

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۶، شماره ۱۰۰، پاییز ۱۴۰۴



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

پژوهشی

جلد ۲۶، شماره ۱۰۰، پاییز ۱۴۰۴

Vol. 26, No. 100, Autumn 2025

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

فهرست مقالات

- ۱ تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به-کارگیری سامانه آبیاری کم-فشار
آرزو مختاری حساری، علیرضا نعمتی
- ۱۷ مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی
سعید اکبری زاده، احسان فدائی کرمانی، مهناز قائینی حسارویی
- ۳۴ طبقه‌بندی و پایش زمانی - مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت
(مطالعه موردی: دشت قزوین)
شیرا آزاده رنجبر، مجید خلقی، افشین اشرف‌زاده
- ۵۶ تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک
(مطالعه موردی: غرب سیستان)
منصور جهان‌تیغ، معین جهان‌تیغ
- ۷۵ تفکر سیستمی؛ پارادایم مفقوده در مدیریت آب ایران
نادر عباسی
- ۱۰۵ مطالعه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در بدنه سد خاکی همگن واقع بر بستر آبرفتی
عاطفه عرب، حجت احمدی، نورعلی حق‌دوست، بهرام نورانی

AERI

Contents

- Explaining the Role of Farmers' Self-Efficacy and Ease of Technology Application on the Adoption Behavior of Low-Pressure Irrigation Systems 1
Arezou Mokhtari Hesari, Alireza Nemati
- Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet. 17
Saeed Akbari Zade, Ehsan fadaei Kermani, Mahnaz Ghaeini Hesaroeeyeh
- Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural, and Industrial Uses (Case Study: Qazvin Plain) 34
Abolghasem Haghayeghi Moghaddam, Majid Keramati, Ardalan Zolfagharan
- The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions. (Case study: West of Sistan) 56
Mansor Jahantigh, Moien Jahantigh
- Systems Thinking: The Missing Paradigm in Water Management 75
Nader Abbasi
- Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation 105
Atefeh Arab, Hojjat Ahmadi, Nourali Haghdoust, Bahram Nourani

AERI

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

عَنْ مُحَمَّدٍ
عَلَيْهِ السَّلَامُ



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)

پژوهشی

جلد ۲۶، شماره ۱۰۰، پاییز ۱۴۰۴ شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

یادداشت فنی

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به‌کارگیری سامانه آبیاری کم‌فشار

۱ آرزو مختاری حصارى، علیرضا نعمتی

مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی

۱۷ سعید اکبری‌زاده، احسان فدائی کرمانی، مهناز قائینی حصاروئی

طبقه‌بندی و پایش زمانی - مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت قزوین)

۳۴ شیما آزاده رنجبر، مجید خلقی، افشین اشرف‌زاده

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک (مطالعه موردی: غرب سیستان)

۵۶ منصور جهان‌تیغ، معین جهان‌تیغ

تفکر سیستمی؛ پارادایم مفقوده در مدیریت آب ایران

۷۵ نادر عباسی

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در بدنه سد خاکی همگن واقع بر بستر ابرفتی

۱۰۵ عاطفه عرب، حجت احمدی، نورعلی حق دوست، بهرام نورانی

مجله "تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی"

با درجه علمی - پژوهشی مطابق ابلاغ (مجوز) شماره ۳/۱۸/۸۱۶۷۱ مورخ ۱۳۹۴/۰۴/۳۱ وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

نمایه شده در CABI، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، ایران ژورنال، بانک اطلاعات نشریات کشور، پایگاه اطلاعات جهاد دانشگاهی و مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی (Agris) (Agrisis)

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
مدیر مسئول: دکتر حسین دهقانی‌سانج

سر دبیر: دکتر نادر عباسی

دستیار سر دبیر: دکتر امید رجا

هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

| | |
|---------------------|--|
| محمدحسین امید | استاد، دانشگاه تهران |
| عاطفه پرورش‌ریزی | دانشیار، دانشگاه تهران |
| نادر حیدری | دانشیار، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی |
| محمود شفاعی بجنستان | استاد، دانشگاه شهید چمران اهواز |
| فریبرز عباسی | استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی |
| نادر عباسی | استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی |
| صلاح کوچک‌زاده | استاد، دانشگاه تهران |
| محمدجواد منعم | استاد، دانشگاه تربیت مدرس |
| ابوالفضل ناصری | دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی |
| علیرضا کیانی | استاد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان |

هیأت تحریریه بین‌المللی (به ترتیب حروف الفبا):

| | |
|-----------------|---|
| علی ترابی حقیقی | دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت هیدروسستم‌ها، دانشکده آب و انرژی و محیط زیست، دانشگاه Oulu فنلاند |
| محمدعلی شریفی | دانشیار مؤسسه علوم جغرافیایی و مشاهده زمین، دانشگاه Twente، هلند |
| راضیه فرمائی | دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه Exeter انگلستان |

بررسی‌کنندگان این شماره:

| | | | |
|---------------|----------------|------------------|-------------------|
| - مسعود اکبری | - افشین خورسند | - نادر عباسی | - محمد مهدی حیدری |
| - فرشید تاران | - نوید خیاط | - مهسا قطبی‌زاده | - پیمان ورجاوند |
| - امید جمشیدی | - فریبرز عباسی | - مصطفی گودرزی | - محمدرضا وکیلی |

ویراستار علمی و ادبی: محمدرضا داهی

ویراستار انگلیسی: محمدرضا داهی

مدیر داخلی: افشین یوسف گمرکچی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تلفن: ۰۲۲۰۵۲۲۰، ۰۲۲۰۵۲۴۲ و ۰۲۲۰۸۳۰۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۰۲۶ ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)

پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

پایگاه اطلاعاتی مجله: <http://idser.areeo.ac.ir>

پیام‌نگار: aridsej@areeo.ac.ir



Technical note

Explaining the Role of Farmers' Self-Efficacy and Ease of Technology Application on the Adoption Behavior of Low-Pressure Irrigation Systems

Arezou Mokhtari Hesari^{✉1}, AliReza Nemati²

1. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor Department of Education Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran.

(✉ Corresponding Author: mokhtari@pnu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 24 August 2025

Revised: 29 September 2025

Accepted: 6 November 2025

Available Online: 10 Desember 2025

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mokhtari Hesari, A., Nemati, A.R (2025). Explaining the Role of Farmers' Self-Efficacy and Ease of Technology Application on the Adoption Behavior of Low-Pressure Irrigation Systems. V.26, No.99, P: 1-16

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370504.1628>

Extended Abstract

Introduction

The majority of agricultural areas worldwide are managed using traditional surface irrigation methods. However, these methods face significant challenges, including inefficient water use and suboptimal productivity. Given their widespread use and low efficiency, improving surface irrigation systems has become essential. In recent decades, numerous initiatives have aimed to enhance the efficiency of irrigation systems and management practices. One such advancement is the development of low-pressure irrigation systems. Studies based on behavioral theories examining farmers' adoption of irrigation technologies have identified several influential factors. Accordingly, this study aims to explain the role of technology ease of use and farmers' self-efficacy in influencing their behavior toward adopting and using modern low-pressure irrigation systems.

Materials and Methods

The method of this research follows a quantitative paradigm. In terms of purpose, it is applied research, and in terms of data collection, it is descriptive research conducted through a survey. In total, 112,010 farmers in East Azerbaijan Province formed the study population, and a sample of 393 was selected using the Cochran formula through multi-stage sampling. The main data collection tool was a researcher-designed questionnaire consisting of three parts: the first part relates to the individual characteristics of the farmers, the second part concerns the characteristics of the exploitation system, and the third part includes items related to the main variables. The face and content validity of the questionnaire were confirmed by professors and subject matter experts. The reliability of the research instrument was determined using Cronbach's alpha, and construct validity was assessed through convergent validity using confirmatory factor analysis. SPSS 20 and AMOS 21 software were used for data analysis.

Results

The measurement and structural model analyses indicated that model fit was acceptable across multiple indices and that the hypothesized relationships among the variables were logically consistent. Hypothesis testing revealed that all proposed relationships were statistically significant. Specifically, there was a positive and significant relationship between the perceived ease of use of the low-pressure irrigation system and farmers' willingness to adopt it. Additionally, farmers' self-efficacy was found to be significantly associated with their willingness to use the technology. Overall, structural equation modeling showed that ease of use and self-efficacy together explained 60% of the variance in farmers' willingness to adopt low-pressure irrigation systems, with ease of use emerging as the stronger predictor.

Conclusions

This study investigated the factors influencing farmers' adoption of low-pressure irrigation systems. Specifically, it examined the effects of perceived ease of use of the technology and farmers' self-efficacy on their willingness to adopt such systems. The findings confirmed that both factors significantly influence adoption, with ease of use playing a particularly strong role. When the equipment, connections, and maintenance of the irrigation system are simple to operate and learn, farmers are more likely to adopt low-pressure irrigation. Additionally, farmers' confidence in their ability to implement water conservation strategies enhances their conservation behavior. In other words, effective water conservation depends on farmers' understanding and belief in their own capabilities.

Keywords: Water consumption management, Modern irrigation system, Technology acceptance, Farmers' behavior

Acknowledgments

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

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

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

Authors' Contribution

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



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370504.1628>

نوع مقاله: یادداشت فنی

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به‌کارگیری سامانه آبیاری کم‌فشار

آرزو مختاری حصار^۱، علیرضا نعمتی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

چکیده

با توجه به اهمیت عوامل متعدد بر رفتار کشاورزان در به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری، پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش سهولت کاربرد فناوری و خودکارآمدی کشاورزان بر رفتار به‌کارگیری سامانه نوین آبیاری کم‌فشار اجرا شده است. این پژوهش به لحاظ هدف، کاربردی و از نظر طرح تحقیق، پژوهش کمی است. جامعه آماری تحقیق، کشاورزان استان آذربایجان شرقی به تعداد ۱۱۲۰۱۰ نفر بودند که بر اساس فرمول کوکران، نمونه ۳۸۳ نفری از آن‌ها با استفاده از روش نمونه‌گیری چندمرحله‌ای انتخاب شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای SPSS20 و AMOS21 استفاده شد. نتایج تجربی پژوهش با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که متغیرهای سهولت کاربرد فناوری و خودکارآمدی کشاورزان و تمایل به کاربرد فناوری آبیاری کم‌فشار، ۶۰ درصد از واریانس متغیر کاربرد آبیاری کم‌فشار را تبیین کردند. همچنین، متغیر سهولت کاربرد فناوری، پیش‌بینی کننده قوی‌تری برای متغیر تمایل به کاربرد سامانه آبیاری کم‌فشار بوده است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت مصرف آب، سامانه نوین آبیاری، پذیرش فناوری، رفتار کشاورزان

مقدمه

داشت (Wang et al., 2024). طی دهه‌های گذشته، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه افزایش کارایی آبیاری با استفاده از فناوری‌های مختلف صورت گرفته است (Darko et al., 2020)، اما اکثریت مناطق کشاورزی در دنیا همچنان از روش‌های مختلف آبیاری سطحی سنتی استفاده می‌کنند (Singh et al., 2018).

روش‌های آبیاری سنتی با چالش‌های اساسی از جمله ناکارآمدی در مصرف آب و بهره‌وری زیربهدینه مواجه است (Kakkavou et al., 2024) و نه تنها بر تولید محصول تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه منجر به تخریب منابع نیز می‌شود (Singh et al., 2018). با توجه به گستردگی استفاده از روش‌های آبیاری سطحی سنتی و بازده پایین آن، بهبود روش‌های آبیاری سطحی گریزناپذیر است. در دهه های

انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، تقاضا برای غذا و انرژی افزایش قابل توجهی خواهد یافت و توجه به مسائل مربوط به کمبود آب و افزایش دما بیش از پیش ضروری خواهد شد (Kakkavou et al., 2024). کمبود آب، نه تنها محدودیتی است کلیدی برای توسعه پایدار کشاورزی جهانی (Wang et al., 2024) بلکه در فهرست چالش‌های زیست محیطی، عامل مهمی است که توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی را در جهان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به خطر می‌اندازد (Ataei et al., 2024). از این رو، استفاده از راهبردهای افزایش حفاظت از آب در بخش کشاورزی و کاربرد و ترویج فناوری‌های نوین آبیاری، تأثیر مثبت قابل توجهی بر استفاده پایدار از منابع آب خواهد

^۱ نویسنده مسئول: (Email: mokhtari@pnu.ac.ir)

^۱ استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

^۲ استادیار گروه روانشناسی و علوم تربیتی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

اخیر توجه برنامه‌ریزان در سطح استان به سیستم‌ها و روش‌های نوین آبیاری دوچندان شده است. اما اجرای سامانه‌های آبیاری تحت فشار به دلیل اینکه به الزام‌های مختلف به ویژه استخر ذخیره آب و انرژی برق مناسب نیاز دارد و از سوی دیگر شوری منابع آب در منطقه و مشکل گرفتگی قطره‌چکان‌ها نیز پیش روست، با دشواری‌های بسیاری مواجه است و امکان در بسیاری از مناطق استان وجود ندارد (Rezaei et al., 2021). در چنین شرایطی، استفاده از آبیاری کم فشار می‌تواند راهکاری مناسب برای مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی استان به‌شمار آید. با توجه به اینکه دولت، تسهیلاتی به‌عنوان مشوق‌های مالی به‌منظور استفاده از فناوری‌های آب فراهم کرده است، اما به‌نظر می‌رسد توسعه فناوری‌های نوین آبیاری به‌خوبی صورت نگرفته است و سطوح پیش‌بینی‌شده برای اجرای فناوری‌های نوین آبیاری در برنامه‌های توسعه به‌طور کامل محقق نشده است (Behbahani Motlagh et al., 2018). به‌همین ترتیب، میزان مطلوب استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری به‌ویژه فناوری آبیاری کم‌فشار در منطقه مورد مطالعه با وضع مطلوب فاصله زیادی دارد. با توجه به حمایت‌های مالی دولت و اینکه سامانه‌های نوین آبیاری به شکلی مناسب توسعه نیافته‌اند، می‌توان گفت که عواملی وجود دارد که بر رفتار کشاورزان در تصمیم به پذیرش و استفاده از فناوری آبیاری کم‌فشار تأثیر می‌گذارند. مطالعه پژوهش‌های مبتنی بر تئوری‌های رفتاری برای بررسی رفتار کشاورزان در پذیرش و استفاده از فناوری‌ها نشان می‌دهد عوامل متعددی در این زمینه مؤثرند. نتایج پژوهش‌های Valizadeh & Karimi (2018) نشان داد که متغیرهای نیت حفاظت آب، عوامل اجتماعی، انتظارات پیامدی، خودکارآمدی و هم‌نظم دهی در زمینه حفاظت آب اصلی‌ترین تعیین‌کننده‌های رفتار حفاظت آب هستند. در پژوهش

اخیر برای بهبود کارایی سیستم‌های آبیاری و شیوه‌های مدیریتی ابتکارهای زیادی شده است (Koech et al., 2021). یکی از فناوری‌هایی که برای بهبود آبیاری سطحی طراحی شده و در سال‌های اخیر پژوهشگران (Pereira et al., 2003; Tognetti et al., 2003; Thompson et al., 2011; Woltering et al., 2010) بدان توجه کرده‌اند، سامانه آبیاری کم‌فشار^۱ است. راندمان این روش آبیاری تا ۸۵ درصد است (Garcia-Saldana et al., 2019). در این روش آبیاری، استفاده از لوله‌های دریچه‌دار^۲ در آبیاری سطحی کمک می‌کند تا تلفات آب در داخل مزارع که معمولاً با استفاده از فاروهای سنتی بیشتر است، کاهش یابد (EL-Shafie et al., 2018). استفاده از لوله‌های دریچه‌دار مزایای پرشماری در پی دارد، از جمله اینکه برای نصب سیستم به زمین کمتری نیاز است، نشت و تبخیر آب در این شیوه کاهش پیدا می‌کند، توزیع آب بهتر می‌شود و هزینه آن کمتر از هزینه راه‌اندازی سیستم‌های دیگر است (Osama et al., 2015).

در حال حاضر از ۴۰۰ هزار هکتار زمین کشاورزی آبی در استان آذربایجان شرقی، ۹۶۲۳۱ هکتار (۲۴ درصد) به سامانه‌های نوین آبیاری مجهز شده‌اند اما در ۲۲۰ هزار هکتار از زمین‌های آبی در این منطقه، قابلیت اجرای فناوری‌های نوین آبیاری تحت فشار و کم‌فشار وجود دارد (East Azerbaijan Jihad-e-Agriculture Organization, 2023). به نظر می‌رسد کشاورزان برای اجرای فناوری‌های نوین آبیاری در مزارع‌شان گامی بر نداشته‌اند. از طرف دیگر، استان آذربایجان شرقی از نظر راندمان کاربرد آب، ۴۰ درصد در سیستم‌های آبیاری سطحی، نسبت به میانگین کشور که شاخص راندمان کل آبیاری ۵۷ درصد است (abbasi & abbasi, 2023) در رتبه پایین‌تری قرار دارد (East Azerbaijan Jihad-e-Agriculture Organization, 2017). با توجه به این مسئله، در سال‌های

¹ Low-pressure irrigation system

² Gated pipes

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به کارگسری امانه آبیاری کم فشار

احمدوند و شرفی پور (Ahmadvand & Sharafipour, 2019) خودکارآمدی تنها متغیر معنادار در رفتار حفاظت از آب در بین کشاورزان شناخته شده است. یافته‌های صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2020) نشان داد که خودکارآمدی، نیازهای روانشناختی و چشم‌انداز زمانی بالاترین تأثیر را بر رفتار بهره‌برداری از منابع آب داشته است. کرنگر و همکاران (Kernecker et al., 2020) در پژوهش‌های خود، اهمیت سهولت استفاده از فناوری را در پیشبرد پذیرش فناوری‌ها برجسته کرده است. نتایج پژوهش ونگ و همکاران (Wang et al., 2024) نشان داد که سهولت درک شده از کاربرد فناوری به طور قابل توجهی به رفتار پذیرش فناوری آبیاری صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزان کمک می‌کند و مقررات دولتی در تأثیر سهولت درک شده از فناوری بر پذیرش فناوری‌های آبیاری صرفه‌جویی در مصرف آب توسط کشاورزان نقش تعدیل کننده‌ای دارد. مرادحاصلی و همکاران (Moradhaseli et al., 2021) با بررسی عوامل اساسی رفتار حفاظت آب توسط کشاورزان نتیجه گرفتند که رفتار کشاورزان توسط خودکارآمدی درک شده پشتیبانی می‌شود و خودکارآمدی بر رفتار حفاظت از آب توسط کشاورزان تأثیر مثبت و معنی‌داری دارد. نتایج پژوهش‌های عطایی و همکاران (Ataei et al., 2024) نشان داد که رفتار حفاظت از آب تحت تأثیر حساسیت درک شده، منافع درک شده، موانع درک شده و خودکارآمدی است. در این پژوهش، با توجه به اهمیت عوامل متعدد بر رفتار کشاورزان در به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری، نقش عامل‌های سهولت کاربرد فناوری و خودکارآمدی کشاورزان بررسی شده است.

سهولت کاربرد^۱: سهولت کاربرد فناوری اشاره دارد به اینکه استفاده از سیستمی خاص از نظر فرد چقدر راحت است و درک اینکه استفاده از سیستم تا چه اندازه بدون

زحمت خواهد بود (Kakkavou et al., 2024). تجربه‌ها و باورهای افراد می‌تواند عوامل تعیین‌کننده سهولت استفاده از فناوری باشد (Venkatesh and Davis, 2000). ککاوو و همکاران (Kakkavou et al., 2024) می‌گویند راجرز (۱۹۸۳) در نظریه انتشار نوآوری، پنج ویژگی اساسی را شناسایی کرده است که عمیقاً بر میزان پذیرش نوآوری‌ها تأثیر می‌گذارد، یکی از این پنج ویژگی ارزیابی سهولت استفاده درک شده از نوآوری است. همچنین مارانگونی و گرانی (Maranguni and Grani, 2015) در مدل پذیرش فناوری دیویس و همکاران (۱۹۸۹) گزارش می‌دهند دو عامل کلیدی در پذیرش فناوری یکی سهولت درک شده در استفاده از فناوری و دیگری سودمندی درک شده است. در تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده آجزن (Ajzen, ۱۹۹۱) تأکید قابل توجهی بر نقش نگرش‌ها و نیت‌ها در شکل دادن به تصمیمات نهایی شده وجود دارد. نیت‌ها و رفتار واقعی با دو عامل تعیین می‌شوند یکی هنجارهای ذهنی و دیگری ادراک شخص از سهولت یا اشکال در نشان دادن رفتار. این نظریه‌ها چارچوب نظری امیدوارکننده‌ای را برای بررسی عوامل رفتاری ارائه می‌کنند که بر پذیرش فناوری‌ها تأثیر می‌گذارد (Pathak et al., 2019). اینکه کشاورزان در نهایت از روش‌های آبیاری سنتی استفاده کنند یا از فناوری‌های آبیاری مرتبط با صرفه‌جویی در مصرف آب تا حد زیادی به آسانی یادگیری استفاده از تجهیزات صرفه‌جویی در آب بستگی دارد (Warner et al., 2020). برخی مطالعات نشان دهنده عامل سهولت استفاده از فناوری به عنوان عامل مهم در تمایل رفتاری است (Shen and Chiou, 2010; Verma and Sinha, 2018). در برخی پژوهش‌ها در زمینه کشاورزی از جمله، پذیرش فناوری آبیاری تحت فشار بین کشاورزان (Movahedi et al., 2018) و پذیرش فناوری مدیریت تلفیقی آفات در بین باغداران (Ghorbani piralidehi et al., 2013) به تأثیر عامل

¹ Ease of use

یکی از راه‌های کاهش پیامدهای بحران جهانی آب تغییر رفتار کشاورزان نسبت به حفظ منابع آب است. ترغیب کشاورزان به حفاظت از منابع آب، بسیار مهم است. برای آنکه این کار به سرانجام برسد، شناخت عوامل مؤثر بر رفتارهای کشاورزان در پذیرش و کاربرد فناوری‌های نوین آبیاری، ضروری است. به نظر می‌رسد باید اطلاعات بیشتری از نحوه تفکر و دلایل استفاده کردن یا استفاده نکردن کشاورزان از فناوری‌های نوین آبیاری را به دست آورد. این پژوهش به دنبال تحلیل تأثیر نقش عامل روانشناختی خودکارآمدی و عامل فنی سهولت کاربرد فناوری بر رفتار کشاورزان در استفاده از فناوری آبیاری کم‌فشار است. چارچوب مفهومی پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. فرضیه‌های پژوهش در مدل نشان داده شده است.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از لحاظ پارادایم کمی است و از نظر هدف، یک تحقیق کاربردی و از لحاظ شیوه گردآوری داده‌ها جزو پژوهش‌های توصیفی است که پیمایشی صورت گرفته است. جامعه آماری شامل کشاورزان شهرستان‌های تبریز، شبستر، آذرشهر، اسکو، خداآفرین، جلفا، ملکان، مرند و سراب به تعداد ۱۱۲۰۱۰ نفر در استان آذربایجان شرقی بودند (Statistical Center of Iran, 2014). بر اساس فرمول کوکران، حجم نمونه کشاورزان مورد مطالعه ۳۸۳ نفر برآورد شد. دلیل انتخاب شهرهای مذکور، اجرای طرح‌های آبیاری کم‌فشار در این شهرها بوده است. برای دستیابی به کشاورزان مورد مطالعه از روش نمونه‌گیری چند مرحله‌ای استفاده شده است. به این صورت که در استان مورد مطالعه از ۹ شهر تعداد ۴ مورد شامل شهرستان‌های تبریز، اسکو، شبستر و آذرشهر برای جمع‌آوری داده‌ها انتخاب شدند.

