندی روش‌ها و راهکارهای مؤثر بر کاهش آب بدون درآمد

پس از شناسایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد، محقق در صدد است که راهکارهای شناسایی شده را با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره رتبه‌بندی نموده و نتایج حاصل از آنها را به کمک روش کپلند اولویت‌بندی نماید. نتایج محاسبات وزن‌دهی، رتبه‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد در ذیل آمده است.

نتایج تکنیک تحلیل فرایند شبکه

به‌منظور دستیابی به وزن راهکارها، پرسش‌نامه‌های مقایسات زوجی طراحی و بین خبرگان توزیع شده است. بدین منظور جداول مقایسات زوجی انجام شده، وزن راهکارها به دست آورده شده و بر اساس آن رتبه‌بندی انجام می‌شوند. مراحل محاسبه وزن راهکارها عبارت‌اند از:

مرحله اول) جهت جمع نظرات خبرگان، از مقایسات زوجی پاسخ‌دهندگان میانگین هندسی گرفته می‌شود.

مرحله دوم) محاسبه بردار ویژه: برای محاسبه بردار ویژه هر یک از جداول مقایسات زوجی جمع شده، از روش لگاریتمی حداقل مجزورات، استفاده می‌شود.

مرحله سوم) تشکیل ماتریس‌های بردار ویژه: این ماتریس‌ها شامل بردارهای ویژه‌ای هستند که از مقایسات زوجی مرحله دوم به‌دست آمده‌اند.

مرحله چهارم) محاسبه اوزان نهایی سطوح: برای محاسبه وزن نهایی مؤلفه‌های هر سطح، حاصل ضرب ماتریس بردار ویژه روابط درونی در بردار ویژه همان سطح، در وزن نهایی سطح بالاتر ضرب می‌شود. جدول شماره ۳ اوزان نهایی و رتبه راهکارهای مختلف بر اساس تکنیک تحلیل شبکه فازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس اوزان نهایی نسبت به وزندهی راهکارها بر اساس تکنیک تحلیل شبکه فازی

رتبه	وزن قطعی نهایی مؤلفه‌ها	راهکارهای کاهش آب بدون درآمد	شناسه
۲	۰/۱۰۲	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به‌جای کنتور کلاس B)	A1
۸	۰/۰۸۶	نوسازی و جایگزینی دوره‌های مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه	A2
۴	۰/۰۹۸	تست دوره‌های کنتورهای اشتراک	A3
۹	۰/۰۸۵	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	A4
۶	۰/۰۹۵	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	A5
۱	۰/۱۱۴	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	A6
۳	۰/۰۹۹	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	A7
۱۱	۰/۰۷۵	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	A8
۱۰	۰/۰۸۳	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	A9
۷	۰/۰۹	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	A10
۵	۰/۰۹۷	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیریهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	A11

همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک تحلیل شبکه، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به‌جای کنتور کلاس B) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها هستند و استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) اولویت سوم را دارد.

۳. نتایج تکنیک ویکور

جدول شماره ۴ رتبه بندی گزینه ها را بر اساس تکنیک ویکور فازی نشان می دهد. چنانچه پیش تر در فصل سوم گفته شده بود، مراحل تکنیک ویکور جهت رتبه بندی راهکارهای شناسایی شده به شرح زیر بوده است:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری ارزیابی گزینه ها

گام دوم: پی مقیاس نمودن ماتریس تصمیم گیری

گام سوم: تعیین بردار وزن معیارها

گام چهارم: تعیین بهترین و بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر معیار

گام پنجم: محاسبه مقدار سودمندی^۱ (S) و مقدار تأسف^۲ (R)

گام ششم: محاسبه شاخص ویکور (مقدار Q)

گام هفتم: تعیین جواب نهایی

جدول ۴. رتبه گزینه ها بر اساس S، R و Q

گزینه ها	R	S	Q	رتبه نهایی
A1	۷	۸	۸	۸
A2	۱	۳	۳	۳
A3	۱	۱	۱	۱
A4	۹	۱۱	۹	۹
A5	۱۰	۱۰	۱۱	۱۱
A6	۱	۶	۶	۶
A7	۷	۵	۷	۷
A8	۱۰	۹	۱۰	۱۰
A9	۱	۲	۲	۲
A10	۱	۶	۵	۵
A11	۱	۳	۳	۴

همان طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک تکنیک ویکور فازی، تست دوره های کنترلهای اشتراک و نظارت دقیق بر پیمانکاری ها و نصب لوله ها در زیر خاک دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه ها هستند و راهکار نوسازی و جایگزینی دوره های مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت های مختلف انشعاب (کمبرند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک طرفه اولویت سوم را دارد.

۴. نتایج تکنیک آراس

چنانچه پیش تر گفته شده بود مراحل رتبه بندی راهکارهای مورد مطالعه با تکنیک آراس به صورت زیر هستند:

- گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری فازی ارزیابی گزینه ها
- گام دوم: تعیین مقدار بهینه هر معیار
- گام سوم: محاسبه ماتریس تصمیم نرمال فازی
- گام چهارم: محاسبه ماتریس تصمیم نرمال شده وزن دار فازی
- گام پنجم: تعیین مقادیر بهینه برای هر گزینه
- گام ششم: محاسبه درجه مطلوبیت هر گزینه

گام هفتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از تکنیک آراس فازی به‌منظور رتبه‌بندی راهکارها، در جدول شماره ۵ آمده است.

جدول ۵. نتایج حل تکنیک آراس فازی

گزینه‌ها	Si			Defuzzify Si	رتبه‌بندی بر اساس Si	Ki	رتبه‌بندی بر اساس Ki
	I	M	U				
A1	۰/۰۰۴۸۷	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۴۸۵	۰/۰۰۹۵۱	۵	۰/۶۹۱۸۱	۵
A2	۰/۰۰۵۹۶	۰/۰۱۰۲۵	۰/۰۱۶۶۶	۰/۰۱۰۹۵	۲	۰/۷۹۷۱۶	۲
A3	۰/۰۰۳۸۳	۰/۰۰۷۱۴	۰/۰۱۲۳۵	۰/۰۰۷۷۸	۸	۰/۵۶۵۸	۸
A4	۰/۰۰۲۹۴	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۹۸۷	۰/۰۰۶۱۵	۱۱	۰/۴۴۲۲۷	۱۱
A5	۰/۰۰۳۷۲	۰/۰۰۶۹۴	۰/۰۱۲۰۱	۰/۰۰۷۵۶	۹	۰/۵۴۹۸۳	۹
A6	۰/۰۰۷۴۱	۰/۰۱۲۸۳	۰/۰۲۰۹۸	۰/۰۱۳۷۴	۱	۱	۱
A7	۰/۰۰۴۷۲	۰/۰۰۸۵۲	۰/۰۱۴۳۸	۰/۰۰۹۲۱	۶	۰/۶۷۰۰۶	۶
A8	۰/۰۰۴۵۴	۰/۰۰۷۹۳	۰/۰۱۳۰۶	۰/۰۰۸۵۱	۷	۰/۶۱۹۵۳	۷
A9	۰/۰۰۵۷۶	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۰۵۹	۳	۰/۷۷۰۵۳	۳
A10	۰/۰۰۵۲۹	۰/۰۰۹۳۳	۰/۰۱۵۴۷	۰/۰۱۰۰۳	۴	۰/۷۲۹۷۲	۴
A11	۰/۰۰۲۹۴	۰/۰۰۵۷۸	۰/۰۱۰۳۳	۰/۰۰۶۳۵	۱۰	۰/۴۶۲۱۶	۱۰
A0	۰/۰۰۷۴۱	۰/۰۱۲۸۳	۰/۰۲۰۹۸	۰/۰۱۳۷۴	---	۱	---

همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک آراس فازی، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها هستند و راهکار نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک اولویت سوم را دارد.

۵. اولویت‌بندی نهایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد بر اساس روش کپلند

رتبه هریک از گزینه‌ها در تکنیک‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره (تحلیل شبکه فازی، ویکور فازی و آراس فازی) در این تحقیق، به شرح جدول شماره ۶ است. برای تعیین اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپلند، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها به‌صورت جدول شماره ۷ ایجاد شده و پس از مجموع سطری و ستونی آراء اکثریت، تفاضل مجموع سطری و ستونی نیز محاسبه شده است. لازم به ذکر است که روش کپلند بر اساس تفاضل مجموع سطری و ستونی، گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند.

جدول ۶. رتبه بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش های تحلیل شبکه فازی، ویکور فازی و آراس فازی

گزینه ها	روش تحلیل شبکه فازی	روش ویکور فازی	روش آراس فازی
A1	۲	۸	۵
A2	۸	۳	۲
A3	۴	۱	۸
A4	۹	۹	۱۱
A5	۶	۱۱	۹
A6	۱	۶	۱
A7	۳	۷	۶
A8	۱۱	۱۰	۷
A9	۱۰	۲	۳
A10	۷	۵	۴
A11	۵	۴	۱۰

جدول ۷. بررسی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپ لند (ماتریس مقایسات زوجی)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	مجموع سطری	تفاضل مجموع سطری و ستونی
A1	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۷	۳
A2	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۸	۵
A3	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۷	۴
A4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۸
A5	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۸
A6	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۰	۱۰
A7	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۵	۰
A8	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۸
A9	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۷	۴
A10	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۵	۰
A11	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۴	-۲
مجموع ستونی	۴	۳	۳	۹	۹	۰	۵	۹	۳	۵	۶	--	--

بر اساس نتایج به دست آمده از روش کپلند، ترتیب اولویت راهکارهای کاهش آب بدون درآمد به صورت جدول شماره ۸ است.

جدول ۸. اولویت‌بندی نهایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپلند

اولویت	راهکار	مولفه
۱	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	A6
۲	نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه	A2
۳	تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک	A3
۳	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	A9
۴	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)	A1
۵	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	A7
۵	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	A10
۶	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	A11
۷	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	A4
۷	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	A5
۷	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	A8

باتوجه به روش کپلند، اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد به شرح زیر است:

$$A6 > A2 > A3 = A9 > A1 > A7 = A10 > A11 > A4 = A5 = A8$$

باتوجه به نتایج جدول ۸ می‌توان بیان نمود که راهکارهای کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی و درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک، اولویت‌های یکسانی دارند و نسبت به سایر راهکارها از اولویت کمتری برخوردارند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اقدامات مربوط به مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) نسبت به سایر راهکارها از اولویت بالاتری برخوردار است. به عبارتی می‌توان بیان نمود که عامل نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل در بروز آب بدون درآمد است و از آنجاکه در هر حالت نشت آب اتفاق خواهد افتاد ضرورت کنترل پایش و مقابله با آن مهم‌ترین راهکار در کاهش آب بدون درآمد خواهد بود. اینجاست که می‌توان به نقش مدیریت نشت نسبت به سایر راهکارهای کاهش آب بدون درآمد اشاره کرد. لازم به ذکر است که بیان شود هر کدام از راهکارهای شناسایی شده در جایگاه خود مهم و ضروری هستند و نمی‌توان بیان کرد که بدون توجه به آن گزینه می‌توان در راه رسیدن کاهش آب بدون درآمد موفق بود.

بحث

برای شناسایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد، محقق در ابتدا از طریق تحقیقات گذشته به بررسی راهکارهای بالقوه پرداخته و سپس از تحلیل عاملی تأییدی برای تأیید روش‌های مذکور استفاده کرده است. برای شناسایی عوامل مؤثر، از روش‌های زیر استفاده شده است.

- ادبیات تحقیق و میزان فراوانی معرفی شاخص
- نظرات ۳ نفر از اساتید دانشگاهی که زمینه تحقیقاتی آنها مرتبط بوده است.
- نظرات ۱۴ نفر از مدیران شرکت های آبفا که دارای تحصیلات تکمیلی (حداقل کارشناسی ارشد) بوده و سابقه کاری بالای ۲۰ سال را در این حوزه دارند.
- براین اساس ۱۱ راهکار زیر جهت کاهش آب بدون درآمد شناسایی شد:

- درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک
 - نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه
 - برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده
 - مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر
 - استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)
 - تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک
 - تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر
 - استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و غیرصلب برای کاهش صدمات فیزیکی .
 - نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک .
 - استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) جهت کاهش احتمال نشت
 - کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج های فشاری
- برای اجرای روش‌های آماری و محاسبه آماره آزمون مناسب و استنتاج منطقی درباره فرضیه های پژوهش مهم ترین عمل قبل از هر اقدامی، انتخاب روش آماری مناسب برای پژوهش است برای این منظور آگاهی از توزیع داده ها از اولویت اساسی برخوردار است. در این راستا در پژوهش حاضر، از آزمون معتبر کولموگروف اسمیرنوف برای بررسی فرض نرمال بودن داده‌های پژوهش استفاده شده است. این آزمون برای گرفتن مجوز لازم جهت استفاده از رگرسیون و ضریب همبستگی که در مدل‌یابی معادلات ساختاری وجود دارد، اعمال می‌گردد تا نرمال بودن اطلاعات اثبات گردد. در این آزمون باتوجه‌به فرضیات زیر، نرمال بودن داده ها بررسی می‌شود:

داده ها دارای توزیع نرمال هستند: H_0

داده ها دارای توزیع نرمال نیستند: H_1

باتوجه‌به آزمون کولموگروف اسمیرنوف اگر سطح معنی‌داری برای کلیه متغیرها بزرگ‌تر از سطح آزمون ۰/۰۵ باشد، توزیع داده‌ها نرمال است. از آنجایی که سطح معناداری آزمون کولموگروف - اسمیرنوف برای تمامی متغیرهای پژوهش بزرگ‌تر از مقدار ۰/۰۵ است (بین ۰/۱۴ تا ۰/۸۶) در نتیجه دلیلی برای رد فرض صفر وجود ندارد و تمامی متغیرهای مورد بررسی در پژوهش حاضر دارای توزیع نرمال هستند.

به‌منظور سنجش روایی، روش‌های گوناگونی وجود دارد که در این پژوهش باتوجه به اینکه راهکارهای کاهش آب بدون درآمد دارای ابعاد گوناگون بوده و هریک از این ابعاد دارای مؤلفه های خاص خود می‌باشند، از روایی همگرایی که جزئی از روایی سازه است، استفاده شده است. نتایج حاصله نشان داد که مقدار میانگین واریانس استخراج شده تمامی شاخص‌های پژوهش بالاتر از مقدار ۰/۵ (بین ۰/۵۱۱ تا ۰/۵۹۱) است. بنابراین روایی همگرایی سؤالات پرسش‌نامه مورد قبول است. در این تحقیق، جهت برازش مدل پژوهش و آزمون تحلیل عاملی تأییدی (تأیید تأثیر راهکارها) از روش مدل‌یابی معادلات ساختاری به کمک نرم‌افزار اسمارت پی ال اس استفاده شده است. به عبارتی تحلیل عاملی تأییدی، به‌منظور بیان تأثیر راهکارها انجام شده است.

در تحلیل عاملی تأییدی اگر مقدار آماره آزمون T-Value هر متغیر، بزرگ‌تر از ۱/۹۶ و کوچکتر از ۱/۹۶ باشد، مدل از برازش خوبی برخوردار است و به عبارتی از تقریبی معقول از جامعه برخوردار می‌باشد. پس از تعیین مدل اندازه گیری به‌منظور ارزیابی مدل مفهومی تحقیق و همچنین اطمینان یافتن از وجود یا عدم وجود رابطه علی میان متغیرهای تحقیق و بررسی تناسب داده های مشاهده شده با مدل مفهومی تحقیق، هریک از راهکارها به‌عنوان یک فرضیه در نظر گرفته می‌شود.

همچنین پس از شناسایی راهکارها، عوامل شناسایی شده با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (که در فصل قبل معرفی شدند) رتبه‌بندی شده و نتایج حاصل از آنها را به کمک روش کپلند اولویت‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بر اساس هدف اصلی تحقیق یعنی، مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش آب بدون درآمد، ۱۱ راهکار بالقوه شامل درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک، نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه)، برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)، استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)، تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک، تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و غیرصلب برای کاهش صدمات فیزیکی، نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک، استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) جهت کاهش احتمال نشت و کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری شناسایی شده اند.

پس از شناسایی راهکارهای بالقوه کاهش آب بدون درآمد، این راهکارهای شناسایی شده با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (روش تحلیل فرایند شبکه، روش ویگور و روش آراس) رتبه‌بندی شده و نهایتاً نتایج حاصل از آنها به کمک روش کپلند اولویت‌بندی شد. بر پایه تکنیک تحلیل شبکه، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها بودند و استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) اولویت سوم را داشت. بر پایه تکنیک ویگور، تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک و نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها بودند و راهکار نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) اولویت سوم را داشت. همچنین بر پایه تکنیک آراس فازی، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) دارای اولویت اول و دوم در بین دیگر گزینه‌ها بودند و راهکار نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک اولویت سوم را داشت. نهایتاً نتایج اولویت‌بندی نهایی با روش کپلند نشان داد که اقدامات مربوط به مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) نسبت به سایر راهکارها از اولویت بالاتری برخوردار است. به عبارتی می‌توان بیان نمود که عامل نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل در بروز آب بدون درآمد است و از آنجا که در هر حالت نشت آب اتفاق خواهد افتاد ضرورت کنترل پایش و مقابله با آن مهم‌ترین راهکار در کاهش آب بدون درآمد خواهد بود. همچنین راهکارهای کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی و درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و تغییرات بعدی در پرونده مشترک اولویت‌های یکسانی داشتند و نسبت به سایر راهکارها از اولویت کمتری برخوردار بودند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- قهرمانی، امین‌الله، ذوالفقاری، حسن، و معصوم پور سماکوش، جعفر. (۱۴۰۱). الگوهای گردش تراز دریا و ارتباط آن‌ها با رودخانه‌های جوی تأثیرگذار بر بارش‌های شدید ایران. *نشریه جغرافیا و توسعه ناحیه ای*، (۴) ۲۰، ۶۶-۳۹. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2022.68440.1008>
- قصابی، زهرا. و فتاحی، ابراهیم. (۱۴۰۰). طبقه‌بندی الگوهای گردش جوی روزانه در خاورمیانه و ایران. *مجله پژوهش های اقلیم شناسی*، (۴۵) ۱۴۰۰، ۴۲. https://clima.irimo.ir/article_132211.html
- شکفته، محمدرضا، جلیلی قاضی زاده، محمدرضا، و یزدی، جعفر. (۱۳۹۹). تئوری شناسایی محدوده‌ی نشت در نواحی مجزای مجازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، (۳) ۱۳۹۹، ۱۸۲-۱۶۶. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.182.3.166.3>

References

- Alvisi, S., & Franchini, M. (2009). Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 135(6), 425-439. [http://dx.oi.org/10.1061/\(ASCE\)1077-0375\(2009\)135:6\(426\)](http://dx.oi.org/10.1061/(ASCE)1077-0375(2009)135:6(426))
- Beuken, R.H.S., Lavooij, C.S.W., Bosch, A., & Schaap, P.G. (2008). Low leakage in the Netherlands confirmed. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-10. [http://dx.oi.org/10.1061/40941\(247\)174](http://dx.oi.org/10.1061/40941(247)174)
- Bozkurt, C., Firat, M., Abdullah, A.T.E.Ş., Yilmaz, S., & Özdemir, Ö. (2022). Strategic water loss management: current status and new model for future perspectives. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(2), -322-330. <https://dx.oi.org/10.1744/sigma.2022.00035>
- Cassidy, J., Barbosa, B., Damiano, M., Ramalho, P., Ganhão, A., Santos, A., & Feliciano, J. (2021). Taking water efficiency to the next level: digital tools to reduce water. *Journal of Hydroinformatics*, 23(3), 455-463. [http://dx.oi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2020\)23:3\(455\)](http://dx.oi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2020)23:3(455))
- Chawira, M., Hoko, Z., & Mhizha, A., (2022). Partitioning revenue water for Juru Rural Service Centre, Goromonzi District, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A/B/C*, 10311-125. <http://dx.oi.org/10.1016/j.pce.2022.103113>
- Fang, Q., Zhang, J., Xie, C., & Yang, Y. (2019). Detection of multiple leakage points in water distribution networks based on convolutional neural networks. *Water Supply*, 19(8), 2223-2239. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2019.105>
- Fallahi, H., Jalili Ghazizadeh, M., Aminnejad, B., & Yazdi, J. (2021). Leakage detection in water distribution networks using hybrid feedforward artificial neural networks. *AQUA Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(5), 687-697. <http://dx.oi.org/10.2166/aqua.2021.140>
- Farley, M., & Liemberger, R. (2005). Developing revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(1), 4-50. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2005.0006>
- Farouk, A.M., Rahman, R.A., Romali, N.S. (2021). Revenue water reduction strategies: a systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 181-199. <http://dx.doi.org/10.1108/SASBE-02-2021-0071>
- Favardin, P., Lepelley, D., & Serais, J. (2002). Borda rule, Copeland method and strategic manipulation. *Review of Economic Design*, 22(1), 1-13. <http://dx.oi.org/10.1007/s100580200073>
- Ghahramani, A., Zolfaghari, N., Masoompour Samakosh, J. (2022). Sea Level Circulation Patterns and Their Relationship with Atmospheric Rivers Affecting Heavy Rainfall in Iran. *Journal of Geography and Regional Development*, 20(4), 663-679. (In Persian) <https://doi:10.22067/jgrd.2022.68440.1008>
- Ghassabi, Z. & Fattahi, E. (2021). Classification of atmospheric circulation patterns in the Middle East and Iran. *Journal of Climate Research*, 1400(45), 127-142. (In Persian) https://clima.irimo.ir/article_132211.html
- Gul, M., Celik, E., Aydin, N., Gumus, A.T., & Guneri, A.F. (2016). A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications. *Applied Soft Computing*, 46, 60-89. <http://dx.oi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.040>
- Güngör-Demirci, G., Lee, J., Keck, J., Guzzetta, R., & Yang, P. (2018). Determinants of non revenue water for a water utility in California. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 67(3), 270-278. <http://dx.oi.org/10.2166/aqua.2018.152>

- Gupta, A.& Kulat, K.D. (2018). A selective literature review on leak management techniques for water distribution systems. *Water resources management*, 32(10), 323-329. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11265-018-1285-5>
- Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., & Fan, J. (2021). Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123511. <http://dx.oi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123511>
- Jang, D., & Choi, G. (2017). Estimation of revenue water ratio for sustainable management using artificial neural network - a case study in Incheon, Republic of Korea. *Sustainability*, 9(11), 1933-1947. <http://dx.oi.org/10.3390/su9111933>
- Jin, T., & Zhou, Z.Y. (2014). Multiple Leakage Detection and Localization Method Based on Bayesian Theory and Genetic Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 635, 924-927. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.635.924>
- Kanakoudis, V., & Gonelas, K. (2016). Revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: from theory to practice. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11436. <http://dx.oi.org/10.1080/19443994.2019.1610296>
- Lai, C.H., Tan, D.T., Roy, R., Chan, N.W., & Zakaria, N.A. (2020). Systems thinking approach for analysing revenue water management reform in Malaysia. *Water Policy*, 22(2), 237-251. <http://dx.oi.org/10.2166/wp.2020.165>
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 83-87. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Liemberger, R.& Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing Revenue Water in Developing Countries: How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. *Water supply and sanitation sector board discussion paper series, World Bank Publications*, Washington, DC <https://documents1.worldbank.org/curated/en/385761468330326484/pdf/394050R1eOwaterOWSS81PUBLIC1.pdf>
- Liemberger, R. (2010). Recommendations for initial revenue water assessment. *IWA Water Loss*, 1-13. <https://documents1.worldbank.org/curated/fr/385761468330326484/pdf/394050ReducingRevenueWaterOWSS81PUBLIC1.pdf>
- Lijuan, W., Hongwei, Z., & Zhiguang, N. (2012). Leakage prediction model based on RBF neural network. In *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*. Springer, 454-458. http://dx.oi.org/10.1007/978-3-71-837184-5_56
- Majidi Khalilabad, N., Mollazadeh, M., Akbarpour, A., & Khorashadizadeh, S. (2018). Leak detection in water distribution system using Kalman filter. *Iran University of Science & Technology*, 8(2), 189. <http://ijoce.ust.ac.ir/article.html>
- Mardani, A., Zavadskas, E.K., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2016). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, 8(14), 937. <http://dx.oi.org/10.3390/su8010037>
- McKenzie, R.S., Sigalaba, Z.N., & Wegelin, W. (2012). The state of revenue water in world. Pretoria. Water Research Commission, Johannesburg, South Africa. <https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%2025.pdf>
- Nasara, M.A., Zubairu, I., Jagaba, A.H., Azare, A.A., Yerima, Y.M., & Yerima, B. (2021). Assessment of Revenue Water Management Practices in Nigeria (A Case Study of Bauchi State Water and Sewerage Cooperation). *American Journal of Engineering Research* 10(5), 3901. <https://www.jer.org/paper/issue/5/ZU1005390401.pdf>

- Paramasivam, S.S.S.S., Kumaran, B., Natarajan, H. (2020). Taguchi additive ratio assessment (ARAS) method in multi-criteria decision making: a case study for treated drill tools performance. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 12(1), 114121
https://ijmmt.ro/vol12no12020/15_Sundar_Singh_Sivam_Sundarlingam_Paramasivam.pdf
- Pérez-Pérez, E.D.J., López-Estrada, F.R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., & Mina Antonio, J. D. (2021). Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. *Control Engineering Practice*, 107, 9104677
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal* 45(1), 25
<http://dx.doi.org/10.1080/15730621003610878>
- Rahman, A., Jahan, S., Yildirim, G., Alim, M.A., Haque, M.M., Rahman, M.M., & Kausher, A.H.M., (2022). A Review and Analysis of Water Research, Development, and Management in Bangladesh. *Water*, 14(12), 1834. <https://doi.org/10.3390/w14121834>
- Rojek, I., & Studzinski, J. (2019). Detection and localization of water leaks in water networks supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities. *Sustainability*, 11(2), 5318 <http://dx.doi.org/10.3390/s110205318>
- Saari, D.G., & Merlin, V.R. (1996). The Copeland method: I: relationships and the dictionary. *Economic theory*, 8, 761. <http://dx.doi.org/10.1007/s001990050077>
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2013). The analytic network process. *Springer US*, 367, 124780. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-9876-1_1
- Sabale, R., Venkatesh, B., & Jose, M. (2023). Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 12. <http://dx.doi.org/10.1007/s41206-022-00292-9>
- Shekofteh, M. R., Jalili Ghazizadeh, M., & Yazdi, J. (2020). Theoretical identification of leakage areas in virtual district metered areas of water distribution networks using artificial neural networks. *Urban-Water Resources Research*, 16(3), 462. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.4.2>
- Shravani, D., Prajwal, Y.R., Prapulla, S.B., Salanke, N.G.R., Shobha, G., & Ahmad, S.F. (2019). A machine learning approach to water leak localization. *International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solution*, 4
<http://dx.doi.org/10.1109/CSITSS47250.2019.9031010>
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management decision*, 48(5), 775-788.
<http://dx.doi.org/10.1108/00251741011043920>
- Şişman, E., & Kızılöz, B. (2020). Artificial neural network system analysis and Kriging methodology for estimation of revenue water ratio. *Water Supply*, 20(5), 881-891
<http://dx.doi.org/10.2166/ws.2020.095>
- Şişman, E., & Kızılöz, B. (2020). Trend-risk model for predicting revenue water: an application in Turkey. *Utilities Policy*, 67, 108137
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jup.2020.101137>
- Steffelbauer, D.B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., & Piller, O. (2022). Leak detection duality for leak detection and localization in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021106
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-2.0001515](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-2.0001515)

Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Faghihi, N.R., & Heydarzadeh, R. (2018). Risk assessment of factors influencing groundwater water using Bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32(11), 3636-3647. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11220-018-0118-8>

Vermersch, M., & Rizzo, A. (2008). Designing an action plan to control water. *Water*, 21, 39. <http://prowat2.bworks.com/f/WS1++Designing+an+action+plan+to+control+NRW.pdf>

Zavadskas, E.K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and economic development of economy*, 16(2), 159-172. <https://www.researchgate.net/journal/Technological-and-Economic-Development> 13928619



Investigation and evaluation of settlement, displacement and pore pressure parameters obtained from instrumentation data (Case Study: Golestan earthen dam)

Shaban Rasooli¹ , Abdolreza Zahiri² , Mahdi Meftah Helghi³ and Farzin Salmasi⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: rasolishaban@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: zahiri.areza@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: meftahhalaghi@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Tabriz University, East Azarbaijan, Iran. E-mail: ferzin.salmasi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 06 April 2025
Received in revised form 07 July 2025
Accepted 12 September 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:
earthen dam,
monitoring,
Golestan dam,
instruments,
settlement.

ABSTRACT

Objective: Instrumentation and monitoring of dams, especially in earthen dams, is one of the basic and vital steps in the construction and operation of these structures, and it is necessary to control the construction, ensure safety and reduce their operational costs. In this study, the behavior of the Golestan earthen dam during the periods of construction, first impounding and operation were investigated and analyzed.

Method: To carry out the required analysis, the data of piezometers, settlement gauges and inclinometers of the Golestan earthen dam were extracted during the above three time periods, and based on these data, the settlement of the dam as well as its horizontal and vertical displacement were evaluated according to standard criteria. The ratio of excess pore water pressure was also analyzed.

Results: The instrumentation results and also observations from downstream of the dam reservoir showed that the difference in the rate of settlement of the dam body at higher levels compared to lower levels is somewhat more than expected. The results showed that the middle part of the dam crest experienced the highest settlement of about 55 cm which is acceptable compared to the allowed value of 1.5 m. Moreover, the results of the piezometers confirm the seepage flow through the sealant wall with a permeability coefficient.

Conclusions: Golestan Dam has a suitable condition in terms of displacement and settlement, and the instruments showed reasonable values within the allowed range. Although some cases like seepage from the sealing element do not endanger the stability of the dam, it is necessary to be taken into account and managed with the help of a more detailed analysis of the instrumentation data and the analysis of the structural behavior of the dam.

Cite this article: Rasooli, Sh., Zahiri, A.R., Meftah Helghi, M., & Salmasi, F. (2026). Investigation and evaluation of settlement, displacement and pore pressure parameters obtained from instrumentation data (Case Study: Golestan earthen dam). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 25-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12129.1166>



Introduction

Instrumentation and monitoring of dams, especially in earthen dams, is one of the basic and vital steps in the construction and operation of these structures, and it is necessary to control the construction, ensure safety and reduce their operational costs. To measure the dam responses regarding the special changes due to environmental phenomena such as floods, earthquake, cracking, liquefaction of foundation soils, piping, etc., several sensitive locations within the dam body and its foundation are monitored with a single instrument or a group of instruments. This process includes measuring various quantities such as pore water pressure, water level, and internal stress ratios using inspection devices such as ordinary and Casagrande piezometers, internal settlement gauges and total pressure cells during construction and operation of the dam. In this study, the behavior of the Golestan earthen dam during the periods of construction, first impounding and operation were investigated and analyzed.

Method

To carry out the required analysis, the data of piezometers, settlement gauges and inclinometers of the Golestan earthen dam during the above three time periods were extracted and based on these data, the settlement of the dam as well as horizontal and vertical displacement were evaluated according to the standard criteria. The ratio of excess pore water pressure (R_U) was also analyzed.

Results

The instrumentation results and also observations from downstream of the dam reservoir showed that the difference in the rate of settlement of the dam body at higher levels compared to lower levels is somewhat more than expected. The results showed that the middle part of the dam crest experienced the highest settlement of about 35 cm which is acceptable compared to the allowed value of 70 cm. Moreover, the results of the piezometers confirm the seepage flow through the sealant wall with a permeability coefficient of 0.00002 m/month. The R_U associated with S4 and S5 piezometers, which are located adjacent to the drainage gallery and have the highest pore water pressures, show values less than 0.3 on all dates. Therefore, all sections are safe from a hydraulic failure standpoint and showing satisfactory conditions with no immediate risk of uplift.

Conclusions

Golestan Dam has a suitable condition in terms of displacement and settlement, and the instruments show reasonable values within the allowed range. Although some cases like seepage from the sealing element do not endanger the stability of the dam, it is necessary to be taken into account and managed with the help of a more detailed analysis of the instrumentation data and the analysis of the structural behavior of the dam.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical Considerations

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

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی و ارزیابی پارامترهای نشست، جابه‌جایی و فشار حاصل از داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی: سد خاکی گلستان)

شعبان رسولی^۱، عبدالرضا ظهیری^۲، مهدی مفتاح هلقی^۳، و فرزین سلماسی^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: rasolishaban@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: zahiri.areza@gmail.com

۳. گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: mefthalmalaghi@gmail.com

۴. گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: ferzin.salmasi@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: ابزارگذاری و رفتارنگاری سدها به‌ویژه در سدهای خاکی، یکی از مراحل اساسی و لازم در فرایندهای ساخت و بهره‌برداری این سازه‌ها بوده و برای کنترل ساخت، تضمین ایمنی و کاهش هزینه‌های اجرائی آنها ضروری است. در این تحقیق رفتار سد خاکی گلستان واقع بر رودخانه گرگانرود در استان گلستان در طی دوره زمانی ساخت، اولین آنگیری و نیز دوره بهره‌برداری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

روش پژوهش: برای انجام تحلیل موردنظر، داده‌های ابزار دقیق پیزومترها، نشست سنج‌ها و انحراف سنج‌های سد خاکی گلستان در طی سه مرحله زمانی فوق (بیش از ۱۵ سال)، استخراج و بر اساس این داده‌ها، نشست سد و تغییر شکل‌های افقی و قائم آن طبق ضوابط استاندارد بررسی شدند. همچنین نسبت فشار آب منفذی اضافی نیز تحلیل شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

یافته‌ها: نتایج داده‌های ابزار دقیق و نیز مشاهدات پایین‌دست مخزن سد نشان داد که اختلاف مقادیر نرخ و میزان نشست بدنه سد در ترازهای بالاتر در مقایسه با ترازهای پایین‌تر تا حدودی بیشتر از حد انتظار است. حداکثر مقدار نشست در وسط تاج سد حدود ۵۵ سانتی‌متر بود که در مقایسه با محدوده مجاز ۱/۵ متری قابل قبول است. همچنین نتایج پیزومترهای پی، آنگذری از دیواره آب‌بند با ضریب نفوذپذیری قابل قبول را تأیید نمود.

کلیدواژه‌ها:
سد خاکی،

رفتارسنجی،

سد گلستان،

ابزار دقیق،

نشست.

نتیجه‌گیری: سد گلستان از نظر میزان انحراف و نشست دارای وضعیت مطلوبی بوده و ابزار دقیق، اعدادی منطقی و در محدوده مجاز را نشان می‌دهند. برخی موارد مثل نشست از المان آب‌بند اگرچه پایداری سد را به مخاطره نمی‌اندازد، اما لازم است موردتوجه قرار گرفته و به کمک تحلیل دقیق‌تر داده‌های ابزار دقیق و نیز تحلیل رفتار سازه‌ای سد مدیریت شود. به‌طور کلی و بر اساس رفتارسنجی و شواهد حاصل از بازرسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سد گلستان پس از گذشت بیش از ۲۲ سال از بهره‌برداری آن، در وضعیت مطلوبی از نظر پایداری و ایمنی قرار دارد. نتایج حاصل از پیزومترها و مشاهدات پایین‌دست بیانگر کارایی نسبتاً مطلوب تنوره و پتوی زهکش است.

استناد: رسولی، شعبان؛ ظهیری، عبدالرضا؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ و سلماسی، فرزین. (۱۴۰۵). بررسی و ارزیابی پارامترهای نشست، جابه‌جایی و فشار حاصل از داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی: سد خاکی گلستان). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۶ (۱)، ۴۳-۲۵.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12129.1166>



مقدمه

در طراحی هر سازه بزرگی مثل سد علاوه بر در نظر گرفتن یک سری مفروضات و معیارها برای بررسی و کنترل رفتار آن در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری، اندازه‌گیری‌های واقعی برخی از پارامترها که بتوان به کمک آنها عملکرد رفتار سازه‌ای سد را بیان نمود نیز لازم است. ایمنی و پایداری سدهای خاکی نه تنها به طراحی و اجرای صحیح آن وابسته است، بلکه به پایش مداوم رفتار این سازه در طول دوره بهره‌برداری نیز بستگی دارد (هسو و همکاران^۱، ۲۰۰۷). بدیهی است در صورت وقوع هرگونه خرابی در سدهای بزرگ، اقتصاد ملی متحمل زیان شده و زندگی و دارایی مردم در معرض خطر قرار خواهد گرفت. تخریب سدهای خاکی به‌ویژه اگر در زمان بارش‌های سنگین و ورود جریان‌های سیلابی باشد، توأم با ایجاد جریان‌های با غلظت بالای رسوب در پایین‌دست سد خواهد بود. آشفتگی قابل‌توجه جریان و چگالی بالای آن باعث فرسایش شدید (کف‌کنی) بستر و دیواره‌های رودخانه و در نتیجه افزایش غلظت رسوبات معلق می‌شود. این پدیده منجر به تخریب رودخانه و حوضه آن، از بین رفتن پوشش گیاهی، سیل‌گیری اراضی اطراف رودخانه در پایین‌دست سد و نهایتاً رسوب‌گذاری شدید در انتهای سیلاب خواهد شد (دقیق و همکاران، ۱۳۹۴). خسارت بالای ناشی از خرابی سدها نشان‌دهنده اهمیت قابل‌توجه مراقبت و ایمنی سدهای بزرگ است. بر اساس گزارش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۲، ۱۹۶۹؛ و انجمن مهندسان عمران آمریکا^۳، ۲۰۰۰)، درصد قابل‌توجهی از شکست سدها در شرایطی بوده است که آنها دارای سیستم پایش پایداری نبوده‌اند (جانسون^۴، ۱۹۹۷؛ اداره بازسازی ایالات متحده^۵، ۲۰۱۴؛ و ال بیلالی و همکاران^۶، ۲۰۲۱).

تغییرات اقلیمی در تمامی نقاط دنیا باعث تغییرات شدید در مقدار و فراوانی پدیده‌های هیدرولوژیکی شده است، به‌طوری که وقوع توأم سیلاب‌های شدید و بلافاصله پس از آن، خشکسالی به امری معمول تبدیل شده است. یکی از راهکارهایی که می‌تواند تا حدودی برای مدیریت هر دو پدیده فوق (سیلاب و خشکسالی) مورد استفاده قرار گیرد، سدهای مخزنی هستند. اهمیت و دلایل نصب ابزار دقیق در سدهای مخزنی و به‌ویژه سدهای خاکی در زمان‌های خاص مثل وقوع سیلاب، خشکسالی و زلزله آن قدر مهم است که تأثیر مستقیم بر عملکرد بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها دارد. مثلاً با افزایش حجم و تراز سطح آب مخزن در اثر ورود سیلاب، مقادیر پیژومترها، فشارسنج‌ها و انحراف‌سنج‌ها با شرایط نرمال و عادی متفاوت خواهد بود و عکس رفتار آنها آن در شرایط خشکسالی است (سید کلبادی^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). اولین داده ثبت شده از سدها مربوط به سد گراس بويس در کشور فرانسه در سال ۱۸۵۳ بوده است (فریمون و همکاران^۸، ۲۰۱۶). در طی قرن نوزدهم در آمریکا، هند، اروپا و آسیا برای بررسی پدیده نشت از سدهای احداث شده در مناطق آبرفتی، ابزار دقیق متفاوتی مثل پیژومترهای لوله باز استفاده شدند (سید کلبادی و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین از قدیمی‌ترین موارد استفاده از داده‌های ابزار دقیق می‌توان به نصب پیژومترهای هیدرواستاتیکی سد کوبول در آمریکا در سال ۱۹۳۸ اشاره نمود (ماجوروس و اسنید^۹، ۱۹۸۱). بر اساس نتایج بررسی ۱۴۷۰۰ سد منتشر شده در گزارش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (۱۹۸۳)، شی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۵) مشخص نمود که ۷ درصد سدها در حال تخریب و ۰/۷ درصد آنها به‌صورت کامل تخریب شده‌اند. همچنین سدهای خاکی، ۷۴ درصد بیشتر از سدهای بتنی دچار تخریب شده‌اند. این واقعیت به‌وضوح لزوم پایش رفتار سدهای خاکی را آشکار می‌کند (رشیدی و حائری^{۱۱}، ۲۰۱۷).

1. Hsu et al
2. ICOLD
3. ASCE
4. Johansson
5. USBR
6. EL Bilali et al
7. Seyed-Kolbadi et al
8. Frémion et al
9. Majoros & Sneed
10. She et al
11. Rashidi & Haeri

در ادبیات مهندسی گاهی از سدها به عنوان موجود زنده یاد می‌شود، زیرا ضمن ایجاد تغییرات شگرف در محیط اطراف و اکوسیستم منطقه، بدنه سد و نیز مخزن آن به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی (مثل زلزله و باد)، هیدرولیکی (مثل فشار آب مخزن و رسوب‌گذاری)، و هواشناسی (مثل بارش و سیلاب) قرار می‌گیرند. این موضوع برای سدهای خاکی مهم‌تر و شدیدتر است. سدهای خاکی سازه‌هایی هستند که برای ذخیره آب و نیز اهداف دیگری از قبیل مدیریت سیل، تولید برق‌آبی، تفریحات آبی و... احداث می‌شوند. بر خلاف سدهای وزنی - بتنی که در رودخانه‌های کوهستانی دارای بستر و سواحل سنگی اجرا می‌شوند، سدهای خاکی از نظر جنس پی دارای محدودیت کمتری بوده و در بازه‌های کوهپایه‌ای و حتی دشت با بستر شنی و ماسه‌ای نیز قابل احداث هستند. این سدها دارای فرایند ساخت ساده‌تری بوده و از نظر مصالح نیز به صرفه‌تر هستند. همچنین سدهای خاکی در مقایسه با سدهای بتنی دارای انعطاف بهتری برای پذیرش بار دینامیکی ناشی از نیروی زلزله هستند (استفنز^۱، ۲۰۱۰). احتمالاً به دلیل همین مزایا است که از حدود ۵۸۰۰۰ سد بزرگ دنیا، حدود ۷۷ درصد آنها از نوع خاکی و یا خاکی - سنگ‌ریزه‌ای هستند (آدامو و همکاران^۲، ۲۰۲۰). مصالح سدهای خاکی متنوع بوده و بر اساس نوع کارکرد هر منطقه از بدنه سد تغییر می‌کنند (تورومانوویک^۳، ۲۰۱۸). این مصالح شامل خاک رس، ماسه، شن و قلوه‌سنگ هستند. باتوجه به تنوع مصالح به کاررفته در بدنه و هسته سد و نیز اثرات متقابل حجم عظیم آب مخزن با خاک بدنه و هسته سد، رفتار این سازه در شرایط مختلف هیدرولیکی و ژئوتکنیکی (پی) پیچیده بوده و ارزیابی ایمنی و پایداری سازه‌ای و ژئوتکنیکی این سازه‌ها، نیازمند تحلیل‌های خاصی است (عالی‌محمدی پیرانشاهی و همکاران، ۱۴۰۰). از طرف دیگر، احداث این سدها نیز پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین بررسی مباحث مربوط به ایمنی این سازه‌ها در حین ساخت و نیز در دوره بهره‌برداری دارای اهمیت زیادی است. یکی از مهم‌ترین مباحث مرتبط با پایداری سدهای خاکی، گسیختگی شیروانی‌ها در شرایط مختلف است که نیازمند رفتارسنجی مستمر است (یحیایی‌نیا، ۱۳۹۹). در این راستا برای بررسی وضعیت پایداری این سازه، ادوات ابزار دقیق در مناطق مختلف سد نصب شده و در طی مراحل اجرای سدها مواردی از قبیل مقادیر تنش (میزان فشار وارده)، تغییر شکل و مقدار جابه‌جایی (شامل میزان نشست سازه‌ای و میزان انحراف) در گالری سیستم انتقال بررسی می‌شود. نتایج این بررسی‌ها می‌تواند در تعیین مجهولاتی که در اثر فشار، نشست و انحراف در سازه ایجاد می‌شود، اثربخشی مهمی داشته باشد.

امروزه ابزار دقیق و تجهیزات رفتارنگاری به واسطه‌ی ارتقای فناوری ساخت، اهمیت ویژه‌ای در کنترل پایداری و ایمنی سدها پیدا کرده‌اند. تقریباً همگی محققین اعتقاد دارند که اغلب باید به داده‌های ثبت شده توسط ابزار دقیق سدها اهمیت بیشتری نسبت به بازدهی‌های میدانی داده شود (دونیاس^۴، ۲۰۲۱). با انتخاب صحیح ابزار دقیق و وجود یک برنامه رفتارسنجی منظم در یک سد، می‌توان علاوه بر کنترل رفتار سد، بروز پدیده‌ها و عوامل مخرب آنها را شناسائی نموده و تمهیدات لازم برای جلوگیری از خرابی سد را انجام داد. به عنوان مثال، نشست از بدنه و پی سد خاکی ضمن کاهش حجم آب در مخزن، منجر به نیروی نشست، فشار آب منفذی و گرادیان هیدرولیکی خواهد شد و اگر این نیروها در محدوده مجاز کنترل نشوند، تبعاتی از قبیل زیرشویی^۵، نشست سد و یا لغزش سازه و نهایتاً تخریب سد خاکی قابل انتظار است (ییلماز^۶، ۲۰۱۷؛ زو و ژانگ^۷، ۲۰۰۹؛ و اوموفونمی و همکاران^۸، ۲۰۱۷) در طی ساخت سد به علت تغییرات تنش کل، فشار آب منفذی و همچنین اثرات خزش، ممکن است تغییر شکل‌های داخلی تحت تأثیر قرار گرفته و مواردی از قبیل حرکات ناهمسان پی و توزیع تنش نامتقارن در سد اتفاق افتند. این مسئله علاوه بر کاربرد در بررسی ایمنی سد، می‌تواند در ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی نیز مفید واقع شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

1. Stephens
2. Adamo et al
3. Toromanovic
4. Dounias
5. Piping
6. Yilmaz
7. Omofunmi et al
8. Xu & Zhang

باوجود پیشرفت‌های چشمگیری که در طول چند دهه اخیر در سامانه‌های ابزار دقیق از نظر قابلیت‌های هر ابزار، سهولت اندازه‌گیری، ارائه و انتقال داده‌ها... اتفاق افتاده است، کماکان مطالعات کافی در زمینه تحلیل داده‌های ابزار دقیق سدها محدود است (دونیاس، ۲۰۲۱). در اغلب گزارش‌های طراحی سدها در بخش ابزار دقیق، فقط عناوین این ابزار، موقعیت این ادوات در قسمت‌های مختلف سد و نیز حجم عظیمی از داده‌های ثبت شده ذکر می‌شود و تحلیل نتایج و رفتارنگاری سد در طول زمان مورد توجه کافی نبوده است. به همین دلیل، تاکنون مطالعات مرتبط با سدهای مخزنی بر مدل‌سازی عددی، مدل‌های بهینه‌سازی و استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین متمرکز بوده است که این تحقیقات برای سدهای خاکی کمتر از سدهای وزنی - بتنی است (ال بیلالی و همکاران، ۲۰۲۱)

در زمینه مدل‌سازی عددی، مطالعات سلماسی و حکیمی خانسر (۱۴۰۰) و سلماسی و همکاران (۱۳۹۷) برای سد خاکی کبودال (نگارستان) در استان گلستان و نیز دقیق و همکاران (۱۳۹۴) برای سد خاکی دریاچه چیتگر تهران قابل‌اشاره است. تحقیقات بهینه‌سازی نیز عمدتاً متمرکز بر بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی، ابعاد هسته رسی سد و یا ابعاد زهکش سد بوده‌اند (رضاییان و همکاران^۱، ۲۰۱۹؛ و کماسی و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در زمینه کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در بررسی پدیده نفوذ یا نشت در سدهای خاکی، تحقیقاتی انجام شده است که شامل مطالعات ژیانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۸)، نجف‌زاده^۵ (۲۰۲۰)، تانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۰)، پارسایی و همکاران^۷ (۲۰۲۱)، و رهام نیا و همکاران^۸ (۲۰۲۱) است. سیکا و همکاران^۹ (۲۰۱۹) یافتند که اگرچه تخمین نسبتاً دقیق دبی نشت از زیر یا درون سدهای خاکی را فراهم نموده و ارزیابی عملکرد راهکارهای مختلف کنترل این پدیده برای جلوگیری از شکست سد به‌ویژه در شرایط وقوع سیلاب (ایجاد حداکثر گرادیان هیدرولیکی) را امکان‌پذیر می‌کنند، اما نمی‌توانند تغییرات مکانی و نوسانات دبی نشت در نقاط بحرانی را با دقت مناسبی برآورد نمایند.

پانسولو و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۱) و فریمیون (۲۰۱۶) یافتند که نوسانات دبی می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی محیطی از قبیل وقایع هیدرولوژیکی، تغییرات سریع تراز آب زیرزمینی، و زلزله باشند. به‌عنوان راهکار جایگزین، می‌توان از تخمین سریع فاکتور پایداری سد به‌عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد برای جلوگیری از شکست سد و یا کاهش ریسک سیلاب با تخلیه سریع ساکنین محل در معرض خطر استفاده نمود. یکی از راه‌حل‌های نسبتاً ساده برای تخمین سریع فاکتور پایداری سد، اندازه‌گیری‌های روزانه فشار آب منفذی است.

مطالعات پاگانو و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۰) و دسیدری و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۳) تغییرات فشار آب منفذی در مناطق مختلف سد خاکی را مورد بررسی قرار داده است. آنها یافتند که تغییرات فشار آب منفذی در مناطق مختلف سد خاکی می‌تواند بیانگر پایداری شیب‌ها و شیروانی‌های سد خاکی در هر دو مرحله ساخت سد و دوره بهره‌برداری (سیستم پایش) باشد. این مسئله به‌وضوح اهمیت داده‌های ابزار دقیق سدهای خاکی را بیان می‌کند. نکته قابل‌توجه این است که با استفاده از داده‌های فشار آب منفذی، می‌توان دبی نشت و نیز نوسانات آن را در طول بدنه سد خاکی محاسبه نمود. نکته مهم دیگری که در مورد سدهای خاکی وجود دارد این است که انجام نمونه‌برداری‌های میدانی متداول از بخش‌های مختلف آنها و به‌ویژه منطقه نفوذناپذیر سد (هسته) نه تنها دشوار و پرهزینه است، بلکه ممکن است اثرات منفی بر کارکرد بدنه سد و نیز پایداری آن داشته باشد. این کار ممکن است

1. Rezaeian et. al
2. Komasi et. al
3. Xiang et al
4. Wang et al
5. Najafzadeh
6. Tang et al
7. Parsaie et al
8. Rehamnia et al
9. Sica et al
10. Panthulu et al
11. Pagano et al
12. Desideri et al

ساختار آب‌بندی سد را به خطر انداخته و باعث تشکیل حفره‌های نفوذ آب شود. همچنین همواره این سؤال مطرح است که آیا نمونه برداشت شده می‌تواند نماینده مناسبی از لایه خاک باشد (تورومانوویک و همکاران، ۲۰۱۸؛ تورومانوویک، ۲۰۱۸؛ و ال بیلالی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین داده‌های ابزار دقیق در این حالت نیز می‌توانند کمک مؤثری نمایند. رفتارنگاری سد علاوه بر مزایای مهم فوق، دارای این مزیت است که رفتار سد خاکی در مرحله ساخت می‌تواند نشان‌دهنده چگونگی رفتار آن در آینده باشد.

در این تحقیق با انتخاب سد خاکی گلستان واقع بر رودخانه گرگانرود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سدهای استان گلستان به‌ویژه برای تأمین آب اراضی کشاورزی و نیز مدیریت سیلاب‌های دوره‌ای این استان، رفتار پی و بدنه سد (به‌طور خاص در بخش‌های تکیه‌گاهی و میانی بدنه) برای بررسی تغییر شکل‌پذیری ارزیابی شده است. به این منظور، با جمع‌آوری داده‌های ادوات ابزار دقیق نصب شده در مناطق مختلف این سد (مجاور تکیه‌گاه‌ها، وسط دهنه سازه و نیز محدوده سازه بتنی خروجی گالری)، پارامترهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی مهم این سد از قبیل جابه‌جایی (شامل میزان نشست سازه‌ای و میزان انحراف) تحلیل شده و وضعیت پایداری این سد در طول دوره بهره‌برداری ارزیابی شده است. نتایج این بررسی‌ها می‌تواند در تعیین مجهولاتی که در اثر فشار، نشست و انحراف در سازه ایجاد می‌شود، اثربخشی مهمی داشته باشد. داده‌های مختلفی برای انجام این تحقیق مورد نیاز است. داده‌های اصلی شامل مقادیر نشست‌ها، جابه‌جایی، فشار آب منفذی و... بر اساس آمار ابزار دقیق نصب شده در مناطق مختلف بدنه و پی سد خاکی گلستان استخراج شده است. این داده‌ها به‌صورت زمانی ثبت شده‌اند. دوره آماری این داده‌ها، چهار سال در طول دوره ساخت سد، سه سال در دوره اولین آبیگری مخزن سد و هفت سال در دوره بهره‌برداری سد است.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه (سد خاکی گلستان)

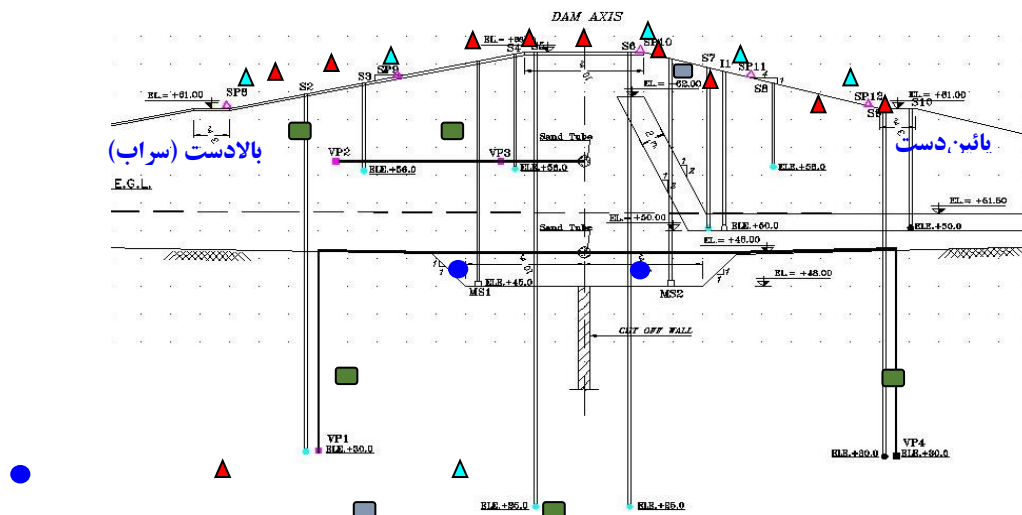
سد خاکی گلستان در ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهرستان گنبدکاووس با طول جغرافیایی ۳۰-۱۶-۵۵ و عرض جغرافیایی ۳۷-۱۹-۳۰ بر روی رودخانه گرگانرود در استان گلستان قرار دارد. این سد در پایین‌دست سد بوستان و در بالادست سد وشمگیر احداث شده است. مشخصات کلی این سد در جدول ۱ ذکر شده است. هدف از احداث این سد، توسعه اراضی ساحل راست رودخانه گرگانرود با استفاده از سیستم آبیاری ایستگاه پمپاژ در سطح خالص ۸۶۰۰ هکتار، کمک به بهبود اراضی فعلی شبکه آبیاری سد وشمگیر به وسعت ۹۲۰۰ هکتار و نیز کمک به مدیریت سیلاب‌های مخرب سالانه رودخانه گرگانرود است. ساخت این سد از سال ۱۳۷۶ شروع شده و بهره‌برداری از آن در اوایل سال ۱۳۸۰ آغاز شده است. در شکل ۱ این سد و موقعیت آن در کشور و استان گلستان نشان داده شده است. سد مذکور دارای اهمیت ویژه‌ای در استان گلستان است. این سد فواید بسیاری برای کشاورزان منطقه (تأمین آب آبیاری)، اهالی و ساکنین پایین‌دست (مدیریت سیلاب)، و نیز سامانه‌های آبی مثل تالاب‌های استان گلستان (تأمین حقابه محیط‌زیستی) دارد. در شکل ۲ تصویر ماهواره‌ای سد مخزنی گلستان (به تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۱) نشان داده شده است.