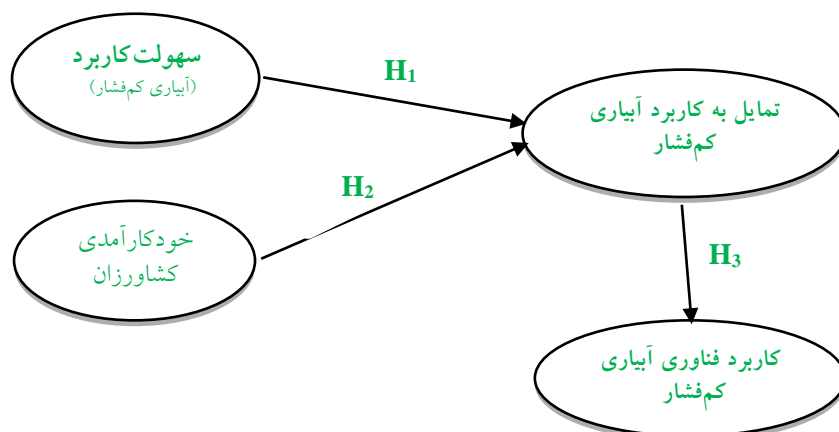
سهولت کاربرد فناوری بر نگرش و بر قصد رفتاری به استفاده از فناوری تأکید شده است.

خودکارآمدی^۱: خودکارآمدی اعتقادی است که فرد برای دستیابی به سطح مشخصی از عملکرد و نیز برای دستیابی به نتایج دلخواه خویش نسبت به ظرفیت‌ها و توانمندی‌های خود دارد (Mohseni *et al.*, 2013). در زمینه کاربرد فناوری‌ها، خودکارآمدی عبارت است از میزان باور فرد بر اینکه به کارگیری فناوری تا چه اندازه می‌تواند موفق‌تر باشد (Bolliger *et al.*, 2010). خودکارآمدی از نظریه شناخت اجتماعی مشتق شده است و چنین می‌گوید افرادی که باورهای خودکارآمدی قوی دارند، معتقدند می‌توانند به‌طور مؤثری با رویدادها و شرایطی برخورد کنند که با آن مواجه می‌شوند (Mohseni *et al.*, 2013). در این پژوهش، خودکارآمدی بر اساس میزان باور کشاورزان به توانایی‌شان در آماده‌سازی مقدمات، راه‌اندازی و بهره‌برداری از سامانه آبیاری کم‌فشار سنجیده شده است. پژوهش‌گران متعددی مانند Zewld *et al.* (2017)، Gangwal & Bansal (2016)، Kazemi *et al.* (2013)، Leejoeiwara (2013)، Yadavar *et al.* (2018)، Sarlak *et al.* (2017)، Tao & Fan (2012)، Wu Hungand (2015)، Taylor & Todd (1995)، Sadeghi *et al.* (2020) و Ahmadvand & Sharafipour (2019) به بررسی تأثیر خودکارآمدی بر رفتار در پذیرش یا نپذیرفتن فناوری‌های جدید پرداخته‌اند.

کشاورزان مهم‌ترین گروه هدف سیاست‌های حفاظت از آب و افزایش بهره‌وری آب هستند و با توجه به اهمیت استفاده از روش‌های نوین آبیاری، ضرورت بررسی رفتار آن‌ها در مواجهه با فناوری‌های بهبود بهره‌وری آب به‌ویژه شناخت عوامل تأثیرگذار بر آن دو چندان می‌شود، چون بروز رفتار مناسب و درست از سوی آنان می‌تواند در حفاظت از منابع آب، نقش حیاتی داشته باشد. در حقیقت،

¹ Self-efficacy

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به کارگیری امانه آبیاری کم فشار



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

Fig.1- Conceptual Model of the Research

سپس، در شهرهای منتخب، برخی بخش‌ها انتخاب شدند، در بخش‌های مذکور نیز از میان دهستان‌ها تعدادی انتخاب شدند. در نهایت، برخی روستاهای دهستان‌های منتخب برای دریافت اطلاعات از کشاورزان انتخاب شدند (۱۷ روستا). با در نظر گرفتن احتمال وجود نقص در پرسشنامه‌های تکمیل شده، در مجموع ۴۰۰ پرسشنامه آماده شد و در نهایت ۳۹۳ پرسشنامه تحلیل شدند. نمونه آماری تحقیق در روستاهای منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای SPSS²⁰ و AMOS²¹ استفاده شد.

جدول ۱- حجم نمونه تحقیق در روستاهای منطقه مورد مطالعه بر اساس تعداد بهره‌بردار کشاورز

Table 1- Research sample size in the villages of the study area based on the number of farmer beneficiaries

| حجم نمونه Sample size | روستا Village | دهستان Rural district | بخش Section | تعداد کشاورز Number of farmers | شهرستان County |
|--------------------------|------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|
| ۲۱ | زیناب | سیس | مرکزی | ۱۴۲۰۳ | شیبستر |
| ۱۹ | بیگجه خاتون | | | | |
| ۲۸ | تازه کند | | | | |
| ۳۹ | قم تپه | چله خانه | صوفیان | | |
| ۲۲ | سهلان | آجی چای | | | |
| ۳۳ | خواجه دیزج | | | | |
| ۲۶ | بیرق | میدان چای | مرکزی | ۱۶۷۷۰ | تبریز |
| ۳۰ | فتح آباد | | | | |
| ۱۴ | زرنق | | | | |
| ۳۱ | قشلاق | شورکات جنوبی | | | |
| ۹ | کردلر | | | | |
| ۱۶ | قپچاق | جزیره | ایلخچی | ۹۷۴۰ | اسکو |
| ۱۸ | گمیچی | | | | |
| ۳۵ | خراجو | قبله‌داغی | | | |
| ۲۱ | نادیلو | | | | |
| ۸ | قاضی جهان | قاضی جهان | حومه | ۱۰۵۱۶ | آذرشهر |
| ۱۳ | آخی جهان | | | | |

یافته‌های مربوط به ویژگی‌های توصیفی نظام بهره‌برداری یافته‌های پژوهش نشان داد که میانگین مساحت زمین‌های زیرکشت ۳/۵ هکتار بوده است. از کشاورزان، ۵۱/۹ درصد دارای زمین زراعی آبی کمتر از ۲ هکتار بودند. منبع آب ۴۷/۸ درصد از کشاورزان چاه نیمه عمیق بوده است. نوع مالکیت منابع آبی ۸۶/۹ درصد از کشاورزان، مشارکتی بوده است. از چاه‌ها ۵۳/۸ درصد مجهز به کنتور هوشمند بودند و ۵۸/۷ درصد موتور برقی داشته‌اند، ۷۵/۱ درصد از کشاورزان از نهر خاکی برای انتقال آب استفاده می‌کردند. منابع آب مورد استفاده ۷۹/۲ درصد از کشاورزان میزان شوری بالایی ($EC > 1500$) داشته‌اند. آبیاری ۸۷/۸ درصد از مزارع و ۹۰/۲ درصد از باغ‌ها به روش سنتی غرقابی بوده است.

مدل اندازه‌گیری مربوط به متغیرهای پژوهش

به‌منظور تدوین مدل اندازه‌گیری تحقیق و آزمون روایی سازه، پایایی ترکیبی و برازش مدل، داده‌ها از طریق تحلیل عاملی تأییدی (مرتب اول) تجزیه و تحلیل شدند که یافته‌های به‌دست آمده از آن در جدول ۲ آورده شده است. به‌غیر از سه متغیر در مولفه‌های نگرش، کنترل رفتاری و تمایل، که به‌دلیل داشتن بار عاملی کمتر از ۰/۵ از فرایند تحلیل حذف شدند، مقدار بار عاملی دیگر متغیرهای آشکار در مدل اندازه‌گیری بزرگ‌تر از ۰/۵ بود. پس از حذف متغیرهای اشاره شده، مقادیر میانگین واریانس استخراج شده (AVE) و پایایی ترکیبی (CR) محاسبه شده برای متغیرهای مکنون مورد مطالعه به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۵ (۰/۵۸۱) و ۰/۷ (۰/۸۰۲) به‌دست آمدند که مقادیر مناسبی هستند. بر این اساس، روایی همگرا و پایایی ترکیبی ابزار تحقیق پس از اجرای اصلاحات اشاره شده به‌دست آمد. بررسی شاخص‌های برازش مدل نشان داد که برازش مدل اندازه‌گیری تحقیق بر اساس شاخص‌های مختلف در سطحی قابل قبول است و بین متغیرهای مورد مطالعه روابط منطقی برقرار است.

در این تحقیق ابزار اصلی جمع‌آوری داده‌ها، پرسشنامه محقق ساخته بود که شامل سه بخش است، بخش اول مربوط به مشخصه‌های فردی کشاورزان مورد مطالعه، بخش دوم مربوط به مشخصه‌های نظام بهره‌برداری و بخش سوم شامل گویه‌های مربوط به عوامل مورد مطالعه و مؤثر بر کاربرد آبیاری کم‌فشار است که برای تدوین آن از مطالعات Taylor & Todd, 1995; Chen & Tung, 2014; Sarlak et al. 2015; Moons & De Pelsmaker, 2015; Ajzen, 2002; Gangwal & Bansal, 2016; Sandoghi & Raheli, 2017; استفاده شده است. روایی صوری و محتوایی پرسشنامه بر اساس نظر استادان ترویج و توسعه کشاورزی در دانشگاه تهران و دانشگاه زنجان (۴ نفر) تأیید شده است. برای تعیین پایایی ابزار پژوهش از آلفای کرونباخ بهره‌گیری شده است که برای مولفه‌های مورد مطالعه از ۰/۷۵۸ تا ۰/۸۹۶ به‌دست آمد. برای تعیین روایی سازه از روش روایی همگرا در قالب تحلیل عاملی تأییدی استفاده شد که به نتایج آنها در ادامه اشاره شده است.

یافته‌ها و بحث

یافته‌های مربوط به ویژگی‌های توصیفی کشاورزان مورد مطالعه

بر اساس نتایج پژوهش، میانگین سنی پاسخگویان ۵۱ سال بود. نود و نه درصد از کشاورزان مورد مطالعه مرد بودند، ۱۴ درصد بی‌سواد، ۲۰/۱ درصد دارای سواد ابتدایی، ۳۵/۶ درصد دارای سطح سواد راهنمایی و متوسطه، ۱۶ درصد دارای دیپلم و ۱۴/۳ درصد دارای مدارک بالاتر از دیپلم بودند. شغل اصلی ۸۵/۲ درصد از پاسخگویان کشاورزی بوده است. از کشاورزان مورد مطالعه ۷۶/۶ درصد مالک زمین‌های کشاورزی‌شان بودند. ۱۰/۷ درصد از کشاورزان از تسهیلات بلاعوض دولتی استفاده کرده‌اند. منبع دریافت اطلاعات مربوط به آب و سامانه‌های آبیاری ۶۳/۱ درصد از کشاورزان جهاد کشاورزی بوده است.

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به کارگسری امانه آبیاری کم فشار

جدول ۲- نتایج به دست آمده از برآورد روایی و پایایی مدل اندازه گیری

Table 2 - Results obtained from the validity and reliability assessment of the measurement model

| شاخص روایی و پایایی Validity and Reliability Indicator | بار عاملی Factor loading | گویه‌ها (نماد در مدل) Items (Symbol in Model) | متغیر مکنون Hidden variable |
|---|-----------------------------|---|---|
| CR=۰/۹۰۴ AVE=۰/۶۵۷ | ۰/۸۶۰ | من فکر می‌کنم به تنهایی و بدون کمک دیگران (اعم از کارشناسان، مشاوران و غیره) می‌توانم از سیستم آبیاری کم فشار در مزرعه خود استفاده کنم (eu1). | سهولت کاربرد (Ease of use) |
| | ۰/۹۱۳ | من فکر می‌کنم به راحتی می‌توانم با تجهیزات و اتصالات سیستم آبیاری کم فشار کار کنم (eu2). | |
| | ۰/۸۹۲ | در صورت نیاز، من به آسانی می‌توانم اتصالات و تجهیزات سیستم آبیاری کم فشار را تعمیر کنم (eu3). | |
| | ۰/۶۹۶ | من فکر می‌کنم پیاده‌سازی و استفاده از سیستم آبیاری کم فشار در مزرعه، کار بسیار فنی و پیچیده‌ای بوده و یادگیری آن برای من آسان نیست (eu4). | |
| | ۰/۶۶۰ | من فکر می‌کنم جابجایی لوله‌های هیدروفولوم در مزرعه کار دشوار و زمان‌بری است (eu5). | |
| CR=۰/۹۰۱ AVE=۰/۶۹۸ | ۰/۷۹۰ | من به دانش، توانایی و مهارت خود در استفاده از سیستم آبیاری کم فشار اطمینان دارم (se1). | خودکارآمدی (Self-efficacy) |
| | ۰/۹۴۱ | من فکر می‌کنم حتی اگر استفاده از سیستم آبیاری کم فشار پیچیده و دشوار باشد، به تنهایی می‌توانم آن را در مزرعه خود استفاده کنم (se2). | |
| | ۰/۹۰۳ | من اطمینان دارم در صورت مواجهه با مشکل در استفاده از سیستم آبیاری کم فشار در مزرعه خود، می‌توانم آن را با موفقیت برطرف کنم (se3). | |
| | ۰/۷۰۰ | می‌توانم سایر کشاورزان را برای استفاده از سیستم آبیاری کم فشار راهنمایی کنم (se4). | |
| CR=۰/۹۰۶ AVE=۰/۷۰۶ | ۰/۸۲۲ | من قصد استفاده از سیستم آبیاری کم فشار را در مزرعه خود در آینده دارم (in1). | تمایل به کاربرد آبیاری کم فشار (Intention) |
| | ۰/۸۳۳ | من در حال برنامه‌ریزی برای استفاده از سیستم آبیاری کم فشار در مزرعه خود در آینده هستم (in2). | |
| | ۰/۸۲۴ | من به طور جدی استفاده از سیستم آبیاری کم فشار را به سایر کشاورزان و روستاییان توصیه می‌کنم (in3). | |
| | ۰/۸۹۰ | من برای استفاده و توسعه سیستم آبیاری کم فشار در مزرعه خود در آینده تلاش خواهم کرد (in4). | |
| CR=۰/۸۶۹ AVE=۰/۶۹۱ | ۰/۸۸۰ | اقدامات اولیه اعم از آزمایش آب و خاک و سایر موارد را برای راه‌اندازی سامانه آبیاری کم فشار در مزرعه خود انجام داده‌ام (be1). | رفتار (Behavior) |
| | ۰/۹۰۱ | در حال حاضر به صورت آزمایشی بخشی از اراضی خود را مجهز به سیستم آبیاری کم فشار کرده‌ام (be2). | |
| | ۰/۶۹۸ | من در تمامی اراضی خود از سامانه آبیاری کم فشار استفاده می‌کنم (be3). | |

مدل ساختاری پژوهش

۶۰ درصد از واریانس میزان کاربرد آبیاری کم‌فشار را تبیین

در این بخش در قالب مدل ساختاری، اقدام به آزمون کرده است.

افزون بر نتایج اشاره شده در بالا، نتایج در خصوص

فرضیه‌ها شد. نتایج به‌دست آمده از آن در جدول ۲ و شکل

آزمون فرضیه‌ها در جدول (۳) بیانگر آن است که تمامی

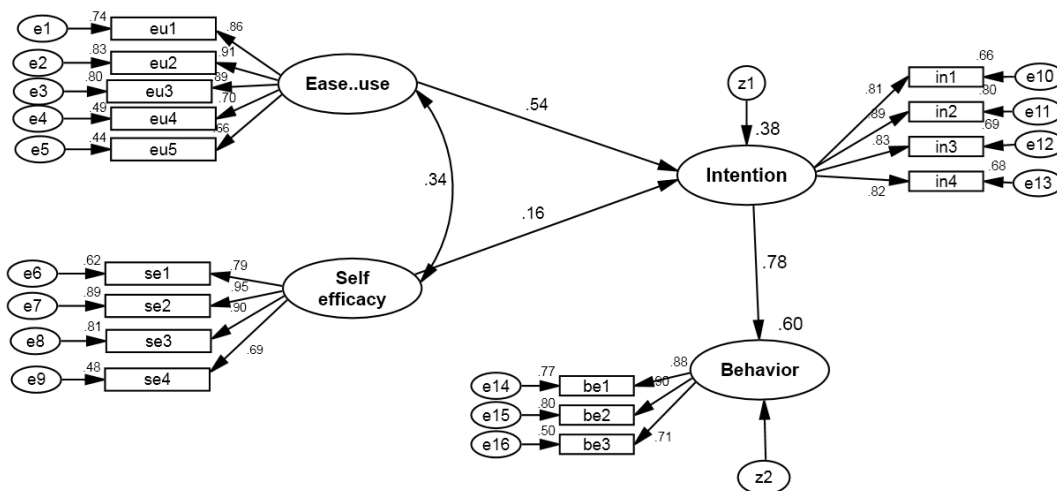
۱ ارائه شده است که نشان می‌دهد برازش مدل در سطحی

روابط بین متغیرها، معنی‌دار و تأیید شده است.

قابل قبول بود. بر اساس نتایج تحقیق، متغیر تمایل بر

به‌کارگیری فناوری آبیاری کم‌فشار به‌همراه سایر متغیرها

Chi-square (df) = 361.399 (100); P value (≥ 0.05) = .000;
 Relative Chi-Sq (≤ 5) = 3.614; AGFI (≥ 0.9) = .864;
 GFI (≥ 0.9) = .900; CFI (≥ 0.9) = .944; IFI (≥ 0.9) = .944;
 RMSEA (≤ 0.08) = .082; RMR (≤ 0.08) = .042



شکل ۲- مدل ساختاری بر اساس ضرایب استاندارد شده

Fig. 2- Structural model based on standardized coefficients

جدول ۳- خلاصه نتایج به دست آمده از برآورد مدل ساختاری

Table 3- Summary of results obtained from structural model estimation

| نتیجه آزمون | سطح معنی‌داری | نسبت بحرانی | ضرایب استاندارد شده | خطای استاندارد | مقادیر غیراستاندارد | مسیر |
|-------------|--------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------|---|
| Test result | Significance level | Critical ratio | Standardized coefficients | Standard error | Non-standardized estimates | Path |
| تأیید فرضیه | ۰/۰۰۰** | ۹/۱۹۶ | ۰/۵۴۱ | ۰/۰۶۱ | ۰/۵۵۹ | سهولت کاربرد ← تمایل به کاربرد آبیاری کم‌فشار |
| تأیید فرضیه | ۰/۰۰۱** | ۳/۲۶۳ | ۰/۱۵۹ | ۰/۰۳۲ | ۰/۱۰۶ | خودکارآمدی ← تمایل به کاربرد آبیاری کم‌فشار |
| تأیید فرضیه | ۰/۰۰۰** | ۱۲/۴۴۵ | ۰/۷۷۶ | ۰/۰۶۴ | ۰/۷۹۱ | تمایل به کاربرد آبیاری کم‌فشار ← کاربرد |

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به کارگسری امانه آبیاری کم فشار

بحث و نتیجه گیری

در ایران، تمرکز بر مؤلفه‌هایی مانند خودکارآمدی، ضروری است. در پژوهش‌های کاظمی و همکاران (Kazemi *et al.*, 2013)، گانگوال و بنسال (Gangwall and Bensal, 2016)، لیجوارا (Leejoeiwara, 2013)، یادآور و همکاران (Hung & Wu, 2018)، هیونگ و وو (Yadavar *et al.*, 2012)، سرلک و همکاران (Tao & Fan, 2017)، و تیلور و تاد (Sarlak 2015) و تیلور و تاد (Taylor & Todd, 1995)، تأثیر خودکارآمدی بر بروز رفتار تأیید شده است. می‌توان ادعا کرد که درک کشاورزان از توانایی آنها در استفاده از راهبردهای حفاظت از آب می‌تواند رفتار حفاظتی آنها را بهبود بخشد. به عبارت دیگر، رفتار صرفه‌جویی در مصرف آب نیازمند درک کامل کشاورزان از توانایی‌های خود است که می‌تواند روند رفتار را سریع کند.

با توجه به نتایج کسب شده از تحقیق، بین میزان سهولت کاربرد سیستم آبیاری کم فشار و تمایل کشاورزان به کاربرد آن رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار وجود دارد. عامل سهولت کاربرد از اجزای تشکیل دهنده نظریه اشاعه نوآوری، مدل پذیرش فناوری دیویس، تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده و مدل تجزیه‌یافته آن است که در پذیرش یا نپذیرفتن فناوری مؤثر است. برخی مطالعات نشان داده است که عامل سهولت استفاده از فناوری عاملی مهم در تمایل رفتاری است (Shen and Chiou, 2010; Verma and Sinha, 2018). با توجه به اینکه سهولت استفاده به طور مستقیم و یا غیرمستقیم از طریق نگرش می‌تواند بر تصمیم به استفاده از فناوری تأثیرگذار باشد، برای افزایش پذیرش فناوری آبیاری نوین در بین کشاورزان، باید روی نگرش کشاورزان و درک آنها از سهولت کاربرد سیستم‌های آبیاری نوین تمرکز کرد (Movahedi *et al.*, 2018). نتایج پژوهش‌های مختاری و همکاران (Mokhtari *et al.*, 2019) نشان دهنده پیچیدگی کمتر فناوری آبیاری کم فشار (سهولت تعمیر و نگهداری تجهیزات و اتصالات و جابه جایی آسان لوله‌های هیدروفولوم در مزرعه) است. به اعتقاد

این مطالعه برای بررسی نقش عواملی است که بر رفتار کشاورزان در زمینه پذیرش سامانه آبیاری نوین کم فشار تأثیر دارند. در این پژوهش تأثیر عامل‌های سهولت کاربرد فناوری و خودکارآمدی بر تمایل کشاورزان به کاربرد آبیاری کم فشار تأیید شده است. در مجموع، متغیرهای مذکور توانستند ۶۰ درصد از تغییرات کاربرد سامانه آبیاری کم فشار را تبیین کنند و متغیر سهولت کاربرد، پیش‌بینی‌کننده قوی‌تری بوده است. این امر نشان می‌دهد که استفاده آسان و راحت از فناوری، در تمایل کشاورزان به کاربرد سامانه آبیاری کم فشار، نقش بیشتری دارد.

نتیجه این پژوهش بیانگر معنی‌داری ارتباط خودکارآمدی با تمایل به نشان دادن رفتار است. خودکارآمدی پیشینه‌ای مهم برای رفتار افراد است (Gangwall & Bensal, 2016). براساس نظریه شناختی اجتماعی می‌توان گفت، افرادی که خودکارآمدی بالایی در استفاده از فناوری جدید دارند تمایل بیشتری به استفاده از آن خواهند داشت زیرا خود را در این زمینه توانا می‌بینند. بنابراین، خودکارآمدی می‌تواند بر پذیرش آن مؤثر باشد. در این پژوهش، کشاورزانی که به دانش و مهارت خود در استفاده از سیستم آبیاری کم فشار اطمینان داشتند و به توانایی خود در زمینه حل مشکلات مربوط به آن باورمند بودند و خود را توانمند به راهنمایی دیگر کشاورزان در این زمینه می‌دانستند، تمایل بیشتری به کاربرد سامانه آبیاری کم فشار داشتند. با توجه به اینکه خودکارآمدی به صورت قضاوت افراد بر توانایی‌هایشان برای سازماندهی و اجرای برخی کارها به منظور دستیابی به عملکرد بالاست، باید برای افزایش خودکارآمدی کشاورزان در زمینه استفاده از سیستم آبیاری کم فشار به توانمندسازی آنان در ابعاد نگرشی و فنی پرداخت. عطایی و همکاران (Ataei *et al.*, 2024) تأکید می‌کنند که برای ترویج رفتار صرفه‌جویی در مصرف آب و استفاده از استراتژی‌های مقابله با کمبود آب

- ونگ و همکاران (Wang *et al.*, 2024)، تمرکز کار آینده باید بر بهبود درک کشاورزان از سهولت استفاده از فناوری‌های آبیاری صرفه‌جویی در آب، گسترش دامنه آموزش‌های فنی و یارانه‌های فنی و تقویت حمایت و آموزش باشد. در پژوهش‌های موحدی و همکاران (Movahedi *et al.*, 2018) و قربانی پیرعلیدهی (Ghorbani piralidehi, 2013) به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به تأثیر عامل سهولت کاربرد فناوری بر نگرش و همین‌طور بر تمایل رفتاری به استفاده از فناوری تأکید شده است. در این پژوهش، کشاورزانی که کار با تجهیزات و اتصالات سیستم آبیاری کم‌فشار و تعمیر آن را پیچیده نمی‌دانستند و حتی یادگیری آن را برای خود آسان می‌دانستند، تمایل بیشتری به کاربرد سیستم آبیاری کم‌فشار داشته‌اند. به عبارت دیگر، بر اساس دیدگاه کشاورزان، آسانی استفاده از ابزارهای سامانه آبیاری کم‌فشار، عاملی مهم برای استفاده از این فناوری است. پیچیده نبودن پیاده‌سازی سیستم، راحتی تعمیر اتصالات و تجهیزات و دشوار نبودن جابه‌جایی لوله‌های هیدروفلوم در مزرعه می‌تواند باعث ترغیب و تشویق کشاورزان به تبدیل سیستم آبیاری سطحی به سامانه آبیاری کم‌فشار شود.
- بر اساس دیگر یافته‌های پژوهش، ارتباط مثبت و معنی‌داری بین نیت و رفتار کشاورزان نسبت به کاربرد آبیاری کم‌فشار وجود دارد. در واقع، هر چه تمایل کشاورزان نسبت به استفاده از سیستم نوین کم‌فشار در آبیاری بیشتر باشد رفتار آن‌ها نیز نمایان‌تر خواهد شد. تمایل تعیین‌کننده تقریبی رفتار است و میزان علاقه افراد برای بروز رفتار است. می‌توان گفت هر چه میزان تمایل به استفاده بهینه از منابع آب بیشتر باشد احتمال بروز رفتارهایی مانند استفاده از روش‌های آبیاری با راندمان بالا از طرف کشاورزان بیشتر خواهد بود. در پژوهش‌های یادآور و همکاران (Yadavar *et al.*, 2018)، تیلور و تاد (Taylor & Todd, 1995)، فلورونسو و اوگانسی (Folorunso & Ogunseye, 2008) و رحیمی فیض آبادی و همکاران (Rahimi Faizabadi *et al.*, 2017.) تمایل رفتاری به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده مهم رفتار بوده است.
- استفاده از روش‌های نوین آبیاری البته منطبق با شرایط اقلیمی هر منطقه از اقدامات اساسی در راستای عملیاتی‌سازی الگوی بهینه مصرف است. با توجه به تطبیق شرایط محیطی بیشتر مناطق استان آذربایجان شرقی (شوری آب به دلیل نزدیکی به دریاچه ارومیه) با اجرای سیستم آبیاری کم‌فشار و محدودیت آبیاری پرفشار در این مناطق، اجرای سیاست‌های حمایتی و تشویقی در جهت تغییر رفتار کشاورزان و توسعه کاربرد فناوری نوین آبیاری کم‌فشار در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس یافته‌های پژوهش که مبتنی بر تأیید نقش مؤثر عامل‌های سهولت کاربرد فناوری و خودکارآمدی بر رفتار کشاورزان نسبت به کاربرد فناوری آبیاری کم‌فشار است، پیشنهادهای زیر ارائه شده است:
- به دلیل نقش مهم سهولت استفاده از فناوری آبیاری کم‌فشار در کاربرد این سامانه، سازمان‌های متولی به منظور اطلاع‌یابی کشاورزان از مزیت سهولت کاربرد فناوری، باید گام‌های مؤثرتری در مناطق مستعد توسعه بردارند. لازم است سازمان‌های ذی‌ربط برای افزایش اطلاعات کشاورزان و بازدید از واحدهای موفق دارای سیستم آبیاری کم‌فشار، به منظور مشاهده مزایای ملموس فناوری برای بهبود نگرش کشاورزان برنامه‌های آموزشی تنظیم کنند.
 - استفاده از قابلیت رسانه‌های استانی، شبکه‌های اجتماعی، تولید برنامه‌های کاربردی ترویجی در جهت معرفی سیستم‌های مناسب و نوین آبیاری و مزایای آن به ویژه سهولت کاربرد فناوری در منطقه مورد مطالعه در جهت بهبود نگرش کشاورزان می‌تواند مؤثر باشد.

تبیین نقش خودکارآمدی کشاورزان و سهولت کاربرد فناوری بر رفتار به کارگیری امانه آبیاری کم فشار

- به منظور بهبود بیشتر خودکارآمدی کشاورزان، **تضاد منافع نویسندگان**، کارشناسان کشاورزی با استمداد از متخصصان روان‌شناسی دوره‌های آموزشی را برگزار کنند. وزارت جهاد کشاورزی باید با جذب روانشناسان اجتماعی و استفاده از توانمندی آنها برای توسعه کاربرد سیستم‌های آبیاری تلاش کند.

- پیشنهاد می‌شود برای افزایش قابلیت اجرایی سیستم آبیاری توسط کشاورزان، کارگروه‌های تخصصی با حضور پژوهشگران روانشناسی و اجتماعی در زمینه سیستم آبیاری، متخصصان آب و مروجان کشاورزی ایجاد گردد و امکان همکاری این گروه در تدوین سیاست‌های مربوط به اجرای سیستم‌های آبیاری فراهم گردد.

منابع مالی
نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها
همه داده‌ها و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان
همه نویسندگان به اندازه یکسانی در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس اصلی و متعاقب آن مشارکت داشتند.

تشکر و قدردانی
نویسندگان از همه شرکت کنندگان (کشاورزان) بابت این مطالعه مقاله تشکر می‌کنند.

مراجع

- Abbasi, F., Abbasi, N. (2023). An analysis of irrigation efficiencies over time. *Iranian Irrigation and Drainage*, 17(6), 1025-1033. (In Farsi)
- Ahmadvand, M., & Sharafipour, L. (2019). Determinants of water conservation behavior of wheat farmers in Orzuieh city using conservation motivation theory. *Irrigation and Water Engineering of Iran*, 38, 275-259. (In Farsi)
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, 50(2), 179-211.
- Ajzen, I. (2002). Perceived behavioral control, self-efficacy, locus of control, and the theory of planned behavior. *Applied Social Psychology*, 32(4), 665-683.
- Ataei, P., Karimi, H., Hallaj, Z., Mottaghi, A. (2024). Risks of farmer's behavior change towards water conservation: a study in the southeast of Iran. *Water supply*, 24(3), 723.
- Behbahani Motlagh, M., Sharifzadeh, M-S., Abdollahzadeh, G-H. & Mahboobi, M-R. (2018). Farmers' Adoption Behavior of Pressurized Irrigation Technology in Dashtestan County. *Agricultural Extension and Education*, 13 (1), 89-103. (In Farsi)
- Bolliger, D. U., Supanakorn, S., & Boggs, C. (2010). Impact of podcasting on student motivation in the online learning environment. *Computers and Education*, 55(2), 714-722.
- Chen, M. F. & Tung, P. J. (2014). Developing an extended theory of planned behavior model to predict consumers' intention to visit green hotels. *Hospitality Management*, 36, 221-230.

- Darko R O, Liu J P, Yuan S Q, Sam-Amoah L K, Yan H F.(2020). Irrigated agriculture for food self-sufficiency in the sub-Saharan African region. *Int J Agric & Biol Eng*, 13(3): 1–12.
- East Azerbaijan Jihad-e-Agriculture Organization. (2017). Fifty-seven thousand hectares of land in East Azerbaijan are equipped with modern irrigation. Retrieved from: <http://www.irna.ir/eazarbaijan/fa/News/> (In Farsi)
- East Azerbaijan Agricultural Jihad Organization. (2023). 96,231 hectares of agricultural lands in East Azerbaijan have been equipped with modern irrigation systems. Available on the website: <https://www.irna.ir/news/84743419>(In Farsi)
- El-Shafie, A.F., Marwa, M.A., & Dewedar, O.M. (2018). Research Article Hydraulic Performance Analysis of Flexible Gated Pipe Irrigation Technique Using GPIMOD Model. *Asian Journal of Crop Science*, 10(4), 180-189.
- Folorunso, O., & Ogunseye, S. (2008). Applying an enhanced technology acceptance model to knowledge management in agricultural extension services. *Data Science Journal*, 7. 31-45.
- Gangwal, N. & Bansal, V. (2016). Application of Decomposed Theory of Planned Behavior for M-commerce Adoption in India. *Proceeding of 18th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS)*, India, 357-367.
- Garcia-Saldana, A., Landeros-Sanchez, C., Castaneda-Chavez, M., Martinez-Davila, J., Perez-Vazquez, A., & Carrillo-Avila, E. (2019). Fertirrigation with Low-Pressure Multi-Gate Irrigation Systems in Sugarcane Agro ecosystems: A Review. *Pedosphere*, 29(1), 1–11.
- Ghorbani piralidehi, F., Alibeigi, A-H. & Simohamadi, S. (2013). Examining the Technology Acceptance Model of IPM among Orchard Farmers of Dalahoo Township, *Agricultural Extension and Education Research*, 6(4), 107-123. (In Persian).
- Hung, S.Y., & Wu, H, L. (2012). Factors Influencing User Acceptance of Web-Based Decision Support Systems. *Journal of Computer Information Systems*, 52(4), 70-77.
- Kakkavou, K., Gemtou, M., Founta, S. (2024). Drivers and barriers to the adoption of precision irrigation technologies in olive and cotton farming lessons from Messenia and Thessaly regions in Greece. *Smart Agricultural Technology*. 7, 100401.
- Kazemi, A., Nilipour, A. & Kabiry, N. (2013). Factors affecting Isfahanian mobile banking adoption based on the decomposed theory of planned behavior. *Academic Research in Business and Social Sciences*, 7(3), 230–245. (In Farsi)
- Koech, R. Haase, M. Grima, B. Taylor, B. 2021. Barriers and measures to improve adoption of irrigation technologies: A case study from the Bundaberg region in Queensland, Australia. *Irrigation and Drainage*, 70(5).
- Kernecker, M, A. Knierim, A. Wurbs, T. Kraus, F. Borges, Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe, *Prec. Agric.* 21 (2020) 34–50, <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>.
- Leejoeiwara, B. (2015). Modeling adoption intention of online education in Thailand using DTPB with self-directed learning. Assumption University. Retrieved from: <http://repository.au.edu/handle/6623004553/3026>.
- Maranguni, N and A. Grani, A. (2015). Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013, *Universal Access Inf. Soc.* 14 (2015) 81–95, <https://doi.org/10.1007/s10209-014-0348-1>.
- Mokhtari Hesari, A., Rezaei, R. and Shabanali Fami, Hossein. (2019). Opinion of East Azerbaijan Agricultural Jihad experts on the problems of using low-pressure irrigation systems by farmers. *Agricultural Education Management Research*, ۵۰, 74-90.

- Mohseni, A., Mousavi, S. H. & Jamali M. (2013). The role of entrepreneurship training on students' entrepreneurial attitude and general self-efficiency beliefs. *Research and Planning in Higher Education*, 19 (3), 63-80. (In Farsi)
- Moons, I. & De Pelsmacker, P. (2015). An Extended Decomposed Theory of Planned Behavior to Predict the Usage Intention of the Electric Car: A Multi-Group Comparison. *Sustainability*, 7, 6212-6245.
- Moradhaseli, S., Ataei, P., Van den Broucke, S. & Karimi, H. 2021 the process of farmers' occupational health behavior by health belief model: Evidence from Iran. *Journal of Agromedicine* 26 (2), 231–244. doi:10.1080/1059924X.2020.1837316.
- Movahedi, R., Izadi, N. & Vahdatadab, R. (2018). Investigating Factors Affecting Farmers' Adoption of Pressurized Irrigation Tchnology in Asadabad County, Hamedan Province. *Water Research in Agriculture*, 31 (2), 287-300. (In Farsi)
- Osama, A. M., Ahmed, A. & Mohammed, S.H. (2015). Performance Evaluation of Gated Pipes Technique for Improving Surface Irrigation Efficiency in Maize Hybrids. *Agricultural Sciences*, 6, 550-570.
- Pathak, H.S, P. Brown, T. Best. (2019). A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process, *Precis. Agric.* 20 (2019) 1292–1316, <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09653-x>
- Pereira, L.S., Calejo, M.J., Lamaddalena, N., Douteb, A. & Bounoua, R. (2003). Design and performance analysis of low-pressure irrigation distribution systems. *Irrigation and Drainage Systems*, 17, 305-324.
- Rahimi Faizabadi, F., Yazdanpanah, M., Forouzani, M., Mohammad Zadeh, S. & Burton, R. (2017). Explanation of Farmers' Water Conservation Behaviors Using Extended Planned Behavior Theory: The Case of Farmers in Aleshtar County. *Agricultural Extension and Education*, 12(2), 1-17. (In Farsi)
- Rezaei, R., Mokhtari Hesari, A. and 'Shababali Fami, H. 2021. Analysis of Psychological Factors Affecting Farmers' Behavior in Using Low-pressure Irrigation System in the East Azarbaijan Province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 52(3), 469-487. Doi: 10.22059/ijaedr.2021.311867.6689
- Sadeghi, A., Farhadian, H., & Bijani, B. (2020). The mediating role of farmers' time perspective in water resources exploitation behaviour in the eastern area of Lake Urmia, Iran: An environmental psychological analysis. . *Water and Environment*, 34(s1), 106-120. (In Farsi)
- Sandoghi, A. & Raheli, H. (2017). Extending the model of planned behavior to predict the intention of producing organic products among Isfahan cucumber greenhouse owners by Moral norm variable. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 47-2(4), 961-974. (In Farsi)
- Sarlak, M-A., GHolpaygani, Z, & Yamani, M. (2015). Investigating the effective factors on the acceptance of e-government by those who refer to the judiciary of Tehran province based on the DTPB model. *Management and Development Process*, 27(1), 27-42. (In Farsi)
- Shen, C.C., and Chiou, J.S. (2010). The impact of perceived ease of use on internet service adoption: the moderating effects of temporal distance and perceived risk. *Computers in Human. Behavior*, 23(1), 42-50.
- Singh, A., Jhorar, R.K., Kumar, S. and Kumar, N. (2018). Performance Evaluation of Surface Irrigation Method under Cotton-Wheat Rotation. *Current Microbiology and Applied Sciences*. 7(5), 1014-1026.
- Statistical Center of Iran (۲۰۱۴). Detailed results of the general agricultural census of 2014, East Azerbaijan Province. Management and Planning Organization
- Tao, C.C., & Fan, C.C. (2017). A Modified Decomposed Theory of Planned Behavior Model to Analyze User Intention towards Distance-Based Electronic Toll Collection Services. *Promet – Traffic and Transportation*, 29 (1), 85-97.
- Taylor, S., & Todd, P.A. (1995). Understanding information technology usage, a test of competing modeles. *Information Systems Research*, 6 (2), 144-176.

- Thompson, E.J., Merkley, G.P., Keller, A.A. & Barfuss, S.L. (2010). Experimental determination of the hydraulic properties of low-pressure, lay-flat drip irrigation systems. *Irrigation and Drainage Engineering*, 137 (1), 37-48.
- Tognetti, R., Palladino, M., Delfine, S. & Alvino, A. (2003). The response of sugar beet to drip and low-pressure sprinkler irrigation in southern Italy. *Agricultural Water Management*, 60 (2), 135-155.
- Valizadeh, N., & Karimi Goghari, H. (2018). Psychological and social analysis of water resources protection: a solution to reduce vulnerability to water shortage. *The Second National Conference on Meteorology of Iran, Mashhad*. (In Farsi)
- Venkatesh, V., and Davis, F.D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Journal of Management Science*, 46(2) 186 -204.
- Verma, P., & Sinha, N. (2018). Integrating perceived economic wellbeing to technology acceptance model: The case of mobile based agricultural extension service. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 207-216.
- Warner, L. A., Lamm, A. J. & Silvert, C. (2020). Diffusion of water-saving irrigation innovations in Florida's urban residential landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening* 47, 126540. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126540>.
- Wang, Y., Wang, Z., Zhao, M., Li, B. (2024). The influence of thechnology perceptions on farmer's water saving irrigation technology adoption behavior in the north china plain. *Water policy*, 26(2), and 170.
- Woltering, L., Ibrahim, A., Pasternak, D. & Ndjeunga, J. (2011). The economics of low pressure drip irrigation and hand watering for vegetable production in the Sahel. *Agricultural Water Management*, 99 (1), 67-73.
- Yadavar, H., Nami, M. & Zarifiyan, SH. (2018). Applying the Analysis of Planned Behavior Theory on Adoption of Organic Farming. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 28 (1), 169-183. (In Farsi)
- Zeweld, W., Huylenbroeck, G.V., Tesfay, G. & Speelman, S. (2017). Smallholder farmers' behavioral intentions towards sustainable agricultural practices. *Environmental Management*, 187, 71-81.

Research Article

Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet

Saeed Akbari Zade¹, Ehsan Fadaei-Kermani ², Mahnaz Ghaeini-Hessaroeeyeh ³

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

(✉ Corresponding Author: e.fadaei@uk.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 11 September 2025

Revised: 8 October 2025

Accepted: 30 December 2025

Available Online: 24 January 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Akbari Zade, S., Fadaei Kermani, E., Ghaeini Hesaroeeyeh, M., (2025). Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet. V.26, No.99, P: 17-33
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370674.1630>

Extended Abstract

Introduction

Urban sewage collection systems in areas with rugged topography present significant hydraulic challenges. Steep slopes and substantial elevation differences generate high kinetic energy in the flow. Without proper control, this excess energy leads to adverse consequences, including erosion and degradation of the channel bed and walls. Further issues may involve structural damage and vibrations induced by high-energy flow, the entrainment of large volumes of air due to free-falling sewage, and the potential for water hammer in closed systems. To address these challenges, vortex drop structures have been introduced as an efficient engineering solution. These structures establish a controlled vortex flow pattern within a vertical shaft, thereby dissipating the incoming flow's excess energy in an effective and manageable manner.

Methodology

In the present study, a physical model of a vortex drop structure was constructed to investigate its hydraulic performance, including the spiral inlet and the shaft. Furthermore, since the structure's performance in flow energy dissipation is significantly influenced by the upstream and downstream hydraulic conditions and geometry, the rate of flow energy dissipation by the structure was measured.

A 1:10 scale physical model of the East Tehran Sewer Vortex Drop Structure was constructed in the Hydraulic Structures Laboratory of Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. The model comprises a rectangular approach channel, a tangential vortex inlet, a drop shaft, an energy dissipator, and a rectangular outlet conduit. In this study, a spiral inlet with different outlet diameters was employed. The inlet channel, with a rectangular cross-section, conveys the flow to the tangential inlet structure. This channel measures 0.18 m in width (B) and 0.21 m in height. Downstream of the vortex drop structure, the flow exits via a rectangular outlet conduit measuring 0.18 m in width and 0.24 m in height.

The model begins with an initial reservoir; upon filling, water enters the structure through the inlet channel. The wall height of the inlet channel is 0.24 m. Four different flow rates were used in this experiment: 10.67, 14.55, 19.40, and 25.22 liters per second, respectively.

Results and Discussion

In the present study, the flow behavior within different sections of the vortex drop structure, including the inlet channel, the spiral inlet structure, and the outlet channel (energy dissipator), was investigated. Subsequently, the influence of three parameters including: flow rate (Q), inlet structure diameter (d), and the ratio of sump depth to shaft diameter (H_s/D) on the energy dissipation efficiency (EDE) was examined. The

effect of these parameters was evaluated in three stages: first, each parameter was assessed individually, then in pairwise combinations, and finally all three parameters were evaluated together.

The results indicate that flow rate had the greatest influence on EDE. The highest efficiency (92.79%) occurred at a flow rate of 10.67 L/s, while the lowest (88.93%) corresponded to 25.22 L/s. Consequently, EDE was found to decrease with increasing flow rate.

The simultaneous effect of all three parameters (diameter, flow rate, and sump depth) on energy dissipation efficiency shows that, for a 12 cm diameter and a flow rate of 10.67 L/s, the highest efficiency of 94.59% corresponds to $H_s/D=1$. For the same diameter and a flow rate of 25.22 L/s, the highest efficiency is 88.92% for $H_s/D=1$. For a 16 cm diameter and a flow rate of 10.67 L/s, the highest efficiency is 94.08% for $H_s/D=1$. For this same diameter and a flow rate of 25.22 L/s, the highest efficiency is 90.35% for $H_s/D=2$.

Conclusions

In the present research, a physical model of a sewer vortex drop shaft with a spiral inlet was investigated in the Hydraulic Structures Laboratory at Shahid Bahonar University of Kerman. This study examined the effect of three parameters including discharge (Q), the diameter of the inlet structure (d) and the ratio of the depth of sump to the drop shaft diameter (H_s/D) on energy dissipation efficiency (EDE). Separate analysis of the individual parameters revealed that the influence of flow discharge (Q) on EDE was greater than that of the other two parameters (diameter and sump depth ratio), accounting for 79.92% of the effect. The two-parameter analysis concerning the interaction of diameter and discharge on EDE showed that at a discharge of $Q=10.67$ L/s, the highest EDE (93.15%) was achieved with a 12 cm diameter. Furthermore, when the discharge increased to $Q=25.22$ L/s, the maximum EDE (89.25%) was recorded for the 16 cm diameter. Regarding the combined effect of diameter and sump depth ratio on EDE, the results indicated that for a 12 cm diameter, the peak EDE (92.21%) occurred when $H_s/D=1$, meaning the sump depth was equal to the drop shaft diameter.