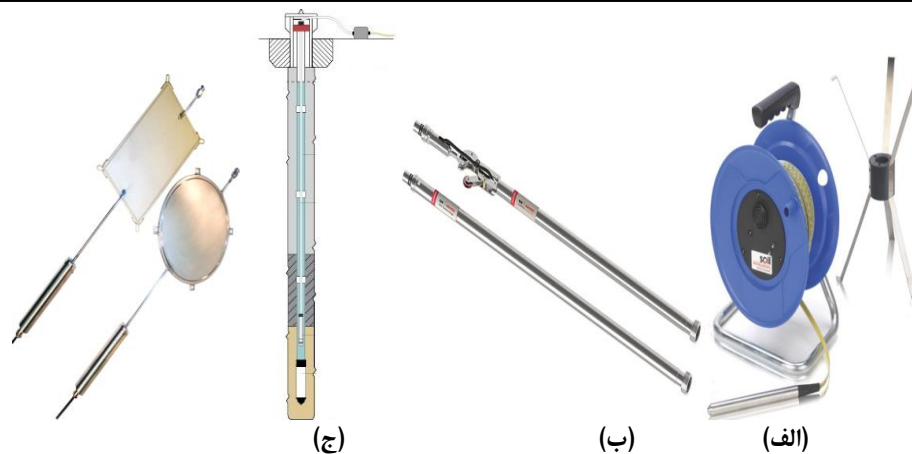
شکل ۲ تصویر ماهواره‌ای سد مخزنی گلستان (تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۱)

۲. تجهیزات رفتارسنجی و ابزار دقیق سد

ابزار دقیق رفتارنگاری سد گلستان در ۴ مقطع عرضی، بدنه و پی سد توزیع شده‌اند. این ابزار شامل ۶۲ پیژومتر (پیژومترهای الکتریکی پی و شیروانی‌ها، پیژومتر کاساگرانده و سلول فشار کل)، ۸ انحراف سنج، ۸ نشست‌سنج، و یک سرریز مثلثی اندازه-گیری دبی تراوش یا نشست هستند (شکل ۳). این ابزار ساخت شرکت کانادایی Roctest هستند. این دستگاه‌ها در بازه زمانی حداکثر سه‌ساله، کالیبره (واسنجی) می‌شوند. البته بعد از وقوع پدیده‌های حدی مثل سیلاب و زلزله نیز این دستگاه‌ها باید کالیبره شوند. دقت اندازه‌گیری دستگاه‌های ابزار دقیق مختلف معمولاً متفاوت است. دقت ادوات مورد استفاده در سد خاکی گلستان برای دستگاه‌های انحراف سنج، $1 \pm \text{mm}$ ، برای دستگاه‌های پیژومتر نشست و سطح آب، $3 \pm \text{mm}$ و برای دستگاه‌های فشارسنج، $5 \pm \text{Pa}$ است. در شکل ۴، ابزار این سد شامل سلول فشار کل، پیژومتر کاساگرانده و انحراف سنج نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت ابزار دقیق در سد خاکی گلستان (SP نقاط مشاهده‌ای، S پیژومتر کاساگرانده، MS نشست‌سنج، VP پیژومتر تار مرتعش، I انحراف‌سنج)



شکل ۴. ابزار دقیق سد گلستان، الف) سلول فشار کل، ب) پیزومتر کاساگرانده، و ج) انحراف سنج

جدول ۲. مشخصات پیزومترهای الکتریکی و پیزومترهای کاساگرانده در سد گلستان

نام	فاصله از محور سد (متر)	تراز نصب (متر)	محل نصب	موقعیت
S2	۸۰	۵۱	بالادست	سراب سد
S3	۷۰	۵۴	بالادست	سراب سد
S4	۵۰	۵۷	بالادست	سراب سد
S5	۲۰	۵۹	بالادست	تاج - سراب سد
S6	۲۰	۵۹	پایین دست	تاج - پایاب سد
S7	۵۰	۵۷	پایین دست	پایاب سد
S8	۷۰	۵۴	پایین دست	پایاب سد

جدول ۳. مشخصات سلولهای فشار کل در سد گلستان

نام	فاصله از محور سد (متر)	تراز نصب (متر)	محل نصب	موقعیت
TCP1,2	۸۰	۵۴	بالادست	روی گالری
TCP3,4	مرکز	۵۴	میانی	روی گالری
TCP5,6	۸۰	۵۴	پایین دست	روی گالری

یافته‌های پژوهش

۱. بررسی نسبت فشار آب منفذی اضافی (R_U)

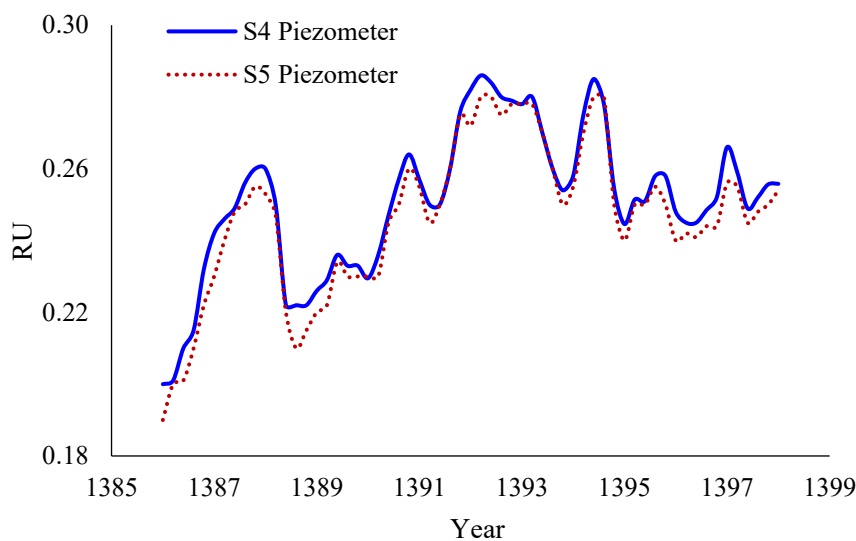
یکی از پارامترهای بسیار مهم در ارزیابی ایمنی سدهای خاکی به‌ویژه برای پایداری شیروانی‌ها و نیز بررسی پتانسیل روان‌گرایی، نسبت فشار آب منفذی اضافی (U) به تنش مؤثر قائم سربار (σ_v) است (R_U):

$$R_U = \frac{U}{\sigma_v} = \frac{\gamma_w \times h_w}{\gamma_s \times h_s} \quad (1)$$

که γ_w و γ_s وزن مخصوص آب و ذرات خاک، h_w فشار آب منفذی و h_s فاصله از سطح زمین است. مقدار نسبت فشار آب منفذی اضافی بین ۰ و ۱ متغیر است. هرچه مقدار این نسبت بزرگتر باشد، بیانگر پتانسیل بالاتر آب برای خروج از خاک است. به ازاء مقادیر کوچکتر از ۰/۴، شرایط سد ایمن و مطلوب است. در محدود ۰/۴-۰/۶ پتانسیل ریسک وجود دارد و بخش موردنظر سد باید به‌صورت مستمر ارزیابی و پایش شود. در حالت مقادیر بزرگتر از ۰/۶، شرایط سد بحرانی بوده و با افزایش این نسبت، احتمال

تخریب و نهایتاً شکست سد وجود دارد. در شرایط حدی و مقادیر بزرگتر از ۱، شکست هیدرولیکی سد اتفاق خواهد افتاد (سید کلبادی و همکاران، ۲۰۲۱)

نتایج تغییرات زمانی این پارامتر در طی سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۸۶ (دوره بهره‌برداری) برای پیزومترهای واقع در موقعیت‌های S4 (بالادست تاج) و S5 (تاج سد) در شکل ۵ نشان داده شده است. باتوجه به اینکه این دو پیزومتر تقریباً در یک تراز نصب شده‌اند، مشاهده می‌شود که منحنی این دو پیزومتر بر هم منطبق بوده و محدوده تغییرات این نسبت حدود ۰/۲۹-۰/۲۰ است که بیانگر ایمن و مطلوب بودن شرایط پایداری سد گلستان است. دلیل انتخاب این پیزومترها این است که در مجاورت گالری قرار گرفته و قطعاً نسبت فشار آب منفذی اضافی آنها مقادیر بیشتری را در مقایسه با پیزومترهای دیگر نشان می‌دهند. در بقیه نقاط به دلیل تراکم بالای خاک، مقادیر این عدد بسیار کمتر است. این نسبت با افزایش نوسانات سطح آب مخزن ارتباط مستقیم دارد به طوری که با افزایش نوسانات سطح آب مخزن در زمان سیلاب، روندی افزایشی داشته است.



شکل ۵. تغییرات نسبت فشار آب منفذی اضافی در سد گلستان در پیزومترهای S4 و S5

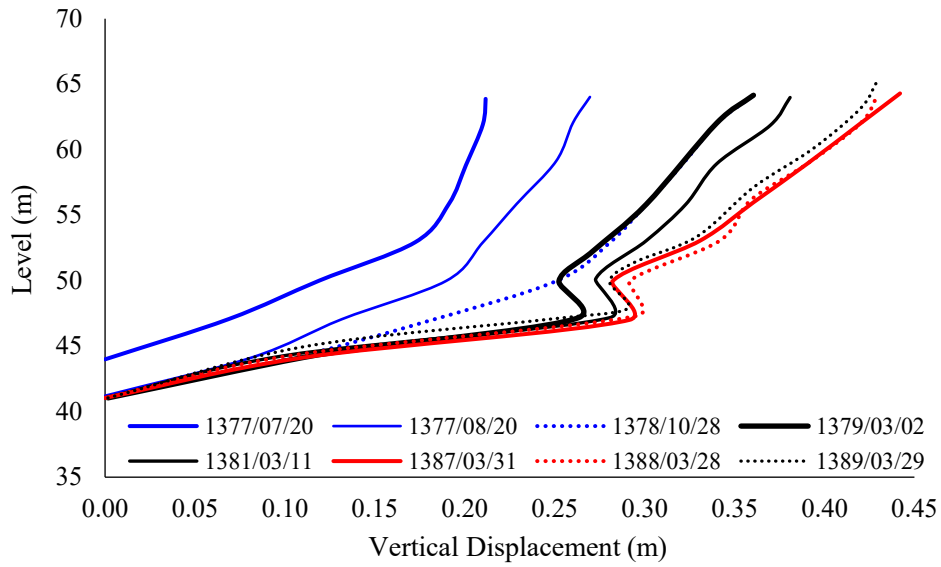
۲. بررسی نشست

حرکات و جابه‌جایی سازه‌ها در بخش‌های میانی و تکیه‌گاه‌های سد، نشانه واضحی از اثر نیروهای داخلی و خارجی وارد بر سازه و نیز عکس‌العمل یا رفتار سازه در برابر این نیروها است. پارامتر نشست سد در مقایسه با سایر پارامترهای کنترلی مثل نیرو بسیار ملموس‌تر بوده و می‌تواند تغییرات ایجاد شده در سد را به خوبی نشان دهد. به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها و حرکات بدنه سد، ۸ دستگاه نشست‌سنج با صفحات مغناطیسی در ۴ مقطع (در بالادست و پائین دست و به فاصله ۹ متری از محور سد) نصب شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به طور نمونه تغییرات جابه‌جایی شعاعی و تغییر شکل صفحات مختلف را در یکی از نشست‌سنج‌های واقع در مجاورت تکیه‌گاه سد (MS3) در طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۷۷ نشان می‌دهند. بررسی مقادیر نشست سنج‌ها که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیانگر این است که با نزدیک شدن به تکیه‌گاه سمت چپ سد، به دلیل تراکم مناسب اولیه، اختلاف بین نشست بالادست و پائین دست کاهش می‌یابد. از نظر مقدار، نشست کل بدنه در محل نشست‌سنج واقع در پائین دست مقطع ۱ بسیار بیشتر از سایر نشست‌سنج‌ها است. این وضعیت عمدتاً به دلایلی مثل نصب صفحات مغناطیسی پس از اجرای خاکریز توسط حفر چاهک و نحوه اجرای تراکم در اطراف لوله نشست، تراکم نسبی پایین خاک درون چاهک و تفاوت تراکم نسبی خاک درون چاهک در نشست‌سنج‌های مختلف اتفاق افتاده است. حداکثر مقدار نشست حدود ۴۴ سانتیمتر است که در مقایسه با مقدار نشست مجاز یا حداکثر نشست بعد از ۵ سال از اولین آبیگیری مخزن (حدود ۷۰ سانتیمتر) به میزان

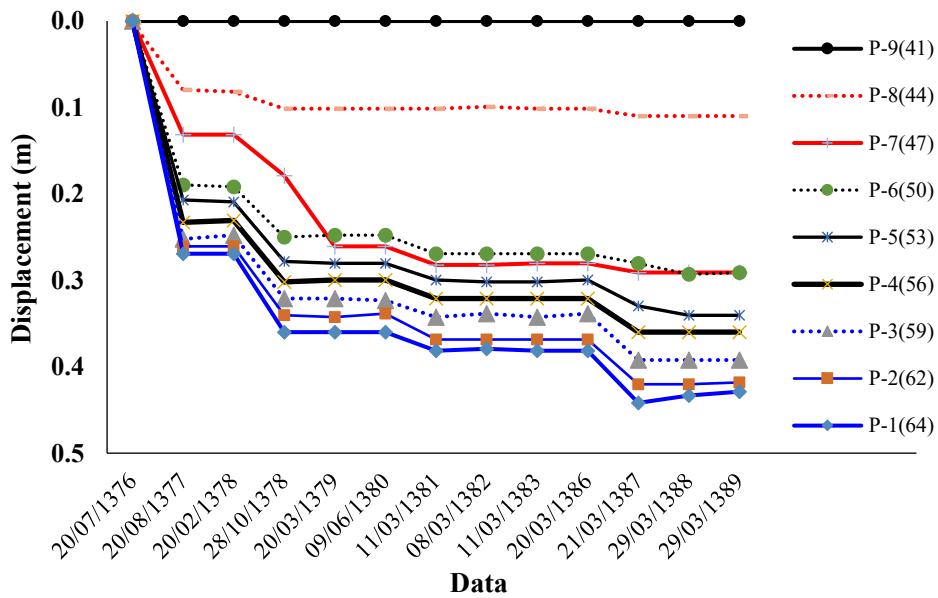
قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر است (شرکت آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۰). در تمامی موارد، نشست‌سنج نصب شده در بالادست، نشست کمتری نسبت به نشست‌سنج پائین‌دست نشان می‌دهد که در شکل ۷ نشان داده شده است. این اختلاف به دلیل عبور نشست‌سنج پائین‌دست از میان زهکش و محو شدن سریع رطوبت خاکریزی در این ناحیه است. مقادیر نشست تا سال ۱۳۷۸ (اتمام ساخت سد) با شیب زیادی در حال افزایش بوده و بعد از آگیری و بهره‌برداری، منحنی‌های نشست تقریباً صاف یا یکنواخت شده‌اند که بیانگر رفتار طبیعی و تحکیمی مصالح خاکی بوده و معمولاً این روند مشابه با منحنی چندجمله‌ای درجه ۴ است (گیکاس و ساکلاریو، ۲۰۰۸). نکته قابل اشاره در این شکل، برگشت منحنی‌ها از تراز ۴۷ متر تا ۵۰ متر است که این فرایند از سال ۱۳۷۹ و بعد از ۲ سال از شروع ساخت سد شروع شده است. بررسی‌های بیشتر بیانگر این است که این مسئله احتمالاً به دلیل تورم خاک است، به این دلیل که در زمان اجرای گالری تحتانی سد گلستان (سامانه انتقال آب از درون سد خاکی به پایین‌دست) که یکی از بخش‌های بحرانی سدهای خاکی است، در تراز ۴۴ تا ۴۷ متر از بتن برای پوشش اطراف لوله‌های فولادی گالری تحتانی استفاده شده است. سپس برای حفاظت مناسب این سامانه انتقال، به ارتفاع ۳ متر (از تراز ۴۷ تا ۵۰ متر) از بالشتک رسی استفاده شد. باتوجه به خاصیت ارتجاعی خاک رس، تورم این خاک می‌تواند یکی از دلایل اصلی برگشت تمامی منحنی‌ها (از سال ۱۳۷۹ به بعد) در تراز ۴۷ تا ۵۰ متر باشد.

در شکل ۸ همین وضعیت به صورت خلاصه برای نشست‌سنج MS5 واقع در وسط تاج سد به عنوان بحرانی‌ترین نقطه سد خاکی از نظر نشست یا جابه‌جایی قائم نشان داده شده است. در این شکل منحنی‌های نشست در دو زمان ابتدایی و انتهایی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در این نقطه حداکثر مقدار نشست بعد از حدود ۹ سال از ساخت سد حدود ۵۵ سانتیمتر ثبت شده است. مطابق استاندارد ICOLD، حداکثر نشست در طول دوره بهره‌برداری در این مقطع بحرانی حدود ۱/۵ متر است (شرکت آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۰). مقایسه این دو مقدار، وضعیت قابل قبول سد گلستان را نشان می‌دهد. این مقدار نشست، حدود ۰/۶۴ درصد ارتفاع سد گلستان (۸۶ متر) است که در محدوده مقدار متعارف نشست در سدهای خاکی (۰/۵ تا ۲ درصد ارتفاع سد) قرار می‌گیرد. همچنین حداکثر نشست این سد تقریباً معادل نشست سد خاکی ۱۰۳ متری پورناری I در یونان (حدود ۰/۶)، بیشتر از نشست سد خاکی ۱۲۶ متری مورنوس در یونان (۰/۴ درصد) و بسیار کمتر از نشست سد خاکی ۶۸ متری ایوشان (۱ درصد) و سنگ‌ریزه‌ای ۱۷۷ متری مسجدسلیمان در ایران (۲ درصد) است (آدامو و همکاران، ۲۰۰۰؛ پیسارولی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عمادعلی و متاق، ۲۰۲۰؛ و بیرانوند و همکاران، ۲۰۲۴) (2000; 2019; 2020; 2024). محققین مختلف، مقادیر متفاوتی از قبیل ۰/۲۵-۱ درصد ارتفاع سد، ۰/۳۵ درصد، ۰/۴-۰/۱ درصد را برای حداکثر مقدار نشست سدهای خاکی - سنگ‌ریزه‌ای پیشنهاد نموده‌اند (پیسارولی و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار ۲ درصد ارتفاع سد نیز توصیه شده است (کالوپ و لی، ۲۰۰۹).

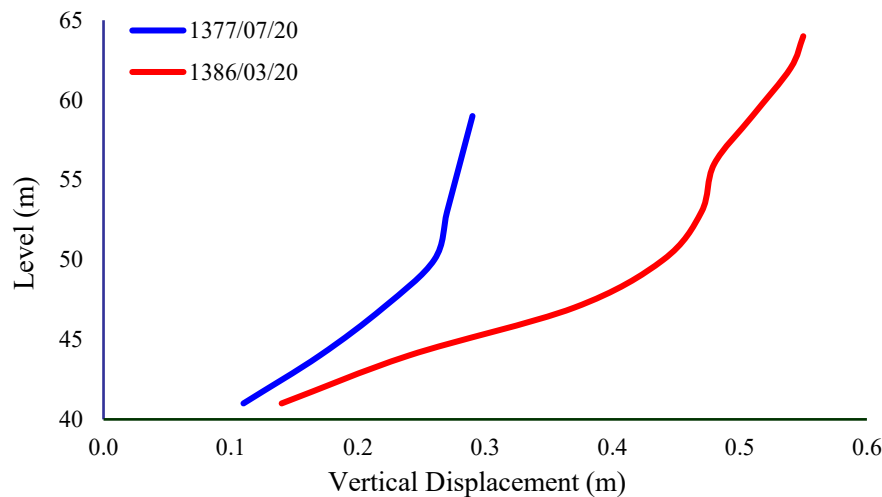
1. Gikas & Sakellariou
2. Adamo et al
3. Pytharouli et al
4. Emadali & Motagh
5. Beiranvand et al
6. Kaloop & Li



شکل ۶. تغییرات نشست با ارتفاع سد در ابزار نشست سنج سراب (MS3)



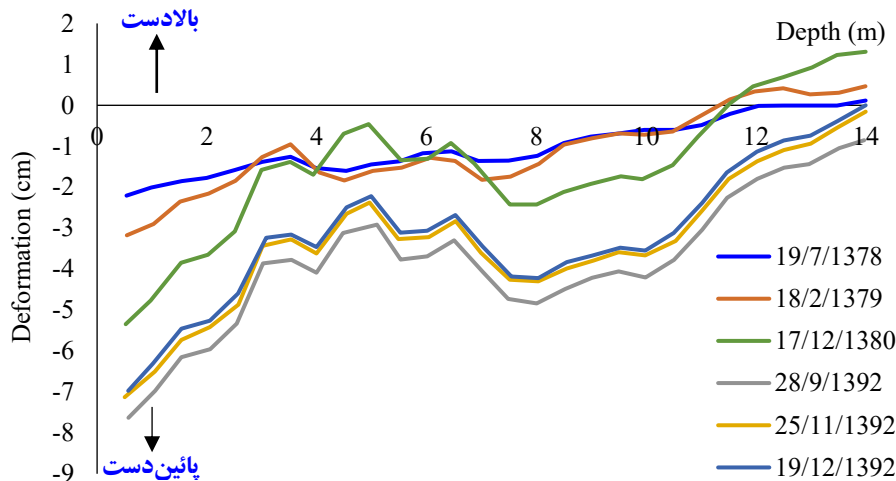
شکل ۷. تغییرات نشست صفحات در ابزار MS3



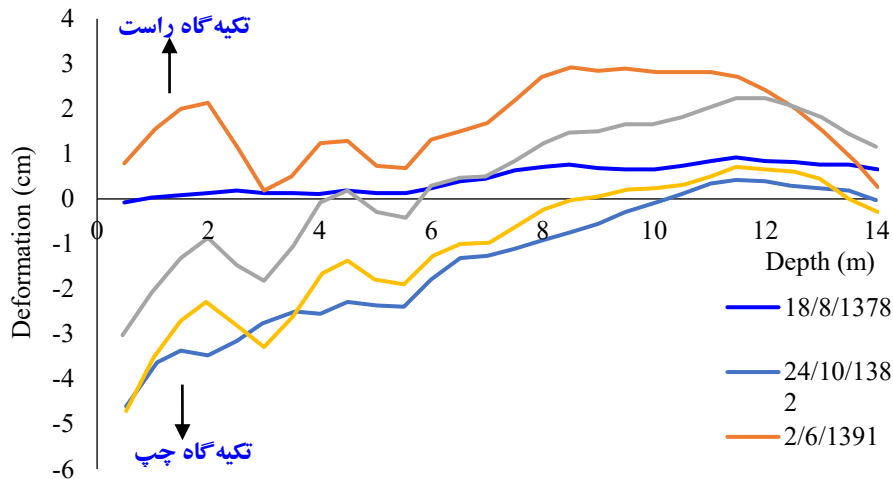
شکل ۸. تغییرات نشست با جابه‌جایی قائم در ترازهای مختلف در ابزار MS5 در وسط تاج سد (بحرانی‌ترین نقطه)

۳. تغییر شکل‌های افقی سد

هدف اصلی از نصب انحراف‌سنج، بررسی جابه‌جایی افقی درون بدنه سد با اندازه‌گیری انحراف افقی لوله راهنمای انحراف-سنج در فواصل یکسان است. انحراف در دو صفحه عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود که یکی عمود و دیگری موازی با آن است. انتهای لوله راهنمای انحراف‌سنج باید به‌عنوان مرجع و ثابت در نظر گرفته شود. بنابراین معمولاً انتهای این لوله در داخل پی سنگی و در محل ثابت قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تغییر مکان افقی در بدنه سد گلستان در مجموع ۴ سیستم انحراف-سنج در پوسته پایین دست نصب شده است (شکل ۲). این ابزار در پوسته پایین دست سد واقع شده و فاصله محور ابزار تا محور سد ۱۲ متر است. در واقع محل ابزارگذاری، نزدیک‌ترین مقطع به تکیه‌گاه سمت چپ است (نقطه A در شکل ۱). این مقطع به دلیل ورود هم‌زمان جریان آب دو رودخانه گرگانرود و اوغان به درون مخزن سد، بحرانی‌ترین مکان از نظر فشار و نشست است. همان‌طور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، میزان تغییر شکل یا جابه‌جایی نسبت به تراز بدنه سد دارای روندی افزایشی است، به این صورت که در ترازهای پایین‌تر، تغییر شکل بیشتر است. همچنین با نزدیک شدن به سطح پوسته سد، مقادیر تغییر شکل افقی بیشتر می‌شود. نمودار تغییر شکل‌ها در تاریخ‌های مختلف (شکل ۹) نشان می‌دهد که این تغییرات به سمت پائین-دست بوده و هیچ‌گونه تغییر شکل ناگهانی که نشان‌دهنده سطح لغزش باشد، ملاحظه نمی‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر تغییر شکل‌ها نسبی بوده و نسبت به اندازه‌گیری مینا (قرائت در زمان اولین اندازه‌گیری در تاریخ ۱۳۷۹) سنجیده شده است. حداکثر جابه‌جایی در تاج سد حدود ۷/۶ سانتیمتر و در سال ۹۲ است که نسبت به سال ۱۳۸۴ حدود ۱/۵ سانتیمتر افزایش داشته است. مقادیر مثبت تغییر شکل‌ها به‌خصوص در شکل ۱۰ ممکن است در اثر خطای قرائت ابزار انحراف‌سنج و یا در اثر گرفتگی لوله ابزار باشد. این نکته باید به‌صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد.



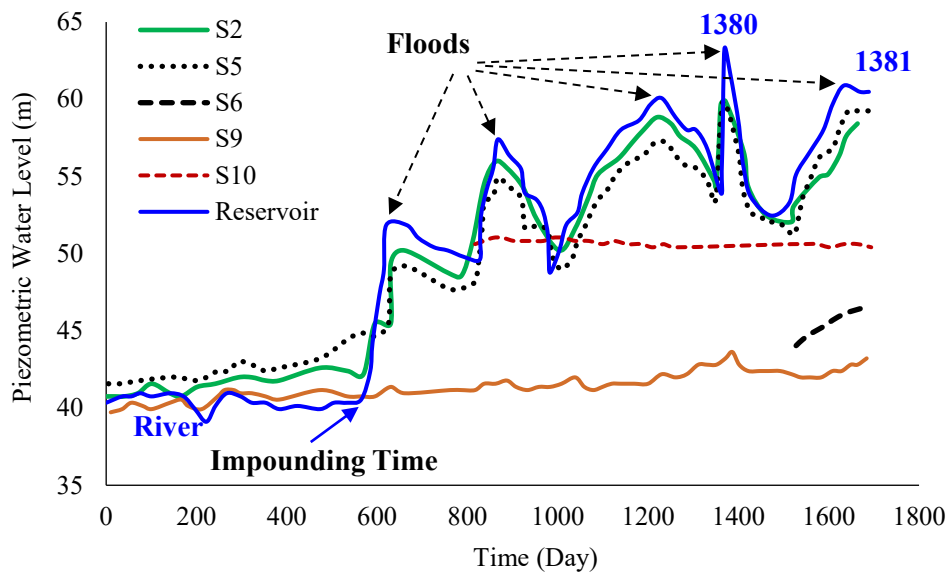
شکل ۹. تغییرات جابه‌جایی افقی سد در مقطع A در جهت بالادست - پائین دست



شکل ۱۰. تغییرات جابه‌جایی افقی سد در مقطع A در جهت چپ - راست

۴. بررسی فشار آب منفذی و تراوش آب

بررسی فشار آب منفذی و تغییرات آن در سدهای خاکی از اهمیت بسزایی برخوردار است، به طوری که افزایش فشار آب منفذی باعث کاهش مقاومت برشی و تنش مؤثر خاک گردیده و پایداری سد را به مخاطره می‌اندازد. بنابراین در سدهای خاکی همواره افزایش فشار آب منفذی مورد توجه قرار گرفته و با انجام تمهیدات لازم از افزایش بیش از حد آن جلوگیری به عمل می‌آید. برای بررسی فشار آب منفذی و تراوش در سد گلستان در ۴ مقطع ابزارگذاری از پیزومترهای کاساگرانده و الکتریکی - تار مرتعش استفاده شده است. تغییرات سطح آب پیزومتریک و تراز آب مخزن پس از آبیگری و در حین عملیات ساختمانی در پیزومترهای واقع در سراب و پایاب سد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل، تاریخ ۱۳۷۶/۷/۱ به عنوان مبنای زمانی قرائت‌ها و به عنوان روز صفر در نظر گرفته شده است. زمان آبیگری مخزن سد گلستان (خرداد ۱۳۷۸) و دوره‌های سیلابی نیز در این شکل مشخص شده است. تأثیرپذیری فشار آب منفذی از تغییرات تراز سطح آب مخزن و نیز اثر سیلاب مردادماه ۱۳۸۰ و سایر سیلاب‌های رودخانه گرگانرود در تغییرات زمانی فشار آب منفذی برای پیزومترهای کاساگرانده که در قسمت سراب مخزن سد نصب شده‌اند (S2 و S5) کاملاً مشهود است، به طوری که با ورود سیلاب به مخزن و افزایش تراز سطح آب، سطح آب در هر دو پیزومتر افزایش یافته و با تخلیه مخزن سد و فروکش سطح آب، تراز این پیزومترها نیز کاهش یافته است. این در حالی است که تغییرات فشار ثبت شده در پیزومترهای واقع در پایاب سد (S6، S9 و S10) تقریباً ناچیز است که روند درستی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. تغییرات سطح آب پیزومتریک و تراز آب مخزن پس از آبیگری در مقطع ۱

بحث

نتایج حاصل از پیزومترها و مشاهدات پایین دست بیانگر کارایی نسبتاً مطلوب تنوره و پتوی زهکش و نیز افت مناسب سطح آب درون بدنه سد است. نتایج پیزومترهای پی، آگذری از المان آب‌بند را تأیید می‌کند که اگرچه پایداری سد را به مخاطره نمی‌اندازد، اما لازم است موردتوجه قرار گرفته و کنترل شود. مقادیر نشست‌های اندازه‌گیری شده در سد تا حدودی حالت یکنواخت داشته و نشست تفاضلی بین مقاطع مختلف مشاهده نمی‌شود. نرخ و میزان نشست در ترازهای بالاتر بدنه سد در مقایسه با ترازهای پایین‌تر، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند که منطقی است ولی تا حدودی بیشتر از حد انتظار است. در تمامی موارد نشست‌سنج نصب شده در بالادست، نشست کمتری نسبت به نشست‌سنج پائین دست نشان می‌دهد. به‌طور کلی عامل اصلی نشست‌ها پس از عملیات ساختمانی را می‌توان ناشی از مرطوب شدن خاک و افزایش تراکم‌پذیری آن دانست. بر اساس گزارش‌های مکانیک خاک و ژئوتکنیک این سد، مقدار نشست در بخش میانی سد پس از هفت سال از دوره بهره‌برداری مطابق با ضوابط ICOLD، حدود ۱/۵ متر پیش‌بینی شده بود، این در حالی است که در این مکان و در مقطع گالری تحتانی سد، نشست جمعی به میزان ۰/۵۵ متر اتفاق افتاده که بسیار کمتر از مقدار پیش‌بینی بوده است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف ارزیابی و پایش ایمنی و سلامت سد خاکی گلستان به‌عنوان بزرگ‌ترین سد مخزنی موجود در استان گلستان و با بررسی و تحلیل داده‌های طولانی مدت ثبت شده توسط ابزار دقیق این سد انجام شده است. باتوجه‌به هزینه فراوان و مدت زمان طولانی احداث سدهای مخزنی و نیز تبعات منفی قابل‌توجه ناشی از عدم پایداری آنها، انجام فرایند پایش و رفتارنگاری سد به کمک داده‌های ابزار دقیق (و به‌ویژه در سدهای خاکی) در طول دوره ساخت، آبیگری اولیه و بهره‌برداری از سد لازم و ضروری است. انجام این کار ضمن کمک به افزایش عمر مفید سد، تشخیص زودهنگام نقص‌ها و وقوع احتمالی ناهنجاری‌ها در بدنه و پی سد را فراهم نموده و گامی مهمی در ارزیابی یکپارچگی سدها، پایش سلامت و مدیریت کلی ریسک است. نتایج این تحقیق می‌تواند برای پایش سلامت سدهای مشابه (به‌ویژه سد در حال ساخت نرماب در استان گلستان) مورد استفاده قرار گیرد. سد خاکی گلستان به‌صورت همگن و بدون هسته رسی طراحی و اجرا شده است که این موضوع، حساسیت و اهمیت ارزیابی‌ها را بیشتر می‌کند. بر اساس رفتارسنجی سد خاکی گلستان و نتایج ارائه شده در این تحقیق و نیز شواهد حاصل از بازرسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که این سد پس از گذشت بیش از ۲۲ سال از زمان بهره‌برداری، در وضعیت مطلوبی از نظر پایداری و ایمنی قرار

دارد. باتوجه به وقوع سیلاب‌های بسیار شدید رودخانه گرگانرود در سال‌های ابتدایی بهره‌برداری از این سد (۱۳۸۰، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲)، وضعیت ایمن سد قابل قبول است. علاوه بر نتایج داده‌های ابزار دقیق این سد که در این تحقیق ارائه شده است، ارائه نتایج بازرسی‌ها نیز مفید است. مثلاً بر اساس بازدیدهای محلی، پوشش بتنی بالادست سد گلستان کاملاً سالم بوده و آسفالت روی تاج سد نیز فاقد هرگونه ترک خوردگی جدید است. باتوجه به پوشش سطحی مناسب شیب بالادست سد گلستان، پتانسیل گسیختگی ناشی از فرسایش سطحی برای این سد بسیار کم ارزیابی شد. رویه پائین دست این سد نیز در وضعیت مطلوبی قرار داشته و اثری از وجود مناطق مرطوب، ترک، لغزش، فرو چاله، تراوش، برآمدگی در خاکریز نزدیک پنجه سد و فرسایش مشاهده نگردید. تحلیل داده‌های ثبت شده توسط نشست سنج‌ها نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی افقی در جهت بالادست - پایین دست دارای روندی افزایشی است به طوری که با نزدیک شدن به سطح پوسته سد، مقادیر جابه‌جایی‌های افقی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نمودار تغییرات زمانی جابه‌جایی‌ها نشان می‌دهد که هیچ‌گونه تغییر جابه‌جایی ناگهانی که نشان‌دهنده سطح لغزش باشد، مشاهده نمی‌شود. حداکثر جابه‌جایی در تاج سد حدود ۷/۶ سانتیمتر در سال ۹۲ بوده که نسبت به سال ۱۳۸۴ حدود ۱/۵ سانتیمتر افزایش داشته است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک در قالب پژوهانه رساله دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- یحیایی‌نیا، احمد. (۱۳۹۹). آنالیز پایداری سد خاکی بر اساس تحلیل عددی و نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی سد دامغان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
<https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=S541>
- دقیق، حدیث، حسن‌پور درویشی، حسین، و موسوی چهرمی، سید حبیب. (۱۳۹۴). آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۵(۲)، ۲۷-۱۵.
<https://sid.r/paper/232260/fa>
- عالی‌محمدی پیرانشاهی، ساناز، شاه‌کرمی، نازنین، و اسدی، حسین. (۱۴۰۰). تحلیل تراوش در شرایط افزایش ظرفیت مخزن با بالا بردن تراز سرریز (مطالعه موردی: سد خاکی کمال صالح). نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۹۳۲-۳۹۱۳.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18161.6786>
- سلماسی، فرزین، و حکیمی خانسر، حسین. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی رفتار سد کبودوال در زمان ساخت با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۹۸۴-۳۹۶۷.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18172.6790>
- سلماسی، فرزین، حکیمی خانسر، حسین، و نورانی، بهرام. (۱۳۹۷). بررسی نشست بدنه سد خاکی در دوران ساخت و مقایسه آن با نتایج تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS (مطالعه موردی سد کبودوال). نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۴)، ۱۷۱-۱۵۵.
<http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3542-fa.html>
- شرکت آب منطقه‌ای گلستان. (۱۳۸۰). گزارش رفتارنگاری سد گلستان در مراحل ساخت و بهره‌برداری. شرکت مهندسی مشاور تهران-برکلی، گلستان، ایران.

References

- Aalimohammadi Piranshahi, S., Shahkarami, N., & Asadi, H. (2021). Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam). *AMIRKABIR J. Civil Engineering*, 53(9), 3913-3932. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2020.18161.6786>
- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety problems related to seepage. *J. Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 191-239. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3878719>
- ASCE, Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance. (2000). Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE, USA. https://damsafety.cwc.gov.in/ecm-includes/PDFs/Guidelines_for_Instrumentation_of_Large_Dams.pdf
- Beiranvand, B., Rajaei, T., & Komasi, M. (2024). Presenting the AI models in predicting the settlement of earth dams using the results of spatiotemporal clustering and k-means algorithm. *Scientific Report*, 14, 10207. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60944-4>
- Daghigh, H., Hassanpour Darvishi, H., & Musavi Jahromi, S.H. (2015). Safety factor analysis of the stability of earth dams over the long period of time. *J. Water and Soil Resources Conservation*, 5(2), 15-27. (In Persian) <https://sid.ir/paper/232260/fa>
- Dannicliiff, J. (1991). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. *John Wiley & Sons Inc*, USA. https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_89.pdf
- Desideri, A., Fontanella, E., & Pagano, L., (2013). Pore water pressure distribution for use in stability analyses of earth dams. *Landslide Sci. Pract. Risk Ass. Manag. Mitig.*, 6, 149-153. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_21
- El Bilali, A., Mohammed, M., Taleb, A., Nafii, A., Alabjah, B., Brouzyine, Y., Mazigh, N., Tezine, Kh., & Mhamed. M. (2021). Predicting daily pore water pressure in embankment dam using machine learning models and hydrostatic seasonal time approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 382-397. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-947164/v1>
- Fremion, F., Bordas, F., Mourier, B., Lenain, J.F., Kestens, T., & Courtin-Nomade, A. (2016). Influence of dams on sediment continuity: a study case of a natural metallic contamination. *Sci. Total. Environ*, 547, 282-294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.023>
- Gikas, V., & Sakellariou, M. (2008). Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring. *Engineering Structures*, 30, 3074-3081. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.019>
- Golestan Regional Water Company. (2011). Golestan dam monitoring in construction and operation phases. Final Report, *Tehran-Berkeley Consulting Engineers Company*, Golestan, Iran. (In Persian)
- Gordan, D., Koopialipour, B., Armaghani, M., Tarinejad, D.J., Pham, R., Huynh, B.T., & Van, V. (2020). Seepage analysis in short embankments using developing a metaheuristic method based on governing equations. *Appl. Sci*, 10, 1-23. <https://doi.org/10.3390/app10051761>
- Hsu, Y.C., Lin, J.S., & Kuo, J.T. (2007). Projection method for validating reliability analysis of soil slopes. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 753-756, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(753\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(753))
- ICOLD, (1969). General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams. Bultten 21, Paris, France. <https://www.svk.se/4a5420/siteassets/3.sakerhet-och-beredskap/dammsakerhet/forskning-och-utveckling/icold-bulletiner---forteckning-med-sammanfattning-230815.pdf>
- ICOLD. (1983). Deterioration of dams and reservoirs; Laboratório nacional de engenharia civil. Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.1080/02630258408970371>

- Johansson, S. (1997). Seepage monitoring in embankment dams. PhD Thesis, *Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:8066>
- Kalooop, M.R., & Li, H. (2009). Monitoring of bridge deformation using GPS technique. *KSCE J. Civil Engineering*, 13, 423-431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>
- Komasi, M., Mohammadzadeh, A., & Beiranvand, B. (2020). Optimization of horizontal drain dimensions in homogeneous earth dams using neural network. *Int. J. Mining and Geo-Eng.*, 54(2), 173-177. <https://doi.org/10.22059/IJMGE.2019.278411.594792>
- Majoros, M., & Sneed, H.M. (1981). The softest program test system. *J. Syst. Softw*, 2, 289-296. [https://doi.org/10.1016/0164-1212\(81\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0164-1212(81)90003-0)
- Najafzadeh, M. (2019). Projection of seepage and piezometric pressure in earth dams using soft computational Models. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7), 435-438, <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15667.5990>
- Omofunmi, O.E., Kolo, J.G., Oladipo, A.S., Diabana, P.D., & Ojo, A.S. (2017). A review on effects and control of seepage through earth-fill dam. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/28538>
- Pagano, L., Fontanella, E., Sica, S., & Desideri, A., (2010). Pore water pressure measurements in the interpretation of the hydraulic behaviour of two earth dams. *Soils Found*, 50, 295-650. <https://doi.org/10.3208/sandf.50.295>
- Panthulu, T.V., Krishnaiah, C., & Shirke, J.M. (2001). Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Eng. Geol.*, 59, 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X)
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H., Dashti Latif, S., & Tripathi, R.P. (2021). Predictive modeling of piezometric head and seepage discharge in earth dam using soft computational models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 60842-60856. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15029-4>
- Pytharouli, S., Michalis, P., & Raftopoulos, S. (2019). From theory to field evidence: observations on the evolution of the settlements of an earthfill dam, over long time scales. *Infrastructures*, 4, 65. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040065>
- Rashidi, M., & Haeri, S.M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 9, 709-725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003>
- Rehamnia, I., Benlaoukli, B., Jamei, M., Karbasi, M., & Malik, A. (2021). Simulation of seepage flow through embankment dam by using a novel extended Kalman filter based neural network paradigm: Case study of Fontaine Gazelles Dam, Algeria. *J. Int. Meas. Confed.*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement>
- Rezaeeian, A., Davoodi, M., & Jafari. M.K. (2018). Determination of optimum cross-section of earth dams using ant colony optimization algorithm. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 26(3), 1104-1121. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.21078>
- Salmasi, F., & Hakimi Khansar, H. (2021). Simulation of behavior of the Kabudval Dam during construction with 3D numerical modeling. *AMIRKABIR J. Civil Engineering*, 53(9), 3967-3984. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/CEJ.2020.18172.6790>
- Salmasi, F., Hakimi Khansar, H., & Norani, B. (2019). Investigation of the structure of the dam body during construction and its comparison with the analytical results using PLAXIS software (Case Study: Kaboodvall Dam). *J. Water and Soil Sciences*, 22(4), 155-171. (In Persian) <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3542-fa.html>
- Seyed-Kolbadi, S.M., Hariri-Ardebili, M.A., Mirtaheri, M., and Pourkamali-Anaraki, F. (2020). Instrumented health monitoring of an earth dam. *Infrastructures*, 5(3), 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026>

- Shi, Z.M., Wang, Y.Q., Peng, M., Chen, J.F., & Yuan, J. (2015). Characteristics of the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake and dynamic behavior analysis using large-scale shaking table tests. *Eng. Geol.* 194, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.009>
- Sica, S., Pagano, L., & Rotili, F. (2019). Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake. *Comput. Geotech.*, 116, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103187>
- Stephens, T. (2010). Manual on small earth dams, A guide to siting, design and construction. *FAO Irrigation and Drainage Paper 64*, Rome, Italy. <https://www.adds.dj/manual-on-small-earth-dams-a-guide-to-siting-design-and-construction-2/>
- Toromanovic, J. (2018). On parameter identification for better predictions of dam behaviour. PhD Thesis, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, *Luleå University of Technology*, Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1200172>
- Toromanovic, J., Laue, J., & Knutsson, S. (2018). Assessment of arching and cracking potential by numerical modelling: A case study of the Mornos dam. In *Proceedings of 14th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Stockholm, Sweden, 445-459. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1158923>
- USB. (2014). Embankment dams, technical report. Design Standards No. 13, *USB*, Denver, USA. https://damtoolbox.org/wiki/Design_Standards_No.13
- Wang, S., Xu, W., Li, Y., Gu, C., Shi, B., & Fei, T. (2018). Monitoring models for base flow effect and daily variation of dam seepage elements considering time lag effect. *Water Sci. Eng.*, 11, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.12.004>
- Xiang, Y., Fu, S.Y., Zhu, K., Yuan, H., & Fang, Z.Y. (2017). Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm. *Water Sci. Eng.*, 10, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.03.005>
- Xu, Y., & Zhang, L.M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1957-1970. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162)
- Yilmaz, A.N. (2017). Assessment of performance of drainage systems in earth-fill dams. MSc. Thesis in Civil Engineering, *Middle East Technical University*, Turkey. <https://hdl.handle.net/11511/26400>
- Yahiaee Nia, A. (2020). Stability analysis of earth fill dams based on numerical analysis and instrumentations results (Case Study: Moghan Dam). MSc Thesis in Civil Engineering, *Shahrood University of Technology*, Shahrood, Iran. (In Persian) <https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=S541>



Water and energy productivities in a solid-set sprinkler irrigation system for wheat production (Case Study: Qorveh plain)

Sana Rahmati¹ , Peyman Tahmasbi²  and Bakhtiar Karimi^{3*} 

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: sana.rh1375@gmail.com
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir
3. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:
Received 02 April 2025
Received in revised form 03 July 2025
Accepted 23 September 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:

energy input,
productivity electricity,
productivity energy,
productivity water,
Qorveh.

Objective: This study aimed to evaluate and compare energy consumption and energy productivity in a solid-set irrigation system with portable sprinklers powered by different energy sources (electricity and diesel) for irrigated wheat production in the Qorveh Plain of Kurdistan Province.

Method: In this research, 15 irrigated wheat farms with a total area of 90 hectares, planted with the "Pishgam" cultivar, were randomly selected in the Qorveh Plain and classified into two groups: CE (electric energy source) and CD (diesel fuel energy source). GPS devices were used to measure the farm areas, and the irrigation water consumption volume was measured using an ultrasonic flow meter. Data on energy consumption (electricity and diesel), crop yield (measured through sampling), and other agricultural inputs such as seed, fertilizer, pesticides, and machinery were collected from farmers through questionnaires. Additionally, at the end of the 2023–2024 growing season, the calculated yields were cross-checked with actual farm sales data.

Results: The results showed that the highest energy consumption in the wheat farming systems using CE and CD systems was allocated to the electric power and diesel fuel, respectively which were required as irrigation head. The total energy input to the farms was calculated to be 73,173.01 and 88,507.83 MJ/ha for CE and CD systems, respectively, while the total energy output was 118,815 and 118,896 MJ/ha, respectively. Water productivity was 1.47 and 1.31 kg/m³, respectively. Energy ratios were calculated as 1.66 for CE and 1.34 for CD farms, and specific energy was 10.26 and 12.86 MJ/kg, respectively. Moreover, electricity productivity was 3.01 and 2.20 kg/kWh, and overall energy productivity was 0.09 and 0.07 kg/MJ, respectively.

Conclusions: In CD farms, the average total energy input and output were higher than CE farms; however, the water productivity index in CD farms was about 12% lower than in the CE group. Also, specific energy use was higher in diesel-powered farms, indicating higher energy consumption for wheat production. Overall, electric irrigation systems (CE) performed better in terms of energy efficiency, and it is recommended that electrification of diesel-powered wells (CD) be prioritized in national agricultural programs.

Cite this article: Rahmati, S., Tahmasbi, P., & Karimi, B. (2026). Water and energy productivities in a solid-set sprinkler irrigation system for wheat production (Case Study: Qorveh plain). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 44-64. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12116.1165>



Introduction

Wheat, as a strategic staple crop, plays a fundamental role in ensuring food security across societies. In many countries, including Iran, it is considered a key component of agricultural development policies. Given the increasing limitations of water and energy resources and the growing importance of sustainable production, improving the efficiency of input use in wheat cultivation has become an essential priority. Today, as water resources—particularly groundwater—face mounting pressures due to over-extraction, climate change, and reduced precipitation, the high share of agricultural water use (over 90%) and the considerable amount of direct and indirect energy consumed throughout the production process have highlighted the critical need to evaluate irrigation systems and energy management strategies. In this context, pressurized irrigation systems, such as the classic solid-set sprinkler system, if properly designed and managed, can significantly contribute to optimizing input use. The Qorveh plain in Kurdistan Province is one of Iran's major irrigated wheat-producing regions, yet it faces numerous challenges related to water and energy resources. Therefore, assessing the consumption and productivity of water and energy in the agroecosystem of wheat production in this region can help identify optimization opportunities and support the development of effective management strategies. The present study was conducted to analyze input consumption and determine key indicators of water productivity, energy productivity, and integrated water–energy productivity in wheat cultivation under a classic solid-set sprinkler irrigation system in the Qorveh plain. The findings of this research can provide valuable insights for policymakers, practitioners, and irrigation system designers in making informed decisions to achieve sustainable resource management at the farm level.

Method

Study Area

This study was conducted on farms located in the Qorveh Plain, situated in Kurdistan Province, 93 kilometers east of Sanandaj, at a latitude of 35°10'N, longitude of 47°48'E, and an elevation of 1850 meters above sea level (Salimi et al., 2017). Based on data from 2002 to 2021, the region receives an average annual rainfall between 250 and 350 mm and has a mean annual temperature of approximately 20°C. Figure 1 illustrates the geographical location of Kurdistan Province, the Qorveh Plain within the province, and the specific study farms within the Dehgolan region.

Data Collection

A total of 15 farms, covering approximately 90 hectares, were randomly selected across the plain. The primary crop cultivated on these farms was irrigated wheat of the cultivar 'Pishgam,' and the irrigation system used was a classic solid-set sprinkler system with portable sprinklers. Farmer cooperation was also considered a critical factor in farm selection. The irrigation water source for these farms was the restricted Qorveh aquifer, accessed via deep wells using motor pumps powered either by electricity or diesel fuel. The area of each farm was measured using a handheld GPS device (Etrex Vista, Garmin, Lenexa, USA) with an accuracy of less than 3 meters in Wide Area Augmentation System (WAAS) mode. To measure irrigation water volume, an ultrasonic flowmeter (UF5000, Adak, Tabriz, Iran) was used. Flow rates were recorded at various times, and the total irrigation volume per event was calculated by multiplying flow rate by irrigation duration. Electricity consumption data for each farm over the irrigation season were obtained from the regional electricity company. For diesel-powered farms, diesel fuel usage was recorded monthly. Crop yield was measured using the crop-cut

method at various points in each field using a 1.5 m × 1.5 m quadrat. Yield estimates were cross-verified with total harvested yield (as reported by farmers) for the 2023–2024 growing season. Additional farm-level input data were collected via farmer interviews, including the amount of wheat seed (Pishgam variety), fertilizer, pesticides, labor, and machinery used throughout the planting, maintenance, and harvesting stages.

Farms were categorized into two groups:

- ✓ CE: Classic solid-set sprinkler irrigation system with portable sprinklers powered by electricity.
- ✓ CD: Same irrigation system as CE, but powered by diesel fuel.

Evaluation Indicators

Using the input and output energy equivalents (Table 2), all recorded data for the 2023–2024 growing season were entered into Microsoft Excel and analyzed. The following indicators were used to evaluate the productivity of the studied farms (Kitani et al., 1999):

- ✓ **Direct energy:** human labor, electricity, fossil fuels, irrigation water.
- ✓ **Indirect energy:** seeds, agrochemicals, and machinery.
- ✓ **Renewable energy:** human labor and seeds.
- ✓ **Non-renewable energy:** fossil fuels, fertilizers, agrochemicals, machinery, and water.

a) Water Productivity

Represents the ratio of crop yield to irrigation water applied:

$$\text{Water Productivity} = \frac{\text{Crop Yield (kg/ha)}}{\text{Irrigation Water (m}^3\text{/ha)}}$$

b) Electricity and Energy Productivity

Shows the relationship between crop yield and electricity or total energy input:

$$\text{Energy Productivity} = \frac{\text{Crop Yield (kg/ha)}}{\text{Electricity or Energy Input (kwh or MJ/ha)}}$$

c) Energy Use Efficiency

The ratio of total output energy to input energy:

$$\text{Energy Efficiency} = \frac{\text{Output Energy (MJ/ha)}}{\text{InPut Energy (MJ/ha)}}$$

d) Specific Energy

Represents the amount of input energy used to produce one kilogram of output:

$$\text{Specific Energy} = \frac{\text{Input Energy (MJ/ha)}}{\text{Crop Yield (kg/ha)}}$$

Results

The results of this research showed that the highest rate of energy consumption in wheat farming systems in fields with CE and CD systems was related to the consumption of electricity and diesel fuel, respectively, for supplying the water needed for agriculture. The total energy input to the fields was calculated to be 73173.01 and 88507.83 MJ ha⁻¹, respectively, and the total energy output was 118815 and 118896 MJ ha⁻¹, respectively. Water productivity indices for these fields were 1.47 and 1.31 Kg m⁻³, respectively. The energy ratio in the fields was 1.66 and 1.34, respectively, and the specific energy was calculated to be 10.26 and 12.86 MJ ha⁻¹, respectively. Furthermore, the electricity consumption productivity was 3.01 and 2.20 Kg Kwh⁻¹, respectively, and the overall energy productivity was calculated to be 0.09 and 0.07 Kg MJ⁻¹ of input energy, respectively.

Conclusion

The results of this study demonstrated that solid-set irrigation system with portable sprinklers powered by electricity (CE) exhibit superior energy efficiency compared to similar systems powered by diesel fuel (CD). Despite the absence of a statistically significant difference in the final wheat yield between the two groups, CE farms showed lower specific energy consumption and higher water productivity. Specifically, energy consumption in diesel-powered farms was considerably higher, and their water productivity was approximately 12% lower than that of electrically powered farms. These findings highlight the critical role of energy source selection in optimizing input use and enhancing the sustainability of agricultural production. Accordingly, replacing fossil fuel-based systems with electric-powered alternatives and electrifying diesel-operated agricultural wells should be prioritized in national agricultural policy and strategic planning.



بهره‌وری مصرف آب و انرژی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت برای محصول گندم (مطالعه موردی: دشت قروه)

ثنا رحمتی^۱، پیمان طهماسبی^۲، بختیار کریمی^۳

۱. گروه منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: sana.rh1375@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: این پژوهش باهدف ارزیابی و مقایسه مصرف و بهره‌وری انرژی در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک با منابع انرژی متفاوت (برق و گازوئیل) در تولید گندم آبی در دشت قروه استان کردستان انجام شد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

روش پژوهش: در این پژوهش، ۱۵ مزرعه گندم آبی به مجموع مساحت ۹۰ هکتار، از نوع رقم «پیشگام» در دشت قروه به صورت تصادفی انتخاب و به دو گروه CE (منبع انرژی الکتریکی) و CD (منبع انرژی سوخت دیزل) تقسیم شدند. برای اندازه‌گیری مساحت مزارع، از دستگاه GPS استفاده گردید و حجم آب مصرفی با دبی‌سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. اطلاعات مربوط به مصرف انرژی (برق و گازوئیل)، عملکرد محصول با روش کیل‌گیری، و سایر داده‌های کشاورزی مانند بذر مصرفی، کود، سموم و ماشین‌آلات از کشاورزان در قالب پرسشنامه جمع‌آوری شد. همچنین، در پایان فصل زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳، عملکرد محاسبه‌شده با داده‌های واقعی فروش مزرعه تطبیق داده شد.

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۱/۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۲/۰۴/۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۷/۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۱/۰۱/۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:

انرژی ورودی، بهره‌وری آب، بهره‌وری برق، کارایی انرژی، قروه.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان مصرف انرژی در نظام‌های زراعی گندم در مزارع با سیستم‌های CE و CD به ترتیب مربوط به مصرف الکتریسیته (برق) و سوخت گازوئیل برای تأمین آب موردنیاز کشاورزی بود. میزان کل انرژی ورودی به مزارع به ترتیب معادل ۷۳۱۷۳/۰۱ و ۸۸۵۰۷/۸۳ و انرژی خروجی کل به ترتیب ۱۱۸۸۱۵ و ۱۱۸۸۹۶ مگاژول در هکتار محاسبه گردید. شاخص‌های بهره‌وری آب برای این مزارع به ترتیب ۱/۴۷ و ۱/۳۱ کیلوگرم در مترمکعب آب مصرفی بود. نسبت انرژی در مزارع به ترتیب برابر با ۱/۶۶ و ۱/۳۴ و انرژی ویژه به ترتیب ۱۰/۲۶ و ۱۲/۸۶ مگاژول در هکتار محاسبه شد. علاوه بر این، بهره‌وری برق مصرفی به ترتیب ۳/۰۱ و ۲/۲۰ کیلووات‌ساعت و بهره‌وری کلی انرژی نیز به ترتیب کیلوگرم به ازای هر مگاژول انرژی ۰/۰۹ و ۰/۰۷ ورودی محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: میانگین کل انرژی ورودی و خروجی در مزارع CD بیش‌تر از CE بوده، اما شاخص بهره‌وری آب در مزارع CD حدود ۱۲ درصد کم‌تر از گروه CE برآورد شد. همچنین انرژی ویژه در مزارع دیزلی بیش‌تر بود که نشان‌دهنده مصرف انرژی بالاتر برای تولید گندم است. در مجموع، سامانه‌های آبیاری برقی (CE) از نظر بهره‌وری انرژی عملکرد بهتری داشتند و پیشنهاد می‌شود برق‌دار کردن چاه‌های دیزلی (CD) در اولویت برنامه‌های کشاورزی کشور قرار گیرد.

استناد: رحمتی، ثنا؛ طهماسبی، پیمان؛ و کریمی، بختیار. (۱۴۰۵). بهره‌وری مصرف آب و انرژی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت برای محصول گندم (مطالعه موردی: دشت قروه). *فناوری های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۱)، ۴۴-۶۴.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12116.1165>



پیچیدگی های گسترده ای را برای سیاست گذاران و مدیران این حوزه به وجود آورده است (مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰). باتوجه به یافته های جمعی از محققان (بیزیکووا و همکاران^۱، ۲۰۱۳؛ ادنو و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ الگافی^۳، ۲۰۱۷؛ اسلامی و همکاران، ۱۳۹۹؛ و لونی و شریفزاده، ۱۴۰۱) منابع آب، انرژی و غذا در جهان با چالش کمبود و تنش جدی مواجه هستند. کشاورزی به عنوان مهم ترین بخش تولیدات مواد غذایی نه تنها به عنوان مهم ترین عرضه کننده انرژی بلکه مهم ترین مصرف کننده انرژی نیز محسوب می شود (السوراگابی و همکاران^۴، ۲۰۱۹). در نتیجه آب و انرژی دو عامل اصلی در بخش کشاورزی می باشند (عمومی بیجائییه و همکاران، ۱۴۰۲). انرژی های ورودی (مصرفی) در حوضه کشاورزی به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می شوند (بهشتی تبار و همکاران^۵، ۲۰۱۰). انرژی های مستقیم شامل تمام انرژی هایی است که در عملیات کاشت، داشت و برداشت محصولات زراعی و باغی به صورت مستقیم در مزرعه مصرف می شود (سینگ^۶، ۲۰۰۰). انرژی های غیرمستقیم شامل، انرژی های مصرفی در تولیدات، بسته بندی ها و انتقال کودهای شیمیایی، آفت کش ها، ساخت ماشین آلات کشاورزی و سایر مواد صنعتی مصرفی (ورودی) در کشاورزی هستند (اوزکان و همکاران^۷، ۲۰۰۴). در هر مناطقی در دنیا که مجموعه توامان غذا، انرژی و آب از بهره وری قابل قبول و مطلوب برخوردار باشد، از امنیت غذایی پایداری برخوردار است (نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲). منابع آب و انرژی هر دو منابع محدود بوده و کمبود این منابع در اکثر کشورهای جهان سوم و توسعه یافته نیز چالش بسیار بزرگی محسوب شده است (احمد و خان^۸، ۲۰۰۹).

در بسیاری از مناطق دنیا از جمله کشور ایران یکی از مهم ترین منابع آبی، در بخش کشاورزی جهت تأمین نیاز آبی محصولات زراعی و باغی آبخوان ها هستند که باتوجه به کمبود منابع آب سطحی و نیز گسترش شهرنشینی، انرژی نقش بسیار کلیدی در این بخش و سامانه های آبیاری دارد. در واقع انرژی مولفه ای ضروری برای هر سامانه آبیاری تحت فشار است (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴؛ و یوسفی و مهدوی دامغانی، ۱۳۹۰) آب مورد نیاز آبیاری و انرژی مصرفی الکتریسیته برای پمپاژ، انتقال و توزیع آن به داخل مزارع یکی از نهاده های اساسی و انرژی بر در بوم نظام های فاریاب تولیدات محصولات غذایی بوده که همچنین حجم بالایی از انرژی مصرفی در این نظام ها را به خود اختصاص داده است. بهره برداری بی رویه از این منابع آب زیرزمینی باعث افت سطح آب آبخوان ها شده است که این امر موجب افزایش انرژی مورد نیاز جهت پمپاژ آب زیرزمینی می گردد. بنابراین یکی از نهاده های ورودی میزان برق مصرفی و سوخت های فسیلی (گازئیل) چاه های کشاورزی جهت توزیع و انتقال آب در داخل مزارع است، به طوری که بخش کشاورزی سومین مصرف کننده برق بعد از بخش های صنعتی و خانگی در داخل کشور محسوب می گردد (قدمی فیروز آبادی، ۱۳۹۴). همچنین باتوجه به مباحث بالا یکی دیگر از پر مصرف ترین نهاده های انرژی مصرفی در تولید محصولات کشاورزی آب آبیاری است. این موضوع در سامانه های آبیاری تحت فشار مطرح بوده و بایستی طراحان بررسی لازم را در این زمینه انجام و نیاز انرژی سامانه در هنگام طراحی را تعیین کنند (فائو^۹، ۲۰۰۲). در کشور ایران هدف اصلی تولید کننده بخش کشاورزی، حداکثر کردن سود تولید از طریق افزایش عملکرد محصولات بوده تا بیش ترین مقدار ممکن نهاده های مصرفی با استفاده از نهاده های قابل

1. Bizikova et al
2. Endo et al
3. El-Gafy
4. Elsoragaby et al
5. Beheshti Tabar et al
6. Sing
7. Ozkan et al
8. Ahmad & Khan
9. FAO

دسترس باشد. از این رو نقش اساسی انرژی و آب در تولیدات محصولات کشاورزی بر کسی پوشیده نیست (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). از طرفی شرایط خاص دشت‌های شهرستان قروه در تامین آب مورد نیاز محصولات مختلف، ضرورت بررسی بهره‌وری آب و انرژی را در تولید محصولات زراعی را نشان می‌دهد. باتوجه به این که سطح زیر کشت محصولات مختلف در استان کردستان قابل ملاحظه بوده و دشت‌های قروه یکی از قطب‌های تولیدات محصولات زراعی در سطح استان به‌شمار می‌رود، اطلاع از میزان مصرف آب، نهاده‌های انرژی مصرفی (ورودی)، بهره‌وری آب و بهره‌وری انرژی محصولات آبی کشت شده در دشت‌های مذکور موجب می‌گردد که متوالیان کشاورزی استان جهت مدیریت مناسب مصارف آب و نهاده‌های انرژی مصرفی در تولیدات محصولات کشاورزی از جمله محصولات استراتژی منطقه گندم کمک کند.

در این راستا، پژوهشی در دشت قروه از استان کردستان، در چارچوب بوم نظام زراعی فاریاب گندم به‌عنوان محصول غالب منطقه، تحت پوشش سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک، باهدف تحلیل وضعیت مقدار انرژی ورودی و خروجی، بهره‌وری مصرف آب و انرژی، و ارزیابی شاخص‌های تلفیقی از جمله بهره‌وری آب - انرژی، انجام گرفت.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در زمینه موضوع این پژوهش، مطالعات گوناگونی انجام گرفته که در ادامه به‌مرور منتخبی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱. مطالعات داخلی

طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی تطبیقی به بررسی کارایی انرژی در دو سامانه آبیاری بارانی شامل سامانه کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک و سامانه لوله چرخ‌دار در زراعت گندم آبی در دشت دهگلان پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که انرژی کل ورودی و خروجی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک به ترتیب برابر با ۶۹۱۸۹۰۴ و ۸۵۹۴۳۹۷ مگاژول در هکتار و در سامانه آبیاری لوله چرخ‌دار به ترتیب معادل ۱۱۰۷۰۰ و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار بوده است. بر این اساس، شاخص کارایی انرژی مصرفی برای سامانه کلاسیک ۱/۶۰ و برای سامانه لوله چرخ‌دار ۱/۷۵ برآورد گردیده است.

قدمی‌فیروز آبادی و اکبری (۱۴۰۲)، در پژوهشی به بررسی تأثیر سامانه‌های مختلف آبیاری بر میزان مصرف آب و عملکرد گندم در استان همدان پرداختند. یافته‌ها نشان داد که میانگین مصرف آب در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و سطحی به ترتیب ۴۱۵۳، ۴۰۹۰ و ۵۹۱۸ مترمکعب در هکتار بوده است. همچنین، بیش‌ترین عملکرد مربوط به سامانه آبیاری قطره‌ای با ۵۵۸۱ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین آن در سامانه آبیاری سطحی با ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شد.

عاشوری و همکاران (۱۴۰۲) به ارزیابی میزان مصرف آب و انرژی در سطح مزارع شبکه قزوین پرداختند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین انرژی مصرفی در تمامی محدوده‌های زراعی درجه دو در مصرف انرژی مربوط به به سوخت دیزل با ۴۰ درصد از کل انرژی و در مصرف غیرمستقیم انرژی متعلق به کود نیتروژنه با ۲۰ درصد از کل انرژی مصرفی محاسبه شد.

غلامی و همکاران (۱۳۹۴) بر اساس نتایج حاصله از بررسی میزان بهره‌وری آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری بارانی برای محصول جو ۰/۷۵ تا ۲/۵، یونجه ۰/۲ تا ۱/۷۶، ذرت ۰/۳ تا ۲/۷۸ و گندم ۰/۶۱ تا ۲/۲ کیلوگرم در مترمکعب و برای سامانه آبیاری سطحی برای محصول جو ۰/۴۳ تا ۱/۴۳، یونجه ۰/۱۲ تا ۱/۵۸، ذرت ۰/۲۲ تا ۱/۵۸ و گندم ۰/۴۳ تا ۱/۲۵ کیلوگرم در مترمکعب برآورد کردند.

۲. مطالعات خارجی

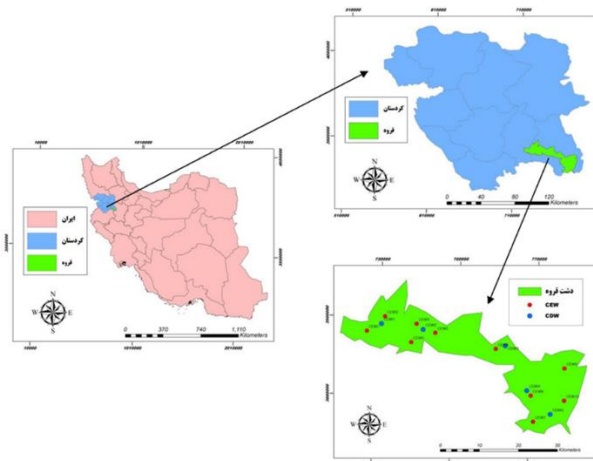
فیروزآبادی و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، در پژوهشی که در ایستگاه اکباتان همدان انجام شد، اثر فاصله ردیف‌های کاشت گندم و فاصله بین نوارهای آبیاری قطره‌ای بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب در خاک لومرسی شنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای موجب کاهش قابل توجه مصرف آب و بهبود بهره‌وری آن شده است.

زاهو و همکاران^۲ (۲۰۲۰)، طی مطالعه‌ای بر روی صرفه‌جویی انرژی و آب آبیاری هنگام استخراج آب از چاه‌ها از دیدگاه پیوند انرژی و آب نشان دادند که ۷۵/۶ میلیارد کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی به دلیل اقدامات صرفه‌جویی در مصارف آب آبیاری، صرفه‌جویی شده است درحالی‌که کاهش سطح آب زیرزمین منجر به افزایش ۱۷۴/۴ میلیارد کیلووات‌ساعت انرژی مصرفی (الکتریسیته) جهت پمپاژ آب از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ گردیده است.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مزارع دشت شهرستان قروه استان کردستان در ۹۳ کیلومتری شرق شهر سنندج با عرض جغرافیایی $35^{\circ} 10'$ درجه و ارتفاع از سطح آب ۱۸۵۰ مترانجام شد (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۷). بر اساس دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰، متوسط بارندگی سالیانه بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱)، موقعیت مکانی استان کردستان، دشت قروه و مزرعه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی استان کردستان، دشت قروه و مزرعه‌های مورد مطالعه در دشت قروه

۲. نحوه جمع آوری داده‌ها

در دشت قروه، ۱۵ مزرعه به مجموع ۹۰ هکتار به‌طور تصادفی و پراکنده، از بین مزارع کشاورزان انتخاب شد. در مزارع انتخابی، محصول مورد کشت گندم آبی (رقم پیشگام) و سامانه آبیاری بارانی آن، کلاسیک با ثابت آبپاش‌های متحرک بود. علاوه بر ملاحظات ذکر شده، همکاری کشاورز از مسایل مهمی است که لازم بود، مورد توجه قرار گیرد. منبع آب آبیاری مزارع مورد مطالعه، آبخوان ممنوعه دشت قروه است که کشاورزان برای بهره‌برداری از آن، از موتورپمپ‌های چاه‌های عمیق استفاده می‌کنند. منبع تامین انرژی موتورپمپ‌ها، انرژی الکتریکی (برق) و یا سوخت دیزل (گازئیل) بود. مساحت هر کدام از مزرعه‌های مورد مطالعه، به‌وسیله دستگاه GPS (مدل Etrex Vista, Garmin, Lenexa, USA) با دقت زیر ۳ متر در حالت سامانه تقویت منطقه وسیع، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم آب مصرفی مزارع مورد مطالعه، از دستگاه دی‌سنج اولتراسونیک^۱ (مدل UF5000, Adak, Tabriz, Iran) استفاده گردید. با استفاده از دستگاه مذکور، دبی خروجی الکتروپمپ‌ها (دبی ورودی به مزرعه) در بازه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری می‌گردید و با ثبت مدت‌زمان آبیاری، حجم آب مصرفی در هر آبیاری محاسبه می‌شد. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی هر کدام از مزارع مورد مطالعه به تفکیک دوره‌ها از شرکت برق منطقه‌ای استان دریافت شد. در مزارعی که از سوخت دیزل برای موتور پمپ‌ها، استفاده می‌شد میزان گازوئیل مصرفی ماهانه ثبت می‌گردید. برای اندازه‌گیری عملکرد محصول گندم آبی از روش کیل‌گیری استفاده شد (لاوسن و کیلینگ^۲، ۱۹۹۹). برای این منظور سعی گردید که در نقاط مختلف مزرعه، عمل کیل‌گیری به روش کادر اندازه، ۱/۵ متر در ۱/۵ متر انجام شود. همچنین میزان عملکرد محاسباتی، با میزان عملکرد کل مزرعه (فروش کشاورز) تطبیق در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ شد. همچنین از کشاورزان، سایر اطلاعات مورد نیاز و تکمیلی برای مزارع مورد مطالعه، شامل میزان بذر گندم آبی (رقم پیشگام) کشت شده در مزرعه، کود مصرفی، سموم مصرفی، نیروی کارگری مورد استفاده، ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده در مراحل کاشت، داشت و برداشت گردآوری شد. مزارع در دو گروه CE (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع انرژی الکتریکی) و CD (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع انرژی سوخت گازئیل) طبقه‌بندی شد. نهاده‌های ورودی مورد استفاده برای تولید محصول گندم در هر هکتار مشخص شدند و برای تبدیل مقادیر مختلف نهاده به واحدهای انرژی از ضرایب معادل‌های انرژی استاندارد استفاده گردید. همچنین برای محاسبه مقدار انرژی خروجی از ضرایب مربوط به محتوای انرژی محصول گندم استفاده شد. این ضرایب در جدول ۱ به‌طور کامل تشریح شده است.

1. Ultrasonic
2. Lawson and Keeling

جدول ۱. معادل‌های انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی (کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹)

مشخصه	واحد	معادل انرژی (مگاژول بر واحد)
الف) انرژی ورودی		
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶
ماشین‌آلات و ادوات*	ساعت	۱۴۲/۷
سوخت دیزلی	لیتر	۵۰/۲۳
نیترژن	کیلوگرم	۶۶/۱۴
فسفر	کیلوگرم	۱۲/۴۴
پتاسیم	کیلوگرم	۱۱/۱۵
کود دامی	کیلوگرم	۰/۳
بنزین	لیتر	۳۷
علف‌کش	لیتر	۲۳۸
قارچ‌کش	لیتر	۲۱۶
آفت‌کش‌ها	لیتر	۱۰/۱۲
آب آبیاری	مترمکعب	۱/۰۲
الکتریسیته	کیلووات‌ساعت	۱۱/۹۳
بذر گندم آبی	کیلوگرم	۱۴/۷
ب) انرژی خروجی		
دانه گندم آبی	کیلوگرم	۱۴/۷
کاه و کلش	کیلوگرم	۹/۲۵

*این انرژی شامل ساخت، تعمیرات و حمل است.

۳. شاخص‌های ارزیابی

با استفاده از معادل انرژی‌های ورودی و خروجی، در جدول ۲، کلیه اطلاعات ثبت شده در طول فصل زراعی سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در صفحه گسترده اکسل (Excel) وارد گردید و محاسبات با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه شد. برای ارزیابی میزان بهره‌وری مزارع مورد مطالعه، از شاخص‌های زیر (کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹) استفاده شد. همچنین سهم انرژی مستقیم (شامل نیروی انسانی، الکتریسیته مصرفی، سوخت فسیلی و آب آبیاری (آب مصرفی))، غیرمستقیم (شامل بذر، مواد شیمیایی و ماشین‌ها)، انرژی تجدیدپذیر (شامل نیروی انسانی و بذر) و تجدیدناپذیر (شامل سوخت فسیلی، کودها و مواد شیمیایی، ماشین‌ها و آب مصرفی) محاسبه شدند (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

الف) بهره‌وری آب مصرفی (کیلوگرم در مترمکعب): نسبت عملکرد محصول به مقدار آب ورودی به مزرعه است (رابطه ۱).

$$\text{میزان عملکرد محصول} = \frac{\text{میزان عملکرد محصول}}{\text{آب ورودی به مزرعه}} = \text{بهره‌وری آب مصرفی} \quad (۱)$$

که در این رابطه، میزان عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار و حجم آب ورودی به مزرعه بر حسب مترمکعب در هکتار است.

ب) بهره‌وری برق مصرفی و انرژی مصرفی (کیلوگرم در کیلووات‌ساعت و کیلوگرم در مگاژول): این شاخص رابطه کمی بین عملکرد محصول به‌ازای واحد انرژی مصرفی، را نشان می‌دهد (رابطه ۲).

$$\text{میزان عملکرد محصول} = \frac{\text{میزان عملکرد محصول}}{\text{برق مصرفی یا انرژی ورودی}} = \text{بهره‌وری برق و انرژی مصرفی} \quad (۲)$$

که در این رابطه، میزان عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار، میزان برق مصرفی و انرژی ورودی به ترتیب، بر حسب کیلووات-ساعت در هکتار و مگاژول در هکتار است.

ج) کارایی انرژی مصرفی (بدون بعد): از نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی، به دست می‌آید (رابطه ۳).

$$\text{کارایی انرژی مصرفی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \quad (۳)$$

در رابطه مذکور، میزان انرژی ورودی و خروجی بر حسب مگاژول در هکتار، وارد می‌گردد. همچنین در این رابطه، میزان انرژی خروجی از رابطه ۴، حاصل می‌شود. ضرایب انرژی از جدول ۱، گزارش شده‌اند.

$$\text{ضریب انرژی} \times \text{عملکرد محصول} = \text{انرژی خروجی} \quad (۴)$$

د) انرژی ویژه (مگاژول در کیلوگرم): از نسبت انرژی ورودی به میزان عملکرد محصول، حاصل می‌شود. در واقع این شاخص، نشان‌دهنده این امر است که برای تولید یک کیلوگرم محصول، چه میزان انرژی مصرف شده است (رابطه ۵).

$$\text{انرژی ویژه} = \frac{\text{انرژی ورودی}}{\text{میزان عملکرد محصول}} \quad (۵)$$

انرژی ورودی بر حسب مگاژول در هکتار و عملکرد محصول، بر حسب کیلوگرم در هکتار است.

یافته‌های پژوهش

۱. ارزیابی و تجزیه و تحلیل انرژی ورودی و خروجی

مطابق جدول ۲، میانگین الکتریسیته (برق) مصرفی برای گیاه گندم آبی به ازای هر هکتار در مزارع مورد مطالعه طی یک دوره زراعی ارائه شده است. متوسط برق مصرفی مزارع CE، ۲۳۰۸/۹۱ کیلووات‌ساعت در هکتار بود. الگوی مصرف انرژی الکتریکی در مزارع کشاورزی تحت تأثیر ترکیبی از عوامل هیدرولیکی، فنی و مدیریتی قرار دارد (طهماسبی و زارع، ۱۴۰۴). در این میان، پارامترهایی نظیر عمق دینامیک سطح ایستابی، فاصله مکانی چاه تا مزرعه، ویژگی‌های مورفولوژیکی و توپوگرافیک اراضی، و بازده عملیاتی الکتروپمپ‌ها در نقطه کار بهینه، به طور مستقیم بر میزان انرژی مصرفی اثرگذارند (نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین،

تعیین میزان دبی بهره‌برداری از چاه بر مبنای ظرفیت آبیاری اراضی تحت پوشش، و مدیریت زمان‌بندی آبیاری در طول دوره رشد زراعی، از مؤلفه‌های کلیدی در چارچوب مدل‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در سامانه‌های تأمین آب به‌شمار می‌آیند (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). میانگین گازئیل مصرفی مزارع CD، ۱۰۶۸ لیتر در هکتار بود که با تبدیل کردن به برق مصرفی (گازوئیل دارای ارزش حرارتی تقریبی ۳۵/۸ مگاژول در لیتر است، اما بازدهی موتورهای دیزلی در تبدیل این انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی معمولاً حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است. با فرض بازدهی متوسط ۳۵ درصد، انرژی مفید حاصل از هر لیتر گازوئیل برابر با ۱۲/۵۳ مگاژول است. این مقدار را می‌توان با استفاده از ضریب تبدیل ۲۷۷/۷۸ کیلووات‌ساعت بر مگاژول به معادل الکتریکی تبدیل کرد که حدود ۳/۴۸ کیلووات‌ساعت در لیتر خواهد بود) معادل ۳۷۱۶/۶۹ کیلووات‌ساعت در طی فصل رشد گیاه گندم است. به عبارت دیگر به‌طور متوسط برق مصرفی مزارع CD بیش از ۱/۶ برابر مزارع CE بود. نتایج بررسی قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که راندمان کل ۱۷ دستگاه موتورپمپ دیزلی به‌کار رفته در مزارع کشاورزی شهرستان همدان، در بازه‌ای بین ۵ تا ۲۴/۳ درصد قرار داشته و میانگین بازدهی این سامانه‌ها حدود ۱۴/۷ درصد برآورد شده بود. در مقابل، مطالعه رضوانی و همکاران (۱۳۸۹) حاکی از آن است که متوسط راندمان انرژی ایستگاه‌های پمپاژ برقی مورد استفاده در همان منطقه، به میزان قابل توجهی بالاتر بوده و برابر با ۴۶/۴ درصد گزارش شده است. به‌طور کلی، راندمان موتورپمپ‌های دیزلی به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از راندمان الکتروپمپ‌ها ارزیابی می‌شود. این اختلاف عملکرد را به عوامل متعددی همچون فرسودگی موتور و پمپ، نبود فونداسیون مناسب برای نصب تجهیزات، عدم تطابق صحیح بین ظرفیت موتور و مشخصات پمپ، و همچنین عدم بهره‌گیری کامل از توان اسمی موتور در حین بهره‌برداری می‌توان مرتبط دانست.

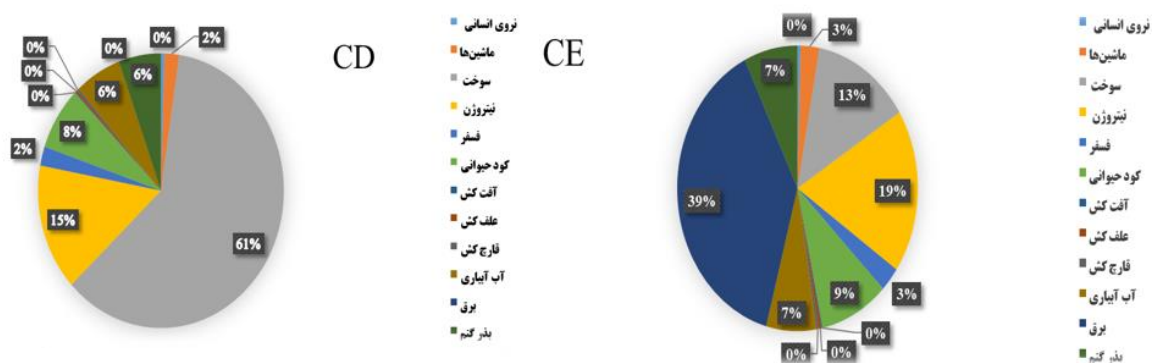
متوسط انرژی مصرفی و یا به عبارتی متوسط کل انرژی ورودی به مزارع CE و CD به ترتیب، ۷۱۳۷۱/۰۱ و ۸۸۵۰۷/۸۳ مگاژول در هکتار بود (جدول ۲). در سامانه آبیاری CD، به‌دلیل اتکای زیاد به گازوئیل به‌عنوان منبع انرژی برای انتقال و توزیع آب، میزان مصرف انرژی تقریباً ۱/۲۴ برابر بیش‌تر از سامانه CE، است. شکل (۲)، به تفکیک سهم هریک از نهاده‌های ورودی در تولید گندم آبی دشت مذکور را نمایش می‌دهد. در مزارع CE الکتریسیته مصرفی (برق) جهت استحصال آب مصرفی با سهم تقریباً ۳۹ درصد، بیش‌ترین سهم از کل انرژی ورودی را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده اهمیت یک جایگزین مطمئن در فرآیندهای کشاورزی منطقه است. پژوهش (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳) با اذعان به نقش مهم و بنیادین انرژی الکتریکی در سامانه‌های آبیاری تحت فشار و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر اختلالات تأمین برق، به‌طور مشخص استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک^{۲۲} (دستگاه‌هایی هستند که انرژی نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، معمولاً با استفاده از سلول‌های نیمه‌رسانا مانند سیلیکون) را به‌عنوان یک راه‌کار کارآمد پیشنهاد دادند. تحلیل کاربردی این پیشنهاد نشان می‌دهد که استقرار این سامانه‌ها قادر است ضمن تأمین انرژی موردنیاز برای استحصال و پمپاژ آب، به کاهش هزینه‌های عملیاتی و اثرات منفی زیست‌محیطی منجر شود. مهم‌تر آن‌که، استقلال نسبی از شبکه تأمین و توزیع برق، به‌ویژه در شرایط بحرانی، به دلیل ناترازی‌های به‌وجود آمده در سال‌های اخیر می‌تواند تداوم آبرسانی به مزارع و در نتیجه، امنیت غذایی را تضمین نماید. همچنین در مزارع CE، بعد از الکتریسیته مصرفی کودهای شیمیایی با سهمی بیش از ۲۰ درصد، به‌عنوان دومین نهاده مصرفی مهم در مزارع شناخته می‌شوند که این موضوع بیان‌گر وابستگی قابل توجه تولید کشاورزی به این نهاده است. سایر نهاده‌ها نظیر سوخت‌های فسیلی (۱۳ درصد)، کود دامی (۹ درصد)، بذر (۷ درصد)، آب آبیاری (۷ درصد)، ماشین‌آلات (۳ درصد)، فسفر (۳ درصد)، سموم شیمیایی (۰/۸۳ درصد) و نیروی انسانی (۰/۴۰ درصد) سهم کم‌تری داشته و در رتبه‌های بعدی مصرف نهاده در سال زراعی مذکور قرار گرفته‌اند. عدم ثبت بنزین (سوخت ماشین‌ها) می‌تواند به دلیل مصرف ناچیز یا عدم استفاده مستقیم آن‌ها در این مزارع باشد. این توزیع انرژی مصرفی، نشان‌دهنده وابستگی بالای این مزارع به نیروی الکتریسیته و کودهای شیمیایی به‌خصوص کود نیتروژن است، درحالی‌که نهاده‌های شیمیایی و نیروی کارگری در سامانه‌های مدرن، کم‌ترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. در مزارع تحت سامانه CD، سوخت‌های فسیلی با سهمی معادل ۶۱ درصد، بیش‌ترین میزان مصرف نهاده‌های ورودی را به خود اختصاص

داد؛ موضوعی که نشان‌دهنده وابستگی شدید این سامانه به منابع انرژی فسیلی برای انجام عملیات تولیدی، به‌ویژه آبیاری، است. پس از آن، به ترتیب کودهای شیمیایی (۱۷ درصد)، کود دامی (۸ درصد)، آب آبیاری (۶ درصد)، بذر گندم آبی (۶ درصد)، آفت‌کش‌ها (۰/۶۷ درصد) و نیروی انسانی (۰/۴۵ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳؛ نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲) در دشت هم‌جوار (دشت‌های دهگلان) کم‌ترین نهاده مصرفی در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک در مزارع گندم و سبب‌زمینی نیروی انسانی گزارش کرده بودند هرچند که در اکثر اقلیم‌های دیگر کشور ایران (قاسمی مبتکر، ۱۳۹۸؛ قاسمی مبتکر و همکاران، ۱۴۰۲؛ حیدری‌سلطان‌آبادی، ۱۴۰۰) نیروی کارگری کم‌ترین مصرف انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بودند. میزان مصرف نهاده‌های مربوط به مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت در طول یک فصل آبی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع محصول، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، طول دوره رشد، شرایط اقلیمی، نوع سامانه آبیاری، موقعیت و نوع منبع آب و همچنین منبع تأمین انرژی قرار دارد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴). طهماسبی و زارع ایبانه (۱۴۰۴) میزان متوسط انرژی مصرفی (ورودی) در مزارع گندم آبی پیشگام تحت سامانه آبیاری سطحی واقع در پایاب سد مخزنی سورال را برابر با ۲۹۷۳۳/۱۶ مگاژول در هر هکتار گزارش کردند. همچنین، بر اساس یافته‌های طهماسبی و همکاران (۱۴۰۴)، میانگین انرژی مصرفی در مزارع گندم آبی همین منطقه تحت سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آب‌پاش‌های متحرک و با استفاده از منابع انرژی برق و نیروی ثقل، به ترتیب برابر با ۴۵۰۲۷/۴۳ و ۴۲۴۷۲/۰۲ مگاژول در هر هکتار بوده است. در مطالعه دیگری، طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) مقدار کل انرژی ورودی برای تولید گندم آبی در دشت‌های دهگلان را ۶۹۱۸۹/۰۴ مگاژول در هر هکتار برآورد کردند. همچنین تقی‌نژاد و واحدی (۱۴۰۰) میزان انرژی خروجی حاصل از تولید گندم آبی در استان اردبیل را ۶۵۰۱۶/۰۷ مگاژول در هر هکتار اعلام نمودند. میزان انرژی مصرفی برای تولید گندم آبی در مناطق مختلف تحت شرایط اقلیمی گوناگون تفاوت قابل توجهی دارد. به طور مثال، در منطقه مشهد این میزان برابر با ۴۵۳۶۷/۶۳ مگاژول در هکتار گزارش شده است (قربانی و همکاران، ۲۰۱۱)، در حالی که در سیستان و بلوچستان، بدون در نظر گرفتن مصرف برق، انرژی مصرفی ۳۲۴۹۲/۹۷ مگاژول در هکتار بوده است (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲). در استان اردبیل این مقدار حدوداً ۳۸۷۵۵/۳۴ مگاژول در هکتار برآورد شده است (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، و در ایالات ماماریای ترکیه مصرف انرژی برابر با ۲۰۶۳۵/۵۰ مگاژول در هکتار بوده است (تیبی و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین در استان همدان، بدون در نظر گرفتن مصرف آب، انرژی مصرفی به ۴۷۵۹۱/۵۲ مگاژول در هکتار رسید (قاسمی‌مبتکر، ۱۳۹۸). در این تحقیق، تفاوت‌های مشاهده‌شده عمدتاً به شیوه مدیریت کشاورزی و نحوه بهره‌برداری از نهاده‌ها توسط کشاورزان ارتباط دارد. اگرچه مقدار انرژی ورودی کم‌تر از تفاوت در بهره‌وری و کارایی انرژی تأثیرگذار است، شناسایی نهاده‌های مصرفی انرژی و تعیین سهم هر یک از آن‌ها در فرآیند تولید محصول، از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر، نحوه مدیریت و مصرف نهاده‌ها توسط کشاورزان تأثیر بیش‌تری در تفاوت‌های مشاهده‌شده نسبت به میزان انرژی ورودی دارد. با این حال، برای بهینه‌سازی فرآیند تولید، ضروری است که سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی انرژی شناسایی و تحلیل گردد. برای مثال، برخلاف نتایج این مطالعه که در مزارع CE که الکتروسیته (برق) مصرفی و در مزارع CD سوخت فسیلی (گازئیل) به‌عنوان پرمصرف‌ترین نهاده‌ها شناسایی شدند، در شرایط منطقه‌ای نتایج متفاوتی گزارش شده است. در مشهد، مواد شیمیایی بیش‌ترین سهم را در مصرف انرژی داشتند (قربانی و همکاران، ۲۰۱۱)، در استان‌های همدان و گرگان سوخت‌های فسیلی غالب بودند (قاسمی‌مبتکر، ۱۳۹۸)، و در سیستان و بلوچستان مصرف کودهای شیمیایی بیش‌ترین مقدار انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲). علاوه بر این، در پژوهش‌هایی همچون تحقیق (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، مشخص شد که در تولید گندم آبی، الکتروسیته بیش‌ترین سهم از انرژی ورودی را داشت. همچنین در استان اصفهان ۵۵/۶۲ درصد و در استان خراسان رضوی ۵۰/۳۷ درصد از کل انرژی ورودی مربوط به این منبع بود. در این مطالعه، تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد سامانه‌های آبیاری بارانی با منابع انرژی مختلف (برق و گازوئیل) تأثیر معناداری روی عملکرد نداشت. مجموع انرژی خروجی برای کشت گندم آبی با در نظر گرفتن عملکرد دانه گندم و بقایای گیاهی (کاه و کلش) در مزارع با سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک با منابع انرژی برق (CE) و گازوئیل (CD) به ترتیب ۱۱۸۸۱۵ و ۱۱۸۸۹۶ مگاژول

در هکتار گزارش شد (جدول ۲). این نتایج نشان دهنده این است که تغییر منبع انرژی (از برق به گازوئیل) در این سامانه‌های آبیاری بارانی تأثیر قابل توجهی در مجموع انرژی خروجی نداشته است. باتوجه به این که اختلافات انرژی خروجی بین دو منبع انرژی در این مطالعه بسیار ناچیز بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر منبع انرژی (برق یا گازوئیل) تأثیر زیادی بر عملکرد کشاورزی نداشته و عوامل دیگری همچون شرایط محیطی، نوع خاک، کمیت و کیفیت آب و مدیریت کشاورزی ممکن است تأثیرگذارتر باشند.

جدول ۲. میزان نهاده‌های مصرفی محصول گندم آبی و عملکرد آن در مزارع کشاورزان دشت قروه استان کردستان

سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک			
منبع انرژی الکتریکی	منبع انرژی سوخت فسیلی		
CE	CD	واحد	شرح شاخص‌ها
۲۳۰۸/۹۱	۳۷۱۶/۶۹	کیلووات ساعت در هکتار	برق مصرفی
۷۱۳۷۱/۰۱	۸۸۵۰۷/۸۳	مگاژول در هکتار	انرژی ورودی
۶۹۵۰	۶۸۸۰	کیلوگرم در هکتار	عملکرد
۱۱۸۸۱۵	۱۱۸۸۹۶	مگاژول در هکتار	انرژی خروجی



شکل ۲. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی مزارع الکتریکی (CE) و دیزل (CD) در کشت گندم آبی دشت قروه استان کردستان

۲. مقایسه روابط بین انرژی‌های ورودی و خروجی

کارایی انرژی که به‌عنوان نسبت انرژی خروجی (محصول برداشت‌شده) به مجموع انرژی‌های ورودی (نهاده‌های مصرفی) تعریف می‌شود، یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی بهره‌وری سامانه‌های کشاورزی است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در جدول (۳)، میزان این شاخص در مزارع CE برابر با ۱/۶۶ و در مزارع CD معادل ۱/۳۴ محاسبه شد. این مقادیر بیان‌گر آن هستند که مزارع CE عملکرد بهینه‌تری در بهره‌برداری از منابع انرژی داشته‌اند. عوامل مختلفی می‌توانند بر این کارایی انرژی مصرفی در مزرعه تأثیر گذار باشد، از جمله نوع محصول، مدیریت مزرعه، شرایط اقلیمی، بافت اجتماعی و فرهنگی منطقه، و سامانه‌های آبیاری به‌کاررفته (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴). به نظر می‌رسد که اختلاف عملکرد بین دو نوع مزرعه، به‌ویژه پایین‌تر بودن کارایی در مزارع CD، ممکن است ناشی از مصرف بالاتر انرژی‌های ورودی مانند سوخت‌های فسیلی جهت پمپاژ و توزیع آب باشد. طهماسبی و زارع ایبانه (۱۴۰۴) در پژوهشی میزان کارایی مصرف انرژی در تولید گندم را در اراضی پایاب سد مخزنی سورال واقع در استان

کردستان بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک، کارایی مصرف انرژی برابر با ۲/۲۳ و در سامانه آبیاری سطحی مبتنی بر نیروی ثقل معادل ۲/۰۷ بوده است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر در همان منطقه، طهماسبی و همکاران (۱۴۰۴) کارایی مصرف انرژی این محصول را در سامانه بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک، تحت تأثیر دو منبع انرژی مختلف بررسی کردند؛ به طوری که مقدار این شاخص برای سامانه مبتنی بر انرژی برق برابر با ۲/۴۶ و برای سامانه مبتنی بر نیروی ثقل برابر با ۲/۸۱ گزارش گردید. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، کارایی مصرف انرژی برای محصول گندم آبی در دشت دهگلان، در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک و لوله چرخ‌دار را به ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ گزارش کردند. یکی از دلایل اصلی پایین‌تر بودن کارایی مصرف انرژی در مطالعه حاضر نسبت به تحقیقات پیشین طهماسبی و همکاران (۱۴۰۴) و طهماسبی و زارع ایبانه (۱۴۰۴)، به تفاوت در منبع تأمین آب و نحوه انتقال آن بازمی‌گردد. در مزارع مورد بررسی، آب آبیاری مستقیماً از سد تأمین شده و با بهره‌گیری از نیروی ثقل بدون نیاز به پمپاژ به مزرعه منتقل می‌شود؛ در نتیجه، میزان انرژی مصرفی برای انتقال آب عملاً ناچیز بوده است. در مقابل، در مطالعه طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، منبع آب، آبخوان‌های زیرزمینی منطقه بوده و تأمین و توزیع آب نیازمند مصرف قابل توجهی از انرژی برای پمپاژ و انتقال به سطح مزرعه بوده است. با وجود این تفاوت در ساختار تأمین انرژی، مقادیر کارایی انرژی در دو مطالعه به یکدیگر نزدیک گزارش شده‌اند که می‌تواند ناشی از تأثیر سایر عوامل مؤثر مانند بهره‌وری محصول، نوع نهاده‌ها و مدیریت مزرعه نیز باشد.

در ارزیابی بهره‌وری انرژی دو نوع سامانه آبیاری بارانی، نتایج نشان داد که مزارع مجهز به سامانه CE (منبع انرژی الکتریسته) با مقدار ۰/۰۹ کیلوگرم در مگاژول، بهره‌وری بالاتری نسبت به مزارع دارای سامانه CD (منبع انرژی دیزل) با مقدار ۰/۰۷ کیلوگرم در مگاژول داشتند (جدول ۳). این بدان معناست که به ازای مصرف هر واحد انرژی، سامانه CE انرژی مصرفی کمتری داشته یا محصول بیشتری تولید کرده است. در مطالعات مربوط به تولیدات زراعی، بهره‌وری انرژی شاخص دقیق‌تری نسبت به کارایی انرژی برای مقایسه سامانه‌ها به‌شمار می‌رود. درحالی‌که کارایی انرژی تنها به میزان انرژی مصرفی برای انجام یک فعالیت خاص اشاره دارد، بهره‌وری انرژی نسبت مستقیم بین مقدار محصول تولیدی و انرژی مصرف‌شده را نشان می‌دهد و درک بهتری از کارآمدی سامانه در تبدیل انرژی به محصول نهایی ارائه می‌دهد (طهماسبی و زارع، ۱۴۰۴). از آن‌جا که عوامل متعددی نظیر میزان انرژی ورودی و عملکرد محصول می‌توانند بر کارایی انرژی اثر بگذارند، اتکای صرف به آن ممکن است منجر به تفسیر نادرست شود. در این مطالعه، با وجود شباهت در عملکرد نهایی محصول میان دو سامانه، مصرف بالاتر سوخت گازوئیل در مزارع CD باعث افزایش مجموع انرژی ورودی آن‌ها و در نتیجه کاهش بهره‌وری انرژی شد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از منبع انرژی الکتریکی در سامانه CE به دلیل مصرف کم‌تر انرژی ورودی، کارایی بهتری در تولید محصول داشته است.

شاخص بهره‌وری مصرف برق در تولید گندم (بر حسب کیلوگرم به ازای هر کیلووات‌ساعت برق مصرفی) در جدول (۳) گزارش شده است. این شاخص نشان‌دهنده مقدار گندم آبی تولیدشده در ازای هر واحد انرژی الکتریکی مصرف‌شده است. بر این اساس، میزان این شاخص در مزارع CE برابر با ۳/۰۱ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت و در مزارع CD معادل ۲/۲۰ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت بوده است. کاهش بهره‌وری در مزارع CD عمدتاً ناشی از راندمان پایین موتورهای دیزلی و در نتیجه مصرف بالاتر برق در این مزارع است. مطالعه‌ای توسط غلامی و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که شاخص بهره‌وری انرژی الکتریکی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در دشت قزوین (در شرایط پمپاژ آب از چاه) برای محصولات مختلف متفاوت است. مقدار این شاخص برای گندم بین ۲/۶۲ تا ۹ کیلوگرم در کیلووات‌ساعت، برای جو بین ۲/۰۹ تا ۷/۷۹، برای ذرت دانه‌ای بین ۱/۰۹ تا ۸/۶۴ و برای یونجه در محدوده ۰/۳۴ تا ۳/۷۴ گزارش شده است. همچنین، علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) بهره‌وری مصرف برق در سامانه آبیاری عقربه‌ای برای ذرت بذری در استان خراسان رضوی را ۰/۸۳۸ کیلوگرم در کیلووات‌ساعت گزارش کردند. یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر بهره‌وری انرژی در مزارع، نوع منبع تأمین آب است؛ چرا که به طور مستقیم بر میزان برق مصرفی تأثیرگذار است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴). در سامانه‌های آبیاری سطحی که برداشت آب از طریق کانال‌های شبکه آبیاری انجام می‌شود، به دلیل حذف نیاز به پمپاژ، مصرف برق به صفر می‌رسد (نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲).

در ارزیابی بهره‌وری آب مصرفی در مزارع مورد بررسی، متوسط شاخص بهره‌وری برحسب کیلوگرم محصول به‌ازای هر مترمکعب آب در مزارع CE و CD به ترتیب برابر با ۱/۴۷ و ۱/۳۱ به‌دست آمد. به بیان دیگر، بهره‌وری مصرف آب در مزارع CD حدود ۱۲ درصد کم‌تر از مزارع CE بود. این تفاوت می‌تواند تحت تأثیر عواملی چون سطح آگاهی کشاورزان نسبت به اصول صحیح آبیاری گندم که بر مدت و تعداد نوبت‌های آبیاری در طول فصل زراعی اثر می‌گذارد، اندازه اراضی، سطح دسترسی به منابع آبی و نوع تجهیزات مورد استفاده در آبیاری باشد (نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲). با وجود مصرف بیش‌تر آب در مزارع CD، عملکرد نهایی محصول تفاوت معناداری با مزارع CE نداشت که این موضوع نشان‌دهنده پائین بودن کارایی سامانه آبیاری در این مزارع است. به‌نظر می‌رسد سامانه‌های آبیاری مورد استفاده در مزارع CD از نظر عملکرد هیدرولیکی، شامل یکنواختی پخش و میزان تلفات آب، دچار ضعف است. یکی از علل اصلی این مشکل می‌تواند به عملکرد ضعیف و ناپایدار موتورهای دیزلی در تأمین فشار موردنیاز برگردد. چنان‌چه فشار لازم برای عملکرد مطلوب سامانه آبیاری بارانی تأمین نشود، یکنواختی پاشش آب توسط آبپاش‌ها کاهش یافته و در نتیجه توزیع آب در مزرعه نامناسب خواهد بود که این مسئله نهایتاً موجب افت عملکرد می‌شود (معروف‌پور و همکاران، ۲۰۱۹).

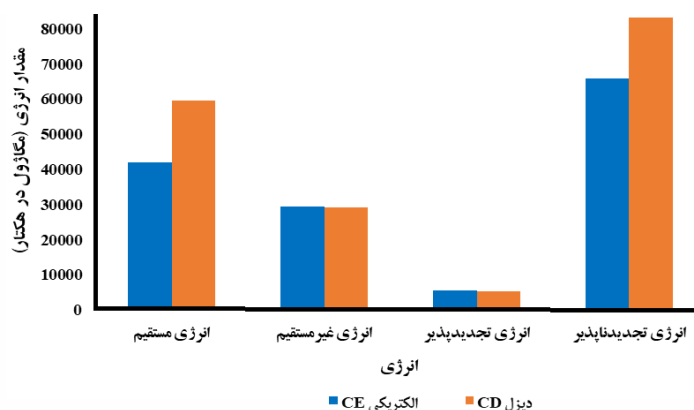
بر اساس شاخص انرژی ویژه ارائه‌شده در جدول (۳)، مقادیر این شاخص برای مزارع CE و CD به ترتیب برابر با ۱۰/۲۶ و ۱۲/۸۶ مگاژول بر کیلوگرم بود. شاخص انرژی ویژه در واقع برعکس شاخص بهره‌وری انرژی است و بیانگر میزان انرژی مصرفی برای تولید هر کیلوگرم دانه گندم آبی است. مقادیر پایین‌تر این شاخص نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر و عملکرد کارآمدتر سامانه تولید هستند. مطابق نتایج، میزان انرژی مصرف‌شده برای تولید یک کیلوگرم گندم در مزارع CD حدود ۱/۲۵ برابر بیش‌تر از مزارع CE بوده است. این اختلاف بیان‌گر آن است که سامانه‌های آبیاری و تأمین انرژی در مزارع CE از کارایی بالاتری برخوردار بوده‌اند. یکی از عوامل اصلی این تفاوت، نوع حامل انرژی مصرفی در سامانه‌های آبیاری است. در مزارع CE، استفاده از برق با راندمان بالاتر نسبت به گازوئیل، منجر به کاهش انرژی ویژه و افزایش بهره‌وری انرژی شده است. در مقابل، در مزارع CD مصرف بالای گازوئیل به‌عنوان منبع اصلی تأمین انرژی، به دلیل راندمان پایین موتورهای دیزلی، موجب افزایش قابل توجه انرژی مصرفی گردیده است. بنابراین، برقی‌سازی چاه‌های کشاورزی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در کاهش مصرف انرژی نهایی، افزایش کارایی سامانه‌های تولید، و در نهایت کاهش هزینه‌های تولید و ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۳. روابط بین انرژی‌های ورودی و خروجی در تولید گندم آبی در سامانه‌های آبیاری بارانی دشت قروه استان کردستان

سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک			
شرح شاخص‌ها	واحد	منبع انرژی الکتریکی	منبع انرژی سوخت فسیلی
		CE	CD
کارایی انرژی	-	۱/۶۶	۱/۳۴
بهره‌وری انرژی	کیلوگرم در مگاژول	۰/۰۹	۰/۰۷
بهره‌وری برق مصرفی	کیلوگرم در کیلووات‌ساعت	۳/۰۱	۲/۲۰
بهره‌وری آب آبیاری	کیلوگرم در مترمکعب	۱/۴۷	۱/۳۱
انرژی ویژه	مگاژول در کیلوگرم	۱۰/۲۶	۱۲/۸۶

توزیع انرژی به صورت‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در شکل ۲ نشان‌دهنده شده است. نتایج حاصل از بررسی انواع انرژی مصرفی در سامانه تولید محصول مورد بررسی نشان داد که انرژی مستقیم سهم بیش‌تری نسبت به انرژی غیرمستقیم دارد. دلیل این موضوع می‌تواند مصرف بالای نهاده‌های الکتریسیته و سوخت باشد. همچنین، انرژی‌های تجدیدنپذیر

در مقایسه با انرژی‌های تجدیدپذیر سهم غالبی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به محدودیت منابع انرژی تجدیدناپذیر و آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، کاهش وابستگی به این منابع و جایگزینی آن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر، ضرورتی انکارناپذیر در راستای دستیابی به کشاورزی پایدار است. یافته‌ها نشان می‌دهد که اصلاح الگوهای مصرف انرژی از طریق به‌کارگیری نهاده‌های طبیعی مانند کودهای زیستی و دامی، استفاده از روش‌های کم‌خاک‌ورزی، و بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی در آبیاری، می‌تواند سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر را به طور مؤثری کاهش دهد. این اقدامات نه تنها موجب کاهش فشار بر منابع محدود انرژی می‌شود، بلکه منجر به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و افزایش پایداری در سیستم‌های تولید محصولات زراعی می‌شود.