The results of this study confirm that all three parameters—flow discharge, inlet diameter, and sump depth—affect the energy dissipation efficiency (EDE), with flow discharge exerting the greatest influence. Future work should investigate the effect of other geometric parameters of the spiral inlet, particularly the slope of the inlet channel bed and the slope of the inlet structure itself, on the EDE of vortex drop shafts.

Keywords: Energy dissipation efficiency, Discharge, Vortex drop structure, Laboratory model, Spiral inlet.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants of the present study, especially the civil engineering department of the Shahid Bahonar University of Kerman which made this research possible.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by E. F.K. and all authors commented on previous versions of the manuscript (S. A.Z., E. F.K., and M. Gh.H.). The final revisions have been applied by E. F.K., and M. Gh.H. Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.



نوع مقاله: پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی

سعید اکبری زاده^۱، احسان فدائی کرمانی^۲✉، مهناز قائینی حصاروئی^۳ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

چکیده:

شیب‌های تند و تغییرات ارتفاعی شدید موجب بروز مشکلاتی برای مجاری فاضلاب یا کانال‌های رو باز می‌شود. در اثر تغییر ارتفاع، سرعت جریان در این سازه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باعث بروز مشکلات عدیده‌ای در مسیر انتقال می‌گردد. برای انتقال سیال در شرایط ذکر شده از سازه‌هایی با نام سازه‌های ریزشی گردابی استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، مدل فیزیکی سازه گردابه فاضلاب شرق تهران با ورودی مارپیچی در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان بررسی گردید. در این پژوهش، تاثیر سه پارامتر دبی جریان (Q)، قطر سازه ورودی به شفت قائم (d) و نسبت عمق چاهک به قطر شفت ریزشی (Hs/D) بر بازده اتلاف انرژی بررسی شد. نتیجه حاصل از بررسی هر یک از پارامترها به صورت مجزا نشان داد که تاثیر دبی بر بازده اتلاف انرژی، نسبت به دو پارامتر دیگر یعنی قطر و عمق چاهک، بیشتر و مقدار آن ۹۲/۷۹ درصد است. در بررسی دو پارامتر، تاثیر قطر و دبی بر بازده اتلاف انرژی به گونه‌ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۲ سانتی‌متر بیشتر و مقدار آن ۹۳/۱۵ درصد است و با افزایش دبی به ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۶ سانتی‌متر بیشترین مقدار و معادل ۸۹/۲۵ درصد است. تاثیر قطر و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه‌ای است که در قطر ۱۲ سانتی‌متر، بیشترین بازده اتلاف انرژی برای $Hs/D=1$ یعنی عمق چاهک برابر با قطر شفت ریزشی است که مقدار آن ۹۲/۲۱ درصد است.

واژگان کلیدی: بازده اتلاف انرژی، دبی جریان، سازه ریزشی گردابی، مدل آزمایشگاهی، ورودی مارپیچی

مقدمه

مشکلات می‌توان به فرسایش و تخریب بستر و دیواره‌های مجاری فاضلاب اشاره کرد. ورود حجم بالایی از هوا در اثر سقوط آزاد جریان از ارتفاع زیاد آسیب‌های سازه‌ای، ارتعاش‌های ناشی از جریان با انرژی زیاد، و وقوع پدیده ضربه قوچ در صورت وجود سیستم بسته از دیگر مشکلات محتمل است (Granata, 2016). سازه‌های ریزشی گردابی^۱ راه‌حل مهندسی کارآمدی برای روبه‌رو شدن با این چالش‌ها معرفی شده‌اند. این سازه‌ها با ایجاد الگوی جریان گردابی^۲ در

شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب شهری، به‌ویژه در مناطق ناهموار اغلب با چالش‌های هیدرولیکی متعددی روبه‌رو هستند. شیب‌های تند و اختلاف ارتفاع شدید بین نقاط مختلف مسیر جریان فاضلاب باعث افزایش قابل توجه انرژی جنبشی جریان می‌شود. این انرژی اضافی اگر به‌صورت مناسب کنترل نشود می‌تواند پیامدهای نامطلوب فراوانی را به دنبال داشته باشد. از جمله مهم‌ترین این

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، (✉ نویسنده مسئول: Email: e.fadaei@uk.ac.ir) دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

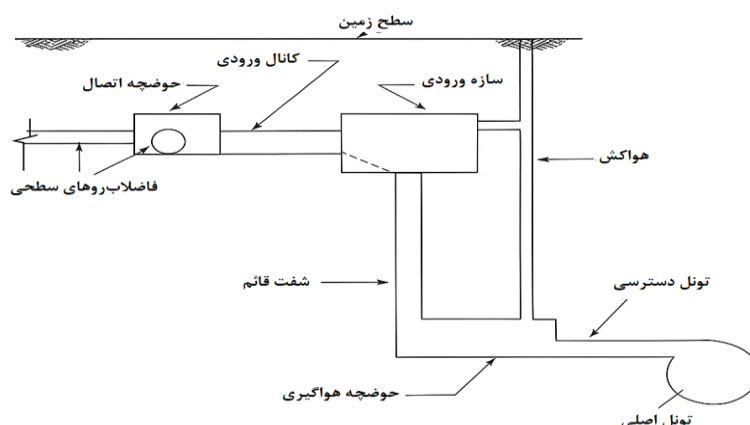
^۲ استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

¹ Vortex Drop Structures

² Vortex

استوانه‌ای عمودی (شفت)، انرژی اضافی جریان ورودی را به صورت مؤثر و کنترل شده‌ای اتلاف می‌کند (Hajiahmadi *et al.*, 2022). تفاوت سازه منهول ریزشی^۳ با سازه ریزشی گردابی در این است که سقوط جریان در شفت قائم سازه سقوطی جت مرکزی منسجم ایجاد نمی‌کند و در اطراف شفت قائم جریانی پیچیده و کنترل نشده شکل می‌گیرد ولی ریزشی می‌شود (Jain, 1984).

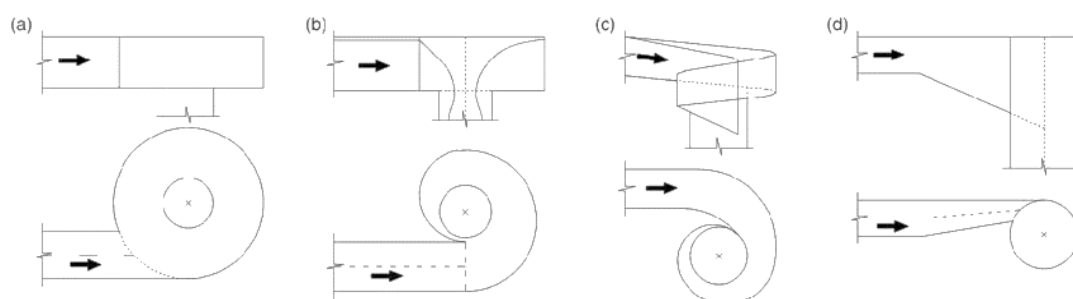


شکل ۱ - نمای سازه ریزشی گردابی (Jain, 1984)

Fig.1- Layout of a vortex drop structure (Jain, 1984)

جریان در شفت قائم عمدتاً مشابه هستند. جریان به دیواره شفت می‌چسبد و مارپیچی پایین می‌آید و به سازه خروجی می‌رسد. سازه خروجی جت حلقوی را به مجرای افقی هدایت می‌کند تا مخلوط هوا - آب را تخلیه و انرژی باقی مانده را به طور ایمن مستهلک کند (Fernandes and Jónatas, 2019).

همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سازه‌های ریزشی گردابی شامل سه جز اصلی است: سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی. ماهیت جریان در شفت قائم توسط سازه ورودی مشخص می‌شود. انواع سازه‌های ورودی شامل: ورودی مماسی، ورودی مارپیچی، ورودی دایره‌ای و ورودی حلزونی است (شکل ۲). صرف نظر از شکل ورودی، الگوهای



شکل ۲- انواع ورودی سازه ورودی: a دایره‌ای، b مارپیچی، c حلزونی، d مماسی (Fernandes and Jónatas, 2019)

Fig.2- Different types of inlet structure: a) circular, b) spiral, c) scroll, d) tangential (Fernandes and Jónatas, 2019)

نوع جریان خروجی از مخزن مستهلک کننده و فشار وارد بر کف مخزن مستهلک کننده نسبت ارتفاع بافل به قطر شفت قائم $0/6-0/28$ ، نسبت ارتفاع سرریز به قطر شفت قائم $0/7-0/3$ ، نسبت فاصله عرضی ونتوری به قطر شفت قائم برابر $0/85$ در دبی‌های کم و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم بین $0/45-1/2$ پیشنهاد کردند. در تحقیقات محمودی‌راد و نجف‌زاده (Mahmoudi-Rad and Najafzadeh, 2023) کارایی اتلاف انرژی در شفت عمودی بررسی و نشان داده شد کارایی اتلاف انرژی در شفت عمودی بین $10/8$ تا $62/29$ درصد متغیر است. با افزایش عدد فرود، مقادیر کارایی اتلاف انرژی جریان در شفت عمودی کاهش می‌یابد. کریسپینو و همکاران (Crispino et al., 2025) با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، جریان در یک سازه گردابی ریزشی فوق بحرانی با ورودی ماریچی را به صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند رفتار جریان در داخل شفت به‌طور قابل توجهی به عدد فرود وابسته است و از شرایط تقارن محوری به‌دور است.

با توجه به مطالب بیان شده، سازه‌های ریزشی گردابی از سه بخش عمده شامل سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی تشکیل شده است که براساس مطالعات محققان، هر بخش بر هیدرولیک جریان و بازده اتلاف انرژی جریان موثر است. از این‌رو در تحقیق حاضر با ساخت مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی، عملکرد هیدرولیکی سازه ریزشی گردابی با سازه ورودی ماریچی و چاهک بررسی گردید. با توجه به اینکه عملکرد سازه در اتلاف انرژی جریان به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر شرایط هیدرولیکی و هندسه بالادست و پایین دست سازه قرار دارد، میزان اتلاف انرژی جریان سازه اندازه‌گیری شده است.

مواد و روش‌ها

مدل سازی آزمایشگاهی

مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی فاضلاب‌رو شرقی تهران با مقیاس $1:10$ در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شده است (شکل ۳). این مدل شامل کانال دسترسی مستطیلی، ورودی گردابی

یو و لی (Yu and Lee, 2009) با آزمایش‌هایی ضمن بررسی عملکرد ورودی مماسی بر رفتار جریان در سازه ریزشی گردابی، روش جامعی را برای طراحی این نوع ورودی ارائه دادند. این محققان با ارائه رابطه عمق-دبی در کانال ورودی، هسته هوای تشکیل شده درون شفت قائم را نیز اندازه‌گیری کردند و نشان دادند در صورت طراحی نامناسب ورودی مماسی، ناپایداری هیدرولیکی و سرریز جریان از آن رخ می‌دهد. مولیگان و همکاران (Mulligan et al., 2016) آزمایش‌های گسترده‌ای را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه ساختار گرداب در 12 مدل مختلف سازه ورودی ماریچی ترتیب دادند و با استفاده از روش ردیابی مسیر ذرات معلق در جریان، ویژگی‌های جریان را به‌صورت دوبعدی در سازه ورودی مطالعه کردند. در این آزمایش‌ها اثر مقیاس بر پارامترهای هیدرولیکی بررسی شد. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، خطای 12 درصد را برای پروفیل جریان و خطای 22 درصد را برای پروفیل سرعت نشان داد. محمودی‌راد و خانجانی (Mahmoudi-Rad and Khanjani, 2019) در یک مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع شفت عمودی و عمق چاهک را بر بازده اتلاف انرژی جریان بررسی کردند و ترکیبی از یک چاهک و یک بافل در محفظه اتلاف برای اتلاف انرژی جریان به کار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که این تغییرات باعث اتلاف انرژی جریان بین 85 تا 95 درصد در شفت ریزشی گردابی شده است. این محققان پیشنهاد دادند که نسبت عمق چاهک به قطر شفت عمودی در بازه 1 تا $1/6$ در نظر گرفته شود. حاجی‌احمدی و همکاران (Hajiahmadi et al., 2021) عملکرد مخزن مستهلک کننده از نظر استهلاک انرژی جریان، نوع جریان خروجی (زیر بحرانی و فوق بحرانی) و میزان فشار وارد شده بر کف مخزن را بررسی و در مخزن مستهلک کننده به‌منظور بهبود عملکرد آن از چهار نوع المان شامل بافل، سرریز، ونتوری و چاهک استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد این المان‌ها جریان ورودی به مخزن مستهلک کننده را به اندازه 90 تا 96 درصد مستهلک می‌کند. این محققان با در نظر گرفتن استهلاک انرژی جریان،

مماسی، شفت ریزشی، مستهلک کننده انرژی و تونل خروجی مستطیلی است. در این تحقیق، از ورودی مارپیچی با قطرهای خروجی متفاوت استفاده شد. برای مشاهده جریان، مدل آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلاس شفاف ساخته شده است. کانال ورودی با مقطع مستطیلی جریان را به سازه ورودی مماسی انتقال می‌دهد. این کانال به عرض ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۱ متر است. جریان هوای وارد شده از شفت قائم از طریق لوله خروجی هوا خارج می‌شود که روی مخزن مستهلک کننده نصب شده است. در پایین دست سازه ریزشی گردابی جریان از تونل خروجی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۴ متر خارج می‌شود. باتوجه به نوع جریان در سازه ریزشی گردابی و نیز مطالعات پیشین و مدل‌های مشابه ساخته شده در سطح بین‌المللی، برای ایجاد تشابه بین مدل آزمایشگاهی و سازه اصلی لازم است عدد بدون بعد فرود در مدل و سازه اصلی یکسان یا به عبارتی تشابه فرودی حاکم باشد (Hajjahmadi *et al.*, 2022). باتوجه به ابعاد سازه و ضرورت کاهش هرچه بیشتر خطای مدلسازی و افزایش دقت مدل و مطالعات محققان پیشین، از مقیاس ۱:۱۰ برای ابعاد فضایی مدل استفاده شده است.



شکل ۳- مدل آزمایشگاهی سازه ریزشی گردابی

Fig.3- The experimental model of the vortex drop shaft structure

درصد دبی طراحی در نظر گرفته شده‌اند. براساس دیدگاه هاگر (Hager 2010) برای طراحی ورودی مارپیچی (شکل ۴-الف) از روابط زیر استفاده شده است.

$$a = R + \Delta R + \frac{1}{2}b + c + s \quad (1)$$

$$e = \frac{1}{7}(b + s) \quad (2)$$

$$R_4 = R + \Delta R + c + e \quad (3)$$

$$R_3 = R_4 + e \quad (4)$$

$$R_2 = R_4 + 3e \quad (5)$$

$$R_1 = R_4 + 5e \quad (6)$$

در این روابط: a فاصله بین مرکز شفت قائم تا دیوار خارجی کانال ورودی، b عرض کانال ورودی، R شعاع شفت

معرفی بخش‌های مختلف مدل آزمایشگاهی
بخش ابتدایی مدل با مخزن شروع می‌شود که پس از پر شدن مخزن، آب از طریق کانال ورودی به سازه وارد می‌شود. ارتفاع دیواره کانال ورودی ۰/۲۴ متر است. در این آزمایش، از ۴ دبی متفاوت استفاده شده است که به ترتیب ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. برای ورود آب به مدل آزمایشگاهی ابتدا پمپ روشن و دبی مورد نظر با دبی‌سنج الکترومغناطیسی تنظیم می‌شود تا آب با دبی مورد نظر وارد مخزن شود. در تحقیق حاضر دبی طراحی برابر با ۱۹/۴۰ لیتر بر ثانیه است، این دبی‌ها به‌صورت درصدی از دبی طراحی است به گونه‌ای که به ترتیب برابر با ۵۵ درصد، ۷۵ درصد، ۱۰۰ درصد و ۱۳۰ درصد

مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی

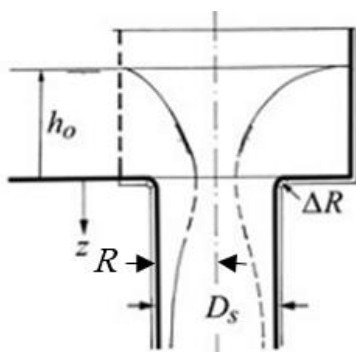
با توجه به مطالب بیان شده و براساس روابط گفته شده در بالا، سازه ورودی مارپیچی طراحی شده است (شکل ۴-ج). مقادیر پارامترهای مدل در جدول (۱) ارائه شده است. قائم، شعاع انحناى ورودی شفت قائم، c حداقل فاصله سازه ورودی با کانال ورودی، s حداقل ضخامت دیواره داخلی کانال ورودی، e فاصله خروج از مرکز و R_1, R_2, R_3 و R_4 شعاع سازه ورودی در طول با فواصل زاویه‌ای ۹۰ درجه است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی مدل فیزیکی

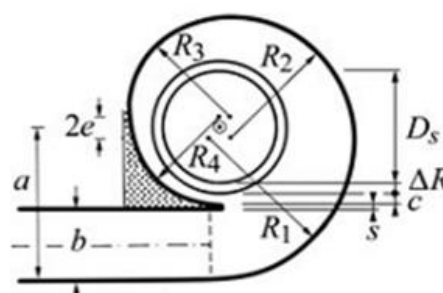
Table 1- Design parameters of the physical model

| R (m) | ΔR | S (m) | C (m) | e (m) | R_1 (m) | R_2 (m) | R_3 (m) | R_4 (m) |
|-------|------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0/08 | 0 | 0/005 | 0/02 | 0/026 | 0/258 | 0/206 | 0/153 | 0/126 |

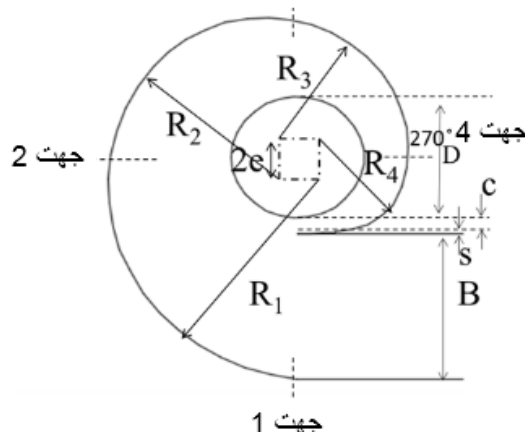
آب پس از کانال ورودی وارد سازه مارپیچی می‌شود. در تحقیق حاضر از ۳ قطر متفاوت برای ورودی آب به شفت قائم استفاده شده است. قطرهای ورودی به ترتیب ۱۲، ۱۳/۶۰ و ۱۶ سانتی‌متر هستند. در جریان آزمایش، در چهار جهت سازه ورودی ارتفاع آب اندازه‌گیری شده است. در شکل (۵) مقطع قطرهای خروجی استفاده شده برای سازه ورودی نمایش داده شده است.



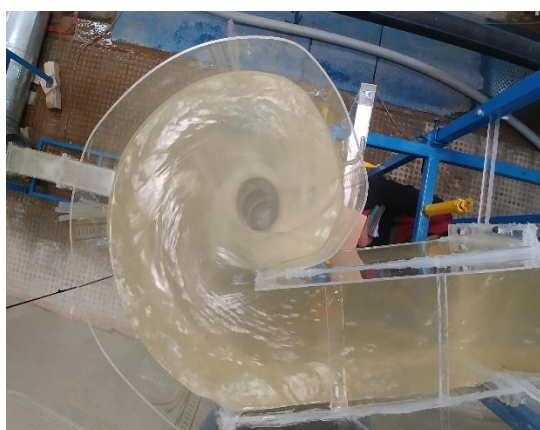
(الف)



جهت ۳



(ب)



(ج)

شکل ۴- سازه ورودی مارپیچی: الف) هندسه ورودی مارپیچی در پلان و مقطع هاگر (Hager, 2010)، ب) پلان شماتیک، ج) مدل آزمایشگاهی

Fig.4- The plan of the spiral inlet structure (Hager, 2010)



شکل ۵- مقطع قطرهای خروجی استفاده شده برای سازه ورودی
 Fig.5- The spiral inlet with different outlet diameters

بعد از سازه ماریچی شفت قائم قرار می‌گیرد. در مدل حاضر، شفت قائم به قطر ۱۶ سانتی‌متر است. برای ساخت شفت قائم از ۴ قطعه مطابق شکل (۶) با ارتفاع ۴۸ سانتی‌متر استفاده شده است که به یکدیگر متصل‌اند. در مدل حاضر قطر ورودی به شفت قائم متغیر است و ارتفاع کل ریزش، ۱۹۲ سانتی‌متر، ثابت در نظر گرفته شده است.



(ب)



(الف)

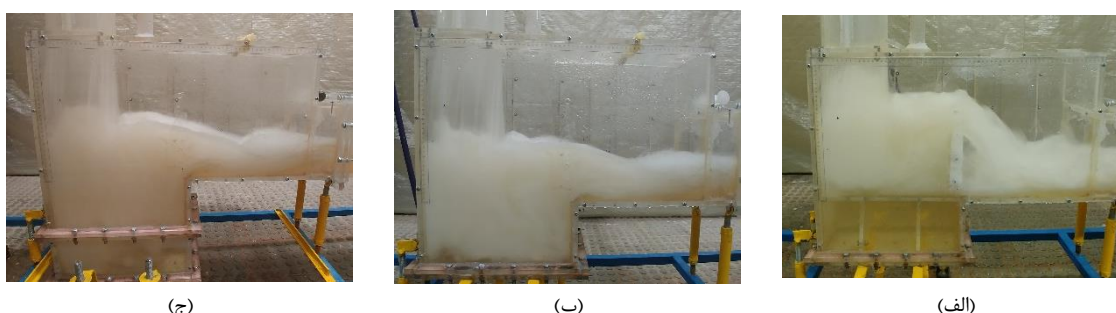
شکل ۶- نمای شفت قائم مدل: (الف) قطعات ۴۸ سانتی‌متری، (ب) شکل کلی شفت قائم

Fig.6- View of the vertical shaft model: a) pieces of 48 cm, b) the overall shape of the vertical shaft

جریان آب به صورت گردابی از شفت قائم پایین می‌آید پس از آن به مخزن مستهلک کننده انرژی وارد می‌شود. که در مسیر شفت قائم مقداری از انرژی مستهلک می‌شود و مخزن مستهلک کننده وظیفه استهلاک انرژی باقیمانده

مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی ماریچی

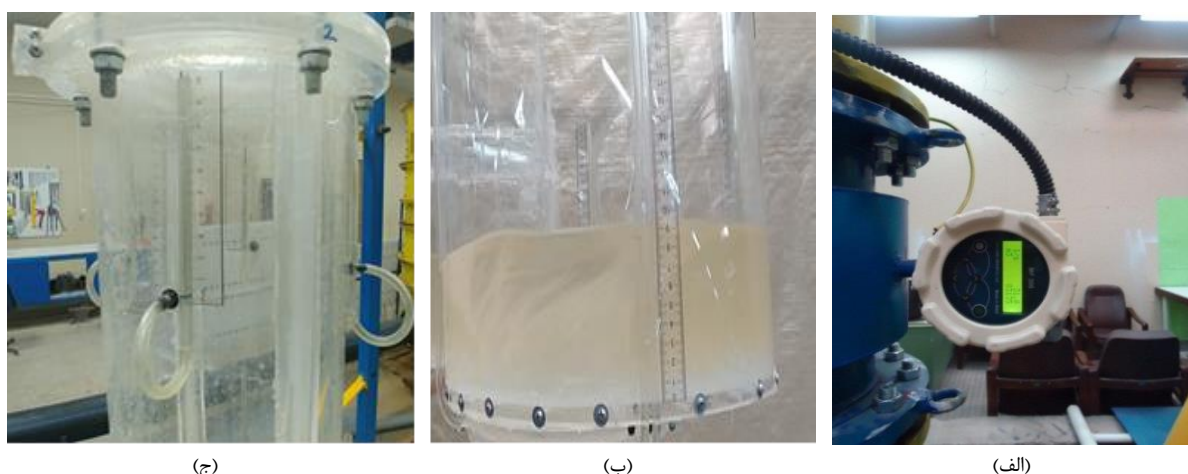
جریان خروجی از شفت قائم، جداسازی حباب های درون جریان، کاهش فشار کف مخزن مستهلک کننده ناشی از سقوط جریان از شفت قائم و ایجاد جریان زیربحرانی و هدایت آن به کانال پایین دست را بر عهده دارد (Zhang *et al.*, 2025). در مدل تحقیق حاضر، ابعاد هندسی مخزن مستهلک کننده به طول ۰/۷۶ متر، ارتفاع ۰/۳۵ متر و عرض ۰/۱۲ متر است. به منظور تغییر در عمق چاهک مدل آزمایشگاهی، با ساخت دو قطعه پیش ساخته امکان اضافه و کم شدن این عمق مهیا گردیده است. این قطعات سبب می شوند تا نسبت $H_s/D=1$ (نسبت عمق چاهک به قطر شفت ریزشی) به صفر و ۲ نیز کاهش و افزایش یابد (شکل ۷). بعد از مستهلک شدن انرژی جریان به وسیله شفت قائم و چاهک، آب به کانال خروجی به ابعاد ۰/۲۱×۰/۲۱ متر وارد و از سازه ریزشی گردابی خارج می شود.