شکل ۲. مقادیر انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید گندم آبی

بحث

این پژوهش باهدف ارزیابی علمی شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و انرژی در تولید گندم آبی در دشت قره استان کردستان انجام شده است. تمرکز اصلی بر ارزیابی میدانی این شاخص‌ها در مزارع کشاورزان منطقه بوده است. مزارع مورد مطالعه بر اساس نوع سامانه آبیاری و منبع انرژی به دو گروه CE و CD تقسیم شدند. گروه CE (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک با منبع انرژی الکتریکی (برق))، گروه CD (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک با منبع انرژی سوخت دیزل) تعریف گروه‌بندی شدند. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی مزارع گروه CE از شرکت برق منطقه‌ای شهرستان جمع‌آوری شد تا محاسبات دقیق‌تری در مورد بهره‌وری برق و انرژی ورودی این گروه انجام شود.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین کل انرژی ورودی و خروجی در مزارع CE به ترتیب برابر با ۷۱۳۷۱/۰۱ و ۱۱۸۸۱۵ مگاژول در هکتار و در مزارع CD معادل ۸۸۵۰۷/۸۳ و ۱۱۸۸۹۶ مگاژول در هکتار برآورد شد. مقایسه شاخص بهره‌وری آب نشان داد که مزارع CD حدود ۱۲ درصد عملکرد پایین‌تری نسبت به مزارع CE داشتند. با این حال، اختلاف معنی‌داری در عملکرد نهایی محصول گندم میان دو نوع مزرعه مشاهده نشد. مقدار انرژی ویژه نیز به ترتیب برای مزارع CD و CE معادل ۱۰/۲۶ و ۱۲/۸۶ مگاژول در کیلوگرم برآورد گردید که بیان‌گر مصرف انرژی بیشتر در مزارع مبتنی بر سوخت دیزل (CD) برای تولید گندم آبی است. به طور کلی، تحلیل شاخص‌های انرژی در این مطالعه نشان می‌دهد که سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری‌های متحرک که با برق کار می‌کنند، از نظر کارایی انرژی در وضعیت بهتری نسبت به سامانه‌های مبتنی بر دیزل قرار دارند. بنابراین، برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی دیزلی باید در اولویت سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان بخش کشاورزی کشور قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ثنا رحمتی و بختیار کریمی؛ تهیه گزارش پژوهش: پیمان طهماسبی؛ تحلیل داده‌ها: پیمان طهماسبی و بختیار کریمی
مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:
نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها
نویسنده دوم: طراحی پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده سوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، جمع‌آوری داده‌ها و اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

در پایان از دانشگاه کردستان برای حمایت مالی این پژوهش در قالب پایان‌نامه و همچنین از شرکت برق منطقه‌ای استان کردستان بابت همکاری در تهیه اطلاعات برق مصرفی مزارع مورد مطالعه، همچنین از سرکار خانم دکتر زینب فتحی تیلکو کارمند جهاد کشاورزی استان کردستان بابت همکاری، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- اسلامی، زینب، جنت‌رستمی، سمیه، اشرف زاده، افشین، و پورمحمد، یاور. (۱۳۹۹) تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. *نشریه آب و خاک*، ۳۴(۱)، ۲۵-۱۱.
<https://doi.org/10.22067/jsvw34i1.81897>
- تقی نژاد، جبرائیل، و واحدی، عادل. (۱۴۰۰). مدل سازی الگوی مصرف انرژی و تحلیل حساسیت نهاده‌ها در تولید گندم آبی، مطالعه موردی: استان اردبیل. *مجله مکانیزاسیون کشاورزی*، ۶(۴)، ۱۹-۱۱.
<https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202>
- جوزی، مهدی، ابراهیمی پاک، و نیازعلی، تافته، آرش. (۱۴۰۴). تعیین بهره‌وری فیزیکی آب مصرفی گندم در اقلیم‌های مختلف استان کرمانشاه. *مجله مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۵(۱)، ۱۷۸-۱۵۹.
<https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14879.1445>
- دین محمدی، مصطفی، و عباسی، رویا. (۱۴۰۲). اندازه‌گیری آب مجازی و مقایسه بهره‌وری فنی با بهره‌وری بازاری آب مجازی در بخش کشاورزی مطالعه موردی محصولات آبی منتخب استان کردستان. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۹(۴)، ۱۲۵-۱۱۰.
<https://doi.org/10.22034/iwrr.2023.177609>
- سالمی، حمیدرضا، و رضوانی، سید معین‌الدین. (۱۳۹۵). ارزیابی سیستم آبیاری بارانی در شرایط زارعین (استان اصفهان و همدان). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳(۲۳)، ۳۵۰-۳۴۵.
<https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>

- سلیمی سبحان، محمدرضا، عینالی، جمشید، جوان، فرهاد، و هاشمی، معصومه. (۱۳۹۷). مکان یابی سکونتگاه های روستایی جدید با ملاحظات پدافند غیرعامل (مورد مطالعه: شهرستان قروه). *پژوهشنامه جغرافیای انتظامی*، ۶(۲۳)، ۱۵۸-۱۳۵.
<https://sid.ir/paper/379102/fa>
- شیخ‌زین‌الدین، آذر، و دهقان‌پور، حامد. (۱۴۰۱). بررسی اقتصادی نقش تغییر نظام آبیاری در بهره‌وری آب شبکه آبیاری و زهکشی دروزن. *مجله اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۳۰(۳)، ۲۸۶-۲۶۷.
<https://doi.org/10.30490/aead.2023.354981.1353>
- ضیایی، سید مسعود، حسین پناهی، فرزاد، ولی زاده، جعفر، و برآبادی، سید ابوالقاسم. (۱۳۹۲). مقایسه کارآمدی تولید گندم و جو به لحاظ مصرف انرژی و بهره‌وری آن در استان سیستان و بلوچستان. *پژوهشهای زراعی ایران*. ۱۱(۲)، ۳۳۶-۳۲۷.
<https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148>
- طهماسبی، پیمان، و زارع ایبانه، حمید. (۱۴۰۴). مقایسه بهره‌وری انرژی در سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال، استان کردستان). *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۵(۲)، ۹۳-۷۲.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>
- طهماسبی، پیمان. (۱۴۰۳). اصول مدیریت منابع آب. انتشارات قلم محقق، اردبیل، ایران. <https://civilica.com/p/502914>
- طهماسبی، پیمان، دالوند، فاطمه، حسینی، سید ابولفضل، کریمی، بختیار، و قدرشناس، هیرش. (۱۴۰۳). بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان). *مجله آب و خاک*، ۳۸(۶)، ۶۹۷-۶۸۳.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439>
- طهماسبی، پیمان، مقدم‌نیا، آرمان، گل‌محمدی قانع، پگاه، فتحی، آرام، کریمی، بختیار، و قدرشناس، هیرش. (۱۴۰۴). ارزیابی کارایی انرژی مصرفی مزارع سبب‌زمینی و گندم تحت سامانه آبیاری بارانی (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال، استان کردستان)، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۵(۳)، ۱۹-۳۷.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2025.501965.1852>
- عاشوری، وحید، هاشمی‌گرم‌دره، سید ابراهیم، هاشمی‌شاهدانی، سید مهدی، و روزبهانی، عباس. (۱۴۰۲). بررسی میزان مصرف آب و انرژی در سطح مزارع شبکه آبیاری قزوین. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*. ۱۳(۲)، ۳۱۰-۲۹۵.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869>
- علی‌آبادی، حسن، علیزاده، امین، و عرفانی، عاطفه. (۱۳۹۴). بهره‌وری مصرف آب و انرژی در سامانه‌های مختلف آبیاری (مطالعه موردی ذرت بذری در کشت و صنعت جوین) در استان خراسان رضوی. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۴)، ۵۸۲-۵۷۱.
<https://sid.ir/paper/131560/fa>
- عموئی بیجائییه، صادق، خالدیان، محمدرضا، و صورتی زنجانی، رضا. (۱۴۰۲). بهبود بهره‌وری آب و انرژی با کاربرد سامانه هوشمند آبیاری بارانی توتستان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۷(۲)، ۳۷۵-۳۸۵.
https://idj.aid.ir/article_170371.html
- غلامی، زینب، ابراهیمیان، حامد، و نوری، حمیده. (۱۳۹۴). بررسی بهره‌وری انرژی آب و بهره‌وری اقتصادی انرژی در سامانه‌های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره‌برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۶(۳)، ۴۴-۳۱.
<https://sid.ir/paper/28231/fa>
- قاسمی مبتکر، حسن. (۱۳۹۸). بررسی روند مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری غرقابی و تحت فشار: مطالعه موردی یک مزرعه صد هکتاری در همدان. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۰(۴)، ۸۰۹-۸۰۱.
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189>
- قدمی فیروزآبادی، علی، و اکبری، مهدی. (۱۴۰۲). تاثیر آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول گندم و شوری خاک در شرایط زارعین (مطالعه موردی: استان همدان). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۵)، ۸۴۲-۸۳۱.
https://idj.html.aid.ir/article_182244
- قدمی فیروزآبادی، علی، دهقانی سانجیح، حسین، خوش‌روش، مجتبی، و سیدان، سید محسن. (۱۳۹۴). بررسی راندمان انرژی و مصرف آب در ایستگاه‌های پمپاژ گازوئیلی. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۹(۳)، ۳۷۷-۳۶۷.
<https://doi.org/10.22092/jwra.2015.103060>
- لونی، ریحانه، و شریف‌زاده، مهدی. (۱۴۰۱). مروری بر مطالعات همبست آب، انرژی و غذا در ایران: ضرورت، چالش‌ها و راه‌کارهای پیشنهادی. *نشریه پایداری، توسعه و محیط زیست*، ۳(۱۱)، ۴۹-۲۹.
<https://www.magiran.com/p2515271>
- مفاخری، صلاح، ویسی، هادی، خوشبخت، کورس، و نظری، رضا. (۱۴۰۰). ارزیابی پایداری پیوند سیستم‌های آب - انرژی‌غذا در محصول‌های کشاورزی (مطالعه موردی: شهرستان دهگلان). *علوم محیطی*، ۱۹(۴)، ۳۰۶-۲۷۸.
<https://doi.org/10.52547/envs.2021.222630.1078>

- ناصری، ابوالفضل، و نیکان فر، رامین. (۱۳۹۸). آینده پژوهی بهره‌وری انرژی در تولید گندم آبی در حاشیه شرقی دریاچه ارومیه. *مجله علوم محیطی*، ۱۷(۲)، ۸۰-۱۰۱. <https://sid.ir/paper/117661/fa>
- ناصری، ابوالفضل، و نیکان فر، رامین. (۱۳۹۸). آینده پژوهش بهره‌وری انرژی گندم آبی در تولید حاشیه شرقی ارومیه. *فصلنامه علوم و محیطی*، ۱۷(۲)، ۸۱-۱۰۲. https://envs.sbu.ac.ir/article_98063.html
- نیازمند، رویا، مقدم نیا، آرمان، طهماسبی، پیمان، نیک مهر، سامان، و معروف پور، عیسی. (۱۴۰۲). بهره‌وری مصرف آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در سامانه‌های آبیاری بارانی (مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان). *فناوری های پیشرفته در بهره‌وری آب*. ۳(۴)، ۱۳۷-۱۱۶. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>
- وزارت جهاد کشاورزی، (۱۴۰۲). آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱ محصولات زراعی (جلد اول). *انشارات معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز آمار، فناوری و اطلاعات و ارتباطات، تهران، ایران*. <https://agrodl.ir/statistics>
- یوسفی، محمد، و مهدوی دامغانی، ع. (۱۳۹۲). بررسی بهره‌وری مصرف آب و انرژی در بوم نظام‌های فاریاب استان کرمانشاه. *بوم‌شناسی کشاورزی*. ۵(۲)، ۱۱۳-۱۲۱. <https://doi.org/10.22067/jag.v5i2.24462>

References

- Ahmad, A., & Khan, S. (2009). On comparison of water and energy productivities in pressurized irrigation systems. *Energy*, 10(6.93), 4-29. <http://mssanz.org.au/modsim09/>
- Ahmed, M. D., Ghulam, H., & Zeng, Y. (2025). Ascertaining the Robust Drought Tolerant Wheat Germplasm for Sustainable Agriculture. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(3). 2991-3001. <https://doi.org/10.15244/pjoes/188698>
- Ahmed, R. S., Abuarab, M. E., Baiomy, M. A., & Ibrahim, M. M. (2024). Heavy metals removal from industrial wastewater using bio-adsorbent materials based on agricultural solid wastes through batch and continuous flow mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104665. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104665>
- Aliabadi, Hassan., Alizadeh, Amin., & Erfani, Atefeh. (2015). Water and energy use efficiency in different irrigation systems (Case study: Seed corn cultivation in Joveyn agro-industry, Razavi Khorasan Province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 9(4), 571–582. (In Persian) <https://sid.ir/paper/131560/fa>
- Amoioe Bijayie, Sadegh, Khaledian, Mohammad Reza, & Soorati Zanjani, Reza. (2023). Improving water and energy productivity using a smart sprinkler irrigation system in mulberry orchards. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(2), 375–385. (in Persian) https://idj.iaid.ir/article_170371.html
- AOSTAT. 2024. Online FAO StaΘsΘcs Database. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, Italy. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Ashouri, Vahid., Hashemi-Garm Darreh, Seyed Ebrahim., Hashemi, Shahdani., & Rouzbehani, Abbas. (2023). Evaluation of water and energy consumption in Qazvin irrigation network farms. *Water and Irrigation Management*, 13(2), 295–310. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869>
- Beheshti Tabar, I., Keyhani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 849-855. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024>
- Bhandari, R., Paudel, H., Nyaupane, S., & Poudel, M. R. (2024). Climate resilient breeding for high yields and stable wheat (*Triticum aestivum* L.) lines under irrigated and abiotic stress environments. *Plant Stress*, 11, 100352. <https://doi.org/10.26480/rfna.02.2021.59.62>
- Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D., & McCandless, M. (2013). The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management. *The International Institute for Sustainable Development Publications*, Manitoba Canada. <https://www.researchgate.net/publication/356879079>
- Dehn Mohammadi, Mostafa., & Abbasi, Roya. (2023). Measurement of virtual water and comparison of technical and market productivity of virtual water in agriculture: A case study of selected irrigated crops in Kurdistan Province. *Iranian Water Resources Research*, 19(4), 110–125. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/iwrr.2023.177609>
- El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7(6), 2857-2868. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0551-3>
- Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Nawi, N. M., & Mairghany, M. (2019). Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation. *Energy*, 189, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116160>
- Endo, A., Burnett, K., Orencio, P.M., Kumazawa, T., Wada, C.A., Ishii, A., Tsurita, I., & Taniguchi, M. (2015). Methods of the water-energy-foodnexus. *Water*, 7, 5806–5830. <https://doi.org/10.3390/w7105806>

- Eslami, Zeynab., Jannat-Rostami, Somayeh., Ashrafzadeh, Afshin., & Pourmohammad, Yavar. (2020). The impact of the water-energy-food nexus approach on integrated water resources management of the Sefidrood irrigation and drainage network. *Water and Soil*, 34(1), 11–25. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i1.81897>
- FAO. (2002). Financial and Economic Appraisal of Irrigation Projects. Irrigation Manual Module 11 Publications, Rome, Italy. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a8c5d789-6b92-4229-941e-4ee341ffec68/content>
- FAO. (2014). The water- energy- food nexus. *Food and Agriculture Organization of the United Nations Publications*, Rome, Italy. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1975296>
- Ferrari, M., Benvenuti, L., Rossi, L., De Santis, A., Sette, S., Martone, D., ... & Turrini, A. (2020). Could dietary goals and climate change mitigation be achieved through optimized diet? The experience of modeling the national food consumption data in Italy. *Frontiers in nutrition*, 7, 48. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00048>
- Firouzabadi, A. G., Baghani, J., Jovzi, M., & Albaji, M. (2021). Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 251, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868>
- Ghadami Firoozabadi, A., & Akbari, M. (2023). Impact of drip (tape) irrigation on yield and water productivity of wheat and soil salinity under farmer conditions (Case study: Hamedan Province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(5), 831–842. (In Persian) https://idj.iaid.ir/article_182244.html
- Ghadami Firoozabadi, Ali., Dehghani Sanij, Hossein., Khoshroosh, Mojtaba., & Seydan, Seyed Mohsen. (2015). Energy efficiency and water consumption assessment in diesel pumping stations. *Water Research in Agriculture*, 29(3), 367–377. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jwra.2015.103060>
- Ghasemi Mobtaker, H. (2019). Analysis of energy consumption trends in flood and pressurized irrigation systems: A case study of a 100-hectare farm in Hamedan. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 801–809. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189>
- Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Nouri, H. (2015). Water and energy resources are limited; however, water and energy consumption for production of agricultural crops is increasing to meet the food dema. *Food Engineering Research*, 16(3), 31–44. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jaer.2015.102988>
- Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noori, H. (2015). Analysis of water and economic energy productivity in sprinkler and surface irrigation systems using groundwater (Case study: Qazvin plain). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), 31–44. (In Persian) <https://sid.ir/paper/28231/fa>
- Ghorbani, R., Mondani, F., Amirmoradi, S., Feizi, H., Khorramdel, S., Teimouri, M., & Aghel, H. (2011). A case study of energy use and economic analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 88(1), 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
- Hamedani, S. R., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(5), 2367-2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
- Jowzi, Mehdi., Ebrahimi Pak, Niazali., & Tafteh, Arash. (2025). Determining the physical productivity of wheat water consumption in different climates of Kermanshah Province. *Water and Soil Modeling and Management*, 5(1), 159–178. (In Persian) <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14879.1445>

- Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and biomass engineering Publications*, Paris, France. <https://www.project-management-tool.eu/cigr/sites/default/files/documets/CIGRHandbookVol5.pdf>
- Lawson, M. J., & Keeling, A. A. (1999). Production and physical characteristics of composted poultry carcasses. *British Poultry Science*, 40(5), 706-708. <https://doi.org/10.1080/00071669987133>
- Louni, R., & Sharifzadeh, M. (2022). A review of water-energy-food nexus studies in Iran: Necessities, challenges, and proposed solutions. *Journal of Sustainability, Development, and Environment*, 3(11), 29-49. (In Persian) <https://www.magiran.com/p2515271>
- Ma, D., Wang, C., Feng, J., & Xu, B. (2021). Wheat grain phenolics: a review on composition, bioactivity, and influencing factors. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(15), 6167-6185. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11428>
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., & Khaledi, M. (2019). Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*, 223, 105691. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105691>
- Ministry of Agriculture Jihad. (2023). Agricultural Yearbook 1401: Field Crops (Volume I). *Publications of the Planning and Economic Deputy, Center for Statistics, Technology, and Information and Communications*, Tehran, Iran. (In Persian) <https://agrodl.ir/statistics>
- Mofakhari, S., Veisi, H., Khoshbakht, K., & Nazari, R. (2021). Assessment of sustainability in water-energy-food systems linkage in agricultural products (Case study: Dehgolan County). *Environmental Sciences*, 19(4), 278-306. (In Persian) <https://doi.org/10.52547/envs.2021.222630.1078>
- Naseri, A., & Nikanfar, R. (2019). Foresight of energy productivity in irrigated wheat production on the eastern shore of Lake Urmia. *Environmental Sciences*, 17(2), 80-101. (In Persian) <https://sid.ir/paper/117661/fa>
- Naseri, A., & Nikanfar, R. (2019). Future research on energy productivity in irrigated wheat production along the eastern shore of Urmia. *Environmental Science Quarterly*, 17(2), 81-102. (In Persian) https://envs.sbu.ac.ir/article_98063.html
- Niyazmand, Roya., Moghadamnia, Arman., Tahmasebi, Peyman., Nikmehr, Saman., & Maroufpoor, Isa. (2023). Water and energy productivity of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan plain, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Productivity*, 3(4), 116-137. (In Persian) <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>
- Ozkan, Burhan, Akcaoz, Handan & Fert, Cemal. (2004). Energy Input Output Analysis in Turkish Agriculture. *Renewable Energy*, 29, 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-)
- Salami, Hamidreza., & Rezvani, Seyed Moeinoddin. (2016). Evaluation of sprinkler irrigation systems under farmers' conditions (Isfahan and Hamedan Provinces). *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 3(23), 345-350. (In Persian) <https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>
- Salimi Sobhan, S., Mohammadreza, M., Einali, J., Javan, F., & Hashemi, M. (2018). Locating new rural settlements considering passive defense principles (Case study: Qorveh County). *Journal of Law Enforcement Geography Research*, 6(23), 135-158. (in Persian) <https://sid.ir/paper/379102/fa>
- Sheikh-Zeynaldin, Azar., & Dehghanpour, Hamed. (2022). Economic analysis of irrigation system change on water productivity in Darvazan irrigation and drainage network. *Agricultural Economics and Development*, 30(3), 267-286. (In Persian) <https://doi.org/10.30490/aead.2023.354981.1353>
- Singh, G. (2000). Energy conservation through efficient mechanized farming. *Agricultural Engineering Today*, 24(2), 35-50. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:act&volume=24&issue=2&article=003>

- Tabar, I. B., Keyhani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 849-855. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024>
- Taghinejad, J., & Vahedi, A. (2021). Modeling energy consumption patterns and sensitivity analysis of inputs in irrigated wheat production: A case study of Ardabil Province. *Agricultural Mechanization*, 6(4), 11–19. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202>
- Tahmasebi, P. (2024). Principles of Water Resources Management. *Ghulam-e-Mohaqeq Publications*, Ardabil, Iran. (In Persian) <https://civilica.com/p/502914>
- Tahmasebi, P., & Zare-Abiane, H. (2025). Comparison of energy productivity in surface and sprinkler irrigation systems in wheat and alfalfa cultivation (Case study: Downstream of Soural Reservoir Dam, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(2), 72-93. (In Persian) <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>
- Tahmasebi, Peyman., Dalvand, Fatemeh., Hoseini, Seyed Abolfazl., Karimi, Bakhtiar., & Ghadarshenas, Hirsh. (2024). Comparative study of energy efficiency in two sprinkler irrigation systems in wheat cultivation (Case study: Dehgolan plains, Kurdistan Province). *Water and Soil*, 38(6), 683–697. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439>
- Tahmasebi, Peyman., Moghadamnia, Arman., Golmohammadi Ghaneh, Pegah., Fathi, Aram., Karimi, Bakhtiar., & Ghadarshenas, Hirsh. (2025). Evaluation of energy efficiency in potato and wheat farms under sprinkler irrigation systems (Case study: Downstream of Soural Reservoir Dam, Kurdistan Province). *Scientific-Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 15(3), 19–37. (In Persian) <https://doi.org/10.22125/iwe.2025.501965.1852>
- Yousefi, M., & Mahdavi Damghani, A. (2013). Evaluation of water and energy productivity in irrigated agro-ecosystems of Kermanshah Province. *Agroecology*, 5(2), 113–121. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jag.v5i2.24462>
- Zhao, Y., Wang, Q., Jiang, S., Zhai, J., Wang, J., He, G., ... & Zhu, Y. (2020). Irrigation water and energy saving in well irrigation district from a water-energy nexus perspective. *Journal of cleaner production*, 267, 122058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122058>



Removal of heavy metals chromium, lead, and iron from water and wastewater using MnFe₂O₄ loaded on activated carbon prepared from algae: kinetic and equilibrium study

Afsoon Jarrah^{1✉}, Mehdi Vosoughi Niri² and Maryam Abedi³

1. Corresponding Author, Social Determinants of Health Research Centre, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran. E-mail: af_jarrah@yahoo.com
2. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran. E-mail: mvn_20@yahoo.com
3. Department of Chemistry, National University of Skills(NUS), Tehran, Iran. E-mail: m.abedi85@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received 06 December 2024
Received in revised form 13 April 2025
Accepted 01 July 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:

lead,
Flaminius,
MnFe₂O₄,
heavy metals,
Chromium.

Objective: This study investigated the efficiency of Flamintus algae combined with MnFe₂O₄ as a natural adsorbent for removing heavy metals from water and wastewater under laboratory conditions.

Method: The research assessed the impact of adsorbent dosage, contact time, pH levels, and varying heavy metal concentrations on adsorption efficiency. Results were analyzed using Freundlich and Langmuir isotherms, as well as pseudo-first and second-order kinetic models, with linear regression and R² parameters for validation.

Results: The findings demonstrated that increasing the adsorbent dosage to 2 grams in 50 milliliters at a concentration of 30 milligrams led to a 50% increase in removal efficiency. The adsorption capacity rose from 25 to 50% when the initial pH was raised from 2 to 12.

Conclusions: The data indicated that removal efficiency improved with longer contact times but decreased with higher initial heavy metal concentrations. The Langmuir isotherm and the pseudo-quadratic kinetic model showed better agreement with the experimental data.

Cite this article: Jarrah, A., Vosoughi Niri, M., & Abedi, M. (2026). Removal of heavy metals chromium, lead, and iron from water and wastewater using MnFe₂O₄ loaded on activated carbon prepared from algae: kinetic and equilibrium study. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 65-79. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12116.1165>



Introduction

The expansion of industrial activities, energy production, mining operations, agricultural practices, and widespread chemical usage have collectively led to a substantial rise in the concentration of toxic pollutants in the environment. Concurrently, the escalating population growth has heightened the demand for clean and accessible drinking water resources. The discharge of approximately 2 million tons of industrial and agricultural wastewater into global water bodies daily leads to various health issues and an estimated 14,000 deaths per day. The presence of pollutants, including organic compounds, harmful chemicals, dyes, pH-altering substances, heavy metals, dissolved salts and solids, and other toxins, in aquatic ecosystems poses a constant threat to human health. These effluents can severely impact the quality of water resources and the well-being of aquatic organisms. Trace quantities of heavy metals like chromium, lead, and copper, commonly present in polluted soils, can adversely impact microbes and plants. This can exacerbate iron deficiency symptoms, thereby hindering their growth. Additionally, heavy metals can bind to the sulfhydryl groups of proteins, resulting in reduced enzyme activity. Heavy metals, organic substances, and toxic pollutants can have severe consequences on living organisms. These substances readily accumulate in tissues, are resistant to biological degradation, and exhibit high toxicity. They can enter the food chain and adversely impact human health through a range of toxic effects, including toxicity, carcinogenesis, genetic alterations, cardiovascular disorders, kidney damage, and neurological impacts. Furthermore, the combination of heavy metals with sulfhydryl groups of proteins can lead to a decrease in enzyme activity, further exacerbating the harmful effects on living systems. Hence, it is crucial to adsorb and reclaim heavy metals and other contaminants before their release into the environment. Various techniques are employed to purify water and wastewater from heavy metals, pollutants, and toxins. These approaches encompass physical processes such as mixing, flocculation, sedimentation, and adsorption, as well as chemical methods including chemical addition, sedimentation, gas transfer, adsorption, and disinfection. The paper explores the use of advanced, efficient, and sustainable technologies in wastewater treatment, with a focus on the process of surface adsorption using inexpensive and readily available adsorbents as a cost-effective method for removing heavy metals from aqueous solutions. Activated carbon, characterized by its unique spatial structure, high cation exchange capacity, thermal stability, low cost, and abundant availability, has emerged as a promising adsorbent that has garnered the attention of researchers. Additionally, the study investigates the use of *Flamintus* algae, a natural adsorbent and a type of activated carbon, for the extraction of heavy metal ions from polluted water. Furthermore, the research explores the enhancement of heavy metal adsorption through the modification of activated carbon with MnFe_2O_4 magnetic nanoparticles. In this study, the researchers synthesized *Flamintus* algae- MnFe_2O_4 using a hydrothermal method and evaluated its ability to absorb Fe^{+2} , Pb^{+2} , and Cr^{+2} ions. The aim of the research is to assess the potential use of magnetic *Flamintus* algae as a natural adsorbent for the removal of these heavy metal ions.

Method

Experimental model

The present research is an experimental study that was carried out as a discontinuous system in the laboratory. The chemicals used were obtained from Merck, Germany. For discontinuous tests, usually 2 grams of modified *Flamintus* are used in 50 mL of each metal solution. Of course, to investigate the effect of the amount of adsorbent on absorption, other ratios were also used, for example, the ratio of 1 gram in 250 mL, but the optimal conditions of the experiments were carried out in a ratio of 1 to 50. Atomic absorption spectrometry (AAS) was also used to

determine the concentration of metal ions. All experiments were performed three times and the obtained average was used as the final values in the calculations of adsorption isotherms and kinetics.

Theories of attraction

Absorption experiments were carried out in a discontinuous system with 50 ml samples containing Fe^{+2} , Pb^{+2} , and Cr^{+2} with a concentration of 25 to 100 mg/liter. The adsorption process was carried out to determine the optimal pH, the effect of metal concentration, and the determination of kinetic coefficients of adsorption and isotherm constants. In each case, the adsorption capacity was obtained according to the following equation (Bagri, Hassani, Jarrah, & Parnianchi, 2024).

$$q_e = \frac{[V(C_0 - C_e)]}{m} \quad (1)$$

Where q_e is the amount of heavy metals absorbed per unit of adsorbent mass, C_0 is the primary concentration, C_e is the secondary concentration at time t , V is the solution volume, and m is the adsorbent mass. To determine the adsorption kinetic coefficients and isotherm constants for the adsorbent that had the highest removal efficiency during the tests to determine the efficiency of the adsorbent, the effect of the initial concentration of Fe^{+2} , Pb^{+2} , and Cr^{+2} on the absorption rate was investigated over 2 hours. The resulting data were analyzed using Langmuir, Freundlich, Temkin isotherm equations and first and second order synthetic equations. The constants of the reaction rate and constants of the above-mentioned different isotherms were extracted to interpret the adsorption processes, adsorption capacity, adsorption type and its energy. All test steps were repeated three times in order to reduce the error rate.

Dimensional analysis

In this research, the following kinetic models were used to investigate the absorption behavior and to know the absorption reaction rate.

Quasi-first order kinetic model

The general state of the pseudo-first-order kinetic model equation is as equation (2).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2)$$

Where q_e and q_t are the amount of metal adsorbed on the adsorbent mass m/g in the equilibrium state and at time t , respectively. By plotting $\log(q_e - q_t)$ against t , the values of $q_e(mg/g)$ and $k_1(\text{min}^{-1})$ can be obtained.

Quasi-quadratic kinetic model

The general equation of the quasi-quadratic kinetic model is as equation (3).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

Results

The findings revealed that elevating the adsorbent dosage to 2 grams per 50 milliliters at a concentration of 30 milligrams resulted in a 50% enhancement in removal efficiency. Additionally, the adsorption capacity increased from 25% to 50% as the initial pH of the solution was raised from 2 to 12. The data further suggested that the removal efficiency improved with extended contact times but declined with higher initial concentrations of heavy metals. Moreover, the Langmuir isotherm and the pseudo-quadratic kinetic model demonstrated better alignment with the experimental data.

Conclusions

In this study, Filamentous-MnFe₂O₄ was synthesized and evaluated as a novel biosorbent for the removal of Fe⁺², Pb⁺², and Cr⁺² ions. Experimental data demonstrated that the magnetic biosorbent is effective in adsorbing these heavy metal ions. The adsorption capacity was found to be influenced by the pH of the solution and the adsorption time, with the maximum adsorption capacity being obtained at pH 6.0. Kinetic studies revealed that the adsorption process follows the pseudo-quadratic model, which provided a higher and more accurate correlation coefficient compared to the first-order model. Thus, the pseudo-quadratic kinetic model is considered a suitable model to describe the adsorption kinetics. The results of the adsorption isotherm study indicated that the adsorption process follows the Langmuir isotherm. Additionally, the studies showed that the magnetic biosorbent can be easily recovered due to its magnetism and has great potential for the removal of Cu⁺² and Cd⁺² ions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical Considerations

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

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



حذف فلزات سنگین کروم، سرب، آهن از آب وپساب با استفاده از $MnFe_2O_4$ بارگذاری شده بر روی کربن فعال تهیه شده از جلبک: مطالعه سینتیک و تعادل

افسون جراح^۱، مهدی وثوقی نیری^۲، و مریم عابدی^۳

۱. نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی سلامت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران. رایانامه: af_jarrah@yahoo.com

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران. رایانامه: mvn_20@yahoo.com

۳. دانشکده شیمی، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران. رایانامه: m.abedi85@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: سرب، فلامینتوس، فریت منگنز، فلزات سنگین، کروم.</p>	<p>هدف: نگهداری آب سالم و نوشیدنی و بازیابی آب‌های آلوده و پساب‌ها یک امر مهم است که برای جلوگیری از بیماری‌ها و آسیب به محیط‌زیست ضروری است. رشد سریع جمعیت، شهرنشینی، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و مصرف مواد شیمیایی به طور قابل توجهی باعث افزایش سطح آلودگی شده است. ورود مواد آلاینده به آب و پساب و تجمع آنها در آبزیان به واسطه خطراتی که برای انسان و دیگر موجودات ایجاد می‌کند، بخش مهمی از آلودگی محیط‌زیست است. روش‌های حذف فلزات سنگین مانند جذب تبادلی، فیزیکی، شیمیایی، اسمز معکوس کارایی محدودی دارند.</p> <p>روش پژوهش: هدف از این تحقیق بررسی کارایی جلبک فلامینتوس با نام علمی <i>Spirogyra app</i> به‌عنوان یک جاذب طبیعی همراه با $MnFe_2O_4$ (نانوذرات فریت منگنز) برای حذف فلزات سنگین از آب‌وفاضلاب است. در این مطالعه، تأثیر عواملی چون دوز جاذب، زمان تماس، pH و غلظت فلزات سنگین بر کارایی جذب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، میزان انطباق داده‌ها با ایزوترم‌های فروندلیچ و لانگمویر و سینتیک‌های شبه درجه اول و دوم تحلیل شده است. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از رگرسیون خطی و پارامتر R2 انجام شده است.</p> <p>یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزایش دوز جاذب به ۲ گرم در ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت ۳۰ میلی‌گرم، راندمان حذف را ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، ظرفیت جذب با افزایش pH از ۲ به ۱۲ از ۲۵ به ۵۰ درصد افزایش یافت.</p> <p>نتیجه‌گیری: داده‌ها نشان دادند که راندمان حذف با زمان تماس طولانی‌تر افزایش و با غلظت‌های بالاتر فلزات سنگین کاهش می‌یابد. ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیک شبه درجه دوم بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان دادند.</p>

استناد: جراح، افسون؛ وثوقی نیری، مهدی؛ و عابدی، مریم. (۱۴۰۵). حذف فلزات سنگین کروم، سرب، آهن از آب وپساب با استفاده از $MnFe_2O_4$ بارگذاری شده

بر روی کربن فعال تهیه شده از جلبک: مطالعه سینتیک و تعادل. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۶ (۱)، ۶۵-۷۹.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12116.1165>



مقدمه

پیشرفت صنعت، نیروگاه‌های انرژی، صنایع معدنی، کشاورزی و مصرف مواد شیمیایی مختلف و غیره همگی در افزایش چشمگیر میزان آلاینده‌های سمی در محیط‌زیست نقش داشته‌اند. این در حالی است که باتوجه‌به رشد روزافزون جمعیت، تقاضا برای آب آشامیدنی سالم در حال افزایش است (هیوز و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ صالح و همکاران^۲، ۲۰۲۱) روزانه تقریباً ۲ میلیون تن پساب صنعتی و کشاورزی به طور مستقیم یا غیرمستقیم وارد بدنه‌های آبی جهان می‌شود که باعث بروز بیماری‌های مختلف و مرگ حدود ۱۴۰۰۰ نفر در روز می‌شود (ژائو و همکاران^۳، ۲۰۱۵) وجود آلاینده‌های مختلف در اکوسیستم‌های آبی تهدیدی دائمی برای سلامت جوامع بشری است. این پساب‌ها حاوی تعداد زیادی ترکیبات آلی، مواد شیمیایی مضر، رنگ‌ها، مواد با pH بالا یا پایین، فلزات سنگین، نمک‌های محلول، جامدات محلول، چربی‌ها و سایر سموم هستند که باعث افزایش کدورت منابع آب می‌شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند پیامدهای شدیدی بر کیفیت منابع آب و سلامت موجودات آبی داشته باشند. با افزایش سموم و املاح موجود در آب فتوستتیز کاهش یافته و رشد گیاهان تحت تأثیر قرار می‌گیرند و زندگی آبزیان و موجودات زنده به ویژه انسان در معرض خطر هستند (للیس و همکاران^۴، ۲۰۱۹؛ پالانی و همکاران^۵، ۲۰۲۱). مقادیر جزئی از فلزات سنگین نظیر کروم، سرب، مس که بطور معمول در خاک‌های آلوده وجود دارند، می‌توانند در میکروب‌ها و گیاهان نیز مضر باشند به طوری که می‌توانند علائم کمبود آهن را تشدید و در نتیجه باعث افت رشد آنها گردند (فومینا و گاد^۶، ۲۰۱۴). علاوه بر این فلزات سنگین می‌توانند با گروه‌های سولفویدریل پروتئین‌ها ترکیب شده و باعث کاهش فعالیت آنزیمی نیز گردند. همچنین فلزات سنگین، مواد آلی و سموم در بسیاری از مکان‌ها منتشر می‌شوند و به دلیل داشتن ویژگی‌هایی نظیر تجمع‌پذیری در بافتها، تجزیه‌ناپذیری، مقاومت به فعل و انفعالات بیولوژیکی و سمیت با راهیابی به زنجیره غذایی و بدن موجودات زنده، در نهایت انسان را تحت تأثیر عوارض سمیت سرطان‌زایی، اثرات ژنتیکی کوتاه مدت و بلند مدت، اختلال در سیستم قلبی و عروقی، آسیب به کلیه‌ها و تأثیر بر سیستم اعصاب قرار دهند (توپاره و وادگانکار^۷، ۲۰۲۳). کادمیوم و سرب حتی در غلظت کم سمیت شدید نشان می‌دهند به همین خاطر، امروزه آلودگی آب‌ها به فلزات سنگین، مواد آلی، سموم و غیره به یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست محیطی تبدیل شده است؛ بنابراین جذب و بازیابی فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها قبل از تخلیه به محیط‌زیست از اهمیت بسیار برخوردار است (بهبودی و شایسته، ۱۳۹۹). تصفیه آب و فاضلاب‌ها از فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها و سموم و استفاده مجدد از پساب‌های تولیدی برای مصارف مختلف نظیر کشاورزی و صنعت شامل تکنیک‌های متعددی از جمله روش‌های فیزیکی شامل فرآیندهایی مانند اختلاط، لخته‌سازی، ته‌نشینی و جذب سطحی و روش‌های شیمیایی شامل افزودن مواد شیمیایی، رسوب‌گذاری، انتقال گاز، جذب سطحی و گندزدایی می‌باشند (وانگ و همکاران^۸، ۲۰۲۴). جدیدترین روش‌های تصفیه فاضلاب شامل استفاده از فناوری‌های پیشرفته، کارآمد و پایدار است که تلاش دارند تأثیر زیست محیطی را کاهش دهند و بازدهی را افزایش دهند. فرایند جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های ارزان و با سهولت دسترسی یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی به شمار می‌رود. عملکرد جذب سطحی به طور مستقیم به کیفیت و هزینه اثربخشی جاذب وابسته است، در این میان، کربن فعال با ساختار ویژه فضایی، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، حفظ ساختار در دمای بالا، قیمت پایین و توزیع فراوان، به‌عنوان یک جاذب ارزان‌تر مورد توجه محققان قرار گرفته است (ایران نژاد و همکاران، ۱۳۹۸). فریت منگنز ($MnFe_2O_4$)، یک اسپینل مکعبی، ماده مغناطیسی قابل توجه به دلیل مزایای مغناطیسی اشباع مناسب، پایداری شیمیایی خوب و سختی مکانیکی است. در این مطالعه،

¹ Hughes et al

² Saleh et al

³ Zhao et al

⁴ Lellis et al

⁵ Palani et al

⁶ Fomina & Gadd

⁷ Topare & Wadgaonkar

⁸ Wang et al

جلبک فلامینتوس/فریت منگنز با یک روش هیدروترمال سنتز شده و این ماده برای جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} همراه با طیف‌سنجی جذب اتمی^۱ اعمال گردید. پارامترهای تجربی مختلف موثر بر ظرفیت جذب مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مطالعه، توسعه استفاده بالقوه از جلبک فلامینتوس مغناطیسی موجود به‌عنوان یک جاذب طبیعی در حذف Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} است. همچنین سینتیک جذب به‌منظور توسعه یک مدل که نمایانگر رفتار جاذب بوده، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، مطالعات سینتیکی برای یافتن مدل سینتیکی که رفتار جذب فلزات سنگین بر روی جلبک فلامینتوس مغناطیسی را توصیف کند، انجام شد.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

غنیمی سعیده^۲ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش انجام شده با روش جذب سطحی فلزات سنگین به کاربرد خاک رس اصلاح شده و بدون اصلاح در جذب آلاینده‌های معدنی در آب پرداختند از جمله: کادمیوم، کبالت و مس. آزمایش‌های جذب تحت شرایط مختلف، یعنی pH، زمان تماس، غلظت اولیه و دما انجام شد. مقایسه جذب این سه فلز بر روی خاک رس اصلاح شده و طبیعی نشان داد که خاک رس اصلاح شده تمایل جذب بالاتری برای فلزات نسبت به رس‌های طبیعی دارد. نتایج تجربی نشان داد که خاک رس اصلاح شده، خواص بهتری در جذب Cd^{2+} , Co^{+2} و Cu^{+2} نسبت به خاک‌های طبیعی نشان می‌دهند که آنها را به جاذب فلزات قابل بازیافت تبدیل می‌کند.

راشا احمد و همکارانش^۳ (۲۰۲۴) پژوهشی را برای طراحی یک واحد تصفیه بیولوژیکی با استفاده از بقایای کشاورزی (پوسته برنج، برگ آلو، پوست موز و پوست لوبیاسبز) به‌عنوان جاذب زیستی مبتنی بر ضایعات جامد کشاورزی برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی در مصر انجام دادند. در این تحقیق، نمونه اولیه واحدهای تصفیه جریان پیوسته برای تصفیه فاضلاب صنعتی انواع فلزات سنگین موجود در منطقه صنعتی ساخته شد. یافته‌های سیستم جریان پیوسته نشان داد که راندمان حذف کروم بین ۹۶٪ تا ۹۹.۵٪ و پس از آن سرب با راندمان بین ۸۶.۷۹٪ تا ۹۵.۹٪ قرار گرفت. کمترین راندمان حذف در زمان ماند ۱۵ دقیقه مشاهده شد، درحالی‌که بالاترین راندمان‌ها در زمان ماند ۴۵ دقیقه ثبت شد. نتایج سیستم جریان پیوسته نشان داد که سطوح سرب بین ۰.۰۴۲ و ۰.۰۴۱ میلی‌گرم در لیتر با راندمان حذف بین ۹۷.۸۹٪ تا ۹۷.۹۴٪ متغیر بود. درحالی‌که سطوح کادمیوم به ۰.۰۰۲ میلی‌گرم در لیتر با راندمان ۹۹.۴۲٪ رسید و سطوح کروم به ترتیب ۰.۰۰۳ و ۰.۰۰۲ میلی‌گرم در لیتر با راندمان بین ۹۸.۹٪ تا ۹۹.۳۳٪ ثبت شد. مشخص شد که سطوح تمام فلزات سنگین پس از تصفیه پایین‌تر از استانداردهای موردنیاز سازمان‌های بین‌المللی است که از نتایج تحقیقات برای کاربرد واحد تصفیه در بسیاری از صنایع پشتیبانی می‌کند.

شیوا لو^۴ و همکاران (۲۰۲۴) پژوهشی را انجام دادند که نشان داد آبرکاری نقش مهمی در جنبه‌های مختلف تولید صنعتی دارد، اما فاضلاب آن حاوی تعداد زیادی یون فلزات سنگین است. بازیافت فلزات از پساب به یک موضوع ضروری تبدیل شده است که به یک راه حل کارآمد نیاز دارد. در این تحقیق، یک الکتروکاتالیست پایدار برای بازیافت و تصفیه فاضلاب بررسی شده است. با استفاده از فاضلاب آبرکاری مس با غلظت بالا (۵۳۳۰ میلی‌گرم در لیتر) ۹۱.۱٪ مس با فرایند الکترولیز و استفاده از یک الکتروکاتالیست سرب بازیابی شده است. استفاده از الکتروکاتالیست جهت بازیافت فلزات سنگین از فاضلاب به‌عنوان روشی جدید، سازگار با محیط‌زیست و پایدار است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و کارآمد است.

¹AAS

² S. Mnasri-Ghnimi

³ Rasha S. Ahmed

⁴Shihua Liu

روش پژوهش

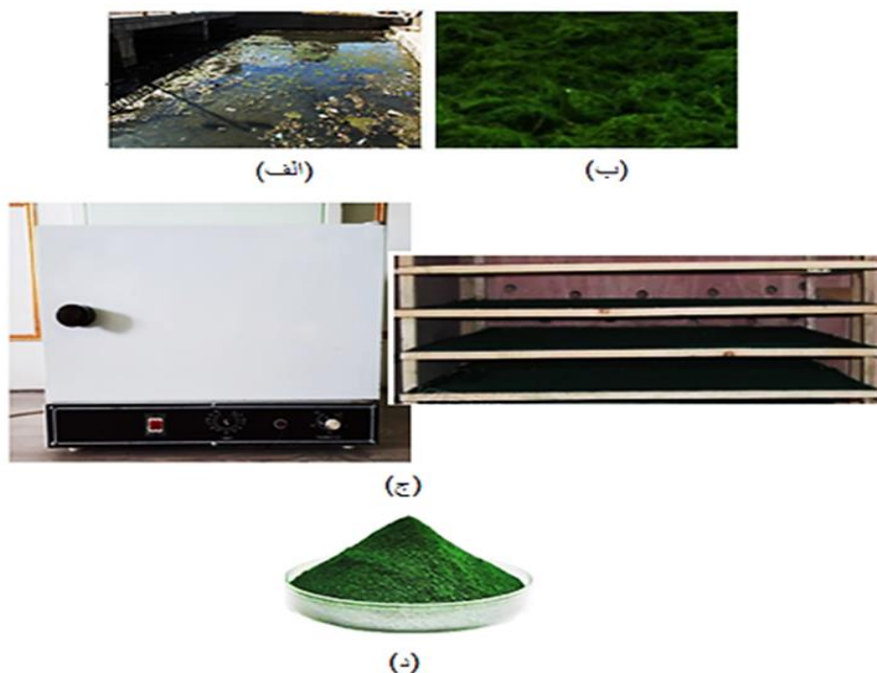
۱. روش کار

تحقیق حاضر یک مطالعه تجربی است که به صورت سیستم ناپیوسته در آزمایشگاه انجام گرفت. مواد شیمیایی مورد استفاده از قبیل سولفوریک اسید، هیدروکلریک اسید، سدیم هیدروکسید، سدیم کلرید، سدیم سولفات، سدیم کربنات، سدیم نیترات، سرب نیترات، کروم کلرید و آهن (III) نیترات ۹ آبه از شرکت مرک تهیه شده‌اند. برای تهیه محلول هر یک از فلزات ابتدا یک محلول مادر ۱۰۰۰ ppm از هر یک از آن‌ها تهیه کرده و سپس برای آزمایش به میزان لازم از آن رقیق سازی گردید. تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق دارای خلوص آزمایشگاهی بودند (خلوص بالای ۹۸٪).



شکل ۱. نقشه ایران و محل و موقعیت استان اردبیل و رودخانه و مختصات نقاط برداشت شده جلبک‌های رشته‌ای فیلامنتوس

سپس جلبک‌ها ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. در نهایت جلبک‌ها توسط میکسر پودر شدند و با استفاده از الک‌های استاندارد با اندازه ۳۰ مش الک شده و در ظرفی مخصوص به دور از رطوبت نگهداری گردید.



شکل ۲. مراحل جمع آوری، خشک و پودر کردن جلبک فلایمیتوس (الف) رودخانه اردبیل جهت جمع آوری جلبک، (ب) خشک کردن در معرض هوای آزاد، (ج) خشک کردن در آون در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و (د) پودر جلبک

۲. مطالعات جذب ناپیوسته

برای آزمایش‌های ناپیوسته معمولاً از ۲ گرم فلامینتوس اصلاح شده در ۵۰ میلی لیتر از محلول هر فلز استفاده می‌شود. البته برای بررسی تأثیر میزان جاذب بر جذب، از نسبت‌های دیگر مثلاً نسبت ۱ گرم در ۲۵۰ میلی لیتر نیز استفاده شد، ولی شرایط بهینه آزمایش‌ها در نسبت ۱ به ۵۰ انجام شد. همچنین از دستگاه جذب اتمی برای تعیین غلظت یون فلزات استفاده گردید. کلیه آزمایش‌ها سه بار انجام شده و میانگین به دست آمده به عنوان مقادیر نهایی در محاسبات جذب ایزوترم ها و سینتیک به کار رفته‌اند.

۳. اصلاح شیمیایی جلبک‌های رشته‌ای فیلامنتوس با فریت منگنز

ابتدا کربن فعال تهیه شده از جلبک رشته‌ای فلامینتوس با استفاده از اتیلن گلیکول به عنوان حلال، با نانوذرات فریت منگنز ترکیب شد تا یک کربن فعال مغناطیسی ایجاد شود. در این فرایند، ۳ گرم کربن فعال در ۶۰ میلی لیتر اتیلن گلیکول ریخته شد و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس، ۲۰۱ گرم $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ و ۰۴۹ گرم $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ به این سوسپانسیون اضافه شدند و مخلوط به مدت ۶۰ دقیقه به شدت هم زده شد. مخلوط حاصل در یک اتوکلاو فولاد ضدزنگ ریخته شد و به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. پس از خنک شدن در دمای اتاق، محصول چندین بار با آب دیونیزه و اتانول شسته شد و در نهایت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ ساعت خشک شد. این فرایند منجر به تولید کربن فعال مغناطیسی با نانوذرات $MnFe_2O_4$ شد (دنگ و همکاران^۱، ۲۰۰۵).

۴. ایزوترم خطی

ساده‌ترین شکل از معادله بین q و C_e به صورت معادله ۲ نوشته می‌شود.

$$q = a + b(C_{eq}) \quad (1)$$

که در آن، q ، جرم ماده جذب شده به ازای واحد جرم ماده جاذب (g/mg) و C_{eq} غلظت تعادلی ماده جذب شونده در محلول بعد از برقراری تعادل (mg/L) است. در این حالت شیب خط برابر b و a عرض از مبدأ است. بسیاری از جاذب‌ها ایزوترم خطی را در غلظت‌های پایین نشان می‌دهند.

۵. مدل‌های سینتیکی جذب

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار جذب و آگاهی از نرخ واکنش جذب از مدل‌های سینتیکی ذیل استفاده شد.

۶. مدل سینتیکی شبه درجه اول

حالت کلی معادله مدل سینتیکی شبه درجه اول به صورت معادله ۲ است (کوربت^۲، ۱۹۷۲؛ و ایران نژاد و همکاران، ۱۳۹۸)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2)$$

که آن q_e و q_t مقدار فلز جذب شده بر جرم جاذب m/g به ترتیب در حالت تعادل و در زمان t است. با ترسیم $\log(q_e - q_t)$ در مقابل t مقدار q_e (mg/g) و k_1 (min^{-1}) ثابت معادله می‌تواند به دست آید.

۷. مدل سینتیکی شبه درجه دوم

معادله کلی مدل سینتیکی شبه درجه دوم به صورت معادله ۴ است (گوپتا، کوشواها، و چاتوپادیا^۳، ۲۰۱۲)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

ثابت‌ها می‌تواند با رسم t/q_t در مقابل t مشخص شود. ثوابت این معادله می‌تواند از شیب خط حاصله و عرض از مبدأ تعیین شود.

¹ Deng et al

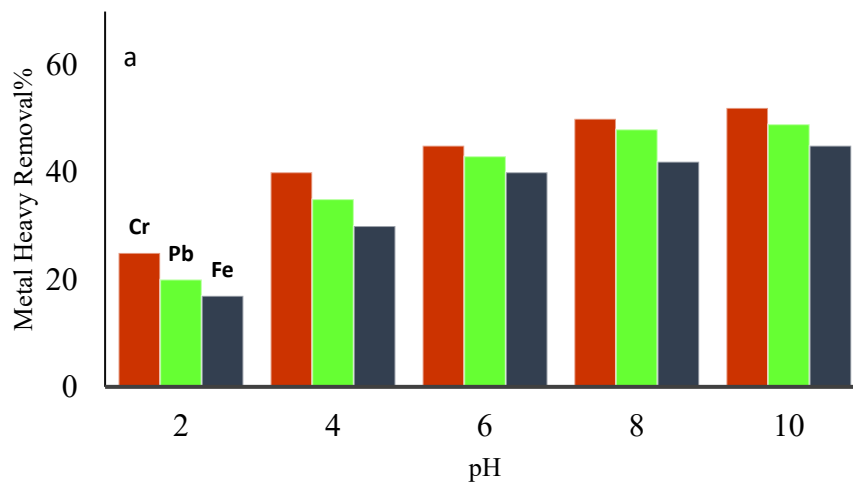
² Corbett

³ Gupta, Kushwaha, & Chattopadhyaya

یافته‌های پژوهش

۱. تأثیر pH بر روی جذب فلزات سنگین

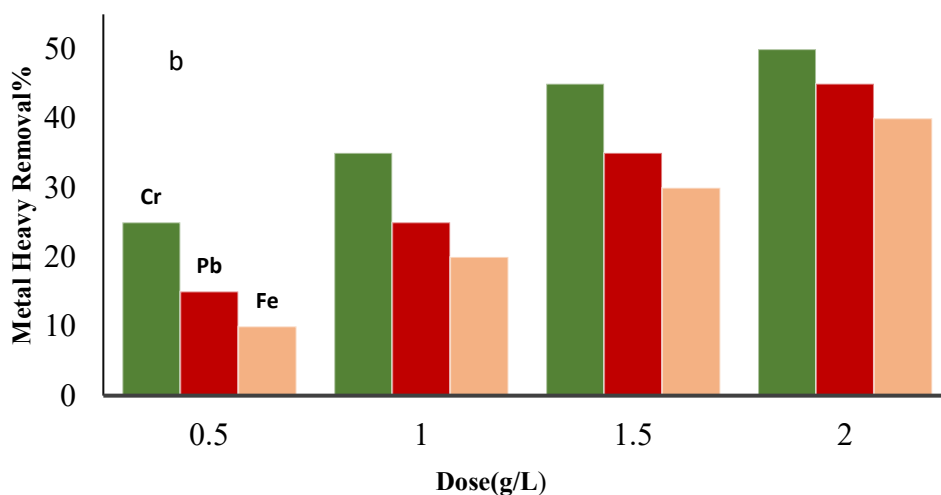
اثر غلظت یون هیدروژن بر روی جذب فلزات سنگین توسط بیو جاذب مغناطیسی شده با فریت منگنز در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان گونه که مشخص است در مورد جذب فلزات سنگین توسط بیوجاذب‌های اصلاح شده با نانوذرات مغناطیسی، راندمان جذب در pH اسیدی پایین‌تر است و با افزایش pH، درصد جذب فلزات سنگین افزایش می‌یابد، به طوری که با تغییر pH از ۲ به ۱۰، جذب فلزات سنگین به ترتیب از ۲۵ به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱. اثر pH بر راندمان جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} (زمان فرایند ۶۰ دقیقه، غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر، دوز جاذب ۲ گرم)

۲. اثر دوز جاذب

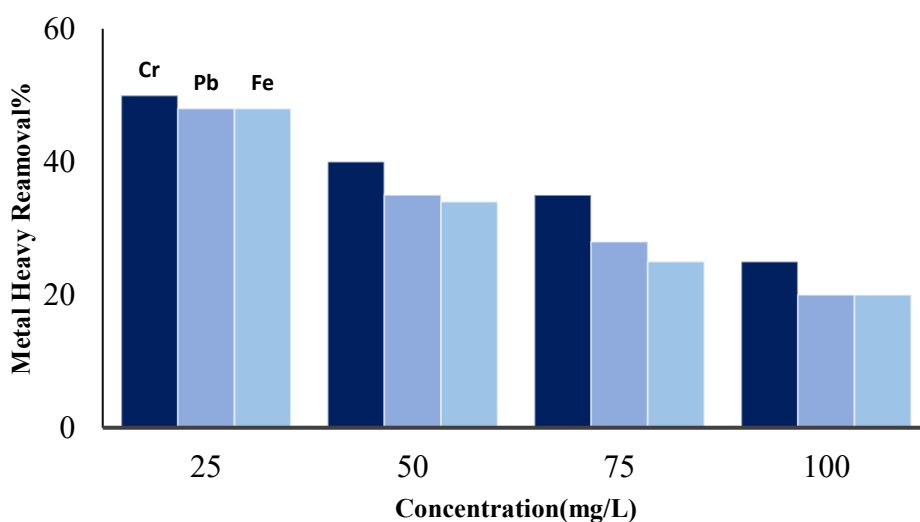
در خصوص تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب فلزات سنگین، نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که بر اساس شکل ۲، درصد جذب فلزات سنگین با افزایش مقدار جاذب از ۰/۵ گرم به ۲ گرم، از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد ارتقا یافته است. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش جاذب، کارایی فرایند جذب را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.