شکل ۷- چاهک در مخزن مستهلک کننده انرژی (الف) $H_s/D=0$ ، (ب) $H_s/D=1$ ، (ج) $H_s/D=2$

Fig.7- The outlet energy dissipator, a) $H_s/D=0$, b) $H_s/D=1$, c) $H_s/D=2$

ابزارهای اندازه گیری برای اجرای آزمایش ها شامل دبی سنج الکترومغناطیسی، پیزومتر و خط کش است. دبی جریان ورودی به سازه با استفاده از دبی سنج الکترومغناطیس (MFC300) با دقت ± 1 درصد اندازه گیری و کنترل شده و تراز سطح آب با خط کش و هد فشار بیا پیزومترهای نصب شده در خط مرکزی کف کانال (با دقت ± 1 میلی متر) اندازه گیری شده است (شکل ۸).



شکل ۸- ابزارهای اندازه گیری پارامترهای آزمایش (الف) دبی سنج الکترومغناطیسی، (ب) خط کش، (ج) پیزومتر
Fig.8- Measurement tools of the hydraulic parameters: flow rate, gauge and piezometer

هد کل انرژی در هر مقطع از جریان به کمک معادله برنولی محاسبه می‌شود.

نتایج

عملکرد هیدرولیکی بخش های ورودی و خروجی سازه ریزشی گردابی

عمق جریان مشاهده شده در کانال ورودی تحت تاثیر تغییرات دبی جریان در شکل (۹) نشان داده شده است. دیده می‌شود که جریان در قسمت ورودی به صورت هموار و بدون تشکیل پرش هیدرولیکی برقرار است. با افزایش دبی، جریان گردابی در شفت قائم با جریان ورودی در محل اتصال برخورد می‌کند و سطح آن افزایش می‌یابد. این برخورد هیچ گونه انسدادی در محل اتصال با شفت قائم ایجاد نمی‌کند و پس‌زدگی آب نیز در ورودی ماریچی رخ نمی‌دهد. این موضوع عملکرد مناسب سازه ورودی را در تبدیل جریان مستقیم به جریان چرخشی نشان می‌دهد.

رفتار جریان در مخزن مستهلک کننده انرژی

جریان بعد از شفت قائم وارد مخزن مستهلک کننده انرژی می‌شود. جریانی که به صورت قائم و ماریچی از شفت قائم خارج می‌شود با برخورد آب به درون چاهک (مستهلک کننده انرژی)، انرژی جریان به صورت قابل توجهی تلف و جریان قائم به جریان افقی تبدیل می‌شود. در سازه خروجی، آزمایش‌ها برای هر چهار دبی مختلف جریان در ۶ نقطه به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر دنبال شده که در هر نقطه میانگین اعداد ارتفاع سطح آب محاسبه شده است. نتایج بررسی‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۰) در تمامی حالات یعنی بدون چاهک و با چاهک به ازای تمامی قطرهای، ارتفاع سطح آب در ابتدا و انتهای کانال تقریباً یکسان است.

در این تحقیق میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی تحت تاثیر دبی جریان ورودی و قطر خروجی سازه ورودی و عمق چاهک در سازه خروجی بررسی می‌گردد. پارامترهای مورد بررسی شامل: دبی جریان ورودی (Q)، قطر خروجی سازه ورودی (d) و عمق چاهک (H_s) است. آزمایش‌ها برای چهار دبی ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه اجرا گردید که با در نظر گرفتن دبی طراحی برابر ۱۹/۴۰ لیتر بر ثانیه، نسبت Q/Q_d برای دبی‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۳ است. آزمایش‌ها برای قطر خروجی سازه ورودی در چهار اندازه ۱۲، ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (H_s/D) برای صفر، ۱ و ۲ اجرا شده‌اند. در جدول (۲) مشاهده می‌شود که عوامل Q ، d و H_s/D به ترتیب دارای ۳، ۴ و ۳ عامل هستند یعنی تعداد کل ترکیبات ممکن بین این عوامل ۳۶ (3×4) ترکیب است. با در نظر گرفتن سه بار تکرار برای تمام ترکیبات ممکن، تعداد ۱۰۸ ($3 \times 3 \times 3$) آزمایش به منظور ارزیابی عملکرد سازه طرح ریزی شده است. هدف از تکرار آزمایش‌ها، افزایش دقت داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کاهش خطای اندازه‌گیری و بررسی تاثیر هر عامل بر نتایج در محدوده مورد مطالعه است.

میزان انرژی در جریان‌های روباز براساس هد انرژی در هر نقطه از جریان تعیین می‌گردد. هد کل انرژی در هر مقطع از جریان به کمک معادله برنولی محاسبه می‌گردد. از این رو بر اساس مطالعات گراناتا (Granata 2016) و هاگر (Hager 2010) از رابطه ۷ به منظور محاسبه بازده اتلاف انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی استفاده شده است:

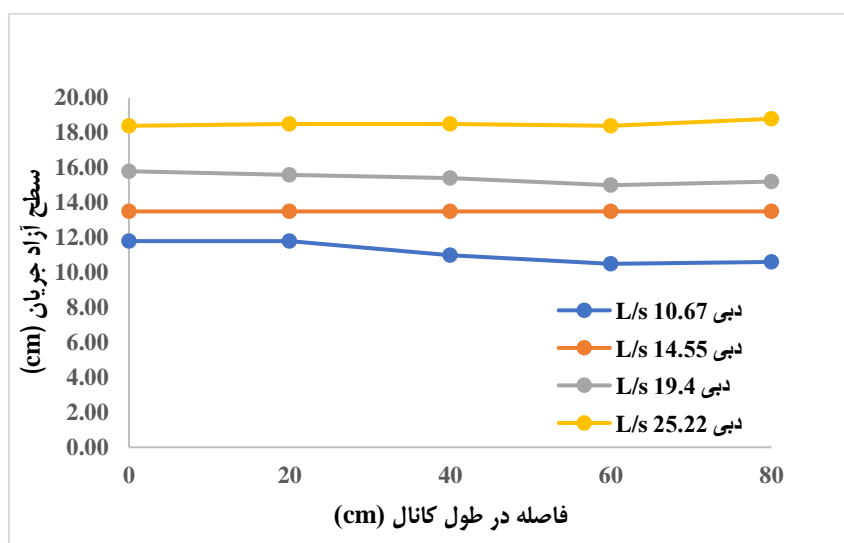
$$\eta = (H_1 - H_2) / H_1 \times 100 \quad (7)$$

که η میزان استهلاک انرژی جریان، H_1 هد کل انرژی مقطع بالادست، و H_2 هد کل انرژی در مقطع پایین دست است.

جدول ۲- وضعیت محدوده عوامل مورد آزمایش

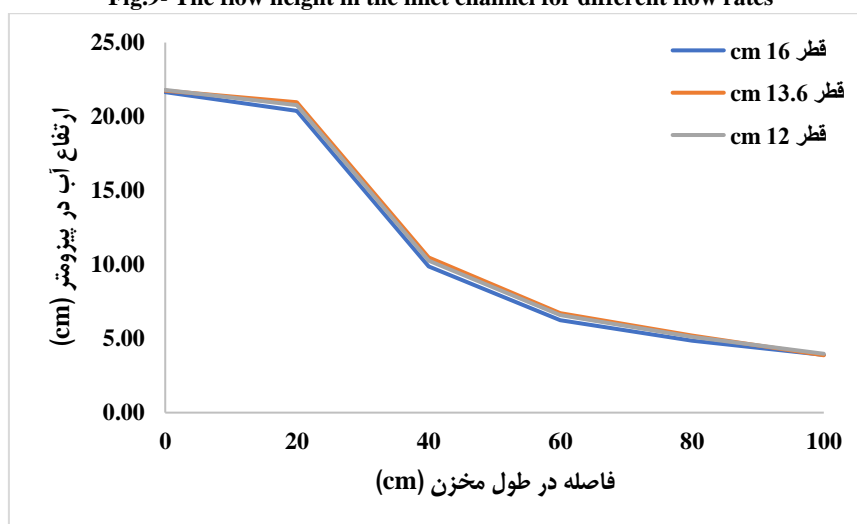
Table 2- Analysis of the experimental parameters

| سطح level | محدوده Range | پارامترهای مورد مطالعه Study parameters |
|--------------|-------------------------|--|
| 4 | 25/22,19/40,14/55,10/67 | $Q (l/s)$ |
| 3 | 16,13/6,12 | $d(cm)$ |
| 3 | 2,1,0 | (H/D) |
| 3 | تکرار | |
| 108 | تعداد آزمایش‌ها | |

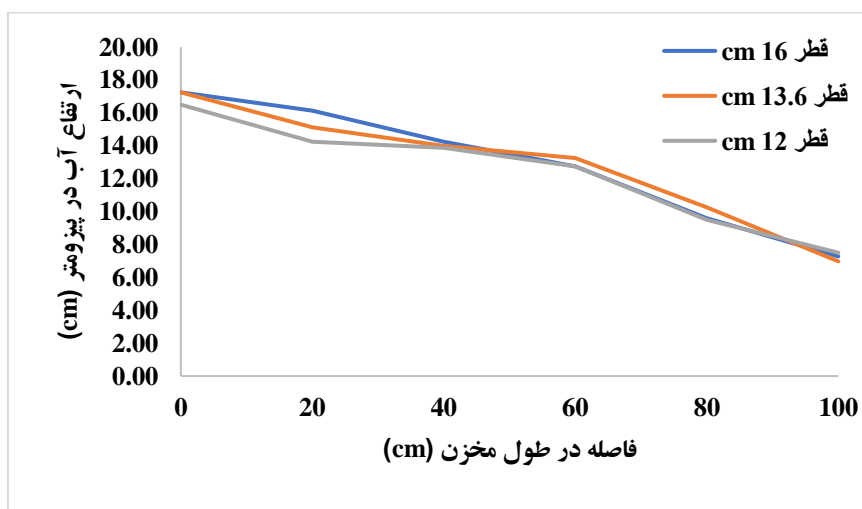


شکل ۹- ارتفاع جریان در کانال ورودی به ازای مقادیر مختلف دبی جریان

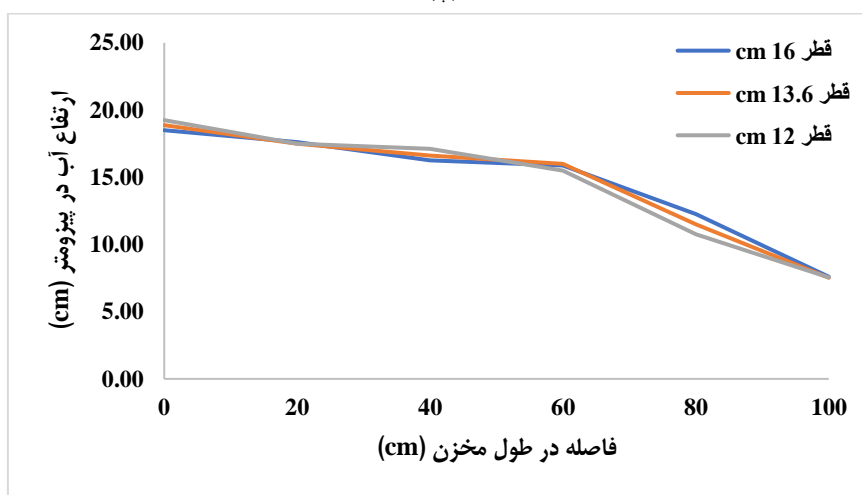
Fig.9- The flow height in the inlet channel for different flow rates



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰- ارتفاع جریان در مخزن مستهلک کننده الف) $H_s/D=0$ ب) $H_s/D=1$ ج) $H_s/D=2$

Fig.10- The flow height in the energy dissipation chamber: a) $H_s/D=0$, b) $H_s/D=1$, c) $H_s/D=2$

است. در شکل ۱۰ ج، حالت عمق چاهک دو برابر قطر شفت، ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۱۸/۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع سطح آب در انتهای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۷/۵۵ سانتی‌متر است.

اتلاف انرژی جریان

در ادامه تحقیق تاثیر پارامترهای دبی جریان، عمق چاهک و قطر سازه ورودی شفت قائم بر بازده اتلاف انرژی در سه حالت بررسی شده است. بدین صورت که در ابتدا تاثیر هر یک از پارامترها به صورت جداگانه بررسی می‌شود، پس از آن تاثیر دو پارامتر باهم و در نهایت هر سه پارامتر

برابر شکل (۱۰) الف، حالت بدون چاهک، ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۲۱/۷۵ سانتی‌متر است. ارتفاع سطح آب در انتهای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۳/۹ سانتی‌متر است. در شکل ۱۰ ب، حالت عمق چاهک برابر با قطر شفت، کمترین ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال مربوط به قطر ۱۲ سانتی‌متر است که مقدار آن برابر با ۱۶/۵ سانتی‌متر است و بیشترین ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال مربوط به قطرهای ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر است که مقدار هر دو آن برابر با ۱۷/۲۵ سانتی‌متر است. در انتهای کانال و هنگام خروج آب از سازه، ارتفاع سطح آب تقریباً یکسان و مقدار آن حدود ۷ سانتی‌متر

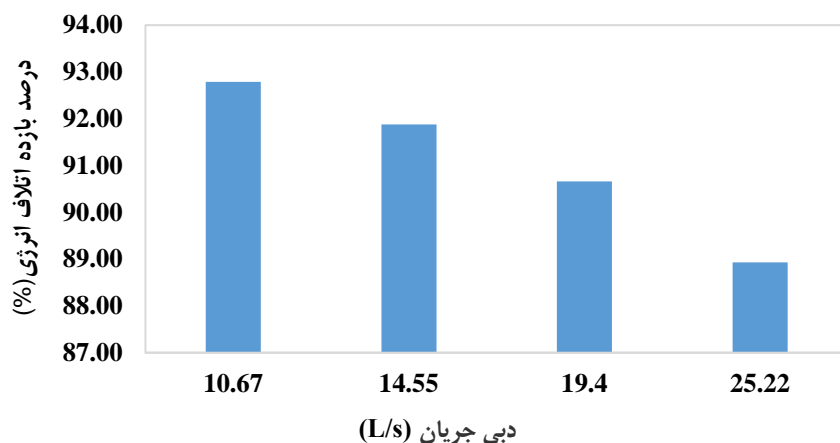
در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری میزان اتلاف انرژی در ۱۰۸ آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. و نسبت‌های مختلف ارائه شده است. در این جدول (۳) تاثیر چهار دبی مختلف به مقدار ۱۰/۶۷،

جدول ۳- میزان اتلاف انرژی جریان
Table 3- The rate of flow energy dissipation

| η (%) | | | دبی Discharge | قطر Diameter |
|----------|----------|----------|------------------|-----------------|
| Hs / D=2 | Hs / D=1 | Hs / D=0 | Q(L/s) | d(cm) |
| 92.04 | 94.08 | 91.18 | 10.67 | 16 |
| 92.00 | 94.01 | 91.01 | | |
| 93.89 | 94.09 | 91.20 | | |
| 91.55 | 93.45 | 90.50 | 14.55 | |
| 91.49 | 93.40 | 90.52 | | |
| 91.55 | 93.35 | 90.55 | | |
| 90.98 | 90.59 | 89.71 | 19.4 | |
| 90.91 | 90.50 | 89.71 | | |
| 90.92 | 90.61 | 89.80 | | |
| 90.35 | 88.87 | 88.52 | 25.22 | |
| 90.35 | 88.80 | 88.50 | | |
| 90.40 | 88.79 | 88.49 | | |
| 92.54 | 94.14 | 91.69 | 10.67 | 13.6 |
| 92.55 | 94.11 | 91.61 | | |
| 92.59 | 94.19 | 91.72 | | |
| 91.81 | 93.33 | 90.42 | 14.55 | |
| 91.88 | 93.31 | 90.44 | | |
| 91.80 | 93.35 | 90.41 | | |
| 91.10 | 91.28 | 89.61 | 19.4 | |
| 91.11 | 91.27 | 89.55 | | |
| 91.18 | 91.33 | 89.61 | | |
| 89.33 | 88.56 | 88.45 | 25.22 | |
| 89.30 | 88.51 | 88.40 | | |
| 89.34 | 88.55 | 88.41 | | |
| 93.27 | 94.59 | 91.57 | 10.67 | 12 |
| 93.25 | 94.55 | 91.51 | | |
| 93.32 | 94.59 | 91.50 | | |
| 91.94 | 93.26 | 90.61 | 14.55 | |
| 91.94 | 93.22 | 90.66 | | |
| 91.99 | 93.25 | 90.67 | | |
| 90.81 | 92.08 | 89.80 | 19.4 | |
| 90.85 | 92.01 | 89.80 | | |
| 90.84 | 92.07 | 89.81 | | |
| 88.72 | 88.92 | 88.65 | 25.22 | |
| 88.69 | 88.90 | 88.61 | | |
| 88.65 | 88.88 | 88.70 | | |

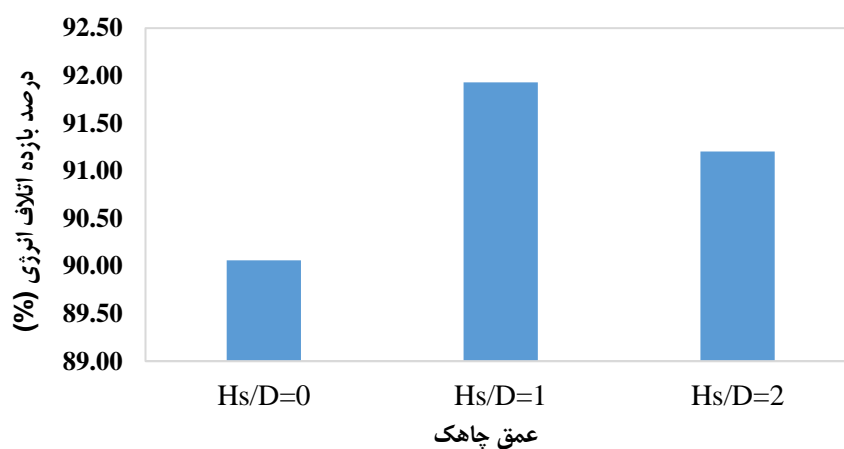
پیشتر اشاره شد که در تحقیق حاضر تاثیر چهار دبی ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بازده اتلاف انرژی برای دبی‌های مختلف به صورت میانگین درصد بازده مربوط به دبی مورد نظر، بدون در نظر گرفتن قطر و نسبت عمق چاهک به قطر شفت محاسبه می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، بازده اتلاف انرژی حاصل از میانگین ۹ عدد، طبق جدول (۳) به ترتیب دبی‌های بالا برابر با ۹۲/۷۹، ۹۱/۸۸، ۹۰/۶۶ و ۸۸/۹۳ درصد است که بیشترین بازده اتلاف مربوط به دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه برابر با ۹۲/۹۷ درصد و کمترین بازده اتلاف مربوط به دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه که برابر با ۸۸/۹۳ درصد است. در شکل (۱۱) دیده می‌شود که با افزایش دبی جریان، بازده اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. در بررسی تاثیر عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی نیز بازده اتلاف انرژی برای هر سه حالت مختلف بر طبق جدول (۳) برابر است با میانگین ستونی نسبت عمق چاهک به قطر شفت (H_s/D) بدون در نظر گرفتن قطر و دبی جریان. در این حالت میانگین ۱۲ عدد برای هر سه حالت، یعنی بدون

چاهک، عمق چاهک برابر با قطر شفت و عمق چاهک دو به شکل (۱۲)، بیشترین بازده مربوط به نسبت $H_s/D=1$ برابر قطر شفت، به صورت جداگانه محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، میزان بازده اتلاف انرژی به ترتیب برابر با ۹۰/۰۶، ۹۱/۹۳ و ۹۱/۲۰ درصد است. با توجه



شکل ۱۱- نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به دبی جریان

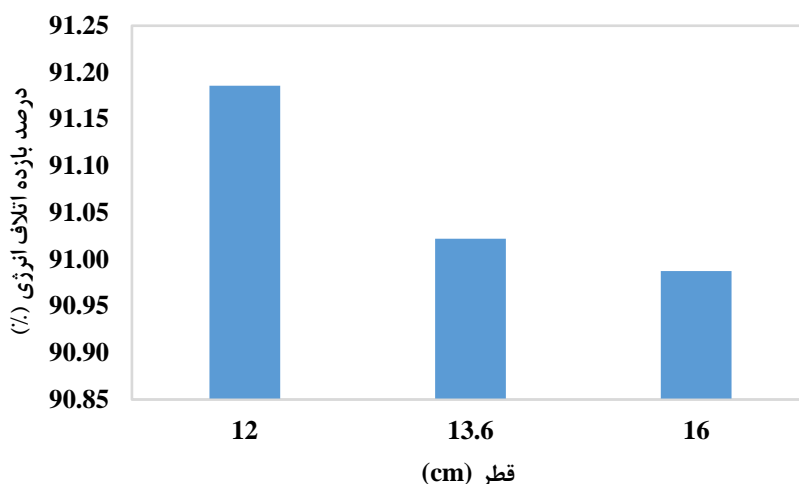
Fig.11- The effect of discharge on energy dissipation efficiency



شکل ۱۲- نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به عمق چاهک

Fig.12- The effect of sump depth on energy dissipation efficiency

در بررسی تاثیر قطر بر بازده اتلاف انرژی، در جدول (۳) بازده اتلاف انرژی برابر با میانگین ۱۲ عدد مربوط به هر قطر بدون در نظر گرفتن دبی جریان و عمق چاهک آورده شده است. بازده اتلاف انرژی برای قطرهای ۱۲، ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۹۱/۱۹، ۹۱/۰۲ و ۹۰/۹۹ درصد است. در این حالت، بیشترین بازده مربوط به قطر ۱۲ سانتی‌متر و برابر با ۹۱/۱۹ درصد و کمترین بازده مربوط به قطر ۱۶ سانتی‌متر و برابر با ۹۰/۹۹ درصد است. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش قطر، بازده اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ - نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به قطر سازه ورودی

Fig.13- The effect of inlet diameter on energy dissipation efficiency

نتیجه گیری

برای قطر ۱۶ سانتی متر برابر با ۹۲/۴۳ درصد است. با افزایش دبی به ۲۵/۲۲ لیتر برثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۶ سانتی متر بیشترین یعنی ۸۹/۲۵ درصد و کمترین بازده در این دبی مربوط به قطر ۱۲ سانتی متر و برابر با ۸۸/۷۶ درصد است.