شکل ۲. اثر دوز جاذب بر راندمان جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} (زمان فرایند ۶۰ دقیقه، غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر، دوز جاذب ۲ گرم)

۳. اثر غلظت اولیه

شکل ۳ اثر غلظت اولیه فلزات سنگین بر راندمان جذب در طول زمان را نمایش می‌دهند. همان گونه که مشخص است ظرفیت تعادلی جذب بیوجاذب مغناطیسی برای جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} با افزایش غلظت اولیه افزایش می‌یابد. در حقیقت هر چه محلول از لحاظ تعداد یون‌ها غلیظ‌تر باشد جذب کاهش می‌یابد. به نحوی که از غلظت ۲۵ به غلظت ۱۰۰ میزان جذب از ۵۰ به ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده زمان ۶۰ دقیقه به‌عنوان زمان تعادل واکنش جذب مد نظر قرار گرفت.



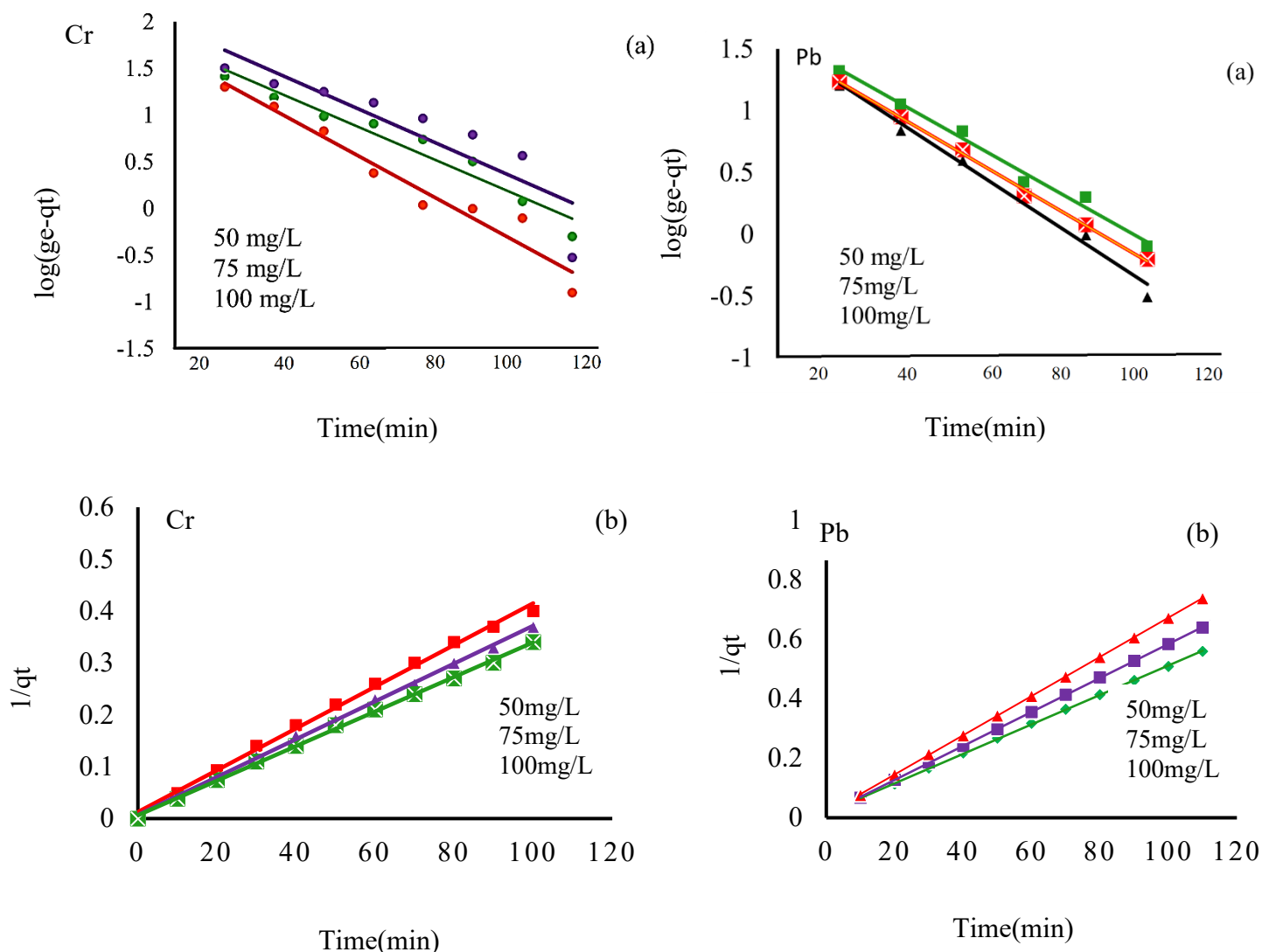
شکل ۳. اثر غلظت‌های مختلف بر راندمان جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} (زمان فرایند ۶۰ دقیقه، غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر، دوز جاذب ۲ گرم)

۴. بررسی مدل های سینتیکی

شکل های ۴ به ترتیب نمودار مدل های سینتیکی شبه درجه اول و دوم را نشان می دهند. جدول ۱ ضریب همبستگی R^2 مربوط به انواع مدل های سینتیکی جذب فلزات سنگین را بر روی بیوجاذب اصلاحی ارائه می کند. باتوجه به جدول ۱، ضریب همبستگی سینتیک جذب فلزات مورد مطالعه نشان می دهد که مدل شبه درجه دوم توصیف بهتری از داده ها ارائه می کند. با مقایسه رابطه و معادله رگرسیون به دست آمده از مدل جذب شبه درجه دوم که دارای ضریب همبستگی بالاتری است، می توان میزان جذب تعادلی (qe) و ثابت نرخ جذب مدل شبه درجه دوم را بر اساس معادله خطی حاصل از خط رگرسیون محاسبه کرد.

جدول ۱. پارامترهای سینتیکی جذب برای فلزات مورد مطالعه بر روی بیوجاذب- فریت منگنز

یون فلز	مدل شبه درجه اول				مدل شبه درجه دوم		
	qe, exp (mg g ⁻¹)	qe, cal (mg g ⁻¹)	K ₁	R ₁ ²	qe, cal (mg/g)	K ₂	R ₂ ²
Cu ⁺²	۸۰	۷۶/۲۵۹	۰/۰۴۴	۰/۹۷۱	۸۹/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۹
Pb ⁺²	۷۷	۶۵/۴۳	۰/۰۳۷	۰/۹۱۲	۷۹/۷۴	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۹
Fe ⁺²	۷۴	۵۰/۰۲	۰/۰۴۲	۰/۹۵۸	۸۵/۶۷	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۹



شکل ۴. مدل سینتیکی شبه درجه اول و شبه درجه دوم جهت جذب فلزات مورد مطالعه بر روی بیوجاذب- فریت منگنز

در مدل سینتیک شبه درجه دوم مقادیر q_e محاسباتی به واقعیت نزدیک تر است؛ بنابراین این مدل به عنوان یک مدل مناسب برای تشریح سینتیک جذب در نظر گرفته می شود (ایران نژاد و حقیقی، ۱۳۹۶). در جدول ۲ میزان جذب فلزات توسط فلامینتوس و فلامینتوس اصلاحی مقایسه شده است. با توجه به متغیر بودن شرایط و وجود پارامترهای متعدد در میزان جذب، تلاش شده است تا شرایط بهینه برای جذب هر فلز در نظر گرفته شود. میزان جذب فلزات در مورد فلامینتوس طبیعی با استفاده از آزمایش های مختلف به دست آمده است. جدول ۲ به عنوان یک فاکتور مقایسه ای برای جذب فلزات مورد مطالعه در این تحقیق ارائه شده است، اگرچه مقایسه آنها با برخی مشکلات همراه است. با این حال، با توجه به آزمایش های متنوع و بررسی پارامترهای مؤثر بر جذب به طور کامل مشخص شد که فلامینتوس اصلاحی به مراتب بیشتر و بهتر از فلامینتوس طبیعی فلزات مورد مطالعه را جذب می کند.

جدول ۲. مقایسه حذف یون های فلزات سنگین مورد مطالعه بر روی بیوجاذب مغناطیسی و طبیعی در شرایط بهینه آن ها

یون مورد نظر	میزان جذب (mg g ⁻¹)	شرایط آزمایش				
		فلامینتوس طبیعی	pH	دوز فلامینتوس گرم بر لیتر	دما درجه سانتیگراد	زمان دقیقه
-	فلامینتوس - فریت منگنز					
Cr ²⁺	۵۰	۳۰	۶	۲	۲۵	۶۰
Pb ²⁺	۴۸	۲۵	۶	۲	۲۵	۶۰
Fe ⁺²	۴۸	۲۰	۶	۲	۲۵	۶۰

۵. بررسی ایزوترم فرایند

این مدل ها به عنوان ویژگی های جذب و داده های تعادلی شناخته می شوند و توصیف کیفیت واکنش هایی را که بین واکنش آلاینده ها و جاذب رخ می دهد، بر عهده دارند. این مدل ها به طور موثر در بهینه سازی استفاده از جاذب مورد بررسی قرار می گیرند. در مطالعه حاضر، از مدل های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ برای بررسی رفتار جذب فلزات بر روی بیوجاذب مغناطیسی استفاده شد. فرضیه های ارائه شده توسط مدل لانگمویر، مبتنی بر جذب تک لایه یکنواختی سطح و حذف اثرات متقابل مولکول های جاذب است. معادله مربوط به مدل لانگمویر، فرایند جذب تک لایه را در معادله ۴ تشریح می کند. مدل فروندلیچ فرایند جذب را با استفاده از معادله ۵ تعریف می کند. رابطه لانگمویر زمانی که مکان های جذب یکنواخت باشند، با آزمایش های تجربی سازگار است. اگر سطح ناهمگن باشد، رابطه فروندلیچ که با کمی کردن میزان جذب مواد در فشارهای مختلف به دست در $\log q_e$ به ترتیب بر اساس شیب و برش نمودار خطی K_f و n می آید، توصیف بهتری از داده ها ارائه می دهد. تعیین مقادیر انجام می شود. $\log C_e$ مقابل

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_b} + \frac{C_e}{Q} (\%) \quad (4)$$

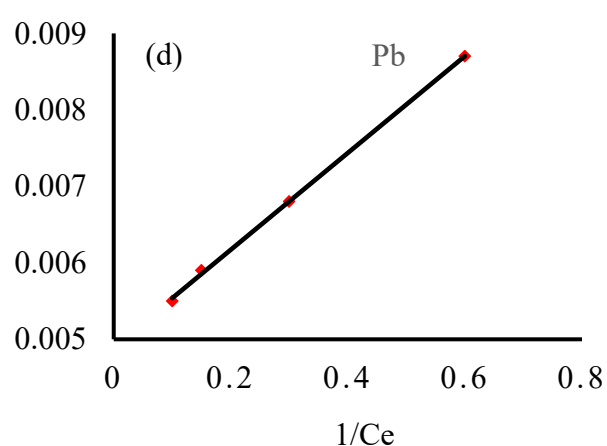
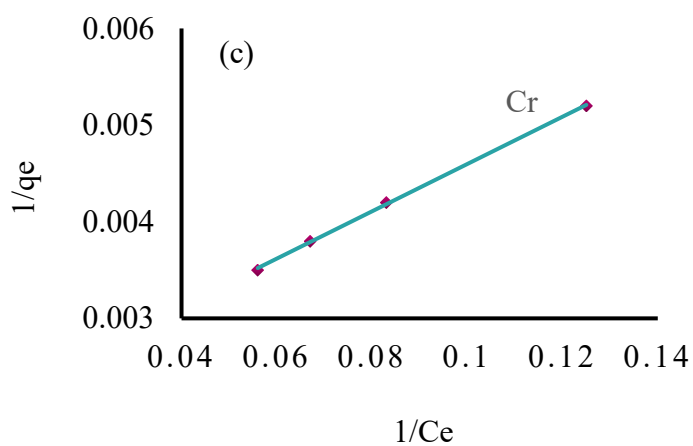
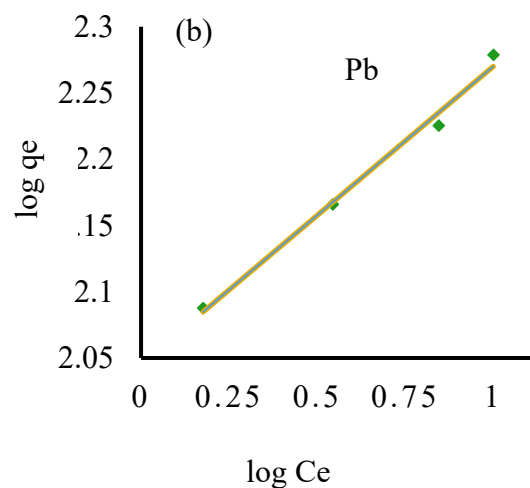
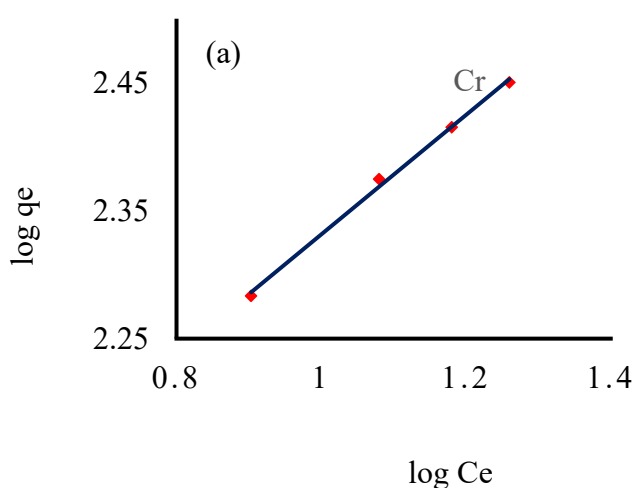
$$\log (q_e) = \log (K_f) + \frac{1}{n} \log (C_e) \quad (5)$$

غلظت تعادلی فلزات در C_e (mg/l) مقدار فلزات جذب شده در هر گرم جاذب و q_e (mg/g) در معادلات ارائه شده در بالا، مربوط به انرژی همبستگی جذب b مربوط به حداکثر ظرفیت جذب و Q پارامترهای لانگمویر هستند. b و Q حالت تعادل است. ثابت n و K_f است mg/g نشان دهنده ظرفیت جذب در زمان تعادل (q_e) و mg/L است. برای نشان دادن غلظت تعادل (جذب فروندلیچ هستند. اینها با ظرفیت و شدت جذب مطابقت دارند. یکی از ویژگی های معادله لانگمویر پارامتر بدون بعد ضریب نوع $R_L = 1$ نوع جذب نامطلوب باشد، $R_L > 1$ است. این برای تعریف نوع فرایند جذب استفاده می شود. اگر R_L جداسازی در معادله $R_L \leq 0$ جذب غیر قابل برگشت است. معادله ضریب جداسازی $R_L = 0$ جذب بهینه، و $R_L > 0$ جذب خطی، ارائه شده است.

$$R_L = \frac{1}{1+b_c} \quad (6)$$

جدول ۳. مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ برای جذب فلزات روی بیوجاذب

لانگمویر			فروندلیچ				
یون‌ها	q_m (mg/g)	K_1 (mg/L)	R^2	R_L	K_f (mg/L)	n	R^2
Cr^{2+}	۱۴۳/۹۰	۰/۱۲	۰/۹۹۹	۰/۰۳۴	۸۵/۲۶	۳/۴۵	۰/۹۹۱۹
Pb^{2+}	۱۵۰/۵۴	۰/۰۲۳	۰/۹۹۹	۰/۱۶	۵۳/۲۱	۱/۱۴	۰/۹۹۲۸



شکل ۵. فروندلیچ (a,b) و لانگمویر (c,d). ایزوترم برای جذب فلزات روی بیوجاذب مغناطیسی

بحث

امروزه پیشرفت صنعت، نیروگاه‌های انرژی، صنایع استخراج معادن، کشاورزی و مصرف مواد شیمیایی گوناگون دست‌به‌دست هم داده‌اند تا میزان آلاینده‌های سمی در محیط را به میزان فراوانی افزایش دهند. این در حالی است که به دلیل افزایش جمعیت، تقاضا برای آب آشامیدنی روبه‌افزایش است. ورود مواد آلاینده به آب و پساب و تجمع آنها در آبریان به واسطه خطراتی که برای انسان و دیگر موجودات ایجاد می‌کند، بخش مهمی از آلودگی محیط‌زیست را شامل می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی کارایی جلبک فلامینتوس به‌عنوان جاذب طبیعی با $MnFe_2O_4$ مغناطیس شده است که برای حذف فلزات سنگین Pb , Cr , Fe از آب‌وفاصلاب در نظر گرفته شده است. این مطالعه در شرایط آزمایشگاهی برای ارزیابی اثربخشی این روش جذب انجام شد. تأثیر دوز جاذب، زمان تماس، pH و غلظت‌های مختلف فلزات سنگین سرب، کروم و آهن بر کارایی فرایند جذب فلز مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت میزان مطابقت داده‌ها با ایزوترم‌های فروند لیچ و لانگمویر و همچنین سینتیک‌های شبه درجه اول و شبه درجه دوم تعیین گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از رگرسیون خطی و پارامتر R^2 استفاده شد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، فلامینتوس -فریت منگنز^۱ سنتز شد و به‌عنوان یک بیو جاذب جدید برای جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} بررسی شد. داده‌های تجربی نشان داد که بیو جاذب مغناطیسی برای جذب Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+2} کارآمد است. ظرفیت جذب تحت تأثیر pH محلول و زمان جذب قرار گرفت که نشان می‌دهد حداکثر ظرفیت جذب در $pH=6.0$ به دست آمد. مطالعات سینتیک نشان داد که فرایند جذب از مدل شبه درجه دوم پیروی می‌کند. همچنین ضریب همبستگی بالاتر و دقیق‌تری را نسبت به نوع اول ارائه می‌دهد. بنابراین مدل سینتیک شبه درجه دوم به‌عنوان یک مدل برای تشریح سینتیک جذب در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه ایزوترم جذب نشان داد که فرایند جذب از ایزوترم لانگمویر تبعیت می‌کند. علاوه بر این، مطالعات نشان داد که بیو جاذب مغناطیسی به دلیل مغناطیسی بودن به راحتی بازیافت می‌شود و پتانسیل زیادی برای حذف Cu^{+2} , Cd^{+2} , Fe^{+2} در عمل دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد.

¹ $MnFe_2O_4$

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک در قالب پژوهانه رساله دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ایران نژاد، مهدی، سلیمانپور، مهرداد، و کامران حقیقی، حسین. (۱۳۹۸). مطالعات جذب و سینتیک حذف فلزات سنگین توسط زئولیت فعال شده با دی اکسید منگنز. نشریه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، ۱۳(۱)، ۱-۱۱. <https://sid.ir/paper/172671/fa>
- شایسته، کیوان، و بهبودی، گیتی. (۱۳۹۹). روش‌های حذف فلزات سنگین از محیط آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری. مجله پژوهش در بهداشت محیط، ۶(۲)، ۱۶۰-۱۴۵. <https://doi.org/10.22038/jreh.2020.46594.1352>

References

- Irannejad, M., Soleimanpour, M., & Kamran Haghghi, H. (2019). Studies on the adsorption and kinetics of heavy metal removal by zeolite activated with manganese dioxide. *Modern Processes in Materials Engineering*, 13(1), 1-11. (In Persian) <https://sid.ir/paper/172671/fa>
- Scanlon, B., Keese, K., Flint, A., Flint, L., Gaye, C., Edmunds, W., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrol. Process*, 20(15), 3335–3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>
- Bagri, F., Hassani, A., Jarrah, A., & Parnianchi, F. (2024). Highly effective elimination of tetracycline and ciprofloxacin antibiotics from synthetic wastewater by novel magnetic P2W18O62/MIL-101 (Fe)/NiFe2O4 nanocomposite. *Separation and Purification Technology*, 329, 125128. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125128>
- Behbudi, G., & Shayesteh, K. (2020). Heavy Metal Removal Methods from Water and Wastewater: A Review Study. 2, 145-160. (In Persian) https://jreh.mums.ac.ir/article_16647.html
- Corbett, J. F. (1972). Pseudo first-order kinetics. *Journal of Chemical Education*, 49(10), 663 . <https://doi.org/10.1021/ed049p663>
- Deng, H., Li, X., Peng, Q., Wang, X., Chen, J., & Li, Y. (2005). Monodisperse magnetic single-crystal ferrite microspheres. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(18), 2782-2785 . <https://doi.org/10.1002/ange.200462551>
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3-14 . <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Gupta, N., Kushwaha, A. K., & Chattopadhyaya, M. (2012). Adsorptive removal of Pb²⁺, Co²⁺ and Ni²⁺ by hydroxyapatite/chitosan composite from aqueous solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(1), 125-131 . <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.07.009>
- Hughes, J., Cowper-Heays, K., Oleson, E., Bell, R., & Stroombergen, A. (2021). Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management*, 31, 100262 . <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100262>
- Irannejad, M., & Haghghi, H. K. (2017). Removal of Co²⁺, Ni²⁺, and Pb²⁺ by manganese oxide-coated zeolite: equilibrium, thermodynamics, and kinetics studies. *Clays and Clay Minerals*, 65(1), 52-62 . <https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.064049>
- Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275-290 . <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>
- Palani, G., Arputhalatha, A., Kannan, K., Lakkaboyana, S. K., Hanafiah, M. M., Kumar, V., & Marella, R. K. (2021). Current trends in the application of nanomaterials for the removal of pollutants from industrial wastewater treatment—a review. *Molecules*, 26(9), 2799 . <https://doi.org/10.3390/molecules26092799>
- Saleh, T., Mustaqem, M., & Khaled, M. (2021). Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review .*Environ Nanotechnol Monit Manage* 17,100617. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>
- Topare, N. S., & Wadgaonkar, V. S. (2023). A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 77, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.450>

- Wang, Y., Cao, J., Biswas, A., Fang, W., & Chen, L. (2024). Acid mine wastewater treatment: A scientometrics review. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104713 . <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104713>
- Zhao, F., Zou, Y., Lv, X., Liang, H., Jia, Q., & Ning, W. (2015). Synthesis of CoFe₂O₄-zeolite materials and application to the adsorption of gallium and indium. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60(5), 1338-1344. <https://doi.org/10.1021/je501039u>



Improving the accuracy of the Trimmer equation for estimating wind drift and evaporation losses in Sprinkler irrigation systems based on Frost and Schwalen's nomograph

Younes Aminpour ¹, Darya Dehghan ², Enrique Playán ³, and Eisa Maroufpoor ⁴

1. Department of Hydraulic, Hydro-Environmental Engineering, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: Y.aminpour@wri.ac.ir
2. Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: Darya.dehghan@ut.ac.ir
3. Department of Soil and Water, Estación Experimental de Aula Dei, EEAD-CSIC, Avda. Montañana, 1005. 50059 Zaragoza, Spain. E-mail: Enrique.playan@csic.es
4. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: E.maroufpoor@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 05 June 2025
Received in revised form 26 August 2025
Accepted 01 November 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:

Sprinkler irrigation,
wind drift,
evaporation losses,
application efficiency,
Frost and Schwalen.

ABSTRACT

Objective: In Iran for estimating wind drift and evaporation losses (WDEL) in sprinkler irrigation systems is the Frost and Schwalen chart. However, applying this chart is somewhat complex and time-consuming. Trimmer conducted extensive analyses on this chart, which led to the derivation of an empirical equation for estimating WDEL. The certain ranges of influencing factors, due to increased error, its use is not recommended, or the constant coefficients of the equation vary under different conditions. The aim of this study is to refine the aforementioned equation.

Method: To refine the equation, the Frost and Schwalen chart was digitized, and a total of 6,501 data series comprising relative humidity, ambient temperature, vapor pressure deficit, nozzle diameter, sprinkler operating pressure, wind speed, and wind drift and evaporation losses were extracted from the chart. Of the entire dataset, 70% was randomly allocated for training and the remaining 30% was used to validate the modified equation. Statistical indicators including relative error, absolute mean relative error (AMRE), and the 25% prediction level ($P_{0.25}$, the percentage of estimated dependent variable values with less than 25% deviation from the measured values) were used to evaluate the accuracy and reliability of the equations.

Results: The AMRE of the estimates was approximately 25%, indicating weak performance in estimation of WDEL. Additionally, based on the $P_{0.25}$ index, around 40% of the Trimmer equation's estimates had errors exceeding 25%. However, the accuracy and reliability of the modified equation, based on the 30% validation data, showed a significant improvement: the AMRE decreased to 4.96%, and nearly 100% of the estimates had errors less than 25%. Furthermore, unlike the fluctuating error trend of the Trimmer equation in specific ranges of nozzle diameter and operating pressure, the error variation in the modified equation followed a uniform trend.

Conclusions: When using the Frost and Schwalen chart to estimate wind drift and evaporation losses in sprinkler irrigation systems, it is recommended to either use the chart directly or apply the proposed refined equation.

Cite this article: Aminpour, Y., Dehghan, D., Playán, E., & Maroufpoor, E. (2026). Improving the accuracy of the Trimmer equation for estimating wind drift and evaporation losses in Sprinkler irrigation systems based on Frost and Schwalen's nomograph. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 80-101. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12276.1172>



Introduction

One of the most comprehensive approaches employed both internationally and within Iran for estimating wind drift and evaporation losses (WDEL) in sprinkler irrigation systems is the application of the Frost and Schwalen nomograph (1955). This nomograph, derived from the results of more than 700 experiments, incorporates five key variables influencing WDEL. Despite its robustness, the chart's application is somewhat complex and time-consuming. In 1987, Trimmer conducted extensive analyses of the chart, resulting in the derivation of an empirical equation designed to estimate WDEL more efficiently. The key advantage of this equation lies in its ease of application and compatibility with computer-based simulations. However, the use of Trimmer's equation requires careful consideration; within certain ranges of the influencing factors, the margin of error increases significantly, making the equation unreliable. Furthermore, under specific conditions, the constants used in the equation vary. Despite these limitations, Trimmer's equation is currently used in the design of sprinkler irrigation systems without accounting for the aforementioned considerations. The primary objective of this study is to enhance the accuracy and reliability of Trimmer's equation by incorporating refinements based on the Frost and Schwalen chart. Specifically, by adjusting the constant coefficients in Trimmer's formulation, this research aims not only to improve its precision but also to enable its application across the entire range of influencing variables presented in the Frost and Schwalen chart.

Method

The parameters required in the Frost and Schwalen nomograph include ambient temperature, relative humidity, wind speed, sprinkler pressure, and nozzle diameter. The ranges of variation for these parameters are as follows: relative humidity: 0 to 100%; ambient temperature: 30 to 110°F (equivalent to -1.1 to 43.3°C); Nozzle diameter: 8.64 to 64.64 inches (equivalent to 3.2 to 25.4 mm); Operating pressure of the sprinkler: 20 to 80 psi (equivalent to 137.9 to 551.6 kPa); Wind speed: 0 to 15 mph (equivalent to 0 to 6.7 m/s). Initially, Trimmer used the Tetens equation (1930) and the parameters of ambient temperature and relative humidity to calculate the saturation vapor pressure deficit. Next, the dimensions of each of the major lines on the chart were measured using a digitizing tablet. By applying similar trigonometric relations and the measured values, Trimmer proposed Eq. (1) to estimate wind drift and evaporation losses:

$$WDEL = [1.98D_n^{-0.72} + 0.22(e_s - e_a)^{0.63} + 3.6 \times 10^{-4}P^{1.16} + 0.14V_w^{0.7}]^{4.2} \quad (1)$$

Where, $WDEL$, wind drift and evaporation losses (%); D_n , Main nozzle diameter (mm); $(e_s - e_a)$, Saturation vapor pressure deficit (kPa); P , Sprinkler operating pressure (kPa); and V_w , Wind speed at height of 2 m (m/s).

The relative error of the equation is approximately 10% near the central values of the parameters, but the errors increase significantly near the extremes of the chart, reaching over 40% in some cases (Trimmer, 1987). To refine Trimmer's equation, the Frost and Schwalen nomograph was digitized in this study using Grapher software (Ver. 7.0.1870, Golden, Colorado 80401), and a total of 6,501 data series were extracted from the chart. Of the total

dataset, 70% was used for training, and the remaining 30% was allocated for validating the revised equation.

Results

The absolute mean relative error (AMRE) of the Trimmer equation, under the condition of using 70% of the data for training and 30% for validation, was found to be 24.69% and 24.96%, respectively. These values indicate the poor performance of the Trimmer equation in estimating WDEL. Additionally, the $P_{0.25}$ index was calculated to be 60.37% and 62.22%, respectively. In other words, approximately 40% of the estimates provided by the Trimmer equation have an error greater than 25%. Furthermore, Trimmer (1987) had already reported undesirable error levels in his proposed equation for certain specific parameter ranges (e.g., extreme values of operating conditions), and the findings of the present study confirm those observations. The revised Trimmer equation is presented as Eq. (2):

$$WDEL = \left[0.962D_n^{-7.4 \times 10^{-3}} + 4.2 \times 10^{-3}(e_s - e_a)^{0.622} + 2.2 \times 10^{-2}P^{0.138} + 3.5 \times 10^{-3}V_w^{0.564} \right]^{145.35} \quad (2)$$

The accuracy and reliability of the proposed equation were significantly improved. Specifically, the absolute mean relative error (AMRE) decreased to 4.96% and 4.99% under the use of 70% and 30% of the dataset, respectively. Additionally, the $P_{0.25}$ index increased to 99.60% and 99.54%, respectively. These results indicate that the developed equation exhibits a highly satisfactory level of accuracy for estimating WDEL.

Conclusions

Given that the accuracy of the revised Trimmer equation in estimating wind drift and evaporation losses in sprinkler irrigation systems is both desirable and of excellent quality compared to the reference data (i.e., the Frost and Schwalen nomograph), it is therefore recommended that, if this method is chosen for estimating losses, either the original chart be used directly or the revised Trimmer equation be employed as a reliable alternative.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This work has been supported by the Center for International Scientific Studies & Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Government of Iran. Therefore, the authors express their appreciation and gratitude for the financial support from the center (CISSC).

Funding

This work has been supported by the Center for International Scientific Studies & Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Government of Iran.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بهبود دقت معادله تریمر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری بارانی بر

پایه نمودار فراست و شوالن

یونس امین پور^۱، دریا دهقان^۲، انریکه پلایان^۳، و عیسی معروف پور^۴ ✉

۱. گروه سازه های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: Y.aminpour@wri.ac.ir

۲. گروه فن آوری های نوین ارزیابی منابع و مصارف، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: Darya.dehghan@ut.ac.ir

۳. گروه خاک و آب، موسسه تحقیقات آولا دی، زاراگوزا، اسپانیا. رایانامه: Enrique.playan@csic.es

۴. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: E.maroufpoor@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: استفاده از نمودار فراست و شوالن یکی از جامع ترین روش ها برای تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری بارانی است. اما استفاده از نمودار مذکور، اندکی پیچیده و زمان بر است. تریمر روی نمودار مذکور، تحلیل های زیادی انجام داد که منجر به استخراج رابطه ای جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی شد. مزیت رابطه تریمر، سهولت استفاده و کاربرد آن در برنامه های کامپیوتری بود اما به دلیل افزایش خطا، استفاده از آن توصیه نشده است و یا در برخی شرایط، ضرایب ثابت معادله متفاوت است. هدف از این پژوهش، افزایش دقت معادله مذکور است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

روش پژوهش: به منظور افزایش دقت معادله مذکور، نمودار فراست و شوالن، رقوم سازی شد و تعداد ۶۵۰۱ سری داده، شامل رطوبت نسبی، درجه حرارت محیط، کمبود فشار بخار اشباع، قطر نازل، فشار کارکرد آبپاش، سرعت باد و تلفات تبخیر و بادبردگی، از نمودار مذکور استخراج گردید. از مجموع کل داده ها، ۷۰ درصد به طور تصادفی، برای آموزش و ۳۰ درصد باقی مانده، جهت صحت سنجی معادله اصلاح شده، در نظر گرفته شد. از شاخص های آماری خطای نسبی، میانگین قدرمطلق خطای نسبی و سطح پیش بینی ۲۵ درصد (P0.25)، درصد مقادیر تخمینی پارامتر وابسته که کمتر از ۲۵ درصد با مقدار اندازه گیری شده تفاوت دارند) جهت ارزیابی دقت و صحت معادلات استفاده شد.

کلیدواژه ها:

آبیاری بارانی،

تلفات تبخیر و بادبردگی،

راندمان کاربرد،

فراست و شوالن.

یافته ها: نتایج نشان داد که دقت معادله تریمر، مبتنی بر مجموعه داده های مورد استفاده، مطلوب نیست؛ به گونه ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی نتایج در حدود ۲۵ درصد است. همچنین بر اساس شاخص P0.25، در حدود ۴۰ درصد تخمین های معادله تریمر، خطایی بیش از ۲۵ درصد دارند. اما دقت و صحت معادله اصلاح شده، مبتنی بر ۳۰ درصد داده های واسنجی به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد، به گونه ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی، به ۴/۹۶ درصد کاهش یافت و همچنین تقریباً ۱۰۰ درصد نتایج، خطایی کمتر از ۲۵ درصد دارند. همچنین برخلاف روند تغییرات زیاد خطای معادله تریمر در بازه های خاصی از قطر نازل و یا فشار کارکرد آبپاش، تغییرات خطا در معادله اصلاح شده، روندی یکنواخت داشت.

نتیجه گیری: در صورتی که برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه های آبیاری بارانی از نمودار فراست و شوالن استفاده می شود، پیشنهاد می گردد، به صورت مستقیم از نمودار مذکور استفاده شده و یا اینکه از معادله اصلاح شده پیشنهادی استفاده گردد.

استناد: امین پور، یونس؛ دهقان، دریا؛ پلایان، انریکه؛ و معروف پور، عیسی. (۱۴۰۵). بهبود دقت معادله تریمر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری

بارانی بر پایه نمودار فراست و شوالن. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۶ (۱)، ۸۰-۱۰۱.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12276.1172>



مقدمه

تاکنون در ایران بیش از ۲/۹ میلیون هکتار تحت پوشش سامانه‌های آبیاری تحت فشار قرار گرفته است که سامانه آبیاری بارانی بیشترین فراوانی را دارد (بی‌نام، ۱۴۰۲). سامانه‌های آبیاری بارانی بایستی طوری طراحی شوند که ضمن به حداقل رساندن تلفات آب آبیاری، باعث توزیع یکنواخت آب در مزرعه شده و به طور کلی راندمان کاربرد آب بالایی داشته باشند (کلر و بلایسنر^۱، ۱۹۹۰). در مجامع علمی و نظریه‌های کارشناسی موجود در کشور، راندمان کاربرد قابل حصول در سامانه‌های آبیاری بارانی، ۸۵ درصد است (سالمن^۲، ۱۹۸۸؛ و عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). عباسی و همکاران (۱۳۹۵) با جمع‌بندی داده‌های اندازه‌گیری‌شده راندمان در بانک اطلاعات ۴۰ ساله مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری را برای سامانه‌های مختلف آبیاری در سطح کشور گزارش نمودند. از میان سامانه‌های آبیاری بارانی، روش لوله چرخ‌دار و کلاسیک ثابت، به ترتیب بیشترین (۶۶/۹ درصد) و کمترین (۵۲/۱ درصد) راندمان کاربرد آب آبیاری را داشتند. آنان، متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری را برای سامانه‌های آبیاری بارانی ۶۲/۱ درصد، سامانه‌های آبیاری تحت فشار، ۶۶/۶ درصد و سامانه‌های آبیاری سطحی ۵۳/۶ درصد گزارش نمودند. بر اساس این مطالعه، حاصل سرمایه‌گذاری‌های کلان کشوری برای توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار، منجر به افزایش حدود ۱۳ درصد راندمان کاربرد آب آبیاری شده است که این میزان افزایش، با سرمایه‌گذاری کمتر و کمی توجه بیشتر به سامانه‌های آبیاری سطحی هم قابل حصول بود. از طرف دیگر فاصله میان راندمان کاربرد سامانه‌های آبیاری بارانی اجراشده تا میزان قابل حصول آن (۸۵ درصد) زیاد و قابل توجه (حدود ۲۳ درصد) است. بر اساس نتایج این مطالعه و همچنین بررسی منابع انجام‌شده در این تحقیق، دلایل مربوط به پایین بودن راندمان کاربرد سامانه‌های آبیاری بارانی کشور، بی‌توجهی به مسائل فنی در هر سه مرحله طراحی، اجرا و بهره‌برداری ذکر شده است (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۵؛ و معروف پور و همکاران^۳، ۲۰۱۹). عدم طراحی صحیح و اصولی، به دلیل نداشتن روابط دقیق و یا پارامترهای موردنیاز طراحی، باعث شده تا تعیین پارامترها با حدس و گمان صورت گیرد و طراحی‌ها به صورت کلیشه‌ای از نمودارها و جداولی باشد که برای سایر سامانه‌ها و مناطق مشابه به دست آمده‌اند. این امر سبب شده است تا راندمان واقعی سامانه با مقدار محاسباتی آن فاصله زیادی داشته باشد و همچنین منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بروز مشکلات و هزینه‌های اضافی در بهره‌برداری و نگهداری و در نهایت، کاهش بازدهی اقتصادی طرح‌ها در طول عمر مفید گردد.

راندمان کاربرد سامانه آبیاری بارانی، بیانگر میزان مفیدبودن آب کاربردی و یا به عبارتی، نشان‌دهنده، میزان تلفات سامانه آبیاری بارانی است که قسمت عمده آن تلفات تبخیر و بادبردگی^۴ (WDEL) است که شامل دو جزء تبخیر و بادبردگی است (دیلا و شال^۵، ۱۹۸۳). در آبیاری بارانی، به اختلاف حجم آب خارج‌شده از آبیاری و حجم آب رسیده به منطقه هدف، تلفات تبخیر و بادبردگی گفته می‌شود. قطرات آب از هنگام خارج‌شدن از نازل تا رسیدن به زمین تحت تأثیر عوامل جوی قرار گرفته که در برخی مواقع، قسمتی از مجموعه قطرات خروجی، تحت تأثیر نیروی باد از سطح قابل توزیع یک آبیاری یا مجموعه آبیاری‌ها خارج شده و نیز بخشی دیگر، تحت تأثیر عوامل جوی تبخیر می‌شوند. هدررفت آب به دو صورت یادشده را هدررفت ناشی از باد یا بادبردگی و هدررفت ناشی از تبخیر یا تلفات تبخیری گویند. همچنین تلفات تبخیر و بادبردگی سبب می‌شود که یکنواختی توزیع آب در مزرعه کاهش یابد (صادقی و همکاران^۶، ۲۰۱۵)؛ بنابراین به صورت متداول کشاورزان بیش‌آبیاری انجام می‌دهند تا مطمئن شوند که تمام مزرعه به اندازه کافی آب دریافت کرده است. این مسئله سبب کاهش بیشتر راندمان کاربرد، هدررفت انرژی پمپاژ،

1. Keller & Bliesner
2. Solomon
3. Maroufpoor et al
4. Wind Drift and Evaporation Losses (WDEL)
5. Dylla & Shull
6. Sadeghi et al

افزایش رواناب، فرسایش خاک و شسته شدن مواد مغذی خاک می‌گردد (سانتوس و همکاران^۱، ۲۰۰۳؛ لوز و هیبرمان^۲، ۲۰۰۵؛ باوی و همکاران^۳، ۲۰۰۹) که متعاقباً کاهش درآمد مزرعه و افزایش هزینه‌های تولید را به دنبال دارد. برخی محققین میزان تلفات تبخیر و بادبردگی را ۱۰-۵٪ (کلر و بلایسنر، ۱۹۹۰)، برخی دیگر حداکثر مقدار آن را تا ۳۰٪ (یازار^۴، ۱۹۸۴؛ و مونترو^۵، ۱۹۹۹) و حتی تا ۵۰٪ (فراست و شوالن^۶، ۱۹۵۵؛ و فاسی و برسرو^۷، ۱۹۹۱) گزارش کرده‌اند. جهت اطلاع از میزان تلفات تبخیر و بادبردگی گزارش شده از مناطق مختلف کشور، سعی در جمع‌آوری مطالعات مذکور گردید که خلاصه آن در جدول ۱ ذکر شده است. در جدول مذکور، حداکثر مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی ۴۰٪ (کیانی و همکاران، ۱۳۹۶) مربوط به استان گلستان و ۳۸٪ (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ و رستمیان و همکاران، ۱۳۹۳) مربوط به شهرستان‌های کنگاور (استان کرمانشاه) و سوندج (استان کردستان) گزارش شده است. زاپاتا و همکاران^۸ (۲۰۰۷) میزان تلفات تبخیر و بادبردگی کمتر از ۲۰ درصد را به‌عنوان حالت استاندارد نام بردند.

تکنیک‌های اندازه‌گیری متفاوتی برای تعیین تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های مختلف آبیاری و شرایط متفاوت اقلیمی استفاده شده است (پلایان و همکاران^۹، ۲۰۰۵؛ آدین^{۱۰}، ۲۰۱۲؛ معروف پور و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸؛ سرور و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۱؛ و محمد و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۱). نتایج این روش‌ها بیانگر یک مفهوم مشترک در رابطه با تلفات تبخیر و بادبردگی نیست و بنابراین بازه گسترده‌ای از نتایج برای مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی گزارش شده است (هنداوی و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۵؛ و سرور و همکاران، ۲۰۲۱). این تکنیک‌ها عبارت‌اند از آزمایش ظروف استاندارد^{۱۵}، روش هدایت الکتریکی^{۱۶}، روش ردیابی^{۱۷} و تکنیک‌های مبنای فیزیکی بر پایه معادلات ریاضی^{۱۸} (کینگ و همکاران^{۱۹}، ۲۰۱۲؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۵؛ و سرور و همکاران، ۲۰۲۱). روش ظروف استاندارد، به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری تلفات تبخیر و بادبردگی استفاده می‌شود. در این روش تلفات شامل مجموع دو تلفات تبخیر و تلفات بادبردگی است. مقادیر تلفات به‌دست‌آمده در این روش بیشتر از مقادیر آن در سایر روش‌ها خواهد بود. روش ردیابی به دلیل پروتکل پیچیده آن که مستعد خطای اندازه‌گیری است کمتر استفاده می‌شود (سرور، ۲۰۲۱). روش هدایت الکتریکی بر مبنای تفاوت غلظت نمک آب آبیاری و آب رسیده به سطح زمین است. این روش شامل تلفات بادبردگی نخواهد شد. روش‌های فیزیکی بر پایه معادلات ریاضی، بر مبنای ترکیب تئوری بالستیک قطره با تئوری انتقال گرما و جرم^{۲۰} است (کینزر و گان^{۲۱}، ۱۹۵۱؛ یان و همکاران^{۲۲}، ۲۰۱۰؛ و مول و همکاران^{۲۳}، ۲۰۱۲). نتایج حاصل از این روش با نتایج

1. Santos et al
2. Luz & Heermann
3. Bavi et al
4. Yazar
5. Montero
6. Frost & Schwalen
7. Faci & Bercero
8. Zapata et al
9. Playán et al
10. Adin
11. Maroufpoor et al
12. Sarwar et al
13. Mohamed et al
14. Hendawi et al
15. Test Standard Catch Can
16. Electrical Conductivity Method
17. Conservative Tracer
18. Physical Based Mathematical Method
19. King et al
20. Mass & heat transfer
21. Kinzer & Gunn
22. Yan et al
23. Molle et al

ظروف لندازه‌گیری و یا روش EC بسیار متفاوت و مقادیر آن کمتر است (تامپسون و همکاران^۱، ۱۹۹۳، ۱۹۹۷؛ یونتس و همکاران^۲، ۲۰۰۰؛ سرور و همکاران، ۲۰۲۱) زیرا در این روش فقط میزان تبخیر قطرات در طول پرواز خود از آبپاش تا سطح زمین محاسبه می‌شود. اگرچه، احتمال خطای روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری تلفات تبخیر و بادبردگی بیشتر از روش مستقیم اندازه‌گیری است (سرور، ۲۰۲۱)، اما روش مستقیم اندازه‌گیری زمان بر و پرهزینه است. همچنین در هنگام طراحی سامانه آبیاری بارانی، امکان آزمایش و یا تعیین مقدار تلفات تبخیر و بادبردگی در سناریوهای متفاوت طراحی، مشکل خواهد بود؛ بنابراین بسیاری از محققین سعی کرده‌اند که مقدار این تلفات را به طور غیرمستقیم و مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی ارائه دهند.

یکی از روش‌های رایج و همچنین پیشنهادی در استاندارد "ضوابط و معیارهای فنی روش‌های آبیاری تحت فشار (طراحی)" نشریه شماره ۲۸۶^۳ از انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، برای برآورد میزان تلفات تبخیر و بادبردگی در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، استفاده از نمودار فراست و شوالن (۱۹۵۵) است. نمودار فراست و شوالن حاصل نتایج بیش از ۷۰۰ آزمایش و شامل ۵ عامل مؤثر بر میزان تلفات تبخیر و بادبردگی (قطر نازل، فشار کارکر، سرعت باد، کمبود فشار بخار اشباع و درجه حرارت) است. به عبارتی، تحقیقات مذکور یکی از جامع‌ترین تحقیقاتی بوده است که تاکنون روی میزان تلفات تبخیر و بادبردگی انجام شده است که به گزارش تریمر^۳ (۱۹۸۷)، گزارش مذکور، در دسترس نمی‌باشد. اما استفاده از این نمودار اندکی پیچیده و زمان‌بر است. تریمر (۱۹۸۷) روی نمودار مذکور، تحلیل‌های زیادی انجام داد که منجر به استخراج رابطه‌ای جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی شد. مزیت رابطه تریمر، سهولت استفاده از آن و امکان کاربرد آن در برنامه‌های کامپیوتری بود. اما استفاده از رابطه مذکور همراه با ملاحظات فراوانی است؛ به طوری که در برخی از بازه‌های عوامل مؤثر، به دلیل افزایش خطا، استفاده از آن توصیه نشده است و یا در برخی شرایط، ضرایب ثابت معادله متفاوت است. جهت اطلاع از جزئیات بیشتر می‌توان به مقاله مذکور مراجعه نمود. علی‌رغم مسائل ذکرشده، در شرایط حاضر، در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، از معادله تریمر، بدون در نظر گرفتن ملاحظات آن استفاده می‌کنند. هدف اصلی این تحقیق، افزایش دقت و بهبود معادله تریمر با استفاده از نمودار فراست و شوالن است. به عبارتی، در تحقیق حاضر با اصلاح ضرایب ثابت معادله تریمر، علاوه بر این که میزان دقت آن بهبود می‌یابد، امکان استفاده از آن برای تمامی بازه‌های عوامل مؤثر در نمودار فراست و شوالن امکان‌پذیر خواهد شد.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باتوجه به تحقیقات صورت‌گرفته، مطالعات زیادی در زمینه پژوهش موردنظر انجام شده است که به دلیل کاهش حجم مطلب، خلاصه مطالعات انجام شده توسط محققین داخلی در ارتباط با تلفات تبخیر و بادبردگی در ایران به شرح زیر است:

1. Thompson et al
2. Yonts et al
3. Trimmer

جدول ۱. خلاصه مطالعات انجام شده توسط محققین داخلی در ارتباط با تلفات تبخیر و بادبردگی در ایران

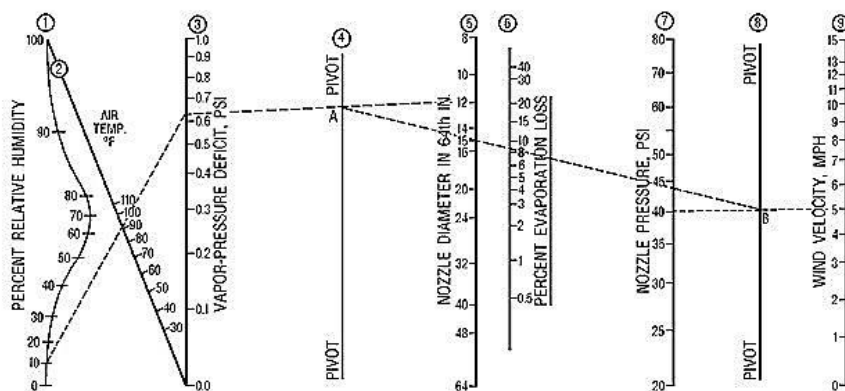
ردیف	منبع	منطقه مورد مطالعه	سامانه آبیاری	تلفات تبخیر و بادبردگی (%)
۱	زمانی سپهوند (۱۴۰۲)	خرم‌آباد	کلاسیک ثابت	چغندرقد: ۱۴/۸ پیاز: ۱۳/۸
۲	مولایی و همکاران (۱۳۹۵)	دشت کوهدشت لرستان	کلاسیک ثابت	۲/۷ - ۱۵/۸
۳	سیدزاده و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)	دشت کنگاور کرمانشاه	کلاسیک ثابت	۵ - ۳۸
۴	باقرخانی و همکاران (۱۳۹۸)	سنقر کرمانشاه	کلاسیک ثابت	۷/۱۰ - ۴/۷
۵	معروف پور و همکاران ^۲ (۲۰۱۹)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	۹ - ۲۹
۶	کریمی و همکاران (۱۳۹۵)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	روز: ۲۲/۵ شب: ۶/۹
۷	یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۹)	دشت دهگلان کردستان	لوله چرخ‌دار	۳/۳ - ۱۸/۶
۸	فاریابی و همکاران (۱۳۸۹)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	۶/۳ - ۱۷/۱
۹	رستمیان و همکاران (۱۳۹۳)	سنندج	کلاسیک ثابت	۵/۵ - ۳۷/۶
۱۰	زارع ابیانه و همکاران (۱۳۹۹)	همدان	کلاسیک ثابت	۴/۱۹ - ۱/۴
۱۱	سالمی و رضوانی (۱۳۹۵)	اصفهان همدان	کلاسیک ثابت	۶
۱۲	بختیاری و همکاران (۱۳۹۹)	استان مرکزی	کلاسیک ثابت	به ترتیب ۱۹/۶ و ۱۱/۸
۱۳	برادران هزاوه (۱۳۸۴)	اراک	کلاسیک ثابت	۵/۵ - ۲۰/۵
۱۴	حسینی و همکاران (۱۳۹۹)	مغان	سامانه عقربه‌ای	۱۸-۷
۱۵	رنوف و همکاران (۱۳۹۷)	مغان	کلاسیک ثابت	۳۴-۶
۱۶	حمدی و همکاران ^۳ (۲۰۱۶)	مغان	سامانه عقربه‌ای	۵/۳۲
۱۷	محمدی و همکاران (۱۳۹۹)	دشت اردبیل	کلاسیک ثابت	۲/۲ - ۱۷/۷
۱۸	میربلوچ و همکاران (۱۳۹۹)	خاش	کلاسیک ثابت	۱۲/۲۹ - ۲/۶
۱۹	کیانی و همکاران (۱۳۹۶)	استان گلستان	کلاسیک ثابت، عقربه‌ای، خطی، قرقره‌ای	۵ - ۴۰
۲۰	مجدسلیمی و همکاران (۱۳۹۴)	استان گیلان	کلاسیک ثابت	۴/۸ - ۱۳
۲۱	رحمت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۱)	اهواز	کلاسیک ثابت	۱/۴ - ۱۲/۸
۲۲	دلیر حسن‌نیا و همکاران (۱۳۹۰)	تبریز	سامانه عقربه‌ای	۱۰/۴ - ۲۲/۶
۲۳	سی‌وسه مرده و بایزیدی (۱۳۹۰)	مهاباد	کلاسیک ثابت	۸/۲ - ۲۷/۵
۲۴	عرفانیان و همکاران (۱۳۸۷)	استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی	لوله چرخ‌دار	۱۰/۱ - ۱۶/۶

1. Seyedzadeh et al
2. Maroufpoor et al
3. Hamdi et al

روش پژوهش

۱. نمودار فراست و شوالن

فراست و شوالن^۱ در سال ۱۹۵۵، با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از ۷۰۰ آزمایش، نموداری را جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه دادند (**Error! Reference source not found.**). آزمایش‌ها در مزارع کشاورزی و شرایط اقلیمی نیمه خشک ایلات آریزونا انجام شد. در این نمودار ۷ خط با دو محور وجود دارد. پارامترهای مورد نیاز در این نمودار شامل درجه حرارت محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد، فشار آبپاش و قطر نازل است. بازه تغییرات رطوبت نسبی، ۰ تا ۱۰۰ درصد، درجه حرارت محیط، ۳۰ تا ۱۱۰ درجه فارنهایت (۱/۱ - تا ۴۳/۳ درجه سانتی‌گراد)، قطر نازل، ۸:۶۴ تا ۶۴:۶۴ اینچ (۳/۲ تا ۲۵/۴ میلی‌متر)، فشار کارکرد آبپاش، ۲۰ تا ۸۰ پوند بر اینچ مربع (۱۳۷/۹ تا ۵۵۱/۶ کیلوپاسکال)، سرعت باد، ۰ تا ۱۵ مایل بر ساعت (۰ تا ۶/۷ متر بر ثانیه) است. آن‌ها دریافتند که میزان تلفات تبخیر و بادبردگی رابطه مستقیم با سرعت باد و فشار آب و رابطه عکس با رطوبت نسبی و اندازه قطر نازل دارد. آزمایش‌های فراست و شوالن نشان داد میزان تلفات تبخیر و بادبردگی در مواقع آفتابی، دمای بالای محیط و رطوبت نسبی پایین، حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد است. نمودار مذکور، هنوز یکی از جامع‌ترین روش‌ها در مجامع بین‌المللی برای محاسبه تلفات تبخیر و بادبردگی است. کلر و بلایسنر (۱۹۹۰) بر پایه نتایج آزمایشات فراست و شوالن، روشی را بر مبنای پتانسیل تبخیر و تعرق منطقه، برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه دادند. در بسیاری از کشورها، همچون آمریکا (کلر و بلایسنر، ۱۹۹۰)، هندوستان (میکائیل، ۲۰۰۸)، اسپانیا (پلایان و ماتئوس^۲، ۲۰۰۶) و ایران (استاندارد شماره ۲۸۶)، روش فراست و شوالن (۱۹۵۵) به‌عنوان یک روش معتبر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی معرفی و پیشنهاد می‌شود. اما یکی از محدودیت‌ها و معایب کاربرد نمودار مذکور این است که جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، بایستی بر روی نمودار و به‌صورت گرافیکی، اقدامات لازم صورت گیرد.