- تاثیر باهم دو پارامتر قطر و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در قطر ۱۲ سانتی متر بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$ یعنی عمق چاهک برابر با قطر شفت ریزشی است که مقدار آن برابر با ۹۲/۲۱ درصد و کمترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=0$ یعنی حالت بدون چاهک است که مقدار آن برابر با ۸۹/۹۸ درصد است. با افزایش قطر نیز باز همان نتیجه به دست آمد.

- تاثیر باهم دو پارامتر دبی جریان و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر برثانیه بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$ است که مقدار آن ۹۴/۲۷ درصد به دست آمده است و برای دبی ۲۵/۲۲ لیتر برثانیه، بیشترین بازده مربوط به $H_s/D=2$ است که مقدار آن ۸۹/۴۷ درصد به دست آمده است.

- تاثیر همزمان هر سه پارامتر بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در قطر ۱۲ سانتی متر و دبی ۱۰/۶۷ لیتر برثانیه، بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$

در تحقیق حاضر رفتار جریان در بخش های مختلف سازه ریزشی گردابی شامل کانال ورودی، سازه مارپیچی و کانال خروجی (مستهلك کننده انرژی) بررسی شد. تاثیر سه پارامتر دبی جریان، قطر سازه ورودی و عمق چاهک به قطر شفت بر بازده اتلاف انرژی جریان نیز بررسی گردید. تاثیر این پارامترها در سه حالت ارزیابی شد. در ابتدا تاثیر هر یک به صورت مجزا و پس از آن دو پارامتری و سپس هر سه پارامتر باهم ارزیابی شدند که نتایج آن به شرح زیر است:

- در بررسی های انجام یافته برای هر یک از پارامترها، بیشترین تاثیر بر درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به پارامتر دبی است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین بازده مربوط به دبی ۱۰/۶۷ لیتر برثانیه است که مقدار آن برابر با ۹۲/۷۹ درصد و کمترین بازده مربوط به دبی ۲۵/۲۲ لیتر برثانیه است که مقدار آن ۸۸/۹۳ درصد به دست آمده است. بدین ترتیب دیده می شود با افزایش دبی، بازده اتلاف انرژی کاهش می یابد.

- تاثیر باهم دو پارامتر قطر و دبی جریان بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر برثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۲ سانتی متر از دیگر حالت ها بیشتر و برابر با ۹۳/۱۵ درصد و کمترین بازده در این دبی

دیده می‌شود که مقدار آن ۹۴/۵۹ درصد است. در همان قطر و دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه بیشترین بازده مربوط به $D=1$ است که مقدار آن ۸۸/۹۲ درصد به دست آمده است. در قطر ۱۶ سانتی‌متر و دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه، بیشترین درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به $D=1$ است که مقدار آن ۹۴/۰۸ درصد به دست آمده است و در همین قطر و دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه بیشترین بازده مربوط به $D=2$ است که مقدار آن ۹۰/۳۵ درصد به دست آمده است.

باتوجه به نتایج تحقیق حاضر، هر سه پارامتر دبی جریان، قطر سازه ورودی و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی جریان تاثیر داشته و در بررسی‌های انجام یافته برای هر یک از پارامترها، بیشترین تاثیر بر درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به پارامتر دبی است. با این حال پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با تغییر در مشخصات سازه ورودی مارپیچی مانند شیب کف کانال ورودی و شیب کف سازه ورودی، تاثیر این پارامترها نیز بر بازده اتلاف انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی افرادی که در پیشبرد این تحقیق و مقاله یاری رساندند، به‌ویژه بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

- Crispino, G., Maietta, F., Iervolino, M., & Gisonni, C. (2025). Numerical study on a supercritical vortex drop shaft with a spiral inlet. *Results in Engineering*, 25, 104197.
- Fernandes, J., & Jónatas, R. (2019). Experimental flow characterization in a spiral vortex drop shaft. *Water Science and Technology*, 80(2), 274-281.
- Granata, F. (2016). Dropshaft cascades in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 73(9), 2052-2059.
- Hager, W. H. (2010). *Wastewater hydraulics: Theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Hajiahmadi, A., Ghaeini-Hessaroyeh, M., & Khanjani, M. J. (2021). Experimental study of flow characteristics in vortex drop shaft. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(3), 04021032.
- Hajiahmadi, A., Crispino, G., Ghaeini-Hessaroyeh, M., & Gisonni, C. (2022). Effect of the flow regime on the hydraulic features governing the operation of vortex drop shafts with spiral inlets. *Water Science & Technology*, 86(5), 1095-1107.
- Jain, S. C. (1984). Tangential vortex-inlet. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1693-1699.
- Mahmoudi-Rad, M., & Khanjani, M. J. (2019). Energy dissipation of flow in the vortex structure: experimental investigation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(4), 04019027.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در مطالعه و طراحی مقاله و تحقیق مشارکت داشته‌اند. جمع‌آوری داده‌ها، پیاده‌سازی، تجزیه و تحلیل و جمع‌بندی نتایج توسط تمامی نویسندگان انجام پذیرفته است. نسخه اولیه مقاله توسط ا. ف. ک. نوشته شده است و تمامی نویسندگان (س. ا. ز. ا. ف. ک. و م. ق. ح.) اصلاحات و پیشنهادات خود را بر روی نسخه اولیه ارائه و اعمال نموده‌اند. اصلاحات و ویرایش نهایی توسط ا. ف. ک. و م. ق. ح. در متن نهایی اعمال شده است. همچنین تمامی نویسندگان نسخه نهایی را بررسی نموده‌اند.

- Mahmoudi-Rad, M., & Najafzadeh, M. (2023). Experimental evaluation of the energy dissipation efficiency of the vortex flow section of drop shafts. *Scientific Reports*, 13(1), 1679.
- Mulligan, S., Casserly, J., & Sherlock, R. (2016). Effects of geometry on strong free-surface vortices in subcritical approach flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016051.
- Yu, D., & Lee, J. H. (2009). Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage. *Journal of hydraulic engineering*, 135(3), 164-174.
- Zhang, S., Wang, Y., & Law, A. W. K. (2025). Large eddy simulations of transient flow characteristics in a drop shaft with a scroll vortex intake. *Flow*, 5, E29.

Research Article

Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural, and Industrial Uses (Case Study: Qazvin Plain)

Shima Azadeh Ranjbar ¹, Majid Kholghi ², Afshin Ashrafzadeh ^{3✉}

1. MSc of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Professor of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Associate Professor of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(✉ Corresponding Author: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 19 November 2025

Revised: 14 December 2025

Accepted: 15 December 2025

Available Online: 24 January 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ranjbar, Sh.A., Ashrafzadeh, A., & Kholghi, M., A.R (2025). Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural and Industrial uses (Case study: Qazvin plain). V.26, No.99, P: 34-55
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.371470.1633>

Extended Abstract

Introduction

In countries such as Iran, where drinking water, agriculture, and industry heavily rely on groundwater resources, management and protection are fundamental priorities. Excessive extraction has caused severe decline in groundwater levels and water quality reduction. Given increasing population and surface water shortage, dependence on quality groundwater has intensified significantly.

The Qazvin Plain, as a major agricultural and industrial hub, plays an effective role in regional food security and economic development. Agricultural and industrial activities have imposed increasing pressure on water resources. Although part of water demand is supplied through the Taleghan Dam and seasonal rivers, this plain has severe dependence on groundwater with increasing extraction, leading to level decline and serious quality challenges.

The Qazvin Plain is located within 49°10' to 50°40' East longitude and 35°20' to 36°31' North latitude. The plain area is 5059.3 square kilometers with elevation ranging between 1131 and 2902 meters. With semi-arid climate, it receives average annual precipitation of 317 millimeters. With 250,000 hectares of agricultural land, the agricultural sector accounts for more than 85 percent of water consumption.

The objective is to classify groundwater quality for agricultural, drinking, and industrial uses, and investigate spatial and temporal variations over a 20-year period from 2001 to 2021.

Methodology

Groundwater quality data were obtained from Qazvin Regional Water Company. Water type and facies were determined using the Piper diagram. Qualitative classification for agricultural purposes was conducted according to Wilcox classification, for drinking according to Schoeller classification, and for industrial purposes using Langelier Saturation Index (LSI). The Wilcox method classifies water based on electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) into four classes: excellent, good, average, and unsuitable. Schoeller method classifies water into six classes based on total dissolved solids (TDS) and total hardness (TH). Langelier index categorizes water as corrosive (LSI<0), balanced (LSI=0), or scaling (LSI>0). Spatial and temporal zoning maps were prepared using Kriging interpolation in GIS at five-year intervals.

Results and Discussion

Piper diagrams analysis over five periods (2001-2021) revealed continuous aquifer degradation. In 2001, most samples showed calcium-bicarbonate facies indicating fresh water. By 2006, samples shifted toward calcium-sulfate facies. In 2011, degradation accelerated with dramatic dispersion increase and sodium-

chloride facies emergence indicating serious salinization. By 2016, critical condition became evident with high facies diversity. In 2021, crisis peaked with maximum dispersion, where calcium-bicarbonate facies appeared only in limited samples, and significant portions showed saline facies dominated by sodium-chloride and sodium-sulfate.

For agricultural water quality, no sample was excellent quality. Good quality decreased from 25.25% in 2001 to 17.91% in 2021 (29% reduction). Average quality increased from 46.46% to 58.95%, and unsuitable samples fluctuated between 14.23% and 33.33%. Medium and unsuitable categories comprised 75 to 92 percent.

For drinking water quality, about 70% of samples remained in good to average categories, but good quality decreased from 29% to 22%. Completely inappropriate category increased from zero to 2.74%. In total hardness, good quality declined from 39% to 24%, while acceptable water increased to 44%.

For industrial water quality, significant changes occurred. Corrosive water decreased from 96.97% to 70.1%, while scaling water increased dramatically from 2.02% to 23.1%. Balanced water comprised only 1 to 6.7%. More than 93% falls into corrosive or scaling categories, requiring treatment before use.

Spatial-temporal analysis revealed northern areas had best quality while southern areas faced worst quality, with degradation advancing from south to north. For agriculture, medium and unsuitable water increased from 75% to over 90%. For drinking, good quality decreased from 29-39% to 22-24%. For industry, over 93% are either corrosive or scaling.

Conclusions

Groundwater resources show concerning degradation trends. Facies evolution from fresh to saline types, dramatic diversity increase, and significant reduction in suitable quality represent serious warnings.

For agriculture, unsuitable water increased from 75% to over 90%, necessitating urgent strategies including extraction control, cropping pattern modification, and drainage systems development. For drinking, good quality decreased from 29-39% to 22-24%, with southern areas requiring advanced treatment. For industry, more than 93% are corrosive or scaling, requiring treatment.

The spatial pattern indicates degradation advancing from south to north. The trend shows increasing salinity and hardness resulting from excessive extraction, reduced recharge, and likely saline water intrusion. This requires urgent actions including extraction control, artificial recharge enhancement, agricultural return flows treatment, and pollution prevention. Without fundamental measures, sustainability will be severely threatened.

Keywords: Langelier index, Piper, Qazvin aquifer, Quality zoning, Schoeller, Wilcox.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere gratitude to the Editor and the two anonymous reviewers for their insightful comments and constructive feedback, which significantly improved the quality of this manuscript. We also thank the Regional Water Company of Qazvin for providing the necessary data for this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article .Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts. Sh. AR. handled the methodology, formal analysis, investigation, data curation, visualization, and initial draft preparation. A.A. and M. Kh. provided supervision and validation for the study. Resources were provided by M .Kh., A. A., and M .Kh. shared responsibility for the final review and editing of the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370674.1630>

نوع مقاله: پژوهشی

طبقه‌بندی و پایش زمانی- مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت قزوین)

شیما آزاده‌رنجبر^۱، مجید خلقی^۲، افشین اشرف‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

چکیده

منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک روند کاهشی کمی و کیفی قابل توجهی را در سال‌های اخیر نشان داده‌اند. با توجه به رشد روز افزون جمعیت و کمبود منابع آب سطحی، وابستگی به منابع با کیفیت آب زیرزمینی برای شرب، کشاورزی و صنعت دو چندان شده است. به دلیل اهمیت کشاورزی و وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی در قزوین، این منطقه به عنوان منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. هدف از این پژوهش، طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آن در دشت قزوین در یک دوره ۲۰ ساله با تأکید بر مصارف شرب، کشاورزی و صنعت است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد رخساره‌ها از کلسیم-بی‌کربناته به سدیم-کلره و سدیم-سولفات تغییر یافته که بیانگر برداشت بیش از حد و نفوذ املاح است. از نظر کشاورزی، سهم آب‌های نامناسب از ۷۵ به ۹۰ درصد افزایش داشته است. از نظر شرب، آب‌های با کیفیت و خوب از ۳۹ به ۲۲ درصد کاهش یافته است و از نظر صنعتی بیش از ۹۳ درصد آب‌ها خورنده یا رسوب‌گذار هستند. الگوی مکانی نشان داد که آب مناطق شمالی دارای بالاترین و آب مناطق جنوبی دارای پایین‌ترین کیفیت است و روند تخریب از جنوب به شمال پیشروی می‌کند که نیازمند گام‌های فوری مدیریتی برای جلوگیری از تخریب غیرقابل بازگشت آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان قزوین، پایپر، پهنه‌بندی کیفیت، شاخص لانژلیه، شولر، ویلکاکس

مقدمه

دقیق است (Fetter, 2001; Mahmoudpour *et al.*, 2023).

در کشورهایی مانند ایران که تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت به‌طور عمده متکی بر منابع آب زیرزمینی است، مدیریت و حفاظت از این منابع حیاتی از اولویت‌های اساسی محسوب می‌شود. حفظ پایداری این منابع مستلزم برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت به‌منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از آنهاست (Abu-Khalaf *et al.*, 2013; Faraji *et al.*, 2017). از این‌رو، دسترسی به آب زیرزمینی با کیفیت مطلوب و حفظ استانداردهای کیفی آن، امری ضروری تلقی می‌شود که تحقق آن مستلزم استقرار شبکه پایش جامع و

در کشورهایی مانند ایران که تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت به‌طور عمده متکی بر منابع آب زیرزمینی است، مدیریت و حفاظت از این منابع حیاتی از اولویت‌های اساسی محسوب می‌شود. حفظ پایداری این منابع مستلزم برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت به‌منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از آنهاست (Abu-Khalaf *et al.*, 2013; Faraji *et al.*, 2017). از این‌رو، دسترسی به آب زیرزمینی با کیفیت مطلوب و حفظ استانداردهای کیفی آن، امری ضروری تلقی می‌شود که تحقق آن مستلزم استقرار شبکه پایش جامع و

پژوهشی جامع در دشت شیراز با بررسی ۱۰ پارامتر کیفی شامل سدیم (Na^+)، اسیدیته آب (pH)، کلراید (Cl^-), جلیلی و همکاران (Jalali *et al.*, 2016) نشان دادند که روش کریجینگ در درون‌یابی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت اراک، دقیق‌تر از روش‌های سنتی عمل می‌کند. از جمله روش‌های درون‌یابی برای تهیه پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب زیرزمینی می‌توان به روش‌های زمین آماری کریجینگ اشاره کرد (Farnia *et al.*, 2018; Amiri-Bourkhani *et al.*, 2017; Amini *et al.*, 2024).

^۱ کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
^۲ استاد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
^۳ دانشیار منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، (نویسنده مسئول: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir) (Email: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir). کرج، ایران.

قرار دارند، اما کاهش کیفیت آب پس از فصل بارندگی به ویژه سطح سدیم مشاهده می‌شود که می‌تواند بر کیفیت خاک و تولید محصول تأثیر منفی بگذارد (Gökçekuş et al., 2025). در مطالعه‌ای در سودان محققان با استفاده از ۱۱ پارامتر فیزیکوشیمیایی از ۲۰ چاه آب زیرزمینی، به ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب پرداختند و نشان دادند که ۷۵ درصد نمونه‌ها در کلاس عالی، ۲۰ درصد در کلاس خوب و ۵ درصد در کلاس نامناسب برای مصارف شرب قرار دارند (Mohammed et al., 2023). در پژوهشی در جنوب غربی الجزایر به ارزیابی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی پرداخته و نشان داده شد که بر اساس شاخص IWQI، ۴۲/۱۸ درصد نمونه‌ها کیفیت عالی، ۳۴/۳۴ درصد بسیار خوب، ۶/۶۳ درصد خوب، ۹/۶۴ درصد رضایت‌بخش و ۴/۲۱ درصد نامناسب برای آبیاری دارند (Hussein et al., 2024). نتایج بررسی کیفیت ۳۸ نمونه آب رودخانه با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره نشان داد که آب‌های رودخانه با میانگین pH برابر با ۷/۷ و TDS برابر با ۳۱۵/۸ میلی‌گرم بر لیتر خنثی و شیرین‌اند و کیفیت مناسبی برای مصارف شرب و کشاورزی دارند (Piroozfar et al., 2018).

پژوهشگران در میناب با استفاده از داده‌های ۱۰ ایستگاه هیدرومتری ارزیابی کیفیت شیمیایی آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی و به‌کارگیری نمودارهای ویلکاکس، شولر و پایپر، شاخص اشباع لانژلیه (LSI) و شاخص پایداری رایزنر^{۱۰} (RSI) نشان دادند که آب ایستگاه‌های سد سرنی برای مصارف کشاورزی و آبیاری در کلاس‌های C3S2، C4S3 و C4S4 قرار دارد و از نظر مصرف شرب از خوب تا غیرقابل آشامیدن متغیر است، کیفیت آب برای مصارف صنعتی در همه ایستگاه‌ها رسوب‌زا ارزیابی شده است و نوع آب عمدتاً کلره و سولفات‌ها با رخساره سدیم است

سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (K^+)، سختی کل (TH) نسبت کل جامدات محلول^۱ (TDS) و هدایت الکتریکی^۲ (EC) در ۲۲ چاه آب شرب شهری، به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی با استفاده از نمودارهای ویلکاکس^۳ و شولر^۴، شاخص اشباع لانژلیه^۵ (LSI) و پارامترهای خطر سلامت مانند دریافت روزانه مزمن^۶ (CDI) و ضریب خطر^۷ (HQ) بر اساس فرمول‌های EPA پرداخته است. نتایج بررسی نشان داد که بر اساس شاخص‌های کیفی ویلکاکس و شولر، آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی در کلاس متوسط و برای مصرف شرب در کلاس قابل قبول طبقه‌بندی می‌شود، منابع آب موجود بر اساس شاخص لانژلیه خاصیت خوردگی تا رسوب‌زایی دارند (Salari, 2024). پژوهشگران در هند با جمع‌آوری ۴۶ نمونه آب زیرزمینی (pH، EC، TDS، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی) به ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی پرداختند و با استفاده از شاخص کیفیت آب^۸ (WQI) و درون‌یابی مبتنی بر GIS نشان دادند که ۷۷ و ۲۳ درصد نمونه‌ها به ترتیب برای آشامیدن مناسب و نامناسب‌اند و بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس، ۷۸، ۲۰ و ۲ درصد نمونه‌ها به ترتیب خوب، متوسط و نامناسب برای کشت ارزیابی می‌شوند (Pappaka et al., 2024).

ال بیلالی و همکاران (El Bilali et al., 2021) با ارزیابی فصلی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی نشان دادند که بیشتر نمونه‌ها بر اساس شاخص کیفیت آب کشاورزی^۹ (IWQI) در کلاس مناسب یا عالی قرار دارند، اما کاهش کیفیت آب پس از فصل بارندگی به ویژه سطح سدیم مشاهده شده که می‌تواند بر کیفیت خاک و تولید محصول تأثیر منفی بگذارد. ارزیابی فصلی کیفیت آب زیرزمینی در قبرس شمالی برای مصارف کشاورزی نشان داد که اکثر نمونه‌ها بر اساس شاخص IWQI در کلاس مناسب یا عالی

⁷ Hazard Quotient (HQ)

⁸ Water Quality Index (WQI)

⁹ Irrigation Water Quality Index (IWQI)

¹⁰ Ryznar Stability Index (RSI)

¹ Total Dissolved Solids (TDS)

² Electrical Conductivity (EC)

³ Wilcox diagram

⁴ Schoeller diagram

⁵ Langelier Saturation Index (LSI)

⁶ Chronic Daily Intake (CDI)

زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت و نیز بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت دشت قزوین در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین در محدوده جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع است و در بخش شمالی و تقریباً غربی حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد. مساحت ارتفاعات و دشت به ترتیب ۴۴۹۲/۳۷ و ۵۰۵۹/۳ کیلومتر مربع است. از لحاظ توپوگرافی، دامنه ارتفاعی منطقه بین ۱۱۳۱ تا ۲۹۰۲ متر با میانگین ۱۲۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. دشت قزوین اقلیم نیمه‌خشک دارد و میانگین بارندگی سالانه آن ۳۱۷ میلی‌متر است.

دشت قزوین با ۲۵۰ هزار هکتار زمین کشاورزی، یکی از قطب‌های کشاورزی ایران محسوب می‌شود که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور دارد. بیش از ۸۵ درصد از کل مصرف آب در این دشت در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. منابع آب سطحی دشت قزوین را رودخانه‌های شاهرود، خررود، ابهررود و چندین رودخانه فصلی تشکیل می‌دهند که به آن‌ها سهمیه‌ای از سد طالقان نیز افزوده می‌شود. به دلیل محدودیت و فصلی بودن منابع آب سطحی، نیاز آبی برای مصارف کشاورزی به‌طور عمده با برداشت از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. از دیدگاه زمین‌شناسی، این دشت که از طریق فرونشست تکتونیک شکل گرفته است به تدریج بر اثر رسوبات منتقل‌شده از ارتفاعات مجاور پر شده و مورفولوژی کاسه‌ای شکلی را به وجود آورده است که در آن جریان‌های سطحی و زیرزمینی از اطراف به سمت مرکز دشت متمرکز می‌شوند (Fotamy et al., 2023). دشت قزوین روی یک آبخوان آبرفتی به مساحت تقریبی ۴۰۰۰ کیلومتر مربع قرار گرفته است که حدود ۷۸ درصد از مساحت کل دشت را پوشش می‌دهد.

که در ۶۰ درصد ایستگاه‌ها کلر-سدیم و در ۴۰ درصد سولفات-سدیم شناسایی شده است، همچنین هدایت الکتریکی رابطه‌ای بسیار قوی با یون‌های سدیم، کلر، سولفات و کلسیم نشان داد و شرایط کاتیونی و آنیونی غالب به صورت $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+}$ و $Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$ گزارش شده است (Torkamanitombeki & Khamsehchiyan, 2025). پژوهشگران در مجارستان در دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به بررسی تکامل مکانی-زمانی شیمی آب زیرزمینی پرداختند و نشان دادند که نوع غالب آب $Ca-Mg-HCO_3$ است که با گذشت زمان به سمت $Na-HCO_3$ تغییر کرده و شوری افزایش یافته است. بر اساس شاخص کیفیت آب زیرزمینی، بهبود کلی کیفیت آب زیرزمینی را در طول زمان با تطابق اکثر مناطق با استانداردهای آب آشامیدنی نشان داده اما مناطق خاصی نشانه‌های آلودگی موضعی را نشان داده‌اند که آن مناطق نیاز به مدیریت هدفمند دارند (Mohammed et al., 2025).

دشت قزوین یکی از قطب‌های مهم کشاورزی و صنعتی کشور است و نقش مؤثری در تأمین امنیت غذایی و توسعه اقتصادی منطقه دارد. رشد فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در این دشت، متراکم‌سازی جمعیت قابل‌توجهی را در دهه‌های اخیر به همراه داشته و فشار فزاینده‌ای بر منابع آب منطقه وارد کرده است. بخشی از تقاضای آب این منطقه از طریق منابع آب سطحی از جمله سد طالقان و رودخانه‌های فصلی تأمین می‌گردد، اما این دشت وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد و از آبخوان‌ها بیش از حد برداشت می‌شود. این امر منجر به افت سطح آب زیرزمینی و بروز چالش‌های جدی در کیفیت منابع آبی گردیده است. با توجه به اهمیت این منطقه و چالش‌های موجود در زمینه کیفیت منابع آب، دشت قزوین به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب گردید.

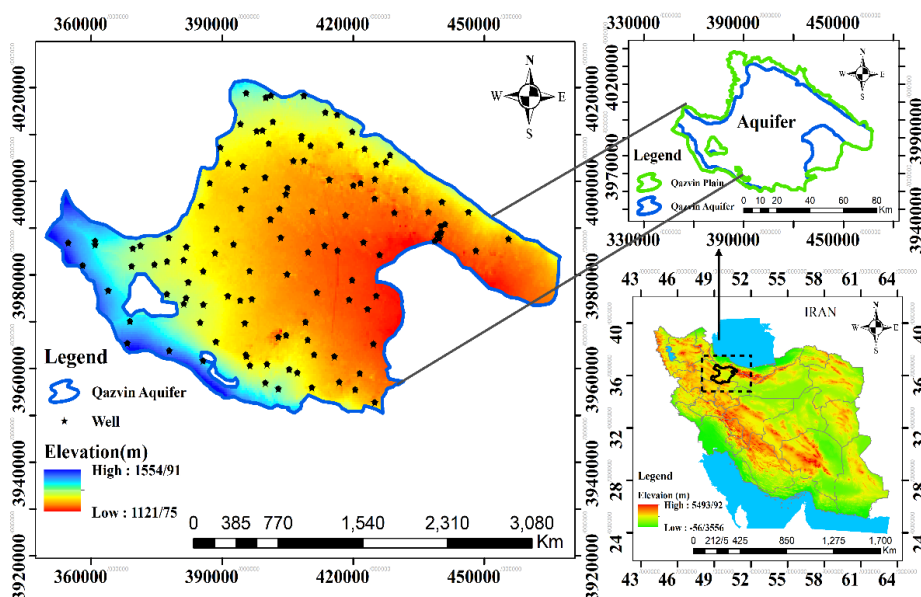
با توجه به اهمیت فراوان شناخت ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی، پایش و طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی برای مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب ضروری به‌نظر می‌رسد، بنابراین هدف از اجرای این پژوهش، طبقه‌بندی کیفیت آب

تامین آب، تعداد و پراکنش مناسب چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی است. داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان قزوین تهیه شده است. موقعیت چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین در شکل (۱) نشان داده شده است.

در سال‌های اخیر افزایش شوری خاک و آب به چالشی جدی برای دشت قزوین تبدیل شده که نه تنها عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد، بلکه باعث تخریب ساختار خاک و کاهش نفوذپذیری آب می‌شود، آلودگی نیترات ناشی از کودهای کشاورزی، نفوذ فاضلاب‌های شهری و صنعتی و افزایش EC و TDS آب، تأمین آب شرب بهداشتی را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. همچنین رقابت بین‌بخش‌های صنعت بر سر منابع محدود آب، افزایش هزینه‌های انرژی برای برداشت از عمق بیشتر و ضرورت سرمایه‌گذاری سنگین در سیستم‌های تصفیه پیشرفته آب برای مصارف صنعتی با مشکلات مواجه است. به همین منظور پایش دقیق روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی، شناسایی عوامل مؤثر و ارائه راهکارهای مدیریتی برای حفظ پایداری منابع آب کشاورزی، شرب و صنعت این منطقه لازم است.

دشت قزوین در حوزه منابع آب زیرزمینی با چالش‌های جدی روبه‌رو است. برداشت بی‌رویه از این منابع در سال‌های اخیر موجب افت متوسط سالانه ۱/۲۳ متر سطح آب زیرزمینی شده است (Azadeh Ranjbar, 2025). این وضعیت، علاوه بر کاهش حجم ذخایر آبخوان، کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار داده است. چالش‌های مدیریتی از جمله ضعف نظارت بر چاه‌های غیرمجاز و نبود سیستم یکپارچه پایش منابع آب زیرزمینی، بر شدت این مشکلات افزوده است. اجرای برنامه‌های حفاظتی مؤثر و به‌کارگیری مدیریت بهینه کیفیت منابع آب برای جلوگیری از تخریب بیشتر آبخوان و بهبود شرایط موجود امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

دشت قزوین توسط چاه شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی (به طور میانگین ۱۲۰ حلقه چاه)، معمولاً دو مرتبه در سال (شش ماه اول و دوم) پارامترهایی مانند سدیم (Na^+)، اسیدیته آب (pH)، کلراید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (K^+)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، نسبت کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) آماربرداری می‌شود. دلیل انتخاب دشت قزوین علاوه بر اهمیت آب زیرزمینی در این منطقه از نظر



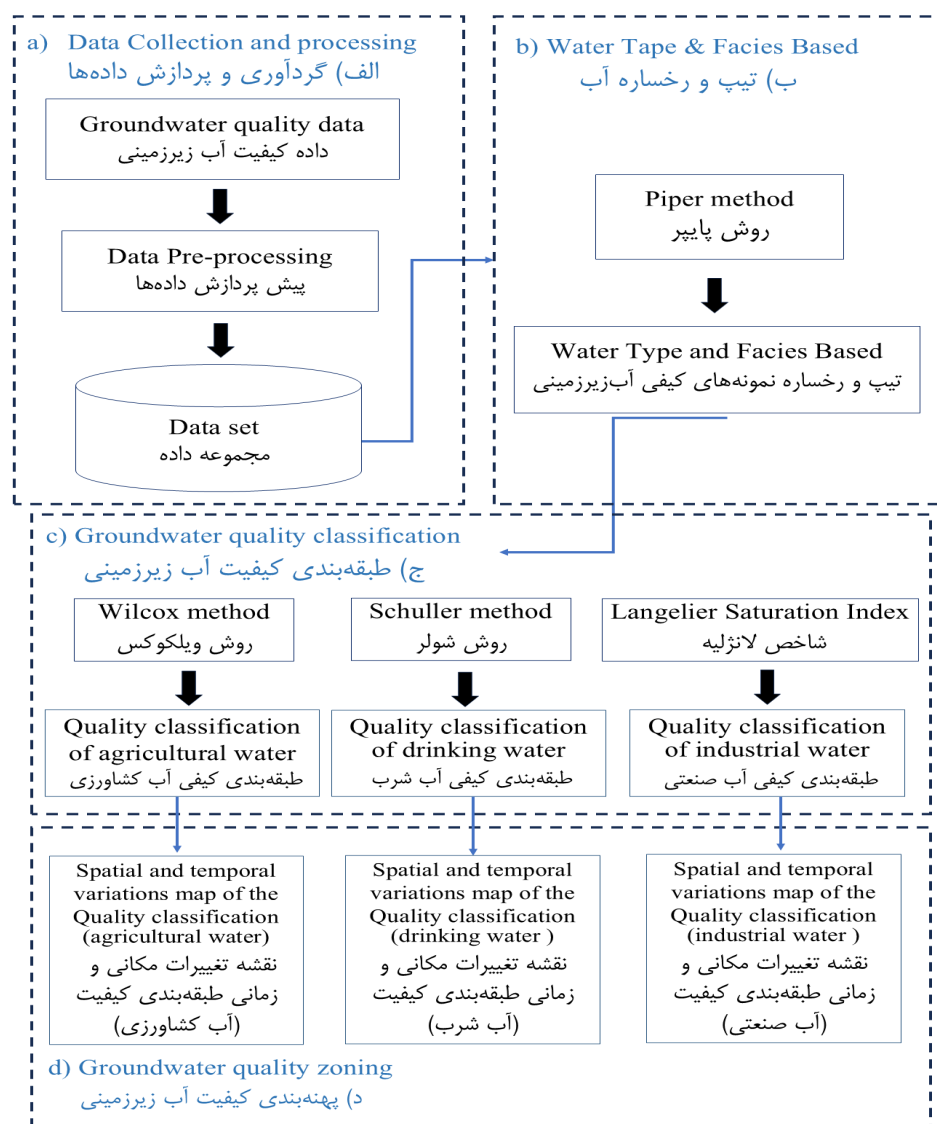
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی

Fig. 1- Location of the study area and the spatial distribution of Groundwater quality monitoring wells

توجه طبقه‌بندی و نمودار شولر و طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ صنعت با توجه شاخص لانژلیه صورت گرفت. در گام چهارم پژوهش، به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس، پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس روش شولر و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانژلیه تهیه گردید. فلوجارت پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.

روش تحقیق

در گام اول پژوهش، ابتدا داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان قزوین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان قزوین اخذ گردید و داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین پیش‌پردازش شدند. در گام دوم پژوهش روی تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از نمودار پایپر آغاز گردید. در گام سوم پژوهش، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی با توجه طبقه‌بندی و نمودار ویلکاکس، همچنین طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ شرب با



شکل ۲- فلوجارت روش شناسی پژوهش

Fig. 2- Flowchart of the Methodology

تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی

نمودار پایپر یکی از روش‌های متداول و کاربردی برای طبقه‌بندی نمونه‌های آب و تعیین تیپ شیمیایی آب به‌شمار می‌رود. در این نمودار، مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها به‌صورت درصد و برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. درصد یون‌ها روی مثلث‌های جانبی نمودار مشخص می‌شود و نقاط متناظر روی اضلاع این مثلث‌ها در لوزی مرکزی نمایش داده می‌شوند. در نهایت، درباره تیپ کیفی آب با استفاده از نمودار پایپر، بر اساس محل قرارگیری نقاط متمرکز در نواحی مختلف نمودار قضاوت می‌شود. در این طبقه‌بندی، آب بر اساس کاتیون‌های غالب به چهار رخساره اصلی تقسیم می‌شود: نوع کلسیم‌دار، منیزیم‌دار، نوع سدیم‌دار و نوع مختلط. بر پایه آنیون‌های غالب، آب همچنین به سه تیپ بی‌کربناته، سولفاته و کلریده طبقه‌بندی می‌گردد. این تقسیم‌بندی امکان شناسایی دقیق ویژگی‌های هیدروشیمیایی و منشأ آب را فراهم می‌آورد (Piper, 1944). نمودار پایپر در مقایسه سریع ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، شناسایی فرآیندهای زمین‌شیمیایی، تعیین منشأ آب‌های زیرزمینی، بررسی مسیرهای جریان، تشخیص منابع آلودگی و رصد تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب در مطالعات هیدروژئولوژی کاربردهای گسترده‌ای دارد.

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

آب‌های کشاورزی از لحاظ غلظت و ترکیب نمک‌های محلول متغیر هستند. افزایش غلظت یون‌های محلول در آب زیرزمینی، اثرهای فیزیکی و شیمیایی مخربی بر خاک و گیاهان وارد می‌کند و قابلیت بهره‌وری خاک را می‌کاهد. شوری موجب اختلال در جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه گیاه می‌گردد. شوری با شاخص‌هایی مانند خطر شوری، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم، سدیم کربنات باقی‌مانده از پارامترهای مهم در تشخیص مناسب بودن آب زیرزمینی برای مصرف آبیاری است. عوامل مصنوعی و طبیعی در کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی تاثیر بسیار زیادی دارد. عوامل مصنوعی شامل ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی و کشاورزی سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. از عوامل طبیعی می‌توان به هیدرواقلیم و زمین‌شناسی اشاره کرد. برای تعیین کیفیت آب کشاورزی، از طبقه‌بندی و نمودار ویلکاکس استفاده شده است. در این طبقه‌بندی، آب کشاورزی بر اساس میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) به چهار طبقه با کیفیت عالی، خوب، متوسط و نامناسب و ۱۶ رده تقسیم‌بندی می‌شود که در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است (Wilcox, 1955).

جدول ۱- معیارهای طبقه بندی آب از نظر کشاورزی

Table 1- Classification criteria for Agricultural water

| کیفیت آب Water Quality | EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | طبقه بندی Classification | SAR | طبقه بندی Classification |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|
| عالی excellent | <250 | C1 | <10 | S1 |
| خوب good | 250-750 | C2 | 10-18 | S2 |
| متوسط Average | 750-2250 | C3 | 18-26 | S3 |
| نامناسب Unsuitable | >2250 | C4 | >26 | S4 |

طبقه‌بندی و پایش زمانی-مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت...

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Table 2- Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

| کیفیت آب Water Quality | نوع کیفیت آب برای کشاورزی Water Quality type for agricultural use | طبقه‌بندی Classification |
|---------------------------|---|--|
| عالی excellent | شیرین- مناسب برای کشاورزی Clean- completely harmless to agricultural | C1S1 |
| خوب good | کمی شور- مناسب برای کشاورزی Slightly Salty- almost suitable for agricultural | C2S1, C2S2, C1S2 |
| متوسط Average | شور- قابل استفاده برای کشاورزی (با تمهیدات لازم) Salty- for agricultural with the necessary arrangements | C3S3, C3S2, C3S1, C2S3, C1S3 |
| نامناسب Unsuitable | خیلی شور- نامناسب برای کشاورزی Too Salty- harmful to agricultural | C4S1, C4S2, C4S3, C4S4, C3S4, C2S4, C1S4 |

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب
 آب آشامیدنی باید فاقد رنگ، بو و طعم و به لحاظ عناصر و مواد شیمیایی موجود در آن در محدوده مجاز باشد که سازمان‌های بهداشتی تعیین کرده است. در گزارش‌های هیدرولوژی برای طبقه‌بندی آب از نظر شرب معمولاً از طبقه‌بندی شولر استفاده می‌شود.
 شرب، با استفاده از طبقه‌بندی و نمودار شولر، میزان سختی کل منابع آب و میزان کل جامدات محلول (TDS) است که پارامتر بسیار مؤثری در ایجاد طعم آب آشامیدنی است. در روش طبقه‌بندی شولر، آب‌ها را به شش طبقه خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، کاملاً نامناسب و غیرقابل شرب تقسیم می‌کنند که در جدول (۳) ارائه شده است.
 مهم‌ترین معیارهای کیفی برای طبقه‌بندی آب از نظر (Schoeller, 1962).

جدول ۳- طبقه‌بندی کیفیت آب آشامیدنی بر اساس روش شولر

Table 3- Quality classification of drinking water based on the Schuller method

| کیفیت آب Water Quality | TDS (mg/L) | TH (mg/L) |
|--|------------|-----------|
| خوب Good | <500 | <250 |
| قابل قبول Acceptable | 500-1000 | 250-500 |
| متوسط Average | 1000-2000 | 500-1000 |
| نامناسب Inappropriate | 2000-4000 | 1000-2000 |
| کاملاً نامناسب Completely inappropriate | 4000-8000 | 2000-4000 |
| غیر قابل شرب Undrinkable | >8000 | >4000 |

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت
 مهم‌ترین پارامتر تعیین کیفیت آب برای مصارف صنعتی، بررسی مسئله خوردگی و رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبرسانی و تاسیسات صنعتی است (Crittenden *et al.*, 2012). به منظور تعیین کیفیت آب از نظر پایداری، شاخص‌های مختلفی پیشنهاد شده‌است که مهم‌ترین آنها شاخص لانژلیه است. این شاخص از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

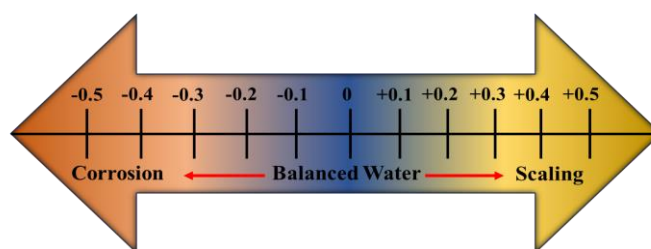
$$LSI = pH_s - pH_m \quad (6)$$
 در این رابطه، pH_s و pH_m به ترتیب مقدار pH در حالت اشباع از کربنات کلسیم و اسیدیته واقعی آب است. بر اساس

شاخص لانژلیه، اگر مقدار شاخص منفی باشد آب خاصیت خوردگی دارد و اگر مثبت باشد آب خاصیت رسوب‌گذاری دارد و چنانچه برابر صفر باشد آب پایدار یا متعادل محسوب می‌شود که در جدول (۴) و شکل (۳) ارائه شده است (Sunkari et al., 2019).

جدول ۴- طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانژلیه

Table 4- Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

| کیفیت آب Water Quality | شاخص لانژلیه Langelier Saturation Index (LSI) |
|---------------------------------------|--|
| خورنده Corrosion | $0 < SI$ |
| آب متعادل یا پایدار Balanced Water | $SI = 0$ |
| رسوب‌گذار Scaling | $SI > 0$ |



شکل ۳- شاخص لانژلیه

Fig. 3- Langelier Saturation Index

بررسی نمودارهای پایپر آب زیرزمینی دشت قزوین در پنج دوره زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ روند نگران‌کننده تخریب کیفیت آبخوان را طی دو دهه به روشنی نشان می‌دهد. در سال ۱۳۸۰ آبخوان دشت قزوین وضعیت نسبتاً مطلوبی داشته است. اکثر نمونه‌ها تیپ و رخساره کلسیم-بی‌کربناته را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده آب‌های تازه، کم‌عمق و با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی است. پراکندگی نمونه‌ها محدود است و تنوع رخساره‌ای کم مشاهده می‌شود. غلبه کلسیم در کاتیون‌ها و بی‌کربنات در آنیون‌ها بیانگر فرآیندهای طبیعی انحلال کربنات‌ها و تغذیه مناسب آبخوان است. در سال ۱۳۸۵، تغییرات اولیه آغاز گردید و برخی نمونه‌ها از تیپ و رخساره کلسیم-بی‌کربناته به سمت کلسیم-سولفات‌ها حرکت کرده‌اند. پراکندگی نمونه‌ها کمی افزایش یافته است و تعداد محدودی از نمونه‌ها به سمت رخساره‌های شورتر گرایش نشان داده‌اند. این تغییرات

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، پهنه‌بندی طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی، شرب و آب صنعتی به ترتیب بر اساس روش ویلکاکس، شولر و شاخص لانژلیه دشت قزوین به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ صورت گرفت. برای پهنه‌بندی از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد.

نتایج و بحث

تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی

برای حجم‌نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار پایپر (سال ۱۴۰۰) در شکل (۴) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر در جدول (۵) و روند تغییرات پارامترهای کیفی آب بر اساس نمودار پایپر در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۶) ارائه شده است.

مستمر و بیش از ظرفیت تغذیه از آبخوان که منجر به افت شدید تراز آب زیرزمینی شده است، افزایش زمان ماند آب در آبخوان که باعث شدید شدن فرآیندهای انحلال و تبخیر شده است، تبادل یونی پیشرفته بین آب و سازندهای زمین‌شناسی که باعث تغییر ترکیب شیمیایی آب شده است، نفوذ و برگشت آب‌های کشاورزی شور به آبخوان و احتمال نفوذ آلودگی‌های انسانی و صنعتی. پیامدهای این تخریب کیفیت شامل کاهش شدید حجم آب قابل استفاده برای شرب، محدودیت‌های جدی در بهره‌برداری کشاورزی، افزایش هزینه‌های تصفیه، تهدید امنیت آب و احتمال غیرقابل بازگشت شدن تخریب در صورت ادامه روند فعلی است.

برای مدیریت و بهبود وضعیت آبخوان، برداشتن گام‌های فوری و اساسی ضروری است که شامل این موارد است: کاهش قابل توجه برداشت و برقراری تعادل بین برداشت و تغذیه، کنترل و مدیریت برگشت آب‌های کشاورزی به آبخوان، شناسایی و کنترل منابع آلودگی، افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان در مناطق مناسب، تغییر الگوی کشت به محصولات کم‌آب‌بر، استفاده از روش‌های نوین آبیاری و کاهش تلفات آب، پایش مستمر و دقیق کیفیت و کمیت آب زیرزمینی، توسعه منابع آب جایگزین و کاهش وابستگی به آب زیرزمینی ضروری. بدون اتخاذ تصمیمات قاطع و اجرای برنامه‌های جامع مدیریتی، آبخوان دشت قزوین در معرض خطر جدی تخریب غیرقابل بازگشت قرار می‌گیرد که می‌تواند پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد.

اولیه نشان‌دهنده آغاز تأثیر برداشت بیش از حد و کاهش تدریجی تراز آبخوان است.