شکل ۱. نمودار ارائه‌شده توسط فراست و شوالن در سال ۱۹۵۵ جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی (فراست و شوالن، ۱۹۵۵)

۲. رابطه تریمر

تریمر (۱۹۸۷) روی نمودار فراست و شوالن تجزیه و تحلیل های زیادی را به عمل آورد و سرانجام مطالعات او منجر به ارائه معادله ای شد که با استفاده از آن می توان میزان تلفات تبخیر و بادبردگی را تخمین زد. در ابتدا تریمر با استفاده از معادله تنس^۱ (۱۹۳۰)، و با استفاده از پارامترهای درجه حرارت محیط و رطوبت نسبی، پارامتر کمبود فشار بخار اشباع را محاسبه کرد (معادله ۱). سپس ابعاد هر یک از خطوط اصلی نمودار، با استفاده از یک تبلت دیجیتالیزر اندازه گیری شد. سپس با استفاده از روابط مثلثات متشابه و مقادیر اندازه گیری شده، معادله ۲ را برای محاسبه تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه داد. مزیت این روش آن است که با معادله ریاضی قابل محاسبه بوده و می توان آن را در برنامه های کامپیوتری وارد نمود.

$$e_s - e_a = 0.61(1 - RH)e^{\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)} \quad (1)$$

$$WDEL = \left[1.98D_n^{-0.72} + 0.22(e_s - e_a)^{0.63} + 3.6 \times 10^{-4}P^{1.16} + 0.14V_w^{0.7} \right]^{4.2} \quad (2)$$

که در این روابط، $WDEL$ ، تلفات تبخیر و بادبردگی (درصد)؛ D_n ، قطر نازل اصلی (میلی متر)؛ $e_s - e_a$ ، کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)؛ P ، فشار کارکرد آبیاش (کیلو پاسکال)؛ V_w ، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)؛ T ، درجه حرارت محیط (درجه سانتی گراد)؛ e ، عدد نپر (2.718؛ e) و RH ، رطوبت نسبی (بدون بُعد) است. پارامتر کمبود فشار بخار اشباع به صورت تابعی از درجه حرارت بوده و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود.

به گزارش تریمر، معادله مذکور، بیشترین تطابق را با نمودار فراست و شوالن (۱۹۵۵) در مقادیر نزدیک به محدوده مرکزی پارامترها دارد. میزان خطای معادله در نزدیکی مقادیر مرکزی، حدود ۱۰ درصد است. در نزدیک مقادیر انتهایی نمودار، خطاها بیشتر و ممکن است به بیش از ۴۰ درصد برسد (تریمر، ۱۹۸۷). همچنین اگر از این معادله برای فشارهای زیر ۲۰۷ کیلو پاسکال یا نازل های با قطر بزرگ تر از ۱۲/۷ میلی متر استفاده شود، مقدار تلفات را نسبت به نمودار، بیش بر آورد محاسبه می کند. جهت بهبود دقت در محدوده های مذکور، می توان از ضرایب جایگزین در بخش های مربوط به نازل و فشار کارکرد، در معادله استفاده نمود (تریمر، ۱۹۸۷).

به منظور افزایش دقت معادله تریمر، در این پژوهش، تلاش گردید نمودار فراست و شوالن، رقومی سازی شده و مجموعه داده های مناسبی از آن استخراج گردد. در همین راستا، تعداد ۶۵۰۱ سری داده (هر سری، شامل متغیرهای مستقل ورودی: رطوبت نسبی، درجه حرارت محیط، کمبود فشار بخار اشباع، قطر نازل، فشار کارکرد آبیاش، سرعت باد و متغیر وابسته: تلفات تبخیر و بادبردگی) از نمودار مذکور استخراج شد و مورد استفاده قرار گرفت. رقومی سازی نمودار مذکور و استخراج داده ها با استفاده از نرم افزار (Grapher (Ver. 7.0.1870, Golden, Colorado 80401 انجام شد. از مجموع کل داده ها، ۷۰ درصد (۴۵۵۰ سری) به طور تصادفی و برای آموزش استفاده شد و ۳۰ درصد باقی مانده (۱۹۵۱ سری)، جهت صحت سنجی معادله اصلاح شده، در نظر گرفته شد.

۳. شاخص های ارزیابی

جهت ارزیابی دقت و صحت معادله تریمر و معادله اصلاح شده آن، از شاخص های آماری قدر مطلق میانگین خطای نسبی ($AMRE^2$, %)، سطح پیش بینی ۲۵ درصد ($P_{0.25}$ ، درصد مقادیر تخمینی $WDEL$ که کمتر از ۲۵ درصد با مقدار اندازه گیری شده تفاوت دارند)، و شاخص خطای نسبی (RE , %) استفاده خواهد شد. شاخص های $AMRE$ و RE ، به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$AMRE(\%) = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{(WDEL_{Exp} - WDEL_{Cal})}{(WDEL_{Exp})} \right| \quad (3)$$

$$RE(\%) = \frac{(WDEL_{Exp} - WDEL_{Cal})}{(WDEL_{Exp})} \times 100 \quad (4)$$

1. Tetens

2. Absolute Mean Relative Error (AMRE)

در این روابط، $WDEL_{Cal}$ و $WDEL_{Exp}$ ، به ترتیب، تلفات تبخیر و بادبردگی در دو حالات محاسباتی و مشاهداتی (مقادیر مستخرج از نمودار) می‌باشند. شاخص $AMRE$ ، یکی از معیارهای مهم جهت ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی است. این شاخص میزان اختلاف مطلق پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی را به صورت نسبی (نسبت به مقدار واقعی) اندازه‌گیری می‌کند. به طور کلی، $AMRE$ بین ۰٪ تا ۱۰٪ نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل است که پیش‌بینی‌ها با دقت بالا و نزدیک به داده‌های واقعی انجام شده است. $AMRE$ بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ نشان‌دهنده عملکرد خوب تا متوسط است. در صورتی که $AMRE$ بالاتر از ۲۰٪ باشد، این نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل است.

بر اساس ۷۰ درصد داده‌های انتخابی برای آموزش و مبتنی بر معیار حداقل کردن میانگین قدرمطلق خطای نسبی، ضرایب معادله تریمر اصلاح‌شده و تعیین گردید. این فرایند از طریق ابزار Solver در محیط نرم‌افزار Excel انجام شد.

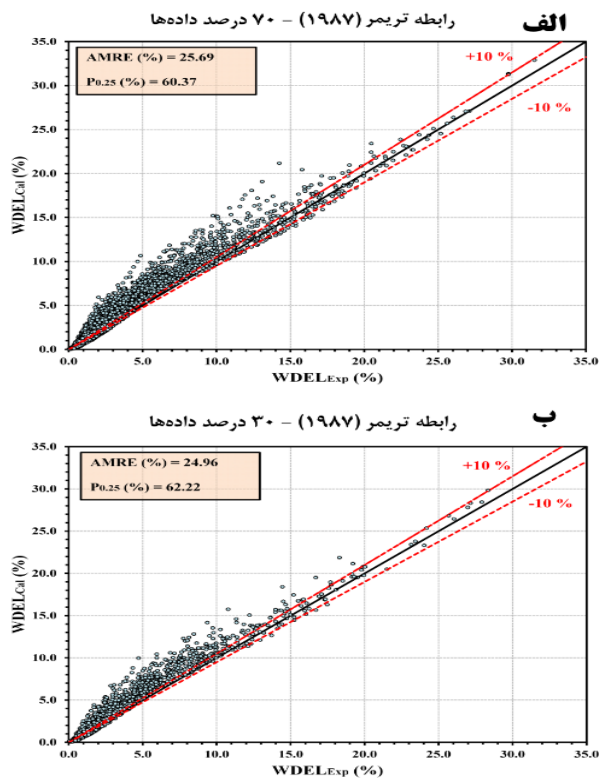
یافته‌های پژوهش

۱. بررسی دقت و صحت رابطه تریمر (۱۹۸۷)

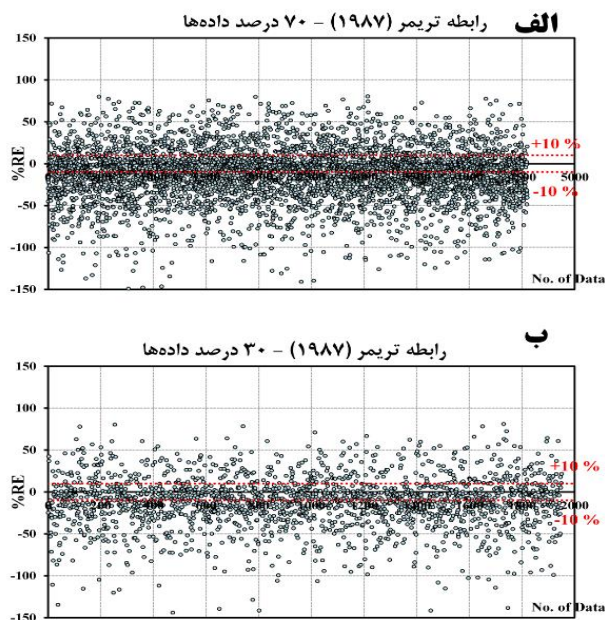
جهت بررسی دقت و صحت معادله پیشنهادی توسط تریمر (۱۹۸۷) از ۶۵۰۱ سری داده استخراج‌شده از نمودار فراست و شوالن استفاده شد. شکل ۲ دقت و صحت معادله پیشنهادی را در دو حالت مختلف (۷۰ درصد داده‌ها، استفاده‌شده جهت آموزش معادله جدید؛ ۳۰ درصد داده‌ها، مورداستفاده جهت واسنجی معادله جدید) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت و صحت رابطه تریمر (۱۹۸۷) مبتنی بر مجموعه داده‌های مورداستفاده، مطلوب نیست؛ به گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی در شرایط استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها (آموزش) و ۳۰ درصد داده‌ها (واسنجی)، به ترتیب، ۲۵/۶۹ و ۲۴/۹۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف معادله تریمر در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی است. همچنین مقدار شاخص $P_{0.25}$ ، به ترتیب، ۶۰/۳۷ و ۶۲/۲۲ درصد بود. به عبارت دیگر، در حدود ۴۰ درصد تخمین‌های معادله تریمر، خطایی بیش از ۲۵ درصد دارند. در شکل ۳، روند تغییرات خطای نسبی ($RE\%$) معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) ارائه شده است. باتوجه به شکل مذکور، گستره تغییرات درصد خطای نسبی در شرایط کاربرد معادله مذکور، بسیار زیاد است، که بیانگر عدم دقت و صحت معادله مذکور در تخمین WDEL است.

۲. ارزیابی محدوده تغییرات خطای معادله تریمر (۱۹۸۷)

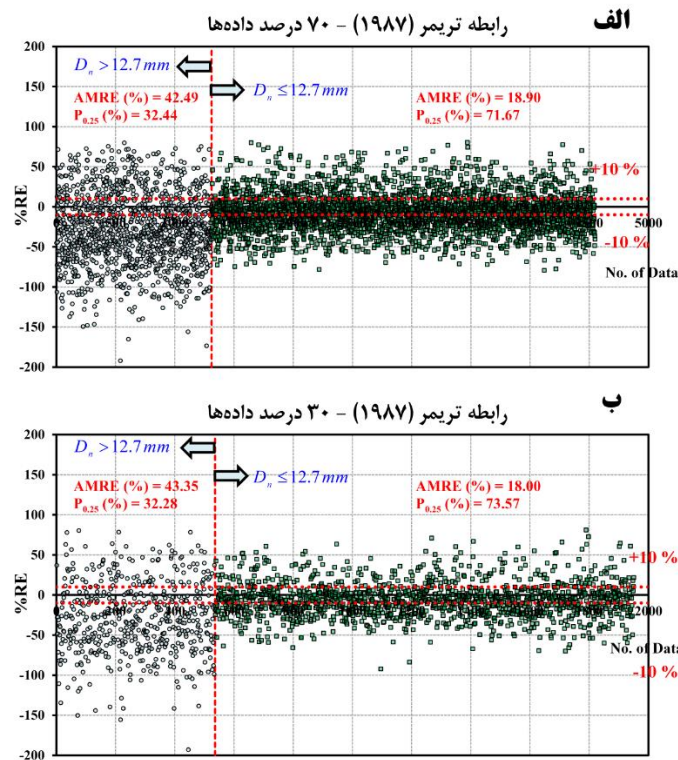
تریمر (۱۹۸۷) مقدار خطای معادله پیشنهادی خود را جهت تخمین WDEL، در یک سری از بازه‌های خاص ($D_n > 12.7 mm$ و یا $P < 270 kPa$) نامطلوب گزارش کرده و این موضوع را می‌توان یکی از ضعف‌های معادله مذکور دانست. شکل ۴ و شکل ۵، به ترتیب، روند تغییرات خطای نسبی و مقادیر شاخص‌های ارزیابی را به تفکیک بازه‌های مذکور برای اندازه قطر نازل و فشار کارکرد آبپاش نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۴، معادله پیشنهادی در شرایطی که اندازه نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، خطای بیشتری ($AMRE = 42.49\%; P_{0.25} = 32.28\%$)، در شرایط کاربرد مجموعه ۷۰ درصدی داده‌ها) نسبت به تخمین WDEL در نازل‌های با قطر کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر ($AMRE = 18.90\%; P_{0.25} = 71.67\%$)، در شرایط کاربرد مجموعه ۷۰ درصدی داده‌ها) داشته و این موضوع، ادعای تریمر (۱۹۸۷) را تأیید می‌نماید. این روند برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز صادق است. به گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۳۱/۰۲ درصد به ازای داده‌های با $P < 270 kPa$ ، به ۲۰/۸۹ درصد برای داده‌های با $P \geq 270 kPa$ تقلیل یافته است (شکل ۵). بنابراین، یکی از نقاط ضعف معادله مذکور، عدم دقت یکسان در تخمین WDEL در بازه‌های مختلف تغییرات پارامترهای مؤثر مستقل است.



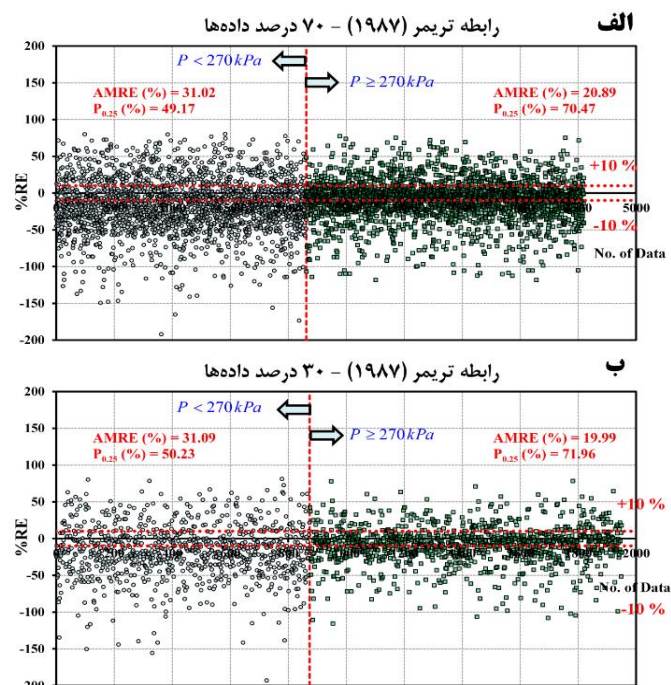
شکل ۲. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی (الف) بر اساس ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) بر اساس ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۳. روند تغییرات درصد خطای نسبی معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۴. روند تغییرات خطای نسبی در محدوده‌های مختلف قطر نازل (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



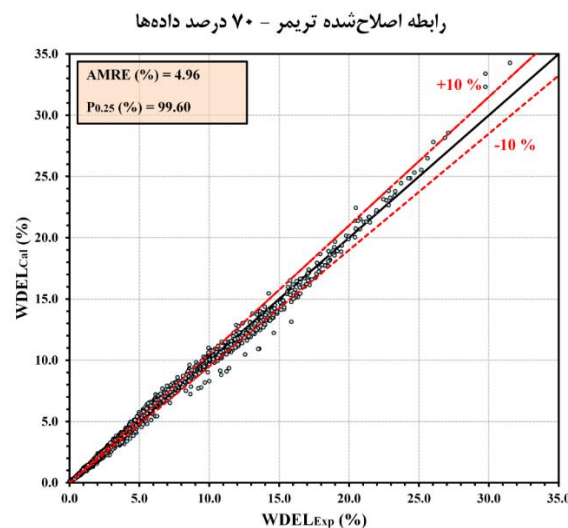
شکل ۵. روند تغییرات خطای نسبی در محدوده‌های مختلف فشار کارکرد آبیاش (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

۳. توسعه معادله جدید

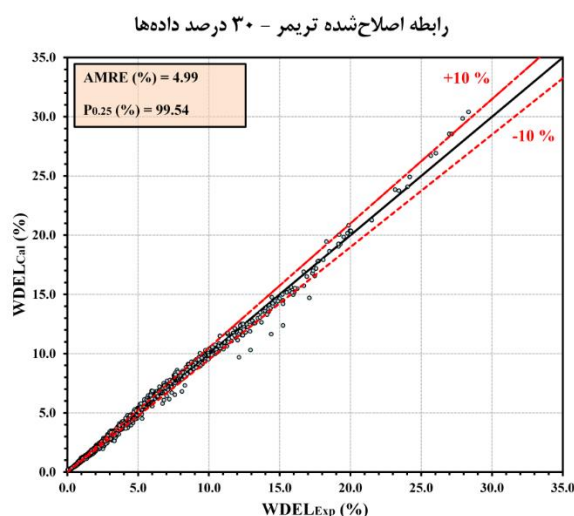
باتوجه به خطاهای قابل توجه معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، به ویژه در شرایط مرزی خاص، اصلاح ضرایب و توان‌های ثابت معادله مذکور مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌های انتخابی تصادفی (جهت آموزش) صورت گرفت. معادله اصلاح شده به صورت زیر است:

$$WDEL = \left[0.962 D_n^{-7.4 \times 10^{-3}} + 4.2 \times 10^{-3} (e_s - e_a)^{0.622} + 2.2 \times 10^{-2} P^{0.138} + 3.5 \times 10^{-3} V_w^{0.564} \right]^{145.35} \quad (5)$$

پارامترهای معادله قبلاً تعریف شده است. شکل ۶ دقت و صحت معادله پیشنهادی را مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌های مورد استفاده جهت آموزش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت و صحت معادله پیشنهادی به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرده است؛ به گونه‌ای که، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۲۵/۶۹ درصد (برای معادله تریمر (۱۹۸۷)) به ۴/۹۶ درصد کاهش یافته است. همچنین شاخص $P_{0.25}$ ، از ۶۰/۳۷ درصد به ۹۹/۶۰ درصد افزایش یافته است. در شکل ۷، دقت معادله اصلاح شده مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌های واسنجی ارائه شده است. باتوجه به شکل مذکور، شاخص‌های ارزیابی در این حالت نیز بسیار مطلوب بوده ($AMRE = \%4.99$; $P_{0.25} = \%99.54$) و این موضوع، بیانگر دقت بسیار مناسب معادله توسعه یافته جهت برآورد WDEL است. به عبارت دیگر، دقت معادله توسعه یافته در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، با درجه عالی بوده و تقریباً ۱۰۰ درصد نتایج، خطایی کمتر از ۲۵ درصد دارند. در شکل ۸ روند تغییرات خطای نسبی برای معادله اصلاح شده ارائه گردیده است. باتوجه به شکل مذکور و مقایسه آن با شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که دقت و صحت معادله پیشنهادی جدید بسیار مطلوب بوده و تقریباً در تمام شرایط، در بازه $\pm 10\%$ درصد تغییر می‌کند.



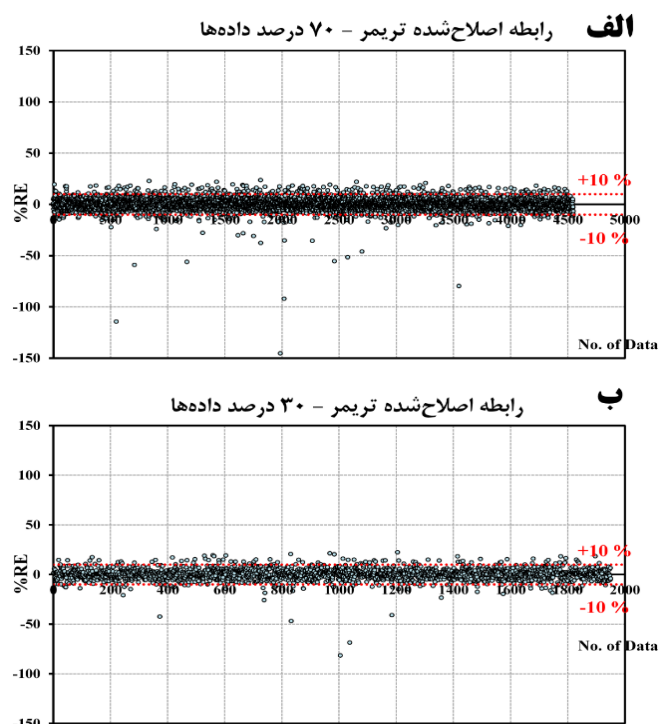
شکل ۶. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی مبتنی بر معادله اصلاح شده تریمر، بر اساس ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش)



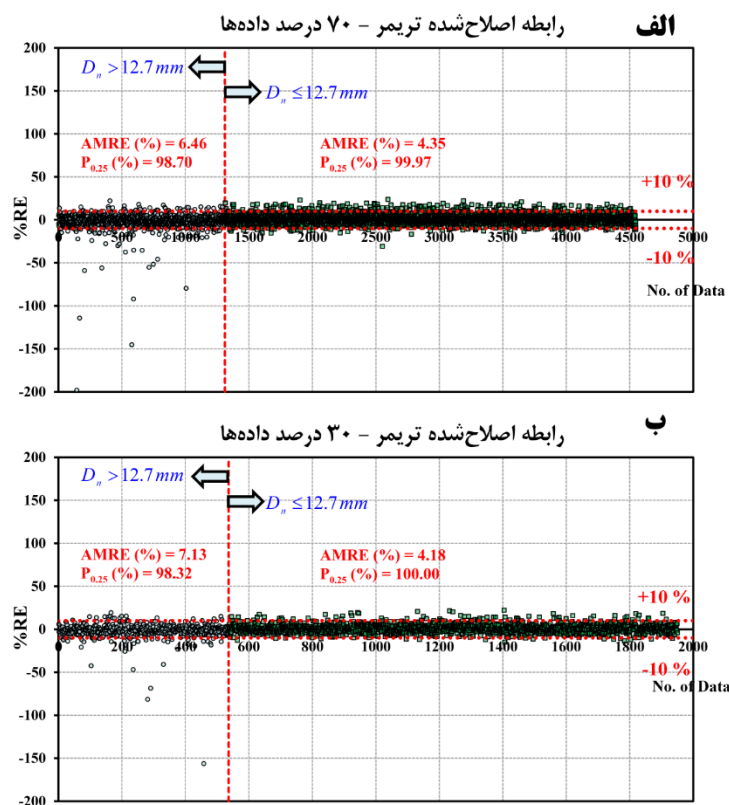
شکل ۷. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی مبتنی بر معادله اصلاح شده تریمر، بر اساس ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

۴. ارزیابی محدوده تغییرات خطای معادله پیشنهادی جدید

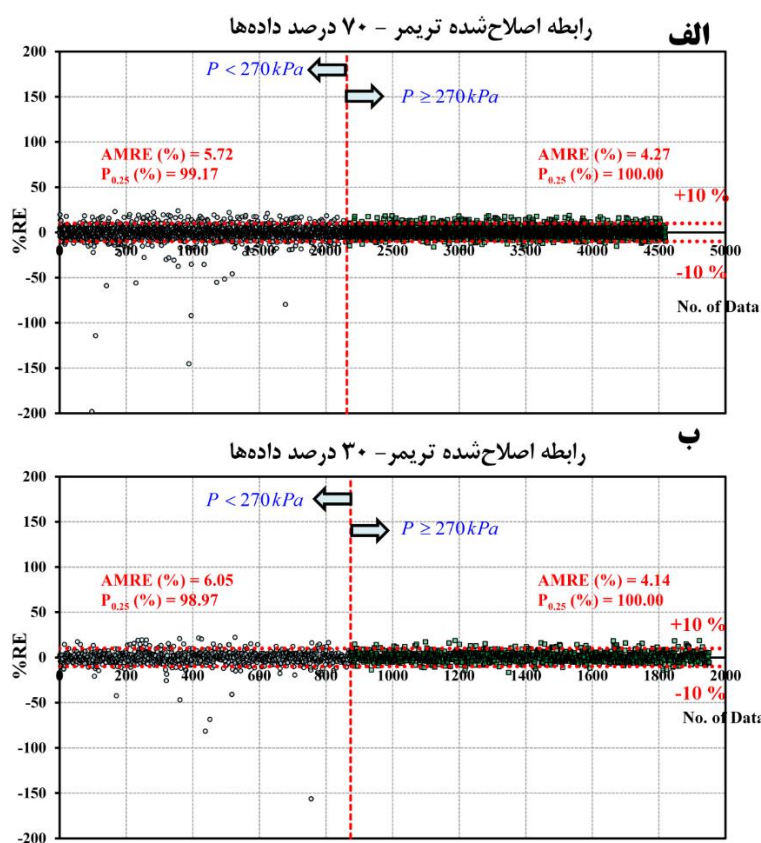
شکل ۹ و شکل ۱۰، به ترتیب، روند تغییرات خطای نسبی و مقادیر شاخص‌های آماری را برای اندازه قطر نازل و فشار کارکرد آبپاش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، معادله اصلاح شده برخلاف معادله تریمر (۱۹۸۷)، وابستگی به تغییرات اندازه نازل نداشته و مستقل از آن، به ازای همه شرایط، دقت و صحت بسیار مطلوبی دارد ($AMRE = 6.46\%$; $P_{0.25} = 98.70\%$ ، برای اندازه نازل کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر و $AMRE = 4.35\%$; $P_{0.25} = 99.97\%$ ، برای اندازه قطر نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر). شکل ۱۰ این موضوع را برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز تأیید می‌نماید (در شرایط کاربرد ۳۰ درصد از داده‌های واسنجی: $AMRE = 6.05\%$; $P_{0.25} = 98.97\%$ ، برای داده‌های با فشار کارکرد کمتر از ۲۷۰ کیلوپاسکال و $AMRE = 4.14\%$; $P_{0.25} = 100.00\%$ ، برای داده‌های با فشار کارکرد بیشتر از ۲۷۰ کیلوپاسکال). به عبارت بهتر، یکی از مزیت‌های اصلی معادله اصلاح شده نسبت به معادله تریمر (۱۹۸۷)، عدم وابستگی به روند تغییرات پارامترهای ورودی و اطمینان از تخمین دقیق آن در همه شرایط بهره‌برداری است.



شکل ۸. روند تغییرات درصد خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر (الف) مبتنی بر ۷ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۹. روند تغییرات خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر، در محدوده‌های مختلف قطر نازل (الف) مبتنی بر ۷ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۱۰. روند تغییرات خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر، در محدوده‌های مختلف فشار کارکرد آبپاش (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

بحث

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه و بررسی دقت و صحت معادله پیشنهادی توسط تریمر (۱۹۸۷) جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های آبیاری بارانی بود. علاوه بر ارزیابی معادله مذکور، تلاش گردید معادله‌ای دقیق‌تر، جامع‌تر و همچنین مستقل از محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر توسعه یابد.

نتیجه‌گیری

میانگین قدرمطلق خطای نسبی (AMRE) معادله تریمر در شرایط استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها (آموزش) و ۳۰ درصد داده‌ها (واسنجی)، به ترتیب، ۲۵/۶۹ و ۲۴/۹۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف معادله مذکور در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی است. همچنین مقدار شاخص $P_{0.25}$ ، به ترتیب، ۶۰/۳۷ و ۶۲/۲۲ درصد به دست آمد که مقادیر مطلوبی نمی‌باشند. معادله مذکور، در شرایطی که اندازه نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، خطای بیشتری ($AMRE = \%42.49; P_{0.25} = \%32.28$) نسبت به نازل‌های با قطر کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر ($AMRE = \%18.90; P_{0.25} = \%71.67$) داشته و این موضوع، ادعای تریمر (۱۹۸۷) را تأیید می‌نماید. این روند برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز صادق است. به‌گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۳۱/۰۲ درصد به ازای داده‌های با $P < 270\text{ kPa}$ ، به ۲۰/۸۹ درصد برای داده‌های با $P \geq 270\text{ kPa}$ تقلیل یافته است. دقت و صحت معادله تریمر اصلاح‌شده، به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد؛ به‌گونه‌ای که، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در شرایط استفاده از ۷۰ درصد و ۳۰ درصد داده‌ها، به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت. همچنین شاخص $P_{0.25}$ ، تقریباً برابر

با ۱۰۰ درصد شد. این موضوع، بیانگر دقت بسیار مناسب معادله توسعه یافته جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی است. به عبارت دیگر، دقت معادله توسعه یافته در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، با درجه عالی بوده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور برابر در شکل‌گیری ایده مقاله و نگارش نسخه اولیه و نسخه‌های بعدی آن مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم و تحقیقات و فناوری انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مرکز اعلام می‌دارند.

منابع

- باقرخانی، علیرضا، زارع ابیانه، حمید، و قدمی فیروزآبادی، علی. (۱۳۹۸). عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در منطقه سنقر در استان کرمانشاه، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۳)، ۶۴۶-۶۳۸.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.7.7>
- بختیاری، سعید، محسنی موحد، سید اسدالله، مقدسی، مهنوش، و داوودمقامی، داود. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در استان مرکزی. نشریه پژوهش آب ایران، ۱۴(۱)، ۱۸-۹.
https://iwj.sku.ac.ir/article_10684.html?lang=en
- برادران هزاوه، فرانک. (۱۳۸۴). ارزیابی فنی سیستم‌های آبیاری تحت فشار اجرا شده در شهرستان اراک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک، ایران.
<https://dolat.ir/detail/410746> وبسایت پایگاه اطلاع‌رسانی دولت.
- حسینی، یاسر، رئوف، مجید، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۹). ارزیابی و مدل‌سازی تلفات تبخیر و باد بردگی سامانه آبیاری عقربه‌ای در منطقه مغان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۵)، ۱۲۷-۱۰۹.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302>
- دلیر حسن‌نیا، رضا، ناظمی، امیرحسین، اشرف صدرالدینی، علی، و فرسادی‌زاده، داود. (۱۳۹۰). مدل تعیین تلفات بادبردگی و تبخیر در اسپری نازل‌های سامانه آبیاری سنترپیوت. مجله دانش آب و خاک، ۲۱(۱)، ۱۴-۱۱.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1241.html
- رحمت‌آبادی، وحید، برومندنسب، سعید، سخایی‌راد، حسین، و باوی، عادل. (۱۳۹۱). تلفات تبخیر و باد دو نوع آبپاش تک نازله و سه نازله در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در شرایط اقلیمی اهواز. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۶)، ۲۷۲-۲۶۵.
<https://www.sid.ir/paper/131412/en>
- رستمیان، بهاره، معروف پور، عیسی، آذربو، نسیم، و فرزانه کیا، فروغ. (۱۳۹۳). بررسی اثر عوامل جوی و هیدرولیکی بر میزان تلفات تبخیر و باد آبپاش‌های ضربه‌ای در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت. نشریه آب و خاک، ۲۸(۴)، ۶۶۹-۶۶۱.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29061>

- رئوف، مجید، حسینی، یاسر، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۷). ارزیابی سیستم کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک و مدل‌سازی تلفات تبخیر و باد بردگی در آبپاش مدل ADF 25 در منطقه مغان. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*، ۴(۷)، ۱۳۴-۱۱۷. <https://sanad.iau.ir/en/Journal/wsrcj/Article/828917>
- زارع ابیلنه، حمید، دلنایی، اعظم، اخوان، سمیرا، و جوزی، مهدی. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری نوین در شهرستان همدان. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۱۰(۳)، ۳۸۱-۳۹۵. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784>
- زمانی سپهوند، سعید، ترابی پوده، حسن، و نصرالهی، علی حیدر. (۱۴۰۲). برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه‌های آبیاری بارانی تحت تأثیر مدیریت‌های مختلف بهره‌برداری (مطالعه موردی: طرح چغاهرووشی خرم‌آباد). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۱)، ۱۲۹-۱۴۱. https://idj.iaid.ir/article_168111_en.html
- سالمی، حمید رضا، و رضوانی، سید معین‌الدین. (۱۳۹۵). ارزیابی فنی سیستم آبیاری بارانی در شرایط زارعین (استان اصفهان و همدان). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۳۴۵-۳۵۰. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>
- سی و سه مرده، معروف، و بایزیدی، مطلب. (۱۳۹۰). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در مطالعه موردی استان آذربایجان غربی-مهاباد. *مجله مهندسی منابع آب*، ۴(۸)، ۶۳-۷۶. <https://www.magiran.com/p869893>
- عباسی، فریبرز، سهراب، فرحناز، و عباسی، نادر. (۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. *مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۱۷(۶۷)، ۱۲۰-۱۱۳. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- عرفانیان ارغوانیان سرشوری، مریم، علیزاده، امین، موسوی بایگی، محمد، انصاری، حسین، و باغانی، جواد. (۱۳۸۷). مطالعه پتانسیل اثرات تبخیر و بادبردگی بر کارایی سیستم‌های آبیاری بارانی در دشت‌های استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی. *نشریه علوم و صنایع کشاورزی*، ۲۲(۱)، ۱۷۲-۱۶۱. https://www.researchgate.net/publication/277797904_
- فاریابی، ارسلان، معروف پور، عیسی، و قمرنیا، هوشنگ. (۱۳۸۹). بررسی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت دهگلان کردستان، *مجله علوم آب و خاک*، ۱۴(۵۴)، ۱-۱۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0>
- کریمی، بختیار، محمدی‌نسب، آمانج، و عبدی، چنور. (۱۳۹۵). ارزیابی تلفات تبخیر و بادبردگی در سیستم آبیاری بارانی شبانه و روزانه. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰(۵۵)، ۱۲۸-۱۳۵. https://idj.iaid.ir/article_55275_en.html
- کیانی، علیرضا، شاکر، مجتبی، و طبرسا، رحیم. (۱۳۹۶). بررسی کارایی سامانه‌های آبیاری بارانی اجراشده در استان گلستان. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۴(۶)، ۲۷۰-۲۵۷. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12201.2670>
- مجدسلیمی، کوروش، صلواتیان، سید بابک، و امیری، ابراهیم. (۱۳۹۴). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک اجراشده در باغ‌های چای استان گیلان. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۹(۲)، ۳۳۶-۳۴۹. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29497>
- محمدی، مهران، عزیزی مبصر، جوانشیر، و رئوف، مجید. (۱۳۹۹). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در دشت اردبیل. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۴(۳)، ۳۳۵-۳۷۳. <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.342287.771>
- مولایی، زینب، معروف پور، عیسی، و ملکی، عباس. (۱۳۹۵). بررسی و ارزیابی فنی برخی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت کوه‌دشت. *پژوهش آب ایران*، ۱۰(۲)، ۱۲۵-۱۳۲. <https://doi.org/10.1002/ird.648>

- میربلوچ، محمد حنیف، دلبری، معصومه، و پیری، حلیمه. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک با آبپاش متحرک در شهرستان خاش. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۰(۱)، ۳۱-۴۴.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2020.292131.732>
- ناصری، ابوالفضل، عباسی، فریبرز، و اکبری، مهدی. (۱۳۹۶). برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۸(۶۸)، ۱۷-۳۲.
<https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
- نشریه شماره ۲۸۶. (۱۳۸۳). ضوابط و معیارهای فنی آبیاری تحت فشار (طراحی). دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تهران، ایران. <https://sazeplus.com/n-286>
- یمین مشرفی، گوران، معروف پور، عیسی، قمرنیا، هوشنگ، و فاریابی، ارسلان. (۱۳۸۹). یادداشت فنی: تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع ضریب یکنواختی و یکنواختی توزیع سیستم‌های آبیاری بارانی دشت دهگلان کردستان. نشریه مجله پژوهش آب/ایران، ۴(۶)، ۹۵-۹۷. https://iwjw.sku.ac.ir/article_10819.html?lang=en

References

- Abbasi, F., Naseri, A., Sohrab, F., Baghani, J., Abbasi, N., & Akbari, M. (2016). Promoting water use productivity. Agricultural Engineering Research Institute. Agricultural Extension, *Education and Research Organization*, 17(67), 113-120. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- Anonymous (2023). *Dolat.ir official information website*. (In Persian) <https://dolat.ir/detail/410746>
- Bagherkhani, A., Zare Abyaneh, H., & Ghadami Firoozabadi, A. (2019). *Performance of fixed classic sprinkler irrigation systems with portable sprinklers in the Songhor region of Kermanshah Province*. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3), 638–646. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.7.7>
- Bakhtiari, S., Mohseni Movahed, S. A. , Moghaddasi, M., & Davoudmaghami, D. (2020). Performance evaluation of semi-portable sprinkler irrigation systems in Markazi Province. *Iranian Water Researches Journal*, 14(1), 9-18. (In Persian) https://iwj.sku.ac.ir/article_10684.html?lang=en
- Bavi, A., Kashkuli, H., Boroomand, S., Naseri, A., & Albaji, M. (2009). Evaporation losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. *Journal of Applied Sciences*, 9(3), 597-600. <http://www.scialert.net/qredirect.php?doi=jas.2009.597.600&linkid=pdf>
- Delirhasannia, R., Nazemi, A., Sadraddini, A. and Farsadizadeh, D. (2014). Wind Drift and Evaporation Losses Model in Spray Nozzles of Center Pivot Irrigation system. *Water and Soil Science*, 21(1), 1-14. (In Persian) https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1241.html
- Dylla, A., & Shull, H. (1983). Estimating losses from a rotating-boom sprinkler. *Transactions of the ASAE*, 26(1), 123-0125. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33887>
- EP496, A. S. A. E. (2006). 3. Agricultural Machinery Management. *ASAE Standard*, 384-390. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASABE/ASAEEP496FEB2006R2015Cor?source=preview>
- Erfanian Arghavanian Soroushri, M., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., Ansari, H., & Baghani, J. (2008). Study of the potential effects of evaporation and wind drift on the efficiency of sprinkler irrigation systems in the plains of Razavi, North, and South Khorasan provinces. *Journal of Agricultural Science and Industries*, 22(1), 161–172. (In Persian) https://www.researchgate.net/publication/277797904_
- Faci, J., & Bercero, A. (1991). Efecto del viento en la uniformidad en las perdidas por evaporacion y arrastre en el riego por aspersion. *Investigación agraria. Producción y protección vegetales*, 6(2), 171-182. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6533523>
- Faryabi, A., Maroufpoor, E., & Ghamarnia, H. (2011). Investigation and evaluation of solid-set systems in Dehgolan Plain of Kurdistan. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 14(54), 1-16. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0>
- Frost, K.R. & H.C. Schwalen. (1955). Sprinkler evaporation losses. *Agricultural Engineering*, 36, 526-528. <https://www.semanticscholar.org/paper/Sprinkler-Evaporation-Losses-Schwalen-Frost/a3685020d207512d7d756d01de4ae5383627dbce>
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Sohrabi, T., Rasoulzadeh, A., Nazari, B., & Liaghat, A. (2016). Performance evaluation of center pivot systems in Moghan Agro-Industry and Livestock. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 723-729. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.59979>
- Hazaveh, F. B. (2005). Technical evaluation of pressurized irrigation systems implemented in Arak City (Unpublished master's thesis). Faculty of Water Science and Engineering, *Arak University*, Arak, Iran.

- Hendawi, M., Molle, B., Folton, C., & Granier, J. (2005). Measurement accuracy analysis of sprinkler irrigation rainfall in relation to collector shape. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(5), 477-483.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:5\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(477))
- Hoseini, Y., Raouf, M., & Nazari-Gigloo, F. (2020). Evaluation and Modeling Wind drift and Evaporation Losses of the Center Pivot Irrigation System in Moghan Region. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 109-127. (In Persian)
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302>
- Karimi, B., Mohammadi Nasab, A., & Abdi, C. (2016). Evaluation of Evaporation and Wind drift Losses at Day and Night Sprinkler Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1), 128-135. (In Persian) https://idj.iaid.ir/article_55275_en.html
- Keller, J. (1983). SCS national engineering handbook Section 15. *US Government Office Publications, Washington, DC*.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/SCS_national_engineering_handbook_%28IA_CAT71334647011%29.pdf
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). Sprinkle and trickle irrigation, Springer Publications, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=599708>
- Kiani, A. R., Shaker, M. and Tabarsa, R. (2018). Assessment of implemented sprinkler irrigation systems in Golestan province.. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 257-270. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12201.2670>
- King, B., Dungan, R., & Bjorneberg, D. (2012). Evaluation of center pivot sprinkler wind drift and evaporation loss. 2012 Dallas, Texas, United states.
<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=41716>
- Kinzer, G. D., & Gunn, R. (1951). The evaporation, temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops. *Journal of Atmospheric Sciences*, 8(2), 71-83.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1951\)008%3C0071:TETATR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1951)008%3C0071:TETATR%3E2.0.CO;2)
- Luz, P., & Heermann, D. (2005). A statistical approach to estimating runoff in center pivot irrigation with crust conditions. *Agricultural Water Management*, 72(1), 33-46.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.013>
- Majdsalimi, K., Salavatian, B., & Amiri, E. (2015). Technical Evaluation of Sprinkler Irrigation Systems which were Implemented in Tea Fields of the Guilan Province. *Water and Soil*, 29(2), 336-349. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29497>
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., & Khaledi, M. (2019). Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*, 223, 105691. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105691>
- Maroufpoor, E., Sanikhani, H., Emamgholizadeh, S., & Kişi, Ö. (2018). Estimation of Wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation systems by different data-driven methods. *Irrigation and drainage*, 67(2), 222-232.
<https://doi.org/10.1002/ird.2182>
- Maroufpoor, S., Shiri, J., & Maroufpoor, E. (2019). Modeling the sprinkler water distribution uniformity by data-driven methods based on effective variables. *Agricultural Water Management*, 215, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.008>
<https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/5d5ba6df2999520e90d04554?lang=gl>
- Mirbalooch, M. H., Delbari, M., & Piri, H. (2020). Evaluation of performance of classical sprinkler irrigation systems with mobile sprinkler in Khash city. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 31-44. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2020.292131.732>
- Mohamadi, M., Azizi mobaser, J., & Raouf, M. (2020). Technical Evaluation of Movable Sprinkler Solid-Set Irrigation Systems in Ardabil Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(3), 335-373. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.342287.771>

- Mohamed, A. E., Hamed, A. M. N., Ali, A. A. M., & Abdalhi, M. A. (2019). Effect of Weather Conditions, Operating Pressure and Riser Height on the Performance of Sprinkler Irrigation System. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 12(1), 01-09. <http://dx.doi.org/10.9790/2380-1201010109>
- Mohamed, A. Z., Peters, R. T., Sarwar, A., Molaei, B., & McMoran, D. (2021). Impact of the intermittency movement of center pivots on irrigation uniformity. *Water*, 13(9), 1167. <https://doi.org/10.3390/w13091167>
- Moulaee, Z., maroufpoor, E. and maleki, A. (2016). Investigation and technical evaluation of solid set sprinkler irrigation systems in Koohdasht plain. *Iranian Water Researches Journal*, 10(2), 125-132. (In Persian) https://iwrij.sku.ac.ir/article_10486.html?lang=en
- Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M., & Granier, J. (2012). Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. *Irrigation and Drainage*, 61(2), 240-250. <https://doi.org/10.1002/ird.648>
- Montero Martínez, J. (1999). Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (sirlas). Colección Tesis Doctorales N°103. Ediciones Universidad de Castilla La Mancha, España. <https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/5d5ba6df2999520e90d04554?lang=gl>
- Naseri, A., Abbasi, F., & Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 17-32. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
- Playán, E., Garrido, S., Faci, J., & Galán, A. (2004). Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. *Agricultural Water Management*, 70(3), 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.004>
- Playán, E., & Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 82(1-2), 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
- Playán, E., Salvador, R., Faci, J., Zapata, N., Martínez-Cob, A., & Sánchez, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, 76(3), 139-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.01.015>
- Rahmat Abadi, V., Boroomand Nasab, S. Sakhaeerad, H. Bavi, A. (2012). Evaporation and Wind Drift Losses for Two Types of Sprinklers With one and Three Nozzles in Solid Set Systems in Ahwaz Climate Conditions, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 6(4), 265. (In Persian) <https://www.sid.ir/paper/131412/en>
- Raof, M., Hosseini, Y., & Nazari-Gigloo, F. (2018). Evaluation of classic semi-permanent sprinkler system and modeling evaporation losses and wind drift in ADF 25° nozzle sprinkler model in Moghan region. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(4), 117-134. (In Persian) <https://sanad.iau.ir/en/Journal/wsrcj/Article/828917>
- Rostamian, B., Maroufpoor, E., Azarboo, N. and Farzankia, F. (2014). Investigation of The Effect Hydraulic and Atmospheric Factors on the Evaporation and Wind Draft Losses in The Fixed Head Sprinkle Irrigation System. *Water and Soil*, 28(4), 661-669. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29061>
- Sadeghi, S.-H., Peters, T. R., Amini, M. Z., Malone, S. L., & Loescher, H. W. (2015). Novel approach to evaluate the dynamic variation of wind drift and evaporation losses under moving irrigation systems. *Biosystems Engineering*, 135, 44-53. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.011>
- Salemi, H., & Rezvani, S. (2016). Technical evaluation of sprinkler irrigation system on farm (Isfahan and Hamadan Provinces). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 345-350. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>

- Sanchez, I., Faci, J., & Zapata, N. (2011). The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. *Agricultural Water Management*, 102(1), 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.002>
- Santos, F. L., Reis, J. L., Martins, O. C., Castanheira, N. L., & Serralheiro, R. P. (2003). Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystems Engineering*, 86(3), 355-364. https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/6036/1/BiosysEng_Santos_compartive%20assessment.pdf
- Sarwar, A., Peters, R. T., & Mohamed, A. Z. (2020). Linear mixed modeling and artificial neural network techniques for predicting wind drift and evaporation losses under moving sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science*, 38, 177-188. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00659-x>
- Sarwar, A., Peters, R. T., Shafeeque, M., Mohamed, A., Arshad, A., Ullah, I., Saddique, N., Muzammil, M., & Aslam, R. A. (2021). Accurate measurement of wind drift and evaporation losses could improve water application efficiency of sprinkler irrigation systems— A comparison of measuring techniques. *Agricultural Water Management*, 258, 107209. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v258y2021ics0378377421004868.html>
- Seyedzadeh, A., Khazaei, P., Siosemardeh, A., & Maroufpoor, E. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 303-312. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470>
- SioseMoradeh, M., Maroof, M., & Bayzidi, M. (2011). *Technical evaluation of fixed classic sprinkler irrigation systems: A case study in Mahabad, West Azerbaijan Province*. *Journal of Water Resources Engineering*, 4(8), 63–76. (In Persian) <https://www.magiran.com/p869893>
- Solomon, K. H. (1988). Irrigation systems and water application efficiencies. *California State University, Fresno, California*, 93740-90018. https://www.researchgate.net/profile/Terry-Howell/publication/43256707_Irrigation_Efficiency/links/566ec91c08aea0892c52a91c/Irrigation-Efficiency.pdf
- Tetens, O. (1930). Uber einige meteorologische Begriffe. *Environmental Science*, 130074018. <https://www.semanticscholar.org/paper/Uber-einige-meteorologische-begriffe-Tetens/33b71d32374b7572d1399fcac74ef7fb9a40a9ef>
- Thompson, A., Gilley, J., & Norman, J. (1993). A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: II. Model application. *Transactions of the ASAE*, 36(3), 743-750. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=28393>
- Thompson, A. L., Martin, D. L., Norman, J. M., Tolk, J. A., Howell, T., Gilley, J., & Schneider, A. (1997). Testing of a water loss distribution model for moving sprinkler systems. *Transactions of the ASAE*, 40(1), 81-88. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=21251>
- Trimmer, W. L. (1987). Sprinkler evaporation loss equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 113(4), 616-620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1987\)113:4\(616\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1987)113:4(616))
- Yamin-Moshrefi, G. , Maroufpoor, I. , Ghamarnia, H. and Faryabi, A. (2010). Determination of the best fit function for uniformity coefficient and distribution uniformity of sprinkler irrigation systems in Dehgolan Plain of Kurdistan. *Iranian Water Researches Journal*, 4(1), 95-97. (In Persian) https://iwj.sku.ac.ir/article_10819.html?lang=en
- Yan, H., Bai, G., He, J., & Li, Y. (2010). Model of droplet dynamics and evaporation for sprinkler irrigation. *Biosystems Engineering*, 106(4), 440-447. <https://www.researchgate.net/publication/248597947>

- Yazar, A. (1984). Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. *Agricultural Water Management*, 8(4), 439-449. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378377484900702>
- Yonts, C. D., Kranz, W. L., & Martin, D. L. (2000). Water loss from above-canopy and in-canopy sprinklers. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, *University of Nebraska-Lincoln*, Lincoln, NE, USA. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1328/water-loss-from-above-canopy-and-in-canopy-sprinklers>
- Zamanisepahvand, S., Torabi, H., & Nasrolahi, A. (2023). Estimation of Wind Drift and Evaporation Losses of Sprinkler Irrigation Systems under the Influence of Different Exploitation Managements (Case Study: Choghahoroshi Khorramabad Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1), 129-141. (In Persian) https://idj.iaid.ir/article_168111_en.html
- Zapata, N., Playán, E., Martínez-Cob, A., Sánchez, I., Faci, J., & Lecina, S. (2007). From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management*, 87(2), 187-199. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377406002071>
- Zare Abyaneh, H., Danaii, A., Akhavan, S. and Jovzi, M. (2020). Performance evaluation of new irrigation systems in Hamedan. *Water and Irrigation Management*, 10(3), 381-395. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784>



Investigating the effect of shallow and saline groundwater on meeting water needs and its impact on the yield of *Moringa oleifera* tree in greenhouse and field environments

Zahra Goorani¹ , Houshang Ghamarnia^{2✉} , Bahman Farhadi Bansouleh³ , and Issa Arji⁴ 

1. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: Z.goorani@razi.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: bfarhadi2001@yahoo.com
4. Department of Plant Production and Genetics of Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: issaarji@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 21 June 2025
Received in revised form 04
October 2025
Accepted 21 December 2025
Available online 21 March
2026

Keywords:

groundwater,
Moringa oleifera,
semi-arid climate,
saline,
shallow.

ABSTRACT

Objective: This study examined the impact of shallow saline groundwater on water supply and the yield of *Moringa oleifera* during the 1402–1403 growing seasons at Razi University.

Method: This research was conducted in a completely randomized factorial design with three replications. The treatments applied included groundwater with salinity levels of 1 (water of the study area), 2, 6, and 10 dSm⁻¹ at three water table depths of 0.6, 0.8, and 1.1 m.

Results: In both greenhouse and field conditions, groundwater contribution to plant water use increased as groundwater depth decreased at all salinity levels; the highest dry leaf, calcium, and iron yields were obtained at 1 dS m⁻¹ salinity and 0.6 m depth, while the lowest were at 10 dS m⁻¹ and 1.1 m, whereas nitrogen content showed the opposite trend.

Conclusions: The results indicate that the closer the groundwater is to the soil surface (shallow groundwater), the easier it is for plants to use this source, allowing them to meet a greater percentage of their water needs through groundwater. However, in none of the treatments was the plant's water requirement 100% met through groundwater. The results obtained in this study also indicate the significant effects of different groundwater depths and their quality on dry leaf yield, calcium, iron, and nitrogen in the greenhouse and research field environments.

Cite this article: Goorani, Z., Ghamarnia, H., Farhadi Bansouleh, F., & Arji, I. (2026). Investigating the effect of shallow and saline groundwater on meeting water needs and its impact on the yield of *Moringa oleifera* tree in greenhouse and field environments. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 102-125. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12347.1174>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12347.1174>

Publisher: Razi University.

Introduction

Rising global population and increasing water demand—especially in arid and semi-arid regions—have intensified pressure on limited freshwater resources, making the use of saline water in agriculture increasingly necessary. In Iran, agriculture is the largest water consumer, and excessive groundwater extraction has led to severe aquifer depletion and declining water quality. A significant portion of groundwater and surface water used in agriculture is saline, while large areas of cultivable land are affected by soil salinity. Combined with climate change, recurrent droughts, inefficient irrigation, and poor water management, these factors have deepened the country's water crisis.

Globally, freshwater scarcity is also escalating, with billions lacking access to safe water and many countries experiencing water stress. Given Iran's low annual rainfall and high evaporation rates, improving water productivity and adopting salt- and drought-tolerant crops are critical for sustainable agriculture and food security.

Moringa oleifera is a multipurpose, nutrient-rich plant whose leaves, flowers, pods, and seeds have food, medicinal, and oil-producing value. Due to its tolerance to harsh conditions and high nutritional content, it is considered a promising crop for water-limited and saline environments. Therefore, this study investigates the performance of *Moringa oleifera* under salinity stress caused by shallow saline groundwater, aiming to identify suitable management strategies to enhance yield and water-use efficiency under such conditions.

Method

This research was designed and implemented as a completely randomized factorial experiment with three replications in order to ensure adequate precision, reduce experimental error, and allow for a robust statistical evaluation of treatment effects. The factorial arrangement enabled the simultaneous investigation of multiple factors and their possible interactions under controlled conditions. The experimental treatments consisted of two main factors: groundwater salinity and water table depth. Groundwater salinity was applied at four distinct levels: 1 dS m⁻¹, 2 dS m⁻¹, 6 dS m⁻¹, and 10 dS m⁻¹. The 1 dS m⁻¹ treatment represented the natural groundwater quality of the study area and served as the control condition. The higher salinity levels (2, 6, and 10 dS m⁻¹) were selected to represent increasing degrees of salinity stress, ranging from slight to severe, in order to simulate conditions commonly encountered in arid and semi-arid regions where groundwater salinization poses a significant limitation to agricultural productivity. The second experimental factor was water table depth, which was maintained at three levels: 0.6 m, 0.8 m, and 1.1 m below the soil surface. These depths were selected to represent shallow, moderate, and relatively deep groundwater conditions, respectively. The variation in water table depth allowed for the assessment of capillary rise potential, salt accumulation in the root zone, and the overall influence of groundwater proximity on soil–plant–water interactions.

By combining the four salinity levels with the three water table depths in a full factorial arrangement, a total of 12 treatment combinations were established. Each treatment was replicated three times, resulting in 36 experimental units. The completely randomized allocation of treatments minimized systematic bias and ensured that any observed differences among treatments could be attributed to the experimental factors rather than environmental variability. This experimental design made it possible to evaluate not only the main effects of groundwater salinity and water table depth independently, but also their interaction effects. In particular, it enabled the investigation of whether the impact of salinity on the measured variables was

influenced by groundwater depth, and vice versa. Such an approach provides a comprehensive understanding of the combined effects of salinity stress and groundwater dynamics, which is essential for developing sustainable water and soil management strategies in salt-affected environments.

Results

In greenhouse and field environments with shallow groundwater depth, the percentage of groundwater contribution to meeting plant water needs increased at all four salinity levels with decreasing groundwater depth, the results also showed that regarding to dry leaf yield in the greenhouse and research field environment, the lowest yield was related to treatments with salinity of 10 dSm^{-1} and groundwater depth of 1.1 m, and the highest yield was related to treatments with salinity of 1 dSm^{-1} and depth of 0.6 m. Results also showed that the nitrogen content in leaf extracts in the greenhouse and field environments was the lowest and highest values related to the salinity and depth treatments (1 dSm^{-1} , 0.6 m) and (10 dSm^{-1} , 1.1 m), respectively. In general, the results of the study showed that regarding to calcium and iron yield in the greenhouse and research field environments, the lowest and highest yield in leaf extract were related to salinity and depth (10 dSm^{-1} , 1.1 m) and (1 dSm^{-1} , 0.6 m), respectively.

Conclusions

The results indicate that the closer the groundwater is to the soil surface (shallow groundwater), the easier it is for plants to use this source, allowing them to meet a greater percentage of their water needs through groundwater. However, in none of the treatments was the plant's water requirement 100% met through groundwater. The results obtained in this study also indicate the significant effects of different groundwater depths and their quality on dry leaf yield, calcium, iron, and nitrogen in the greenhouse and research field environments.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical Considerations

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

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی تأثیر آب زیرزمینی کم عمق و شور در تأمین نیاز آبی و تأثیر بر محصول درخت مورینگا اولیفر (Moringa Oleifera) در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی

زهرا گورانی^۱، هوشنگ قمرنیا^۲، بهمن فرهادی بانسوله^۳، و عیسی ارجی^۴

۱. گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: Z.goorani@razi.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: bfarhadi2001@yahoo.com

۴. گروه علوم و مهندسی باغبانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: issaarji@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: در این مطالعه به بررسی اثر آب زیرزمینی کم عمق و شور در کمک به تأمین نیاز آبی گیاه مورینگا اولیفر و تأثیر آن بر محصول این گیاه در دو سال زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ با استفاده از میکرو لایسیمتر در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی پرداخته شد.

روش پژوهش: این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل و در سه تکرار انجام شد که تیمارهای اعمال شده شامل آب زیرزمینی با سطوح شوری ۱ (آب منطقه مورد مطالعه)، ۲، ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر در سه عمق سطح ایستابی ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر بود.

یافته ها: نتایج نشان داد که در محیط های گلخانه و مزرعه تیمارهای با عمق آب زیرزمینی کم، درصد مشارکت آب زیرزمینی در تأمین نیاز آبی گیاه در هر ۴ سطح شوری با کاهش عمق آب زیرزمینی، افزایش پیدا کرده است همچنین نتایج نشان داد که عملکرد برگ خشک در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی، کمترین عملکرد برگ خشک مربوط به تیمارهای با شوری ۱۰ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر و بیشترین عملکرد مربوط به تیمارهایی با شوری ۱ دسی زیمنس بر متر و عمق ۰/۶ متر است، همچنین نتایج نشان داد که در محیط های گلخانه و مزرعه کمترین و بیشترین محتوی ازت در عصاره برگ ها به ترتیب مربوط به تیمار با شوری و عمق (۱ دسی زیمنس بر متر، ۰/۶ متر) و (۱۰ دسی زیمنس بر متر، ۱/۱ متر) بوده است. به طور کلی نتایج پژوهش نشان داد که در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی کمترین و بیشترین میزان عملکرد کلسیم و آهن در عصاره برگ ها به ترتیب مربوط به شوری و عمق (۱۰ دسی زیمنس بر متر، ۱/۱ متر) و (۱ دسی زیمنس بر متر، ۰/۶ متر) بوده است.

نتیجه گیری: نتایج نشانگر آن است که هر چه آب زیرزمینی فاصله کمتری تا سطح خاک داشته باشد (آب زیرزمینی کم عمق) به علت آسان تر بودن استفاده از این منبع گیاه می تواند درصد بیشتری از نیاز آبی خود را از طریق آب زیرزمینی تأمین نماید. اما در هیچ کدام از تیمارها نیاز آبی گیاه صد درصد از طریق آب زیرزمینی تأمین نشده است. همچنین نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان دهنده معنی دار بودن اثرات عمق های مختلف آب زیرزمینی و کیفیت آن بر عملکرد برگ خشک، کلسیم، آهن و ازت در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه ها:

آب زیرزمینی،

مورینگا اولیفر،

اقلیم نیمه خشک،

شور،

کم عمق.

استناد: گورانی، زهرا؛ قمرنیا، هوشنگ؛ فرهادی بانسوله، بهمن؛ و ارجی، عیسی. (۱۴۰۵). بررسی تأثیر آب زیرزمینی کم عمق و شور در تأمین نیاز آبی و تأثیر بر محصول درخت مورینگا اولیفر (Moringa Oleifera) در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۶ (۱)، ۱۲۵-۱۰۲.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12347.1174>

© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.



مقدمه

روند صعودی تقاضای آب به تبعیت از افزایش روزافزون جمعیت بشری در مناطقی از جهان که شدت نیاز به آب به دلیل شرایط اقلیمی حاکم بر آن، در حد بالایی است و با توجه به تقاضای زیادی که در مصرف آب وجود دارد و عدم تناسب این نیاز با میزان آب شیرین موجود، لزوم بررسی و استفاده از آب‌های شور در امر آبیاری در بخش کشاورزی را بیش از پیش آشکار می‌کند. به نظر می‌رسد در آینده‌ای نه چندان دور به سبب اعتبار و ارزشی که آب خصوصاً در بخش کشاورزی پیدا خواهد نمود (هم‌اکنون به دلیل نبود انگیزه اقتصادی در مصرف آب ارزش واقعی خود را نیافته است)، امکانات بیشتر و مدیریت‌های بهتری در نیل به هدف فوق معطوف شود. بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب است که بر اثر اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی، حجم کسری آبخوان‌های کشور در سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱، بیش از ۳۵۰ میلیارد مترمکعب برآورد شده است (زندپارسا و همکاران^۱، ۲۰۲۴). تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌ها حاکی از این واقعیت است که متأسفانه در اکثر دشت‌های ایران که کاربری کشاورزی دارند، برداشت بیش از حد و ظرفیت آبخوان از چاه‌ها، ضریب آسیب‌پذیری آبخوان و احتمال بروز مشکلات آبی را افزایش می‌دهد (فرمانی‌فرد و همکاران، ۱۴۰۱). وسعت و پراکنش خاک‌های شور در کشورمان بسیار گسترده است، از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی قابل کاشت ۲۴ میلیون هکتار آن را خاک‌های شور تشکیل می‌دهند (رحیمیان و غلامی، ۱۴۰۱). بنابراین از آن جا که منابع آبی باکیفیت مطلوب برای آبیاری محصولات در جهان کم است لذا، استفاده از آب‌های شور و کمی شور برای کشاورزی امری ضروری بوده و استفاده از ارقام مقاوم به شوری در حال حاضر یکی از مهمترین روش‌های موثر در بهره‌برداری از آب‌های شور است. مناطقی که تحت تاثیر شوری آب و خاک قرار دارند، به طور کامل و دقیق شناخته نشده‌اند، ولی آنچه مسلم است این مناطق از وسعت زیادی برخوردار می‌باشند. بررسی بر روی ۴۴/۵ میلیارد مترمکعب آب‌های زیرزمینی مورد استفاده در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که از نظر حجمی حدود ۳۱٪ از این منابع (معادل ۱۳/۸ میلیارد مترمکعب) دارای شوری‌های بالای ۲ دسی‌زیمنس بر متر (با سطوح مختلف شوری) می‌باشند. از این بین حدود ۷/۵ میلیارد مترمکعب در کلاس شوری ۲-۴ دسی‌زیمنس بر متر، حدود ۴/۳ میلیارد مترمکعب در کلاس شوری ۴-۸ دسی‌زیمنس بر متر، حدود ۱/۳ میلیارد مترمکعب در کلاس شوری ۸-۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، حدود ۰/۴ میلیارد مترمکعب در کلاس شوری ۱۲-۱۶ دسی‌زیمنس و حدود ۰/۲ میلیارد مترمکعب در کلاس با شوری بالای ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر به مصرف کشاورزی می‌رسد. در خصوص کلاس شوری در آب‌های سطحی بررسی‌ها نشان داده است که در حدود ۱۰/۷ میلیارد مترمکعب (معادل ۱۱٪ از کل جریانهای سطحی کشور) شوری بیشتر از ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر دارند (رحیمیان و غلامی، ۱۴۰۱). در خصوص دلایل شور شدن منابع آب زیرزمینی، عوامل طبیعی نظیر توپوگرافی، زمین شناسی و میزان تغذیه توسط بارش و در کنار آن‌ها، سوء مدیریت برداشت آب از سفره‌ها، از مهمترین عوامل هستند. در این خصوص می‌توان گفت که تقریباً تمام عوامل موثر در بروز بحران آب کشور، در افت کیفی آب‌های زیرزمینی دهه‌های اخیر کشور موثر بوده‌اند (رحیمیان و غلامی، ۱۴۰۱). با توجه به مباحث گفته شده در می‌یابیم که کشور خشک و نیمه‌خشک ایران به دلایلی نظیر برنامه‌های توسعه اقتصادی، کشاورزی ناکارآمد (راندمان پایین) تغییر اقلیم و خشکسالی‌های پیاپی و به‌تبع آن تغییر ویژگی‌های مکانی و زمانی بارش و محدود کردن منابع آب‌های تجدیدپذیر از طریق حفر چاه‌های غیر مجاز، با بحران شدید آب روبروست (کرباسی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). از طرفی بررسی‌ها نشانگر آن هستند که بیش از ۹۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر در کشور در بخش کشاورزی مصرف شده اما به دلیل راندمان پایین آبیاری، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر در بخش کشاورزی هدر رفته و باعث کاهش بهره‌وری آب کشاورزی شده است (مغربی و همکاران^۲، ۲۰۱۰؛ فرامرزی و همکاران^۳، ۲۰۱۹؛ میرزایی و همکاران^۴، ۲۰۲۰).

1 . Zand-Parsa et al
 2 . Maghrebi et al
 3 . Faramarzi et al
 4 . Mirzaei et al

عوامل مختلفی نظیر مدیریت ضعیف، تغییرات آب و هوایی، خشکسالی های پی در پی، رشد جمعیت، افزایش تقاضا و به تبع آن افزایش مصرف آب در دهه های اخیر، موجب کمبود شدید منابع آب شیرین در سراسر جهان گردیده است (صالحی^۱، ۲۰۲۰). بر اساس گزارش یونیسف و سازمان بهداشت جهانی، در سراسر جهان حدود ۲/۲ میلیارد نفر به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند (سازمان بهداشت جهانی^۲، ۲۰۱۹؛ یونیسف^۳، ۲۰۱۹). هم اکنون بیش از ۴۳ کشور جهان سطوح مختلفی از تنش آبی را تجربه می کنند. سازمان ملل متحد هشدار داده است که اگر جهان به مصرف آب با نرخ فعلی ادامه دهد، تقریباً ۶ میلیارد نفر در جهان تا سال ۲۰۵۰ با کمبود آب مواجه خواهند شد (WWAP، ۲۰۱۵؛ فائو^۴، ۲۰۰۷؛ بورتی و رزا^۵، ۲۰۱۹). کشور ما به دلیل کمبودن ریزش های با متوسط بارندگی ۲۲۱ میلی متر در سال (حدود یک سوم متوسط جهانی) و تبخیری معادل سه برابر متوسط جهانی در زمره کشورهای خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد و همچون سایر کشورهای جهان از این قاعده و بحران مستثنی نخواهد بود (مرزبان و همکاران، ۱۳۹۸؛ قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به نکات گفته شده در راستای تأمین امنیت غذایی این جمعیت در حال رشد، یافتن راهکارهایی برای غلبه بر کمبود آب در ایران بیش از پیش ضروری است و باید جز اولویت های مطالعاتی و پژوهشی محققین باشد (قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۹). حال سؤال اینجاست برای مقابله با تنش آبی و کاهش مصرف آب چه باید کرد؟ چه راهکارهای مدیریتی کارآمد است؟ کشت چه نوع محصولاتی جهت بهره وری بیشتر آب (مصرف کمتر آب برای تولید مقدار مشخصی از محصول) پیشنهاد می شود؟ آیا می توان از آب هایی با کیفیت پایین تر یا اراضی شور و ماندابی استفاده کرد یا خیر؟

مویبگی اولیفر درختچه ای است با خواص فراوان، به طوری که از تمامی قسمت های گیاه برای مصارف گوناگون می توان استفاده نمود. از برگ های مویبگی اولیفر برای افزایش سوخت و ساز بدن و در نتیجه کاهش وزن بدن استفاده می شود؛ زیرا مویبگی انرژی بدن را بدون قند فراهم می کند. برگ های تازه، گل ها و میوه جوان آن همانند سبزی مصرف غذایی دارند. برگ های این درخت سرشار از ویتامین ها، مواد معدنی و پروتئین هاست. دانه های درخت مویبگی اولیفر سرشار از کلسیم و آهن است و فسفر آن پایین است.

با توجه به اینکه ایران با بحران و کمبود شدید آب روبروست، لذا باید ترویج و کشت گونه هایی از گیاهان با بهره وری مصرف آب بیشتر و مقاوم به شوری و خشکی بیشتر مورد توجه قرار گیرد؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده تا ضمن معرفی درخت مورینگا اولیفر (Moringa Oleifera) به عنوان یک گیاه دارویی که علاوه بر مصرف دارویی دارای دانه های روغنی است و همچنین می توان به عنوان منبع غنی پروتئین از برگ و ساقه های جوان آن در علوفه استفاده کرد، به بررسی تأثیر آبیاری با آب های زیرزمینی کم عمق و شور بر عملکرد و پارامترهای گیاهی آن پرداخته شود؛ لذا هدف از این پژوهش بررسی عملکرد درخت مورینگا اولیفر در مقابل تنش های شوری ناشی از آب زیرزمینی کم عمق به منظور ارائه راهکار مناسب جهت کشت این محصول در راستای افزایش عملکرد محصول و بهره وری منابع آب موجود است.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باتوجه به بررسی منابع تا کنون تحقیقی در این زمینه بر روی درخت مورینگا اولیفر انجام نشده است، اما در این قسمت به چند مورد از تحقیقاتی که بر روی سایر گیاهان انجام شده است اشاره شده است.

لیو و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه ای به بررسی میزان تأثیر آب زیرزمینی کم عمق (سطح ایستابی بین ۰/۸۵ تا ۲/۲۵ متر با هدایت الکتریکی ۳/۱۰ تا ۴/۶۹ دسی زیمنس بر متر) در تأمین نیاز آبی گیاه ذرت (دو مجموعه لایسیمتر کشت شده در حوضه رودخانه زرد^۶) پرداختند. نتایج نشان داد که سطوح کم عمق آب زیرزمینی شور به آب آبیاری کمتری نیاز دارد (سهام مشارکت آب زیرزمینی در تأمین نیاز آبی ذرت از ۳۷٪ تا ۱۱٪ نیاز آبی گیاه) اما شوری تأثیرات زیادی بر رشد و عملکرد محصول دارد. هان و

- 1 . Salehi
- 2 . WHO
- 3 . UNICEF
- 4 . FAO
- 5 . Boretta & Rosa
- 6 . Liu et al
- 7 . Yellow River

همکاران^۱ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی الگوی جذب آب شور توسط گیاهان غیرهالوفیت (به صورت موردی درختان ملخ یا افاقای سیاه با نام علمی (*Gleditsia triacanthos*)) پرداختند. نتایج نشان داد آب زیرزمینی عمق ۰-۲۰ سانتی متری، ۲۹/۴٪ و آب زیرزمینی عمق ۱۲۰-۱۸۰ سانتی متری ۲۴/۷٪ در تأمین نیاز آبی گیاه مشارکت داشته است. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که عوامل موثر در الگوی جذب آب، تعرق، پوشش گیاهی و شوری خاک است. همچنین نتایج نشان داد که تجمع املاح در لایه پایین خاک (۶۰-۱۲۰ سانتی متری) مانع از جذب آب توسط گیاه ملخ میشود. قمرنیا و جلیلی^۲ (۲۰۲۴) در پژوهشی به بررسی کمک آب زیرزمینی به تبخیر و تعرق و عملکرد محصول گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa L.*) پرداختند. تیمارهای مورد بررسی در این آزمایش شامل سه سطح ایستابی آب زیرزمینی کم عمق با اعماق ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر و سه سطح شوری ۱، ۲ و ۴ دسی زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که درصد مشارکت آب زیرزمینی برای شوری ۱ دسی زیمنس بر متر در اعماق ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر در حدود ۴۵/۷۵، ۵۵/۰، ۶۷/۲۵ درصد، شوری ۲ دسی زیمنس بر متر در اعماق ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر به ترتیب در حدود ۴۱/۵، ۵۰/۰، ۶۰/۷۵ درصد و شوری ۴ دسی زیمنس بر متر در اعماق ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متری به ترتیب در حدود ۴۳/۵۰، ۵۴/۲۵، ۶۳/۵۰، ۳۶/۰ درصد نیاز کلی گیاه بود. قمرنیا و همکاران^۳ (۱۳۹۹) در پژوهشی با هدف بررسی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد محصول استویا، تیمارهای آبیاری شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ (تیمار شاهد) درصد نیاز آبی گیاه را در نظر گرفته و آزمایش را در سه تکرار در محیط‌های مزرعه و گلخانه در دو سال متوالی انجام دادند و یافته‌های تحقیق نشان داد که آستانه تحمل استویا برای جلوگیری از کاهش عملکرد برگ و قند نسبت به کم آبیاری، در محیط مزرعه در دو سال کشت برای کاهش عملکرد برگ (۳/۱ و ۳/۳) و کاهش عملکرد قند (۱/۱۲ و ۰/۹۸) و در محیط گلخانه برای کاهش عملکرد برگ (۳/۲ و ۳/۱) و کاهش عملکرد قند (۰/۹۴) و (۰/۸۳) درصد کم آبیاری است. قمرنیا و همکاران^۴ (۲۰۱۱) با مطالعه ۳ سطح ایستابی ۶۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی متری و شوری آب زیرزمینی ۱۰ دسی زیمنس بر متر روی گیاه گلرنگ دریافتند که بیشترین و کمترین میزان مشارکت آب زیرزمینی برای تیمارهای مختلف تقریباً بین ۲/۷۲ تا ۶۹/۴۰ درصد از کل آب مورد استفاده در طول فصل رشد گیاه گلرنگ بود. بخش اعظم مشارکت آب زیرزمینی در تیمارهایی با سطوح عمیق‌تر آب زیرزمینی و آبیاری کامل به دست آمد. در تیمارها با اعماق ۶۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی متری و بدون آبیاری سطحی کاهش قابل توجهی در میزان مشارکت آب زیرزمینی به میزان ۹، ۹ و ۷ درصدی در مقایسه با تیمارها همراه با آبیاری سطحی مشاهده شد.

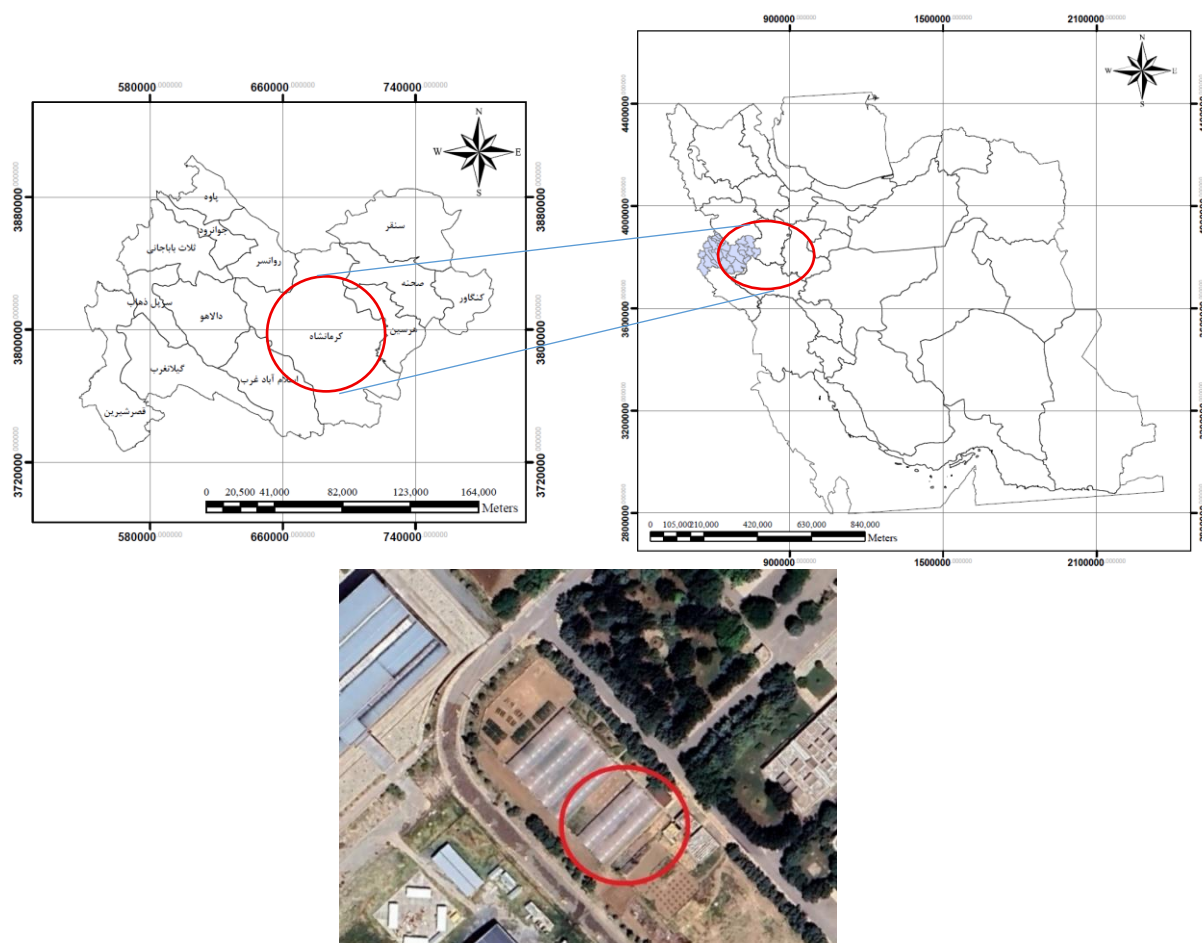
گوینگ و همکاران^۴ (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر شوری بر بهره‌وری آب در محصول گندم تحت آبیاری تکمیلی با آب شور و آب‌های زیرزمینی کم عمق با شوری بالاتر پرداختند. در این پژوهش در مجموعه‌ای از لایسیمیترها، با سطح آب زیرزمینی کنترل شده با سطوح شوری ۲ تا ۸ دسی زیمنس بر متر در عمق ۱/۰ متر در شرایطی که تبخیر بالا بود (بیش از ۵ میلیمتر در روز)، آبیاری تکمیلی با شوری در محدوده ۱ تا ۴ دسی زیمنس بر متر اعمال شد. نتایج نشان داد که افزایش شوری باعث کاهش جذب آب کل توسط محصول می‌شود اما در اکثر تیمارها، گندم ۴۰ درصد آب مورد نیاز خود را از آب‌های زیرزمینی استخراج کرد.

روش پژوهش

۱. مشخصات منطقه مورد پژوهش

این طرح در محیط گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، با مختصات ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۳۱۹/۸ متر از سطح دریاهای آزاد، در دو سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ انجام شد. بر اساس طبقه بندی اقلیمی دمازن شهرستان کرمانشاه دارای اقلیم نیمه خشک سرد می‌باشد. شکل شماره ۱ موقعیت انجام پژوهش در کشور، استان و دانشکده کشاورزی را نشان می‌دهد.

1. Han et al
2. Ghamarnia and Jalili
3. Ghamarnia et al
4. Gowing et al



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲. گلخانه و مزرعه تحقیقاتی و تشریح روش کار

جهت انجام آزمایش در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی، هر محیط از ۳۶ عدد لایسمتر پلی اتیلنی به قطر خارجی ۴۰۰ میلیمتر به ارتفاع ۱/۵ متر استفاده شد که با خاک همان منطقه که از الک ۲ میلیمتری گذرانده شده بود، پر شدند. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. انتهای همه لایسمترها با رینگ و فلنچ کور کاملاً آب‌بندی شدند تا از خروج آب جلوگیری شود. یک لایه ۱۰ سانتی‌متری شن و ماسه کف لایسمترها ریخته شد پس از آماده سازی لایسمترها، خاک هر لایسمتر با کود حیوانی پوسیده به میزان پنج تن در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره با خلوص ۴۷٪ (N)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل با خلوص ۴۵٪ (P) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم با خلوص ۵۰٪ (K) مخلوط شد و لایسمترها به صورت دستی لایه لایه به ضخامت ۱۰ سانتی متر پر و متراکم شدند. بذره‌های مورینگا اولیفرآ تهیه شده از شرکت سبزویان به شماره ثبت ۱۹۹۷ با نام تجاری مزارع مورینگا به تعداد ۱۴۴ عدد (برای هر لایسمتر دو عدد که پس از سبز شدن، نهال مناسب و قوی‌تر نگه داشته و نهال دیگر حذف شد) و به مدت ۷۲ ساعت در آب معمولی قرار گرفتند و سپس در تاریخ ۱۴۰۲/۱/۷ داخل لایسمترهای گلخانه و تاریخ ۱۴۰۲/۲/۱ و ۱۴۰۳/۲/۱ در مزرعه تحقیقاتی کشت شدند. در محیط‌های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی در تاریخ ۱۴۰۲/۳/۲۶ و ۱۴۰۳/۴/۸ مجدداً کود پاشی با ۷۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم با خلوص ۵۰٪ و اوره با خلوص ۴۷٪ به‌عنوان کود استارتر در اختیار گیاه قرار داده شد. هنگامی که ارتفاع درختان به ۳۰ سانتی‌متر رسید، تیمارهای مورد نظر اعمال شدند. لازم به ذکر است که کلیه تیمارها پس از جوانه زدن بذرها و رشد آنها تا ارتفاع تقریباً ۳۰ سانتی‌متری در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب حدود ۴۶ روز پس از کشت (۱۵ اردیبهشت) و ۴۸ روز پس از کشت (۱۷ خرداد) بذر

به صورت یکسان آبیاری شده و پس از آن آبیاری مطابق تیمارهای شوری مورد نظر اعمال گردید. این پژوهش شامل سه سطح آب زیرزمینی به اعماق ۰/۶، ۰/۸، ۱/۱ متر و در چهار سطح شوری و سه تکرار آب زیرزمینی ۱ (کیفیت آب موجود در منطقه) و ۲ و ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر انجام شد. به منظور تهیه آب شور مورد استفاده در آزمایشات به نسبت ۱:۱ از نمک های NaCl و CaCl₂ (به جهت جلوگیری از دیسپرسه شدن خاک لایسیمتر استفاده شد) با خلوص ۸۰٪ استفاده شد و از بطری ماریوت سیفون برای ثابت نگه داشتن عمق آب زیرزمینی در لایسیمترها استفاده شد. در طول آزمایش میزان حجم آب کاهش یافته در بطری های ماریوت سیفون نشان دهنده میزان مشارکت آب زیرزمینی در کل آب مصرفی گیاه بوده است به این صورت که در پایان هر دوره میزان آبی که به بطری های ماریوت سیفون اضافه می شد و مجدداً پر می شدند توسط استوانه مدرج اندازه گیری و این عدد میزان حجم مشارکت آب زیرزمینی در تأمین نیاز آبی گیاه را نشان می داد. این پژوهش در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار و به صورت فاکتوریل انجام گرفت.

به منظور به دست آوردن تبخیر - تعرق برای تعیین نیاز آبی گیاه مورینگا از داده های مربوط به تشتک تبخیر با ضریب تشتک ۰/۷ در محیط های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی استفاده شد (آلن و همکاران^۱، ۲۰۰۵). متوسط ضرایب K_c مورینگا اولیفر در مراحل ابتدایی، میانی و پایانی در این تحقیق برای دو سال انجام آزمایش به ترتیب ۰/۷۵، ۱/۷۵ و ۱/۷۳ در نظر گرفته شد (سانتوس و همکاران^۲، ۲۰۱۷). به منظور تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار SAS (V8) و آزمون دانکن در سطح ۱٪ استفاده گردید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

وزن مخصوص ظاهری	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	رطوبت اشباع (%)	نقطه پژمردگی (%)	ظرفیت زراعی (%)	هدایت آبی (mm/h)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	کربن آلی (%)	کلسیم و منیزیم محلول (meq/l)	سدیم محلول (meq/l)	pH	SAR	EC (dS/m)
۱/۳۳	Silty Loam	۱۳/۶	۶۳/۸	۲۲/۶	۴۹/۷	۱۴/۴	۳۴/۱	۱۱/۲	۳۲/۰	۲۹۲/۰	۱/۰۵	۳/۲	۰/۴۶	۷/۷۱	۰/۳۶	۰/۲۸۴

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه

کربنات (meq/l)	بی کربنات (meq/l)	سولفات (meq/l)	منیزیم و کلسیم (meq/l)	سدیم (meq/l)	S.A.R	شوری آب (dS/m)	pH	TDS (mg/lit)
۰/۲	۶/۱	۳/۴۶	۸/۸	۰/۹۵	۰/۴۵	۰/۸۶۵	۷/۵۶	C3-S1

به منظور محاسبه نیاز آبی، از روش تشتک تبخیر میزان تبخیر داخل گلخانه و مزرعه تحقیقاتی محاسبه شد و با استفاده از ضرایب گیاهی تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه محاسبه گردید. سپس با محاسبه نیاز آبی گیاه، مقدار بارش و میزان استفاده گیاه از آب زیرزمینی از طریق بطری ماریوت سیفون (از طریق اضافه کردن آب مصرف شده در دوره با ظرف مدرج محاسبه گردید)، در نهایت کمبود نیاز آبی گیاه به صورت سطحی و با کیفیت ۱ دسی زیمنس بر متر تأمین گردید (معادله ۱).

$$d_i = ET_c - R - d_m \quad (۱)$$

که در معادله ۱ داریم :

$$ET_c = \text{نیاز آبی گیاه}$$

$$R = \text{بارندگی مؤثر}$$

$$d_m = \text{عمق آب کم شده از بطری ماریوت سیفون}$$

در این پژوهش شاخص کارایی مصرف آب سطحی بر اساس عملکرد برگ از معادله (۲) محاسبه شد.

$$WUE \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Y \left(\frac{kg}{ha} \right)}{V_w \left(m^3 \right)} \quad (2)$$

که در رابطه ۲ داریم:

$$WUE = \text{کارایی مصرف آب}$$

$$Y = \text{عملکرد محصول مورد نظر}$$

$$V_w = \text{کل حجم آب استفاده شده برای گیاه (شامل آب آبیاری، آب زیرزمینی استفاده شده، بارندگی موثر و ...)}$$

پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در این پژوهش شامل میزان عملکرد برگ، محتوای کلسیم، آهن و ازت در برگ گیاه تحت تیمارهای مختلف است. برای اندازه‌گیری آهن و کلسیم موجود در نمونه‌های برگ به روش هضم خشک بعد از خاکسترشدن در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در کوره الکتریکی و حل کردن خاکستر در مخلوط اسیدی (اسید کلریدریک + اسید نیتریک) عصاره‌گیری شدند، سپس مقدار آهن و کلسیم با استفاده از دستگاه طیف سنج جذب اتمی (ساخت کشور استرالیا مدل *AAS/Varain 220*) قرائت می‌شود (جونز، ۲۰۰۱). همچنین برای اندازه‌گیری محتوای ازت از روش هضم‌تر در این رابطه استفاده شد. ۰/۵ گرم نمونه خشک شده در آون و عبور داده شده از الک ۰/۵ میلی‌متری در بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد، ۳ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ و ۱/۱ گرم مخلوط کاتالیزور (سولفات پتاسیم + سولفات مس + سلنیوم) به آن اضافه و تا زمان بی رنگ شدن بر روی هیتر قرار گرفت. سپس محتویات درون بالن، درون بالن ۵۰ میلی‌لیتری صاف و با آب مقطر به حجم مورد نظر رسانده شد. مقدار نیتروژن موجود در این عصاره با استفاده از دستگاه کلدل یا کجدال قرائت و با استفاده از فرمول مربوطه محتوای ازت نیز به دست آمد (Baethgen and Alley, 1989)

یافته‌های پژوهش

۱. آب سطحی و آب زیرزمینی مصرف شده

در جدول ۳ مقادیر کل آب استفاده شده سطحی، زیرزمینی و درصد مشارکت آب زیرزمینی برای کلیه تیمارها به ترتیب در محیط گلخانه ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۳، کل آب استفاده شده برای همه تیمارها به ترتیب ۱۲۵۳/۸ در مدت ۳۵۴ روز کشت در سال ۱۴۰۲ و ۹۸۹/۳ برای ۱۷۷ روز طول دوره رشد در سال ۱۴۰۳ در محیط گلخانه است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد به طور میانگین در دو سال انجام پژوهش در محیط گلخانه کمترین میزان آب سطحی مصرف شده برابر ۳۰۳/۷ میلی‌متر متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر و بیشترین مقدار آن برابر ۸۸۵/۷ میلی‌متر متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر می‌باشد همچنین در خصوص آب زیرزمینی مصرف شده، درصد مشارکت آب زیرزمینی و مشارکت آب زیرزمینی بر حسب میلی‌متر بر روز کمترین مقدار برابر ۲۳۵/۹ میلی‌متر، ۳۰ درصد و ۱/۰۹ میلی‌متر در روز متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر می‌باشد و بیشترین مقدار برابر ۸۱۷/۸ میلی‌متر، ۷۵ درصد و ۳/۶۹ میلی‌متر در روز متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر می‌باشد. به طور کلی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در محیط گلخانه با افزایش عمق آب زیرزمینی مقدار مصرف آب سطحی توسط گیاه افزایش پیدا کرده است و این در شرایطی است که مقدار کل آب زیرزمینی مصرف شده و مشارکت آب زیرزمینی بر حسب درصد و میلی‌متر در روز کاهش یافته است. همچنین در محیط گلخانه با افزایش شوری آب زیرزمینی از ۱ به ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مصرف آب زیرزمینی کاهش یافته و مصرف آب سطحی توسط گیاه افزایش یافته است.

جدول ۳. کل آب سطحی و زیرزمینی استفاده شده و درصد مشارکت آب زیرزمینی در محیط گلخانه ۱۴۰۲-۱۴۰۳

سال	شوری آب زیرزمینی (دسی زیمنس بر متر)	عمق آب زیرزمینی (میلیمتر)	کل آب مورد نیاز (میلیمتر)	کل آب سطحی مورد استفاده (میلیمتر)	کل آب زیرزمینی مورد استفاده (میلیمتر)	مشارکت آب زیرزمینی (درصد)	بارندگی (میلیمتر)	مشارکت آب زیرزمینی (میلی متر در روز)
۱۴۰۲	۱	۰/۶	۱۲۵۳/۸	۳۷۵/۶۰	۸۷۸/۲	۷۰/۰۴	۰/۰	۳/۰۹
	۱	۰/۸		۵۹۸/۵۰	۶۵۵/۳۳	۵۲/۲۷		۲/۳۱
	۱	۱/۱		۸۲۲/۶۴	۴۳۳/۱۹	۳۴/۳۹		۱/۶۴
	۲	۰/۶		۴۴۳/۹۱	۸۰۹/۹۲	۶۴/۶۰		۲/۸۵
	۲	۰/۸		۶۳۷/۴۱	۶۱۶/۴۲	۴۹/۱۶		۲/۱۷
	۲	۱/۱		۸۴۷/۵۳	۴۰۶/۳۰	۳۲/۴۱		۱/۵۴
	۶	۰/۶		۴۷۵/۰۱	۷۷۸/۸۲	۶۲/۱۲		۲/۷۴
	۶	۰/۸		۶۷۵/۵۲	۵۷۸/۳۱	۴۶/۱۲		۲/۰۹
	۶	۱/۱		۸۸۵/۴۴	۳۶۸/۳۹	۲۹/۳۸		۱/۴۰
	۱۰	۰/۶		۵۰۳/۲۳	۷۵۰/۶۰	۵۹/۸۶		۲/۶۴
۱۰	۰/۸	۷۶۹/۴۳	۴۸۴/۴۰	۳۸/۶۳	۱/۷۵			
۱۰	۱/۱	۹۸۶/۳۰	۲۶۷/۵۳	۲۱/۳۴	۱/۰۲			
۱۴۰۳	۱	۰/۶	۹۸۹/۳	۲۳۱/۹۱	۷۵۷/۴۰	۸۰/۴۰	۰/۰	۴/۲۸
	۱	۰/۸		۳۶۷/۸۲	۶۲۱/۴۸	۶۳/۸۸		۳/۵۱
	۱	۱/۱		۶۱۵/۶۹	۳۷۳/۶۱	۳۷/۷۶		۲/۱۱
	۲	۰/۶		۳۰۷/۶۴	۶۸۱/۶۶	۷۱/۴۴		۳/۸۵
	۲	۰/۸		۴۷۴/۰۱	۵۱۵/۲۹	۵۲/۶۴		۲/۹۱
	۲	۱/۱		۶۸۵/۲۹	۳۰۴/۰۱	۳۰/۷۳		۱/۷۲
	۶	۰/۶		۲۳۵/۵۲	۶۵۳/۷۹	۶۷/۵۱		۳/۶۹
	۶	۰/۸		۵۳۹/۲۵	۴۵۰/۰۵	۴۶/۱۹		۲/۵۴
	۶	۱/۱		۶۹۰/۳۴	۲۹۸/۹۶	۳۰/۲۲		۱/۶۹
	۱۰	۰/۶		۴۳۷/۰۴	۵۶۲/۲۶	۵۶/۸۳		۳/۱۸
۱۰	۰/۸	۶۲۴/۹۹	۳۶۴/۳۱	۳۷/۰۹	۲/۰۶			
۱۰	۱/۱	۷۸۵/۰۹	۲۰۴/۲۱	۲۰/۶۴	۱/۱۵			

در جدول ۴ مقادیر کل آب استفاده شده در مزرعه تحقیقاتی برای کلیه تیمارها برای دو سال ۱۴۰۲ (از اول اردیبهشت ماه تا پایان آبان ماه) و ۱۴۰۳ (از اول اردیبهشت ماه تا پایان شهریور ماه) آورده شده است. با توجه به نتایج جدول مذکور کل آب استفاده شده برای همه تیمارها در سال های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به ترتیب ۶۱۱/۱ و ۴۳۲/۹ میلی متر در سال است. در مزرعه تحقیقاتی تیمارهای مربوط به شوری آب زیرزمینی ۱ و ۲ و ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر کمترین و بیشترین آب سطحی مصرف شده به ترتیب متعلق به تیمارهایی با عمق ۱/۱ و ۰/۶ متر می باشد. نتایج جدول ۴ نشان می دهد به طور میانگین در دو سال انجام پژوهش در محیط مزرعه تحقیقاتی کمترین میزان آب سطحی مصرف شده برابر ۷۱/۰ میلی متر متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر و بیشترین مقدار آن برابر ۳۰۲/۸ میلی متر متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱۰ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر می باشد همچنین در خصوص آب زیرزمینی مصرف شده، درصد مشارکت آب زیرزمینی و مشارکت آب زیرزمینی بر حسب میلی متر بر روز کمترین مقدار برابر ۷۸/۰۵ میلی متر، ۲۰ درصد و ۰/۴۱۵ میلی متر در روز متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱۰ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر می باشد و بیشترین مقدار برابر ۳۰۹/۸۵ میلی متر، ۸۳ درصد و ۱/۷۲ میلی متر در روز متعلق به تیمار با شوری آب زیرزمینی ۱ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر می باشد. به طور کلی نتایج جدول ۴ نشان می دهد که با افزایش عمق آب زیرزمینی مقدار مصرف آب سطحی توسط گیاه در محیط مزرعه تحقیقاتی افزایش پیدا کرده است و این در شرایطی است که مقدار کل آب زیرزمینی مصرف شده و

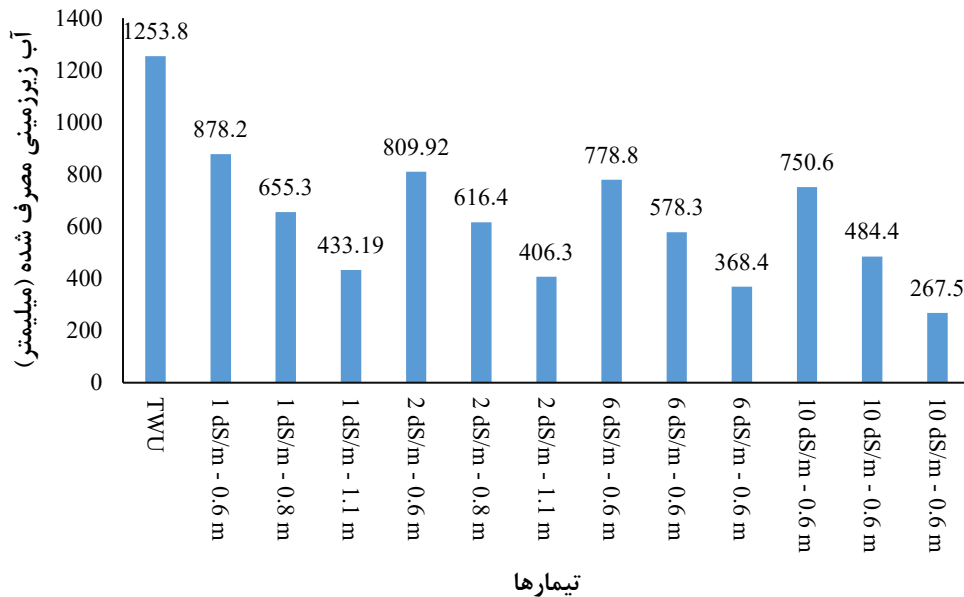
مشارکت آب زیرزمینی بر حسب درصد و میلی متر در روز کاهش یافته است. همچنین با افزایش شوری آب از ۱ به ۱۰ دسی زیمنس بر متر مصرف آب زیرزمینی کاهش یافته و مصرف آب سطحی توسط گیاه افزایش یافته است.

جدول ۴. کل آب سطحی و زیرزمینی استفاده شده و درصد مشارکت آب زیرزمینی در محیط مزرعه تحقیقاتی ۱۴۰۲-۱۴۰۳

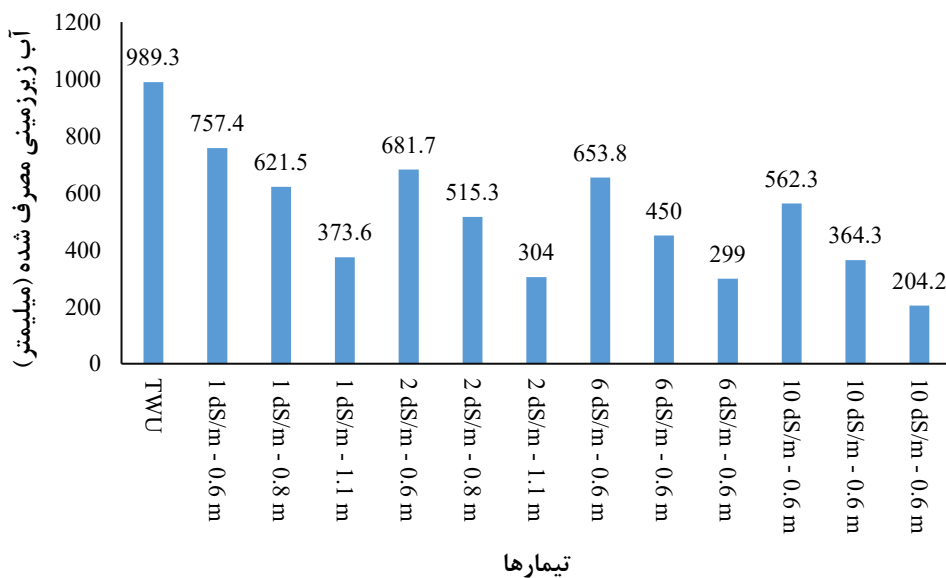
سال	شوری آب زیرزمینی (دسی زیمنس بر متر)	عمق آب زیرزمینی (میلیمتر)	کل آب موردنیاز (میلیمتر)	کل آب سطحی مورداستفاده (میلیمتر)	کل آب زیرزمینی مورداستفاده (میلیمتر)	مشارکت آب زیرزمینی (درصد)	بارندگی (میلیمتر)	مشارکت آب زیرزمینی (میلی متر در روز)
۱۴۰۲	۱	۰/۶	۶۱۱/۱	۱۰۸/۶	۳۵۰/۹	۷۶/۴	۱۵۱۶	۱/۵۳
	۱	۰/۸		۱۴۳/۵	۳۱۶/۰	۶۸/۸		۱/۳۷
	۱	۱/۱		۲۲۳/۵	۲۲۲/۰	۴۸/۳		-/۹۷
	۲	۰/۶		۱۶۱/۷	۲۹۷/۸	۶۴/۸		۱/۲۹
	۲	۰/۸		۲۶۲/۷	۱۹۶/۸	۴۲/۸		-/۱۸۶
	۲	۱/۱		۳۰۳/۸	۱۵۵/۷	۳۳/۹		-/۶۸
	۶	۰/۶		۲۶۴/۷	۱۹۴/۸	۴۲/۴		-/۱۸۵
	۶	۰/۸		۳۰۶/۵	۱۵۳/۰	۳۳/۳		-/۶۷
	۶	۱/۱		۳۳۷/۹	۱۲۱/۶	۲۶/۵		-/۵۳
	۱۰	۰/۶		۳۱۳/۸	۱۴۵/۷	۳۱/۷		-/۶۳
	۱۰	۰/۸		۳۳۹/۱	۱۲۰/۴	۲۶/۲		-/۵۲
	۱۰	۱/۱		۳۵۹/۷	۹۹/۸	۲۱/۷		-/۴۳
۱۴۰۳	۱	۰/۶	۴۳۲/۹	۳۳/۴	۲۶۸/۸	۸۸/۹	۱۳۰۷	۱/۹۲
	۱	۰/۸		۱۰۱/۵	۲۰۰/۷	۶۶/۴		۱/۴۳
	۱	۱/۱		۱۹۸/۴	۱۰۲/۸	۳۴/۴		-/۷۴
	۲	۰/۶		۵۳/۶	۲۴۸/۶	۸۲/۳		۱/۷۸
	۲	۰/۸		۱۳۲/۵	۱۶۹/۶	۵۶/۱		۱/۲۱
	۲	۱/۱		۲۱۳/۴	۸۸/۷	۲۹/۴		-/۶۳
	۶	۰/۶		۱۰۸/۱	۱۹۴/۱	۶۴/۲		۱/۳۹
	۶	۰/۸		۱۶۷/۹	۱۳۴/۳	۴۴/۴		-/۹۶
	۶	۱/۱		۲۳۴/۹	۶۷/۲	۲۲/۲		-/۴۸
	۱۰	۰/۶		۱۶۸/۲	۱۳۳/۹	۴۴/۳		-/۹۶
	۱۰	۰/۸		۱۸۳/۷	۱۱۸/۴	۳۹/۲		-/۸۵
	۱۰	۱/۱		۲۴۵/۹	۵۶/۳	۱۸/۶		-/۴۰

شکل های ۳ و ۴، تبخیر تعرق و کل آب زیرزمینی مصرف شده در طول دوره رشد را برای درخت مورینگا اولیفر در محیط گلخانه به ترتیب در سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ را نشان می دهد. همچنین شکل های ۳ و ۴ نشان می دهند در محیط گلخانه تیمار با شوری ۱ دسی زیمنس بر متر در عمق های آب زیرزمینی ۰/۶، ۰/۸، از تاریخ ۱۹ اردیبهشت (۴۳ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نموده اند و تیمار با عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر از تاریخ ۹ خرداد ماه (۶۴ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نمودند. در تیمار با شوری ۲ دسی زیمنس بر متر در عمق های آب زیرزمینی ۰/۶، ۰/۸، از تاریخ ۱۹ اردیبهشت (۴۳ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نموده اند و تیمار با عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر از تاریخ ۹ خرداد ماه (۶۴ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نمودند. در تیمار با شوری ۶ دسی زیمنس بر متر با عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر از تاریخ ۱۹ اردیبهشت (۴۳ روز پس از کشت) و عمق آب زیرزمینی ۰/۸ متر در تاریخ ۲۶ اردیبهشت ماه (۵۰ روز پس از کشت) و عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر در تاریخ ۹ خرداد ماه (۶۴ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی کردند. در تیمار ۱/۱ متری آب

زیرزمینی به علت عمیق تر بودن سطح آب زیرزمینی شور گیاه دیرتر (۲۱ روز بعد از تیمار ۰/۶ متری) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نموده است. در تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با عمق آب زیرزمینی ۰/۶ متر از تاریخ ۱۹ اردیبهشت (۴۳ روز پس از کشت) و ۰/۸ متری در تاریخ ۲۶ اردیبهشت ماه (۵۰ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نموده است و در تیمار ۱/۱ متری آب زیرزمینی به علت عمیق تر بودن سطح آب زیرزمینی شور گیاه دیرتر شروع به استفاده از آب زیرزمینی کرده است در تاریخ ۱۵ خرداد (۷۰ روز پس از کشت). همچنین شکل ۲ بیانگر این موضوع است که این است که مقدار استفاده گیاه از آب زیرزمینی که شوری بیشتری داشته کمتر بوده است و این موضوع نشان دهنده کم شدن کمک آب زیرزمینی به تبخیر و تعرق درخت مورینگا اولیفر در شوری‌های بالای ۲ دسی‌زیمنس بر متر است.

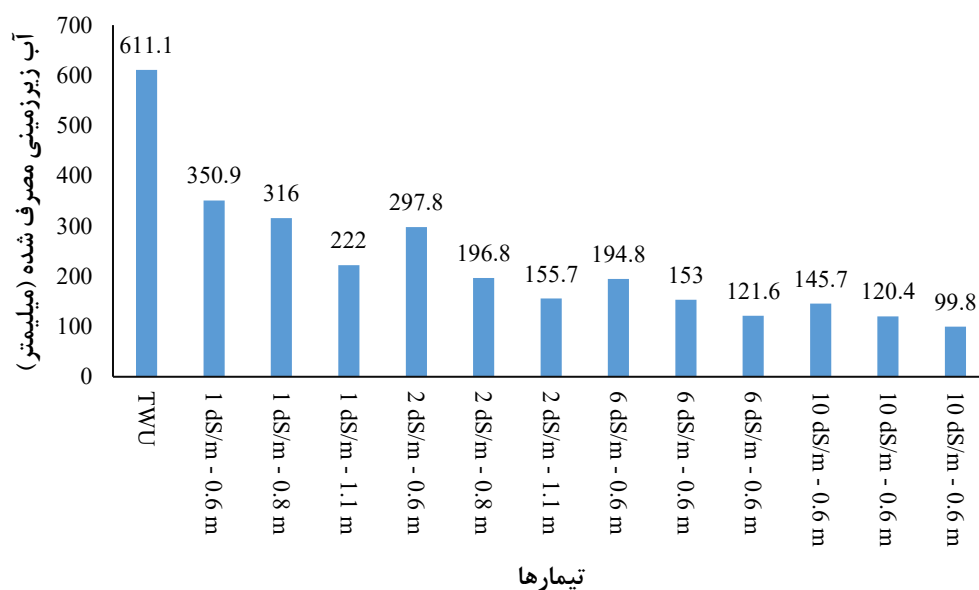


شکل ۳. کل نیاز آبی گیاه و آب زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۲ در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفر در محیط گلخانه

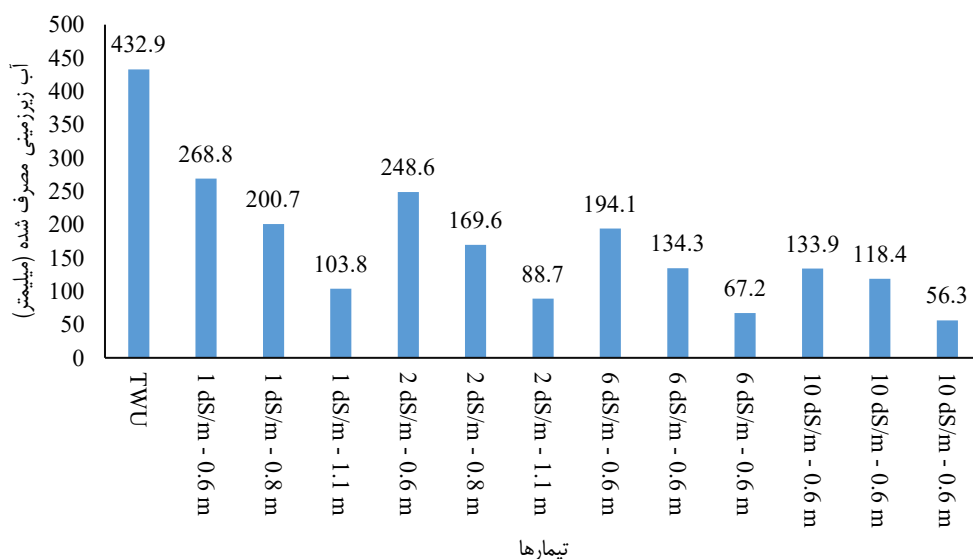


شکل ۴. کل نیاز آبی گیاه و آب زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۳ در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفر در محیط گلخانه

شکل های ۵ و ۶، تبخیر تعرق و کل آب زیرزمینی مصرف شده در طول دوره رشد را برای درخت مورینگا اولیفررا در محیط مزرعه تحقیقاتی نشان می دهد. همچنان که از شکل های مذکور نتیجه می گیریم در تیمار با شوری ۱ و ۲ دسی زیمنس بر متر در عمق های آب زیرزمینی ۰/۶، ۰/۸، ۰/۱۰ به ترتیب از تاریخ ۱۵ خرداد (۷۷ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نموده اند و تیمار با شوری ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر و عمق آب زیرزمینی ۰/۶ و ۰/۸ متر از تاریخ ۱ خرداد ماه (۳۲ روز پس از کشت) و عمق ۱/۱ متر در تاریخ ۱۵ خرداد (۷۷ روز پس از کشت) شروع به استفاده از آب زیرزمینی نمودند. همچنین شکل های ۵ و ۶ بیانگر این موضوع است که این است که مقدار استفاده گیاه از آب زیرزمینی که شوری بیشتری داشته کمتر بوده است و این موضوع نشان دهنده کم شدن کمک آب زیرزمینی به تبخیر و تعرق درخت مورینگا اولیفررا در شوری های بالای ۲ دسی زیمنس بر متر است.

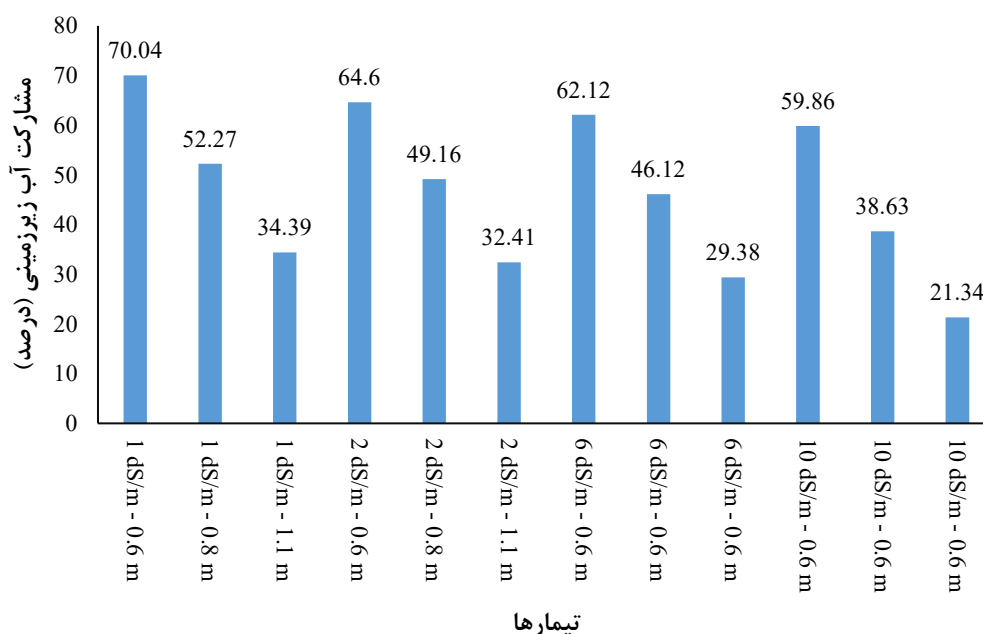


شکل ۵. کل نیاز آبی و آب زیرزمینی مصرف شده در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفررا - سال ۱۴۰۲ در محیط مزرعه تحقیقاتی

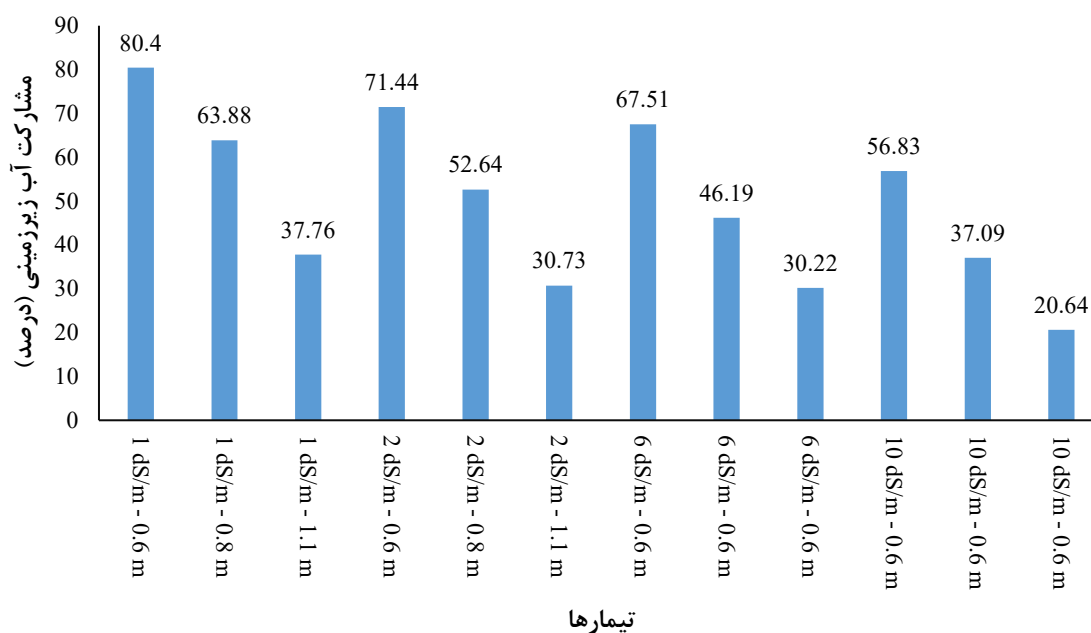


شکل ۶. کل نیاز آبی و آب زیرزمینی مصرف شده در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفررا در محیط مزرعه تحقیقاتی - سال ۱۴۰۳. شکل های ۷ و ۸ درصد مشارکت آب زیرزمینی تیمارهای مختلف را در محیط گلخانه در دو سال پژوهش نشان می دهند. همچنانکه شکل های مذکور نشان می دهند، درصد مشارکت آب زیرزمینی در تیمارهای با عمق های ۰/۶ و ۰/۸ متر آب زیرزمینی

و برای شوری‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر از تیمار با عمق آب زیرزمینی ۱.۱ متر می‌باشد. این امر احتمالاً به علت وجود فاصله بیشتر بین ریشه گیاه و عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی در تیمار ۱.۱ متر آب زیرزمینی نسبت به تیمارهای ۰/۶ و ۰/۸ متر آب زیرزمینی است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود برای تیمار با آب زیرزمینی با کیفیت شوری‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در تیمارهای ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر، در هیچ روزی نیاز آبی گیاه به صورت صددرصد توسط آب زیرزمینی تأمین نشده است و گیاه همواره در طول دوره تحقیق نیاز داشته است تا مقداری از آب مورد نیاز خود را از طریق آبیاری سطحی تأمین کند. شکل ۷ مشارکت آب زیرزمینی در تیمارهای مختلف شوری و عمق‌های مختلف را بر حسب میلی‌متر بر روز نشان می‌دهد. با توجه به نمودار در تیمار ۰/۶ متر آب زیرزمینی برای شوری‌های ۱ و ۲ و ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به بقیه عمق‌های متوسط مشارکت آب زیرزمینی بیشتر بوده است. این موضوع نشانگر آن است که هرچه آب زیرزمینی فاصله کمتری تا سطح خاک داشته باشد (آب زیرزمینی کم عمق) به علت آسان‌تر بودن استفاده از این منبع آب، گیاه قادر خواهد بود تا برای رفع نیازهای آبی خود بیشتر از آب زیرزمینی استفاده نماید. با توجه به نمودار هرچه شوری آب زیرزمینی کمتر باشد (آب زیرزمینی کم عمق از کیفیت بهتری برخوردار باشد) متوسط مشارکت آب زیرزمینی بیشتر بوده و گیاه برای بر طرف کردن نیازهای خود به مقدار کمتری از آب سطحی نیاز خواهد داشت.

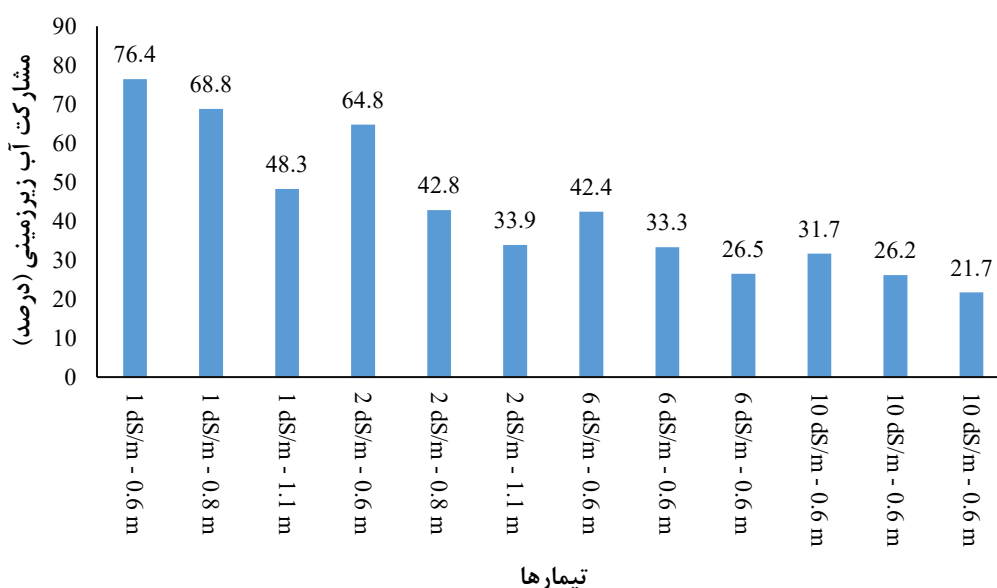


شکل ۷. درصد آب شور زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۲ در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفا در محیط گلخانه

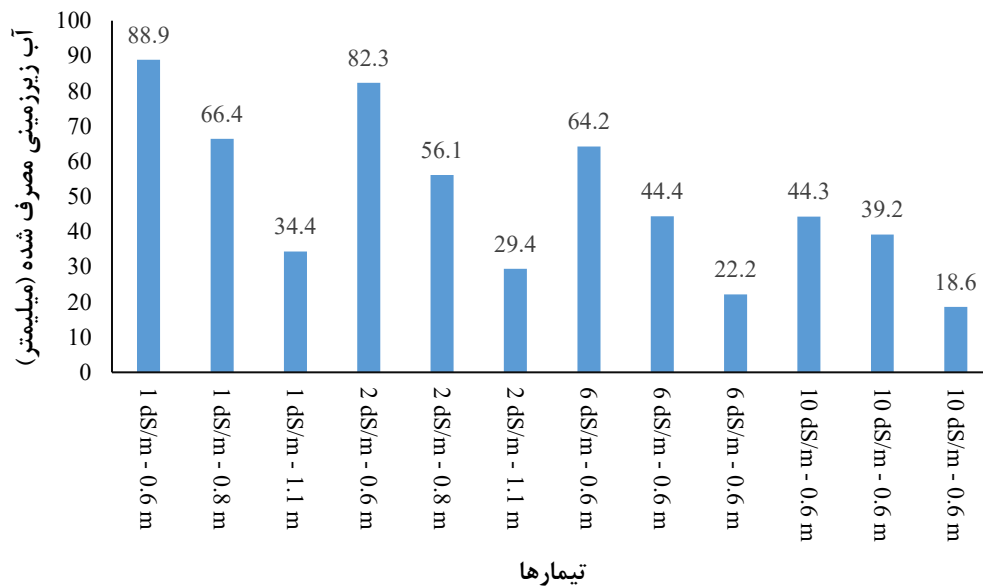


شکل ۸. درصد آب شور زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۳ در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفر در محیط گلخانه

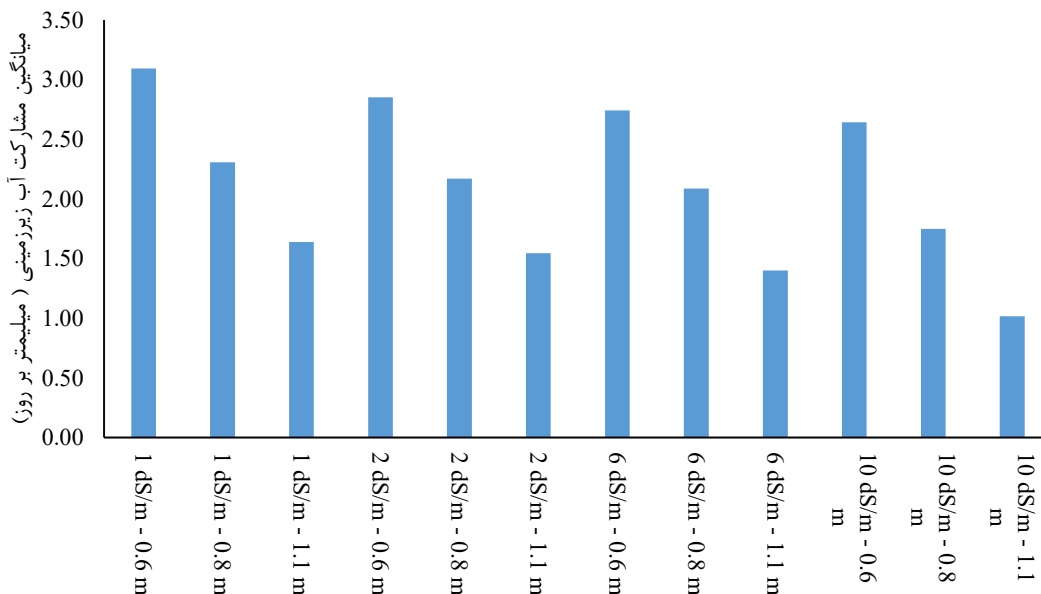
شکل های ۹ و ۱۰ درصد مشارکت آب زیرزمینی تیمارهای مختلف را در محیط مزرعه تحقیقاتی نشان می دهد. همچنان که شکل های مذکور نشان می دهند، در مزرعه تحقیقاتی درصد مشارکت آب زیرزمینی در تیمارهای با عمق های ۰/۶ و ۰/۸ متر آب زیرزمینی و برای شوری های ۱، ۲، ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر بیشتر از تیمار با عمق آب زیرزمینی ۱/۱ متر می باشد. این امر احتمالاً به علت وجود فاصله بیشتر بین ریشه گیاه و عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی در تیمار ۱/۱ متر آب زیرزمینی نسبت به تیمارهای ۰/۶ و ۰/۸ متر آب زیرزمینی است. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود برای تیمار با آب زیرزمینی با کیفیت شوری های ۱، ۲، ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر در تیمارهای ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر در مزرعه تحقیقاتی، در هیچ روزی نیاز آبی گیاه به طور صددرصد توسط آب زیرزمینی تأمین نشده است و گیاه همواره در طول دوره تحقیق نیاز داشته است که مقداری از آب مورد نیاز خود را از طریق آبیاری سطحی تأمین کند.



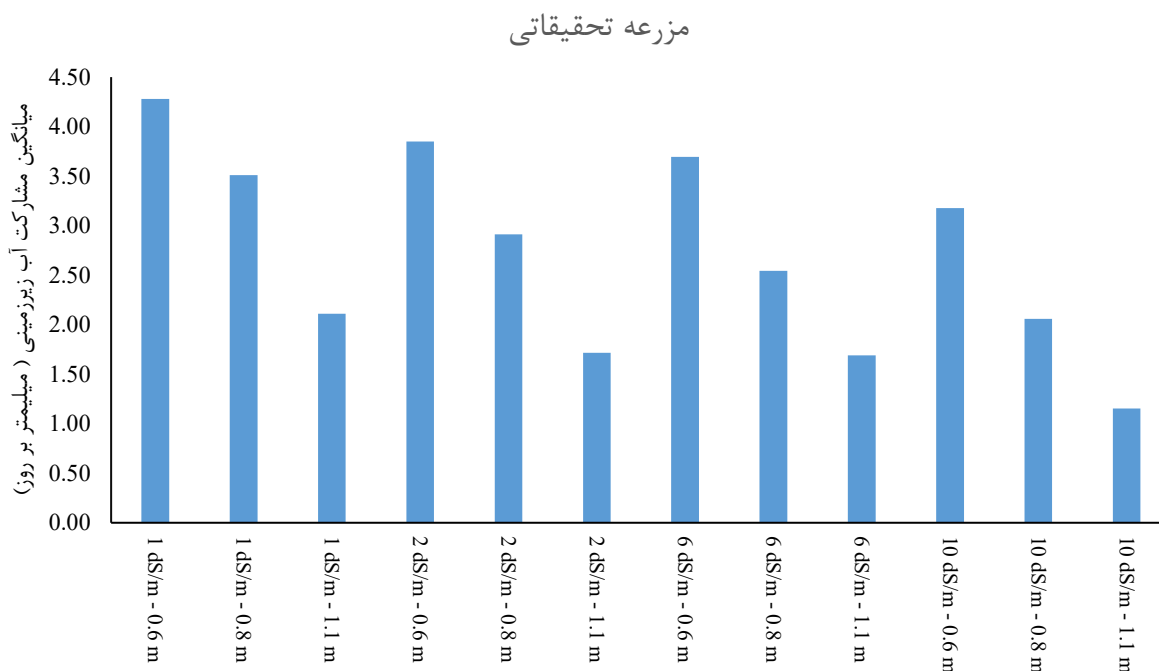
شکل ۹. درصد آب شور زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۲ در طول دوره رشد درخت مورینگا اولیفر در محیط مزرعه تحقیقاتی



شکل ۱۰. درصد آب شور زیرزمینی مصرف شده - سال ۱۴۰۳ در طول دوره رشد درخت مورینگ اولیفر در محیط مزرعه تحقیقاتی شکل‌های ۱۱ و ۱۲ میانگین مشارکت آب زیرزمینی در تیمارهای مختلف شوری و عمق‌های مختلف را بر حسب میلی‌متر بر روز به ترتیب در محیط‌های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار در تیمار ۰/۶ متر آب زیرزمینی برای شوری‌های ۱ و ۲ و ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به بقیه عمق‌های متوسط مشارکت آب زیرزمینی بیشتر بوده است و این موضوع نشانگر آن است که هرچه آب زیرزمینی فاصله کمتری تا سطح خاک داشته باشد (آب زیرزمینی کم‌عمق) به علت آسان‌تر بودن استفاده از این منبع آب، گیاه قادر خواهد بود تا برای رفع نیازهای آبی خود بیشتر از آب زیرزمینی استفاده نماید. با توجه به نمودار هرچه شوری آب زیرزمینی کمتر باشد (آب زیرزمینی کم‌عمق از کیفیت بهتری برخوردار باشد) متوسط مشارکت آب زیرزمینی بیشتر بوده و گیاه برای بر طرف کردن نیازهای خود به مقدار کمتری از آب سطحی نیاز خواهد داشت.



شکل ۱۱. میانگین مشارکت آب زیرزمینی بر حسب میلی‌متر بر روز در دو سال پژوهش ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در محیط گلخانه



شکل ۱۲. میانگین مشارکت آب زیرزمینی بر حسب میلی‌متر بر روز در دو سال پژوهش ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در محیط مزرعه تحقیقاتی

۲. آنالیز آماری مشارکت آب زیرزمینی

در جداول ۵ و ۶ خلاصه آنالیز واریانس انجام شده برای کل آب زیرزمینی مصرف شده و مشارکت آب زیرزمینی بر حسب درصد و میلی‌متر بر روز به ترتیب در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی آورده شده است که نتایج نشانگر معنی‌دار بودن مشارکت آب زیرزمینی در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی در عمق‌های مختلف در سطح ۰/۰۱ می‌باشد.

جدول ۵. خلاصه آماری سطوح معنی‌داری آنالیز واریانس برای مشارکت آب زیرزمینی در محیط گلخانه

منبع تغییرات	درجه آزادی	آب زیرزمینی مورد استفاده (میلی متر)	مشارکت آب زیرزمینی (%)	مشارکت آب زیرزمینی (میلی‌متر بر روز)
سال	۱	۱۹۱۴۷۷.۳۵**	۵۴۶.۱۵**	۷.۹۲۶**
تکرار	۴	۱۱۹۸.۴۷ ns	۳۵۲.۵۴**	۰.۰۳۲ ns
A فاکتور (عمق)	۲	۹۷۱۲۹۵.۰۱**	۹۲۱۶۶۸**	۱۹۶۲۳**
B فاکتور (شوری)	۳	۱۰۱۹۲۷۶.۰**	۸۸۶.۵۷**	۲.۲۸۲**
A سال *	۲	۷۰۹۱.۲۶ *	۱۲۸.۲۸ *	۰.۴۵۵**
B سال *	۳	۲۳۰۹.۳۸ ns	۸۶.۲۱ ns	۰.۲۹۹ **
AB	۶	۱۵۸۴.۶۰ ns	۴۲.۶۷ ns	۰.۰۳۹ ns
A * B سال	۶	۱۲۹۵.۵۲ ns	۵۰.۵۸ ns	۰.۰۳۱ ns
خطا	۴۴	۱۹۴۹.۲۳	۵۲.۰۷	۰.۰۳۲
ضریب تغییرات (درصد)	*	۲۴.۷	۷.۲۲	۰.۰۳۵

***، ** و ns وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و نبود اختلاف معنی‌دار

جدول ۶. خلاصه آماری سطوح معنی داری آنالیز واریانس برای مشارکت آب زیرزمینی در محیط مزرعه تحقیقاتی

منبع تغییرات	درجه آزادی	آب زیرزمینی مورد استفاده (میلی متر)	مشارکت آب زیرزمینی (%)	مشارکت آب زیرزمینی (میلی متر بر روز)
سال	۱	۴۳۳۱۶.۰۵**	۷۱.۳۶۱*	۰.۷۴۰۱**
تکرار	۴	۲۱۶۶.۵۱*	۹۶۶۸۹**	۰.۰۸۸۴**
A فاکتور (عمق)	۲	۷۹۵۰۶.۰۵**	۳۲۶۲.۴۴۵**	۲.۸۲۰۷**
B فاکتور (شوری)	۳	۵۹۱۱۲.۳۳**	۲۰۵۲.۰۱۸**	۱.۶۵۵۰**
A سال *	۲	۲۱۷۱.۷۲*	۳۳۹.۰۶۳**	۰.۴۳۳۸**
B سال *	۳	۶۹۸۷.۵۷**	۸۱.۶۵۸*	۰.۰۳۵۹ ns
AB	۶	۳۱۸۰.۸۸**	۱۱۸.۸۵۹**	۰.۰۹۷۸**
A * B سال	۶	۲۹۴.۵۲ ns	۹.۷۹۳ ns	۰.۰۰۹۰ ns
خطا	۴۴	۶۰۴.۸۳	۲۱.۳۸	۰.۰۱۷۹۶
ضریب تغییرات (درصد)	*	۱۴.۲۰	۱۳.۸۶	۱۳.۹۴

ns و ** و *** وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و نبود اختلاف معنی دار

۳. بررسی عملکرد برگ خشک و محتوای کلسیم، آهن و ازت

در جدول ۷ نتایج عملکرد برگ، کلسیم، آهن و ازت در برگها در محیط گلخانه، برای عمق‌های مختلف آب زیرزمینی و سطوح شوری ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشانگر آن است که در محیط گلخانه کمترین و بیشترین عملکرد برگ خشک با ۲/۲۹۳ و ۱۸۰/۶ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۴۰۲ و ۳۳۷/۸ و ۲۶۳/۵ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمارهای ۱/۱ متر با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۰/۶ متر با شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمده است. همچنین کمترین و بیشترین عملکرد کلسیم و آهن عبارتست از ۶۶/۴۵ و ۰/۴۵۸۸ ppm در سال ۱۴۰۲ و ۲۱۹/۸۸ و ۰/۷۸۶۷ ppm در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۱/۱ متر در شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۲۳۹/۵۵ و ۰/۸۴۳۷ ppm و ۳۳۵/۹۲ و ۱/۸۲۱۸ ppm در تیمار ۰/۶ متر و شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر می باشد و در خصوص محتوای ازت مربوط به پروتئین کمترین و بیشترین مقدار ۰/۱ درصد در سال ۱۴۰۲ و ۱/۱۳ درصد در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۰/۶ متر و شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر و ۳/۶۰ درصد در سال ۱۴۰۲ و ۳/۶۸ درصد در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۱/۱ متر و شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر است.

جدول ۷. تأثیر عمق و سطوح مختلف شوری آب زیرزمینی بر عملکرد و کارایی مصرف آب در مورینگا اولیفر در محیط گلخانه

سال	شوری (دسی‌زیمنس بر متر) و عمق (متر) آب زیرزمینی	عملکرد برگ (کیلوگرم بر هکتار)	کلسیم ppm	آهن ppm	ازت ppm	کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۴۰۲	۱, ۰/۶	۲۳۹/۲	۲۳۹/۵۵	۰/۸۴	۰/۱۰	۰/۲۴
	۱, ۰/۸	۲۶۵/۸	۱۸۶/۲۱	۰/۷۳	۰/۰۸	۰/۲۷
	۱, ۱/۱	۲۵۴/۷	۱۶۳/۷۴	۰/۸۰	۰/۱۰	۰/۲۶
	۲, ۰/۶	۲۲۵/۴	۱۱۷/۵۸	۰/۷۶	۰/۳۹	۰/۲۳
	۲, ۰/۸	۲۱۸/۶	۱۱۷/۱۵	۰/۶۷	۰/۵۷	۰/۲۲
	۲, ۱/۱	۲۱۱/۵	۸۹/۴۰	۰/۷۰	۰/۲۸	۰/۲۱
	۶, ۰/۶	۲۱۷/۳	۸۶/۰۵	۰/۵۷	۰/۴۲	۰/۲۲
	۶, ۰/۸	۲۱۳/۸	۷۳/۵۸	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۲۲
	۶, ۱/۱	۲۰۴/۶	۸۹/۵۹	۰/۴۵	۱/۰۸	۰/۲۱
	۱۰, ۰/۶	۲۰۸/۶	۶۳/۹۴	۰/۳۴	۱/۰۵	۰/۲۱
	۱۰, ۰/۸	۲۱۰/۱	۶۳/۰۵	۰/۳۳	۲/۲۶	۰/۲۱
۱۰, ۱/۱	۱۸۰/۶	۶۶/۴۵	۰/۴۶	۳/۶۰	۰/۱۸	
۱۴۰۳	۱, ۰/۶	۳۳۷/۸۳	۳۳۵/۹۲	۱/۸۲	۰/۱۳	۰/۳۴
	۱, ۰/۸	۳۰۸/۶۶	۳۱۵/۲۰	۱/۹۱	۰/۱۰	۰/۳۱
	۱, ۱/۱	۲۹۲/۴۵	۳۰۸/۲۱	۱/۷۷	۰/۱۵	۰/۳۰
	۲, ۰/۶	۳۱۵/۲۸	۲۹۲/۶۵	۱/۲۴	۰/۳۸	۰/۳۲
	۲, ۰/۸	۲۶۷/۰۴	۲۹۶/۰۲	۱/۳۵	۰/۶۲	۰/۲۷
	۲, ۱/۱	۲۱۶/۷۱	۲۶۳/۸۹	۱/۲۱	۰/۳۵	۰/۲۶
	۶, ۰/۶	۲۹۶/۳۹	۲۶۷/۳۹	۰/۹۷	۰/۴۴	۰/۳۰
	۶, ۰/۸	۲۶۴/۴۵	۲۶۱/۰۶	۰/۹۷	۰/۷۲	۰/۲۷
	۶, ۱/۱	۲۵۵/۲۶	۲۵۵/۳۴	۱/۳۲	۱/۰۵	۰/۲۶
	۱۰, ۰/۶	۲۶۱/۸۲	۲۳۶/۵۲	۰/۸۸	۲/۱۵	۰/۲۶
	۱۰, ۰/۸	۲۶۰/۵۱	۲۰۱/۸۳	۰/۷۹	۲/۳۶	۰/۲۶
۱۰, ۱/۱	۲۳۶/۵۴	۲۱۹/۸۸	۰/۷۷	۳/۶۸	۰/۲۴	

در جدول ۸ نتایج عملکرد برگ، کلسیم، آهن و ازت در برگها در محیط مزرعه تحقیقاتی، برای عمق‌های مختلف آب زیرزمینی و سطوح شوری ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر آن است که بیشترین و کمترین عملکرد با ۶۷۵/۰ و ۳۲۹/۰ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۴۰۲ و ۶۶۲/۷ و ۳۴۹/۳ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمارهای ۰/۶ متر با شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر و ۱/۱ متر با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در محیط مزرعه تحقیقاتی به‌دست‌آمده است. کمترین و بیشترین عملکرد کلسیم و آهن عبارتست از ۷۶/۳۳ و ۰/۴۷۹۵ ppm در سال ۱۴۰۲ و ۷۶/۳۳ و ۰/۴۷۱۶ ppm در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۱/۱ متر در شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۶۳۷/۶۷ و ۱/۶۲۵۴ ppm و ۶۳۷/۶۷ و ۱/۶۲۵۴ ppm در تیمار ۰/۶ متر و شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر در محیط مزرعه تحقیقاتی می‌باشد. در خصوص محتوای ازت در محیط مزرعه تحقیقاتی کمترین و بیشترین مقدار ۰/۱ درصد در سال ۱۴۰۲ و ۱/۱۳ درصد در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۰/۶ متر و شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر و ۳/۶۰ درصد در سال ۱۴۰۲ و ۳/۶۸ درصد در سال ۱۴۰۳ مربوط به تیمار ۱/۱ متر و شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر است.

جدول ۸. تاثیر عمق و سطوح مختلف شوری آب زیرزمینی بر عملکرد و کارایی مصرف آب در مورینگا اولیفا در محیط مزرعه

سال	شوری (دسی‌زیمنس بر متر) و عمق (متر) آب زیرزمینی	عملکرد برگ (کیلوگرم بر هکتار)	کلسیم ppm	آهن ppm	ازت ppm	کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۴۰۲	۱, ۰/۶	۶۷۵	۶۷۵	۱/۶۲	۰/۱۵	۱/۱۰
	۱, ۰/۸	۶۴۲	۶۴۲	۱/۲۹	۰/۱۸	۱/۰۵
	۱, ۱/۱	۵۱۸	۵۱۸	۰/۹۵	۰/۲۰	۰/۸۵
	۲, ۰/۶	۶۳۸	۵۷۱	۱/۲۵	۰/۵۷	۱/۰۴
	۲, ۰/۸	۵۶۴	۴۵۲	۱/۰۶	۰/۷۸	۰/۹۲
	۲, ۱/۱	۴۷۷	۴۱۳	۰/۹۲	۱/۳۴	۰/۷۸
	۶, ۰/۶	۳۴۰	۲۳۲	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۷۲
	۶, ۰/۸	۳۸۸	۱۷۵	۰/۷۴	۱/۱۵	۰/۶۳
	۶, ۱/۱	۳۵۶	۹۶	۰/۶۸	۲/۱۸	۰/۵۸
	۱۰, ۰/۶	۳۶۶	۲۵۶	۰/۷۱	۲/۰۹	۰/۶۰
	۱۰, ۰/۸	۳۵۵	۱۴۸	۰/۶۲	۲/۵۱	۰/۵۸
۱۰, ۱/۱	۳۲۹	۷۶	۰/۴۸	۶/۸۹	۰/۵۴	
۱۴۰۳	۱, ۰/۶	۶۶۳	۶۳۸	۱/۵۸	۰/۲۱	۱/۵۳
	۱, ۰/۸	۶۲۳	۵۴۹	۱/۳۴	۰/۲۵	۱/۴۴
	۱, ۱/۱	۵۷۶	۴۸۵	۰/۹۸	۰/۲۹	۱/۳۳
	۲, ۰/۶	۶۴۲	۳۳۲	۱/۳۰	۰/۸۱	۱/۴۸
	۲, ۰/۸	۵۸۸	۳۰۲	۱/۱۰	۱/۱۵	۱/۳۶
	۲, ۱/۱	۵۳۰	۲۷۷	۰/۹۴	۰/۶۹	۱/۲۲
	۶, ۰/۶	۴۷۲	۲۳۲	۰/۹۶	۰/۸۵	۱/۰۹
	۶, ۰/۸	۳۷۸	۱۷۵	۰/۷۸	۱/۱۲	۰/۸۷
	۶, ۱/۱	۳۵۰	۹۷	۰/۷۰	۲/۰۸	۰/۸۱
	۱۰, ۰/۶	۴۰۳	۲۵۶	۰/۷۰	۳/۸۷	۰/۹۳
	۱۰, ۰/۸	۳۵۷	۱۴۷	۰/۶۱	۴/۲۱	۰/۸۲
۱۰, ۱/۱	۳۴۹	۷۶	۰/۴۷	۶/۹۹	۰/۸۱	

۴. آنالیز آماری عملکرد برگ خشک و محتوی کلسیم، آهن و ازت

آنالیز واریانس بر اساس عملکرد برگ، کلسیم، آهن و ازت و کارایی مصرف آب زیرزمینی در محیط گلخانه انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ برای محیط گلخانه و جدول ۱۰ برای محیط مزرعه تحقیقاتی ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده معنی دار بودن اثرات عمق‌های مختلف آب زیرزمینی و کیفیت آنها بر عملکرد برگ خشک، کلسیم، آهن و ازت در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی است.

جدول ۹. آنالیز واریانس برای عملکرد برگ، کلسیم، آهن و ازت در محیط گلخانه

منبع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد برگ (کیلوگرم بر هکتار)	کلسیم ppm	آهن ppm	ازت %	کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ
سال	۱	۶۲۶۲۵/۵۵**	۴۴۸۰۳۵/۲۴**	۷/۴۲۸۶**	۰/۲۸۲۵**	۰/۲۰۴۹**
تکرار	۴	۱۵۳۲/۷۰ ns	۲۲۱۷/۴۶*	۰/۰۴۲۰ ns	۰/۱۵۲۶**	۰/۰۰۱۳ ns
(A) فاکتور عمق	۲	۳۹۲۹/۰۲ ns	۴۸۶۰/۴۹**	۰/۱۶۶۳ *	۲/۸۹۷۵**	۰/۰۰۳۶**
(B) فاکتور شوری	۳	۱۰۳۱۲/۷۹**	۴۳۳۴۳/۲۴**	۱/۶۴۶۹ **	۲۰/۸۵۹۶**	۰/۰۰۸۵ **
A سال *	۲	۲۰۲۹/۶۷ ns	۴۰/۷۷ ns	۰/۰۱۱۲ ns	۰/۱۸۶۹**	۰/۰۰۲۱ ns
B سال *	۳	۷۵/۸۵ ns	۳۰۷۵/۰۹*	۰/۳۳۴۱ **	۰/۱۸۰۹**	۰/۰۰۰۲ ns
AB	۶	۳۲۱/۲۱ ns	۶۶۹/۴۸ ns	۰/۰۱۰۹ ns	۱/۳۸۸۰**	۰/۰۰۰۲ ns
A سال * B	۶	۳۰۷/۳۰ ns	۲۷۷/۶۷ ns	۰/۰۰۶۷ ns	۰/۱۳۵۰**	۰/۰۰۰۲ ns
خطا	۴۳	۱۳۳۱/۲۲	۹۱۰/۹۸	۰/۰۵۹۱	۰/۰۳۵۵	۰/۰۰۱۱
ضریب تغییرات (درصد)	*	۱۴/۵۷	۱۵/۷۲	۱۶/۶۰	۱۹/۸۶	۱۴/۹۳

***، ** و * وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و نبود اختلاف معنی دار

جدول ۱۰. آنالیز واریانس برای عملکرد برگ، کلسیم، آهن و ازت در محیط مزرعه تحقیقاتی

منبع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد برگ (کیلوگرم بر هکتار)	کلسیم ppm	آهن ppm	ازت %	کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ
سال	۱	۴۱۲۵/۳۴*	۴۲۵۳۴/۷۲**	۰/۰۰۶۸*	۱/۶۹۸۹**	۰/۲۴۸۴**
ار تکر	۴	۳۴۹۲/۰۵*	۲۷۵۶/۸۸ ns	۰/۱۴۷۰ *	۰/۲۱۳۸**	۰/۰۰۲۹*
(A) فاکتور عمق	۲	۶۲۰۱۸/۰۵**	۱۳۲۳۹۸/۵۱**	۰/۷۹۳۳**	۱۳/۶۳۳۷**	۰/۰۴۹۷**
(B) فاکتور شوری	۳	۲۸۹۵۲۰/۹۰**	۶۸۴۷۳۱/۸۱**	۱/۷۲۵۵**	۶۲/۵۵۵۲**	۰/۲۳۶۹**
A سال *	۲	۱۳۵۶/۰۵ ns	۲۱۰۴/۰۱ ns	۰/۰۰۰۷ ns	۰/۹۰۰۰**	۰/۰۰۱۰ ns
B سال *	۳	۴۵۹/۷۱ ns	۳۲۱۷۲/۲۴ **	۰/۰۰۲۸ ns	۱/۵۷۹۶**	۰/۰۰۳۹**
AB	۶	۳۱۲۳/۵۵ *	۲۰۳۶/۴۹ ns	۰/۰۵۶۷ ns	۵/۹۷۵۸**	۰/۰۰۲۳ *
A سال * B	۶	۱۱۲۰/۳۷ ns	۹۸۲/۸۱ ns	۰/۰۰۱۵ ns	۰/۳۰۶۱**	۰/۰۰۰۷ ns
خطا	۴۳	۱۰۵۸/۷۲	۱۳۳۴/۸۲	۰/۰۵۲۴	۰/۰۵۴۸	۰/۰۰۰۸
ضریب تغییرات (درصد)	*	۶/۶۸	۱۱/۳۶	۱۰/۰۲	۱۳/۵۷	۶/۷۲

***، ** و * وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و نبود اختلاف معنی دار

بحث

خشکسالی و کم آبی در ایران یک واقعیت اقلیمی است و با توجه به روند روزافزون نیاز بخش های مختلف به آب، مشکل خشکسالی در سال های آینده حادث تر نیز خواهد شد و در چنین شرایطی یکی از راهکارهای موثر و عملی استفاده بهینه و صرفه جویی در مصرف آب است. مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده ای از مصارف آب در ایران و جهان را نیز شامل می شود، می تواند بسیار راه گشا و موثر باشد (ذوالفقاران، ۲۰۲۲). بررسی ها نشانگر آن است که تا کنون در زمینه تأثیر آب زیرزمینی کم عمق با کیفیت های مختلف و در شرایط آبیاری کامل سطحی بر کمک به تبخیر و تعرق در طول دوره رشد مورینگا اولیفرا در مناطق خشک و نیمه خشک تحقیقی انجام نشده تا بتوان با نتایج این پژوهش مقایسه نمود اما در رابطه با بعضی از سایر گیاهان

دارویی تحقیقاتی صورت پذیرفته است. طبق نتایج به دست آمده، مشخص شد که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی آب زیرزمینی با کیفیت شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر در کمک به تبخیر و تعرق گیاه مورینگا نقش بسزایی داشته به طوری که برای عمق‌های ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر درصد مشارکت آب زیرزمینی تقریباً می‌تواند بخش عمده‌ای از نیازهای آبی گیاه را تأمین نماید. ضمناً نتایج نشان داد در محیط گلخانه در حدود (۷۵/۲۲، ۵۸/۰۷، ۳۶/۷۰) و (۶۸/۰۱، ۵۰/۸۹، ۳۱/۵۶) و (۶۴/۸۱، ۴۶/۱۵، ۲۹/۸۰) و (۵۸/۳۴، ۳۷/۸۶، ۲۰/۹۹) و در محیط مزرعه تحقیقاتی در حدود (۸۲/۶۵، ۶۷/۵۹، ۴۱/۳۳) و (۷۳/۵۳، ۴۹/۴۸، ۳۱/۶۲) و (۵۳/۳۱، ۳۸/۸۶، ۲۴/۳۵) و (۳۸/۰۱، ۳۲/۶۹، ۲۰/۱۷) درصد از نیاز آبی گیاه بود. در کل نتایج این تحقیق نشانگر این موضوع است که استفاده از آب زیرزمینی کم‌عمق با شوری کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر برای گیاه مورینگا می‌تواند به صورت قابل توجهی نیاز آبی گیاه را بر طرف نموده و به تبخیر و تعرق گیاه کمک کند، همچنین دور و عمق آبیاری مورد نیاز نیز کاهش یابد. ضمناً با استفاده گیاه از آب زیرزمینی کم‌عمق می‌توان به مقدار زیادی در استفاده از آب سطحی صرفه جویی نموده و از این آب سطحی در توسعه بیشتری از اراضی استفاده کرد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد در محیط گلخانه میانگین کارایی مصرف آب در تولید برگ خشک به ترتیب برای شوری‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در عمق‌های ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۱ متر به ترتیب در حدود (۰/۸۶۶، ۰/۷۷۴، ۰/۶۶۰) و (۰/۷۷۶، ۰/۶۴۱، ۰/۵۷۰) و (۰/۷۲۵، ۰/۶۱۵، ۰/۵۴۵) و (۰/۶۳۹، ۰/۵۷۸، ۰/۴۷۹) و در محیط مزرعه تحقیقاتی در حدود (۰/۶۰۴، ۰/۵۷۱، ۰/۴۹۷) و (۰/۵۷۸، ۰/۵۲۲، ۰/۴۱۴) و (۰/۳۴۵، ۰/۳۱۹، ۰/۳۴۹) و (۰/۳۲۲، ۰/۳۰۷) به دست آمد که نشانگر این موضوع است که در هر دو محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی با افزایش عمق و شوری آب زیرزمینی کارایی مصرف آب در تولید برگ خشک کاهش یافته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی هرچه عمق و شوری آب زیرزمینی افزایش پیدا کند به علت آسان نبودن دسترسی ریشه‌های گیاه به آب زیرزمینی با عمق بیشتر و تأثیر منفی بر رشد اجزای گیاه مورینگا، سبب کاهش درصد مشارکت آب زیرزمینی و افزایش احساس نیاز به انجام آبیاری سطحی برای رفع نیازهای آبی گیاه می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که در هر دو محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی با افزایش عمق آب زیرزمینی و شوری، عملکرد برگ خشک، کلسیم و آهن کاهش می‌یابد اما محتوای نیتروژن موجود در برگ علی‌الرغم کاهش عملکرد برگها افزایش پیدا می‌کند همچنین نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب در تولید محصول برگ خشک نیز با افزایش عمق و شوری آب زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند. تا کنون پژوهشی بر روی گیاه مورینگا اولیفر در خصوص استفاده از آب زیرزمینی شور و کم‌عمق انجام نگرفته تا بتوان آنها را مقایسه کرد، اما نتایج پژوهش مشابه بر روی درخت افاقای سیاه (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۴)، ذرت (لیو و همکاران^۲، ۲۰۲۲)، گیاه دارویی سیاه‌دانه (قمرنیا و همکاران^۳، ۲۰۲۴)، گیاه گلرنگ (قمرنیا و همکاران^۳، ۲۰۱۱) و گیاه رزماری (قمرنیا و همکاران^۳، ۲۰۲۲) در استفاده از آب زیرزمینی کم‌عمق و شور به‌عنوان منبع تأمین بخشی از نیاز آبی گیاهان مورد مطالعه نتایج مشابهی را ارائه کرده است و نشان دادند که آبهای کم‌عمق با شوری کمتر سهم بیشتری در تأمین نیاز آبی گیاهان را داشته‌اند.

لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در مدیریت آبیاری کشت مورینگا اولیفر در مناطق گرم و خشک با پتانسیل آب زیرزمینی با کیفیت و اعماق متنوع، جهت صرفه‌جویی در مصرف منابع آب سطحی استفاده شود لذا با این روش اراضی بیشتری قابلیت کشت داشته و همچنین تولید محصول و امکان ایجاد اشتغال بیشتری برای کشاورزان فراهم خواهد بود. لازم به ذکر است که به صورت کلی استفاده از آب شور منجر به شور شدن خاک می‌شود و لازم است با آبیاری از انباشت نمک جلوگیری شود.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان ابراز داشت که در صورت وجود آب زیرزمینی در عمق کم، می‌توان از ۳۰٪ تا ۷۵٪ در محیط گلخانه و ۲۰٪ تا ۸۳٪ در محیط مزرعه، از نیاز آبی مورینگا اولیفر را تأمین کرد و به جای انجام آبیاری سطحی با صرف

1 . li et al

2 . liu et al

3 . Ghamarnia et al

منابع آب شیرین محدود و انرژی از آب زیرزمینی رایگان استفاده کرد. همچنین با توجه به عملکرد گیاه و محتوای عناصر مفید این گیاه در تیمارهای مختلف پیشنهاد می‌گردد در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای محدودیت منابع آب شیرین هستند و از طرفی از نعمت آب زیرزمینی کم‌عمق در عمق ۰/۶ تا ۱/۱ متر بهره‌مند هستند کشت گردد.

لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در مدیریت آبیاری کشت مورینگا اولیفا در مناطق گرم و خشک با پتانسیل آب زیرزمینی باکیفیت و اعماق متنوع، جهت صرفه جویی در مصرف منابع آب سطحی استفاده شود لذا با این روش اراضی بیشتری قابلیت کشت داشته و همچنین تولید محصول و امکان ایجاد اشتغال بیشتری برای کشاورزان فراهم خواهد بود. لازم به ذکر است که به‌صورت کلی استفاده از آب شور منجر به شور شدن خاک می‌شود و لازم است با آبیاری از انباشت نمک جلوگیری شود.

به‌صورت کلی از نتایج پژوهش می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت :

۱. به طور کلی شوری آب زیرزمینی باعث کاهش مصرف گیاه از آن می‌گردد. هرچه شوری بیشتر شود کاهش مصرف بیشتر می‌گردد. همچنین افزایش عمق سطح ایستابی نیز باعث کاهش مصرف آب زیرزمینی گشته است.
۲. به طور کلی شوری آب زیرزمینی باعث کاهش عملکرد برگ و کارایی مصرف آب در گیاه شده است. هر چه شوری بیشتر شود، کاهش عملکرد و کارایی مصرف آب نیز بیشتر می‌گردد. همچنین افزایش عمق سطح ایستابی باعث کاهش عملکرد برگ و کارایی مصرف آب در گیاه شده است.
۳. به طور کلی شوری آب زیرزمینی باعث کاهش عملکرد برگ و محتوی کلسیم، آهن و ازت در گیاه شده است. هرچه شوری بیشتر شود این کاهش نیز بیشتر می‌شود. همچنین افزایش عمق سطح ایستابی باعث کاهش عملکرد برگ و کارایی مصرف آب بر اساس تولید برگ و نیز کاهش محتوی کلسیم و آهن موجود در عصاره برگ می‌گردد. اما در خصوص محتوی ازت (پروتئین) موجود در برگ افزایش عمق سطح ایستابی باعث افزایش این پارامتر شده است

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور برابر در شکل‌گیری ایده مقاله و نگارش نسخه اولیه و نسخه‌های بعدی آن مشارکت داشته‌اند

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک در قالب پژوهانه رساله دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- رحیمیان، محمدحسن، و غلامی، حسن. (۱۴۰۱). تحلیلی بر وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۹(۳)، ۱۱۶-۱۰۷. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i3.2204.1135>
- ذوالفقاران، اردلان. (۱۴۰۱). تعیین آب کاربردی و بهره‌وری مصرف آب در مزارع زعفران استان خراسان رضوی. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۱)، ۵۱-۳۸. <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7535.1015>
- قمرنیا، هوشنگ، جلیلی، زهرا، و رضوانی، سید وحیدالدین. (۱۳۹۹). بررسی سطوح مختلف کم آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه استویا (*Stevia rebaudiana Bertoni*) در محیط‌های گلخانه و مزرعه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۲)، ۳۱۲۵-۳۱۱۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.308735.668716>
- قمرنیا، هوشنگ، امیری، سجاد، و نیکو کیش، مهتاب. (۱۴۰۱). بررسی امکان استفاده گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis.L*) از آب زیرزمینی کم‌عمق با کیفیت‌های مختلف. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۶(۳)، ۲۹۸-۲۸۷. <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.358650.924>
- کرباسی، علیرضا، محتشمی، تکتم، علیزاده، امین، و مقیمی، زهرا. (۱۳۹۹). بررسی عوامل موثر بر اضافه برداشت کشاورزان از منابع آب زیرزمینی در دشت زاوه- تربت حیدریه. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۴)، ۶۱۴-۶۰۳. <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.123502>
- مرزبان، حسین، صدرایی جواهری، احمد، زیبایی، منصور، ناظم السادات، سید محمد جعفر، و کریمی، لیلا. (۱۳۹۸). بررسی وضعیت منابع و مصارف آب در ایران و راهکارهای بهبود وضعیت. مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۴)، ۳۲-۱۶. <https://doi.org/10.22093/wwj.2018.126649.2663>
- فرمانی‌فرد، میلاد، نجفی بیامه، مهدی، محمدی، فرزانه، و محسنی‌پور، فتح‌الله. (۱۴۰۱). برآورد و بررسی تداخل حریمی چاه‌های بهره‌برداری جهت شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان (مطالعه موردی: آبخوان سنجایی کرمانشاه). نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۱)، ۱۰۲-۸۵. <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7582.1016>
- نیازمند، رویا، مقدم‌نیا، آرمان، طهماسبی، پیمان، نیک‌مهر، سامان، و معروف‌پور، عیسی. (۱۴۰۲). بهره‌وری مصرف آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در سامانه‌های آبیاری بارانی (مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان). نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۴)، ۱۳۷-۱۱۶. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13. https://water.nv.gov/mapping/et/Docs/Annex_1.pdf
- Baethgen, W.E., & Alley, M.M. (1989). A manual colorimetric procedure for measuring ammonium nitrogen in soil and plant Kjeldahl digests. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20, 961-969. <https://doi.org/10.1080/00103628909368129>
- Boretti, A. & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Connor, R. (2015). The United Nations world water development report water for a sustainable world, *UNESCO publications*, Paris, France. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823>
- Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., & Abbaspour, K. C. (2010). Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural water management*, 97(11), 1861-1875. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.002>
- Farmani Fard, M., Najafi Biameh, M., Mohammadi, F., & Mohsenipour, F. (2012). Estimation and investigation of the boundary interference of exploitation wells to identify vulnerable aquifer areas (Case study: Sanjabi Aquifer, Kermanshah). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 85-102. (In Persian) <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7582.1016>
- Ghamarnia, H., Golamian, M., Sepehri, S. & Arji, I. (2011). Shallow groundwater use by Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in a semi-arid region. *Irrigation science*, 29, 147-156.
- Ghamarnia, H., & Jalili, Z. (2014). Shallow saline groundwater use by Black cumin (*Nigella sativa* L.) in the presence of surface water in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 132, 89-100. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.308735.668716>
- Ghamarnia, H., Jalili, Z., & Rezvani, S. V. (2021). Investigation of different levels of deficit irrigation on the yield and water use efficiency of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) in greenhouse and field environments. *Soil and Water Research*, 51(12), 3115-3125. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.358650.924>
- Gowing, J., Rose, D. & Ghamarnia., H. (2009). The effect of salinity on water productivity of wheat under deficit irrigation above shallow groundwater. *Agricultural water management*, 96(3), 517-524. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.024>
- Jones, J. B. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis, CRC Publications, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>
- Karimi, V., Karami, E. & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Karbasi, A., Mohtashami, T., Alizadeh, A., & Moghimi, Z. (2021). Investigation of factors affecting farmers' over-withdrawal of groundwater resources in the Zaveh-Torbat Heydariyeh Plain. *Water Research in Agriculture*, 34(4), 603-614. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.123502>
- Li, H., Lan, Z., Chen, H., & Huang, J. J. (2024). How do non-halophyte locust trees thrive in temperate coastal regions: A study of salinity and multiple environmental factors on water uptake patterns. *Hydrological Processes*, 38(3), e15122. https://doi.org/10.1002/hyp.15122?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

- Liu, M., Paredes, P., Shi, H., Ramos, T. B., Dou, X., Dai, L. & Pereira, L. S. (2022). Impacts of a shallow saline water table on maize evapotranspiration and groundwater contribution using static water table lysimeters and the dual Kc water balance model SIMDualKc. *Agricultural Water Management*, 273, 107887. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v273y2022ics0378377422004346.html>
- Maghrebi, M., Noori, R., Bhattarai, R., Mundher Yaseen, Z., Tang, Q., Al-Ansari, N., Danandeh Mehr, A., Karbassi, A., Omidvar, . J. & Farnoush, H. (2020). Iran's agriculture in the anthropocene. *Earth's Future*, 8(9), e2020EF001547. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020EF001547>
- Marzban, H., Sadraei Javaheri, A., Zebai, M., Jafar Nazim Al-Sadat, S. M. & Karimi, L. (2019). Surveying the Status of Water Resources and Consumption in Iran and Strategies for Improving the Situation. *Water and Wastewater*, 30(4), 16-32. (In Persian) <https://doi.org/10.22093/wwj.2018.126649.2663>
- Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., & Madani, K. (2019). The groundwater–energy–food nexus in Iran's agricultural sector: implications for water security. *Water*, 11(9), 1835. <https://doi.org/10.3390/w11091835>
- Organization, W. H. (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities, World Health Organization Publications, Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2024--special-focus-on-inequalities>
- Niazmand, R., Moghadamnia, A., Tahmasebi, P., Nikmehr, S., & Maroufpoor, I. (2024). Water and energy consumption efficiency of potato crop in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan plain, Kurdistan province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 116-137. (In Persian) <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>
- Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 158, 106936. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>
- Rahimian, M. H., & Gholami, H. (2023). An Analysis of the Salinity Status of Water Resources in Use by the Agricultural Sector. *Water and Sustainable Development*, 9(3), 107-116. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i3.2204.1135>
- Santos, C. S. d., Montenegro, A. A. d. A., Santos, M. A., & Pedrosa, E. M. (2017). Evapotranspiration and crop coefficients of Moringa oleifera under semi-arid conditions in Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21, 840-845. <https://scite.ai/reports/evapotranspiration-and-crop-coefficients-of-dvL9M6M>
- Zad-Parsa, Sh., Sepaskhah, A. R., & Didari, S. (2024). Gradual Reduction of Agricultural Water Withdrawal an Effective Step in Adapting to Water Scarcity in Iran. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 9(1), 19-34. <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2024.403085.1073>
- Water, U. (2007). Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century. Prepared for World Water Day. Fao Publications, Rome, Italy. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/aq444e>
- Zolfagharan, A. (2022). Determination of Applied Water and Water Use Efficiency in Saffron Farms in Khorasan Razavi Province. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 38-51. (In Persian) <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7535.1015>