در سال ۱۳۹۰، تخریب کیفیت به طور معناداری تسریع شده است و این دوره را می‌توان نقطه عطفی در روند کاهش کیفیت دانست. پراکندگی نمونه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته و تنوع رخساره‌ها به شدت بالا رفته است. تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها به سمت تیپ و رخساره کلسیم-سولفات و رخساره‌های مختلط حرکت کرده‌اند. ظهور نمونه‌هایی با رخساره سدیم-کلره نشان‌دهنده آغاز شورشدگی جدی آبخوان است. در سال ۱۳۹۵، وضعیت بحرانی آبخوان به وضوح آشکار می‌شود. پراکندگی نمونه‌ها در سراسر نمودار پایپر و تنوع بسیار بالای رخساره‌ها نشان‌دهنده ناهمگنی شدید در کیفیت آب است. تعداد نمونه‌های با رخساره تازه به حداقل رسیده و تعداد نمونه‌های با رخساره‌های شور به طور قابل توجهی افزایش یافته است. حرکت گسترده نمونه‌ها به سمت تیپ و رخساره‌های سدیم-کلره و سدیم-سولفات بیانگر تشدید فرآیندهای تبخیر، تبادل یونی و نفوذ املاح است. در سال ۱۴۰۰، بحران کیفی به اوج خود رسیده است. پراکندگی نمونه‌ها به حداکثر رسیده و تنوع رخساره‌ها کامل شده است. رخساره کلسیم-بی‌کربناته تنها در تعداد بسیار محدودی از نمونه‌ها دیده می‌شود و بخش عمده نمونه‌ها رخساره‌های مختلط و شور را نشان می‌دهند. تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها در محدوده رخساره‌های سدیم-کلره و سدیم-سولفات قرار دارند که برای بسیاری از مصارف نامناسب هستند.

تحلیل روند تغییرات در دو دهه نشان می‌دهد که عوامل اصلی مؤثر تخریب کیفیت شامل این موارد است: برداشت

جدول ۵- تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر

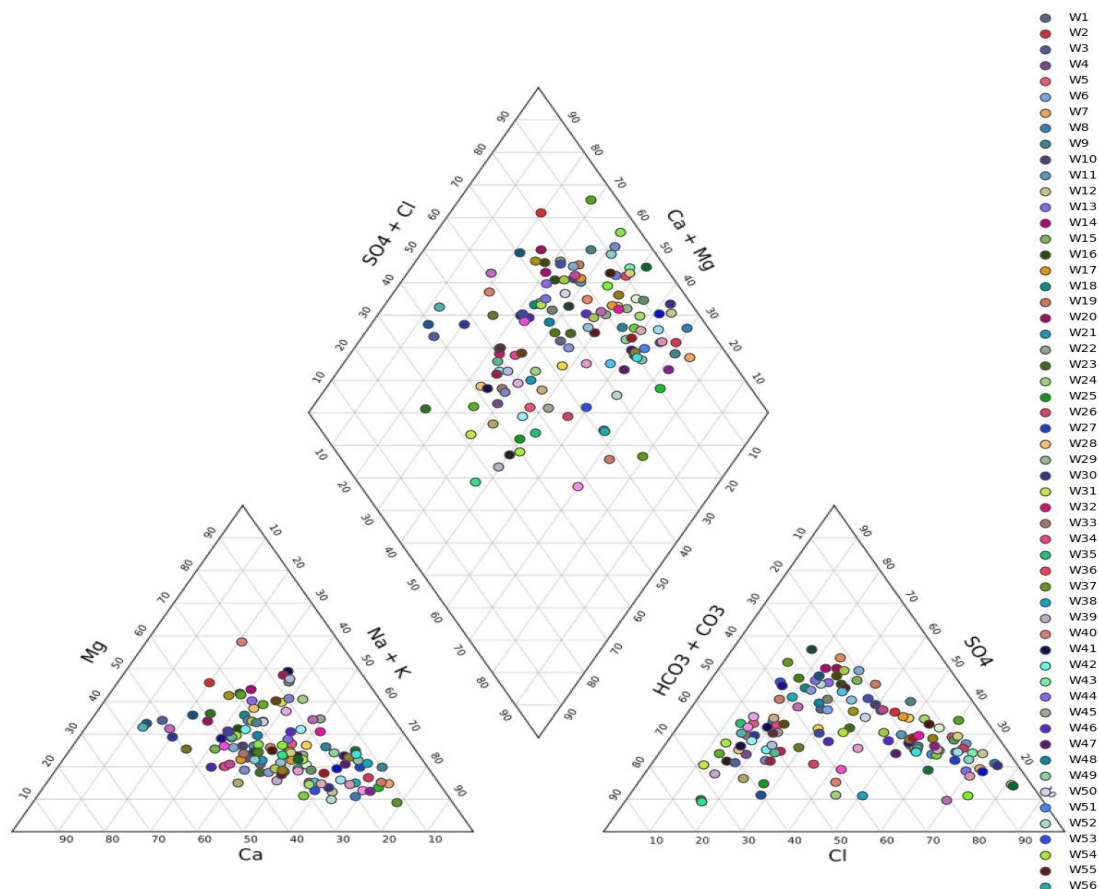
Table 5- Water Type and Facies Based on Piper Diagram

| دوره زمانی Time Period | غلظت آنیون‌ها Anion Concentration | غلظت کاتیون‌ها Cation Concentration | تیپ آب Water Type | رخساره آب Water Facies | تیپ و رخساره Type and Facies |
|---------------------------|---|---|--|-------------------------------|--|
| 2001(۱۳۸۰) | HCO ₃ >SO ₄ >Cl | Ca>Mg>Na+K | بی کربناته Bicarbonate | کلسیت Calcic | کلسیت- بی کربناته Calcium-Bicarbonate |
| 2006(۱۳۸۵) | HCO ₃ >SO ₄ >Cl | Ca>Mg>Na+K | بی کربناته - سولفات Bicarbonate-Sulfate | کلسیت Calcic | کلسیت- بی کربناته - سولفات Calcium-Bicarbonate-Sulfate |
| 2011(۱۳۹۰) | SO ₄ >HCO ₃ >Cl | Ca>Mg>Na+K | سولفات - بی کربناته Sulfate-Bicarbonate | کلسیت Calcic | کلسیت- سولفات- بی کربناته Calcium-Sulfate-Bicarbonate |
| 2016(۱۳۹۵) | SO ₄ >Cl>HCO ₃ | Ca>Mg>Na+K | سولفات - کلر Sulfate-Chloride | کلسیت - مختلط Calcic-Mixed | سولفات - کلر - کلسیت - مختلط Calcium-Sulfate-Chloride-Mixed |
| 2021(۱۴۰۰) | SO ₄ >Cl>HCO ₃ | Ca>Na>Mg+K | سولفات - کلر Sulfate-Chloride | مختلط - سدیمی Mixed-Sodic | سولفات - کلر - سدیمی - مختلط Mixed-Sodium-Sulfate-Chloride |

جدول ۶- روند تغییرات پارامترهای کیفی دشت قزوین

Table 6- Trend of Quality Parameter Changes in Qazvin Plain

| پارامتر Parameter | 2001(۱۳۸۰) | 2006(۱۳۸۵) | 2011(۱۳۹۰) | 2016(۱۳۹۵) | 2021(۱۴۰۰) |
|---|---------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| کاتیون غالب Dominant Cation | Ca | Ca | Ca | Ca & Mg | Ca, Mg & Na |
| آنیون غالب Dominant Anion | HCO ₃ | HCO ₃ & SO ₄ | SO ₄ & Cl | SO ₄ & Cl | SO ₄ & Cl |
| پراکندگی نمونه‌ها Sample Distribution | محدود Limited | نسبتاً محدود Relatively Limited | متوسط Moderate | گسترده Extensive | بسیار گسترده Very Extensive |
| تنوع رخساره‌ای Facies Diversity | کم Low | متوسط Moderate | بالا High | خیلی بالا Very High | حداکثر Maximum |
| نمونه‌های کیفیت خوب Good Quality Samples | بالا High (>35) | متوسط Moderate (25-30) | کم Low (15-20) | خیلی کم Very Low (<10) | خیلی کم Very Low (<5) |
| درصد رخساره شور Saline Facies (%) | خیلی کم Very Low (<5%) | کم Low (5-10%) | متوسط Moderate (10-20%) | قابل توجه Considerable (20-30%) | بالا High (>30%) |
| وضعیت کیفی Quality Status | مطلوب Satisfactory | نسبتاً مطلوب Relatively Good | نگران‌کننده Concerning | بحرانی Critical | بسیار بحرانی Highly Critical |



شکل ۴- تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر (۱۴۰۰)

Fig. 4- Water Type and Facies Based on Piper Diagram (2021)

۱۷/۹۱ درصد در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که معادل کاهش ۲۹ درصد در دو دهه اخیر است. در مقابل، سهم نمونه‌های با کیفیت متوسط که نیاز به مدیریت‌های ویژه آبیاری و محدودیت‌هایی در انتخاب نوع محصول دارند، از ۴۶/۴۶ درصد به ۵۸/۹۵ درصد افزایش یافته است. نمونه‌های نامناسب که تنها برای گیاهان بسیار متحمل به شوری و با سیستم‌های زهکشی پیشرفته قابل استفاده هستند، نوسان‌هایی بین ۲۳/۱۴ تا ۳۳/۳۳ درصد داشته‌اند. طبقات متوسط و نامناسب در مجموع حدود ۷۵ تا ۹۲ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شوند که هشدار جدی برای آینده کشاورزی منطقه است و ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریتی فوری از جمله بهبود کارایی مصرف آب، توسعه سیستم‌های زهکشی، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آب‌پر و متحمل به شوری، و کنترل برداشت بی‌رویه از آبخوان را آشکار می‌سازد.

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

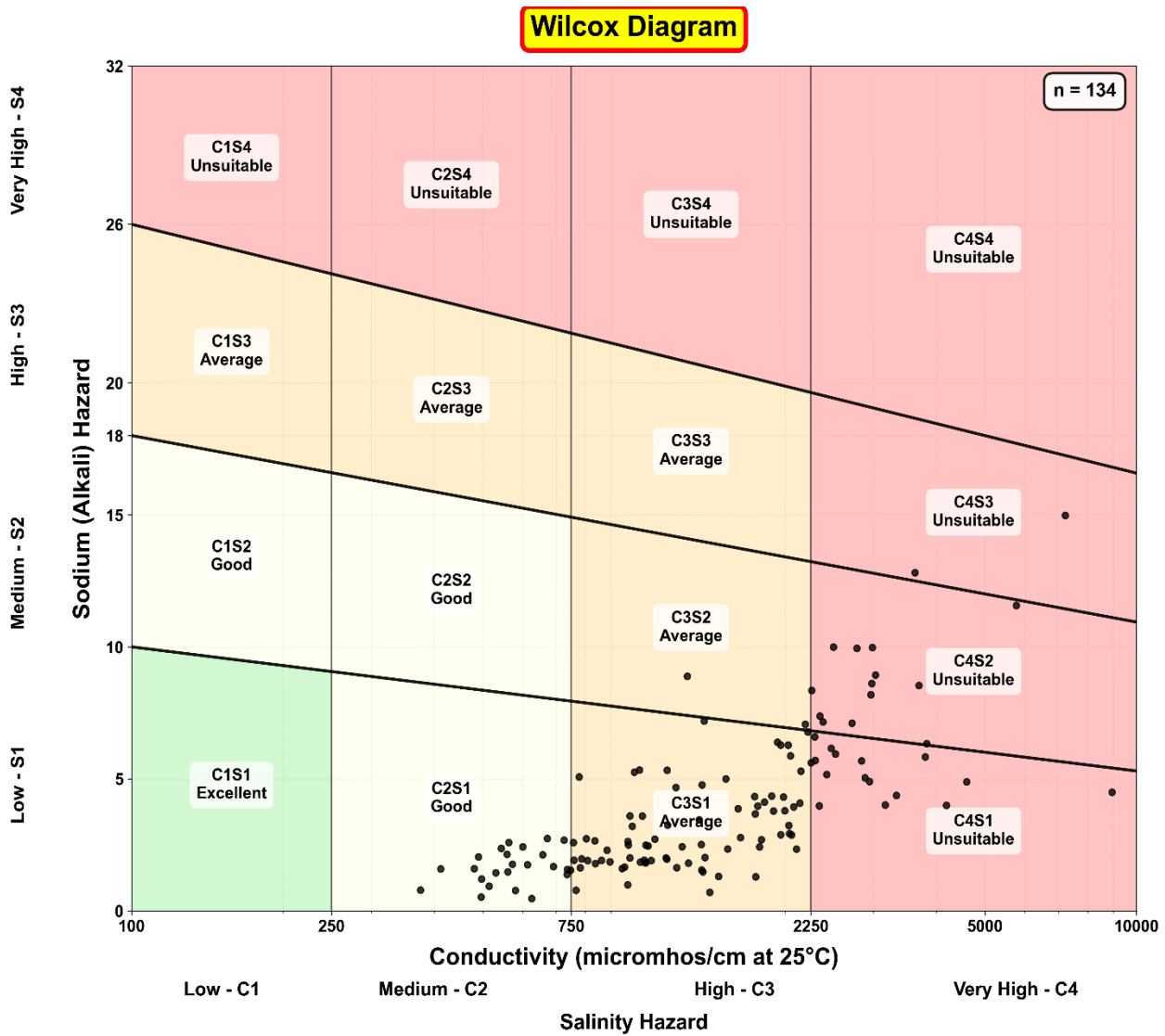
برای حجیم نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار ویلکاکس (سال ۱۴۰۰) در شکل (۵) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، درصد توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷) نشان‌دهنده روند نامطلوب تخریب کیفی منابع آب برای مصارف کشاورزی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ است. نتایج حاکی از آن است که در این دوره بیست‌ساله، هیچ نمونه آب در طبقه عالی قرار نگرفته است که این امر بیانگر فقدان کامل منابع آب با کیفیت مطلوب در منطقه است. درصد نمونه‌های با کیفیت خوب که برای آبیاری اکثر محصولات کشاورزی مناسب هستند، روندی نزولی و نگران‌کننده را از ۲۵/۲۵ درصد در سال ۱۳۸۰ به

جدول ۷- درصد هر یک از طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Table 7- Percentage of each the Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

| دوره زمانی Time Period | عالی excellent | خوب good | متوسط Average | نامناسب Unsuitable |
|------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|---|
| | C1S1 | C2S1, C2S2, C1S2 | C3S3, C3S2, C3S1, C2S3, C1S3 | C4S1, C4S2, C4S3, C4S4, C3S4, C2S4, C1S4 |
| 2001(۱۳۸۰) | 0 | 25.25 | 46.46 | 28.28 |
| 2006(۱۳۸۵) | 0 | 27.37 | 47.37 | 25.17 |
| 2011(۱۳۹۰) | 0 | 19.79 | 46.88 | 33.33 |
| 2016(۱۳۹۵) | 0 | 19.18 | 46.58 | 34.25 |
| 2021(۱۴۰۰) | 0 | 17.91 | 58.95 | 23.14 |



شکل ۵- طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس (۱۴۰۰)

Fig. 5- Quality classification of agricultural water based on the Wilcox diagram (2021)

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر شرب
 برای حجیم نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار شولر (سال ۱۴۰۰) در شکل (۶) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، درصد توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۸) ارائه شده است.

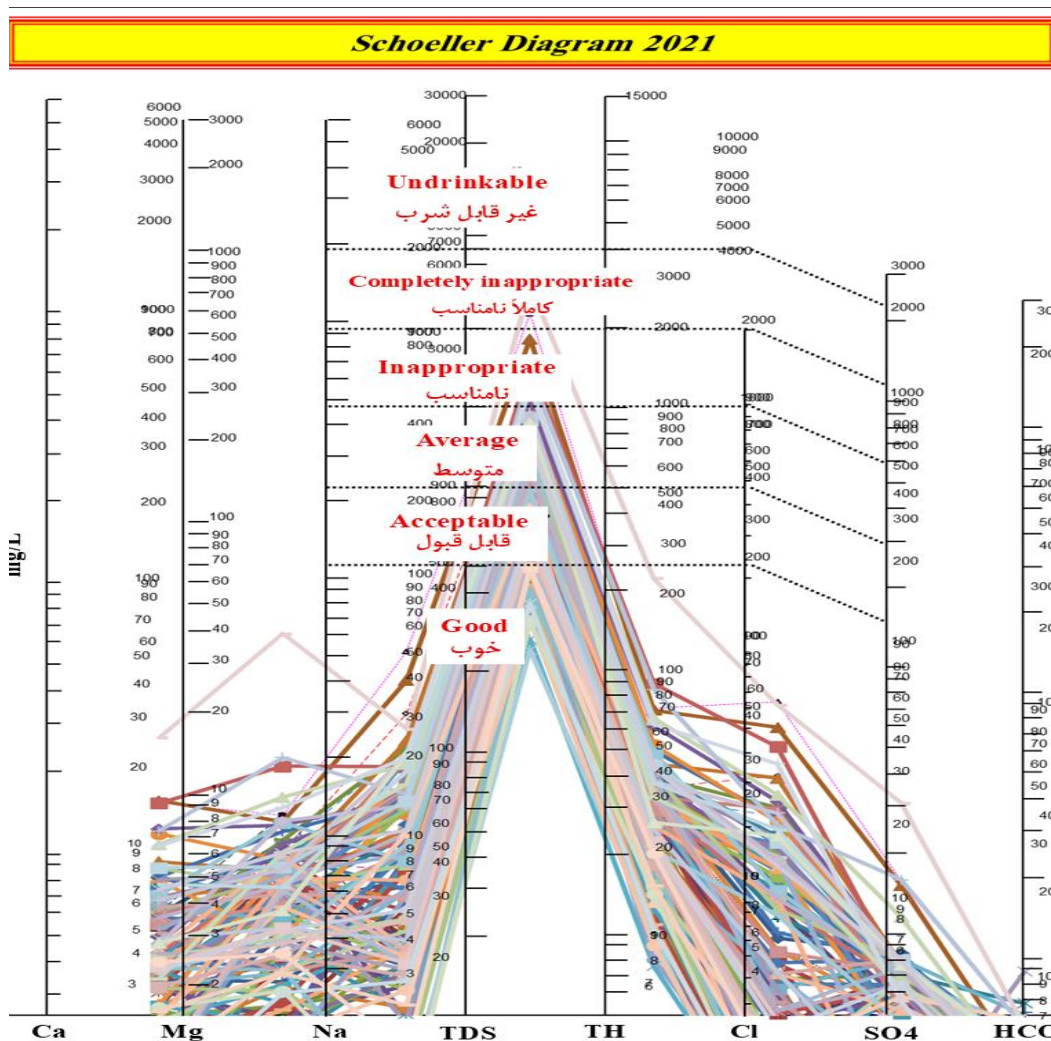
در جدول (۸) کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین از نظر شرب در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که از نظر TDS، وضعیت نسبتاً پایدار است و حدود ۷۰ درصد نمونه‌ها در دسته‌های خوب تا متوسط قرار دارند، اما آب‌های با کیفیت خوب از ۲۹ درصد به ۲۲ درصد کاهش یافته و نگران‌کننده‌تر، طبقه کاملاً نامناسب از صفر در سال ۱۳۸۰

به ۲/۷۴ درصد در ۱۳۹۵ افزایش یافته است. از نظر سختی کل (TH)، وضعیت بدتر است و آب‌های با کیفیت خوب کاهش شدیدی از ۳۹ درصد به ۲۴ درصد داشته‌اند، در حالی که آب‌های قابل قبول به ۴۴ درصد در سال ۱۴۰۰ افزایش یافته‌اند. طبقه کاملاً نامناسب در TH نیز از صفر به ۱/۳۷ درصد در سال ۱۳۹۵ ظهور کرده است. به طور کلی، هر دو معیار TDS و TH روند کاهش تدریجی کیفیت آب را نشان می‌دهند، به طوری که آب‌های با کیفیت خوب کاهش و آب‌های با کیفیت متوسط و نامناسب افزایش یافته‌اند. ظهور و افزایش طبقات کاملاً نامناسب در هر دو شاخص، هشدار جدی درباره تخریب منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود و نیازمند راهبردهای مدیریتی فوری است.

جدول ۸- درصد هر یک از طبقه بندی کیفیت آب شرب بر اساس روش شولر

Table 8- Percentage of each the Quality classification of drinking water based on the Schuller method

| دوره زمانی Time Period | TDS | | | | | |
|------------------------------|-------------|-------------------------|------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| | خوب Good | قابل قبول Acceptable | متوسط Average | نامناسب Inappropriate | کاملاً نامناسب Completely inappropriate | غیر قابل شرب Undrinkable |
| 2001(۱۳۸۰) | 29.29 | 30.3 | 33.33 | 7.07 | 0 | 0 |
| 2006(۱۳۸۵) | 27.37 | 26.32 | 41.05 | 5.26 | 0 | 0 |
| 2011(۱۳۹۰) | 20.83 | 32.29 | 36.46 | 9.38 | 1.04 | 0 |
| 2016(۱۳۹۵) | 20.55 | 27.4 | 38.36 | 10.96 | 2.74 | 0 |
| 2021(۱۴۰۰) | 22.39 | 34.33 | 35.07 | 6.72 | 1.49 | 0 |
| | TH | | | | | |
| 2001(۱۳۸۰) | 39.39 | 36.36 | 23.23 | 1.01 | 0 | 0 |
| 2006(۱۳۸۵) | 38.95 | 40.00 | 20.00 | 1.05 | 0 | 0 |
| 2011(۱۳۹۰) | 27.08 | 29.17 | 39.58 | 4.17 | 0 | 0 |
| 2016(۱۳۹۵) | 24.66 | 35.62 | 34.25 | 4.11 | 1.37 | 0 |
| 2021(۱۴۰۰) | 23.88 | 44.03 | 27.61 | 3.73 | 0.75 | 0 |



شکل ۶- طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس نمودار شولر (۱۴۰۰)

Fig. 6- Quality classification of drinking water based on the Schuller diagram (2021)

برای مصارف صنعتی است، تنها ۱ تا ۶/۷ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد و روند پایدار ندارد. تغییر از آب با خاصیت خوردگی به سمت آب با خاصیت رسوب‌گذاری نشان‌دهنده تغییر در ترکیب شیمیایی آب و افزایش غلظت املاح است. با توجه به اینکه بیش از ۹۳ درصد آب‌های منطقه در دسته‌های خوردگی یا رسوب‌گذاری قرار دارند، استفاده از این آب‌ها برای کاربردهای صنعتی بدون تصفیه و تنظیم شیمیایی مناسب، می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های جدی به لوله‌ها، تجهیزات و سیستم‌های صنعتی شود و نیازمند برداشتن گام‌های مدیریتی و تصفیه‌ای است.

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر صنعت جدول (۹) توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی را از نظر صنعت بر اساس شاخص لانزلیه در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. این جدول تغییرات قابل توجهی در خصوصیات شیمیایی آب در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. آب با پتانسیل خوردگی که غالب‌ترین نوع است، از ۹۶/۹۷ درصد در سال ۱۳۸۰ به ۷۰/۱ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است، در حالی که آب با پتانسیل رسوب‌گذاری افزایش چشمگیری (افزایش بیش از ۱۰ برابر) از ۲/۰۲ درصد به ۲۳/۱ درصد داشته است. آب متعادل که ایده‌آل‌ترین حالت

جدول ۹- درصد هر یک از طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانگیلر

Table 9- Percentage of each the Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

| دوره زمانی Time Period | خورنده Corrosion | آب پایدار Balanced Water | رسوب‌گذار Scaling |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| 2001(۱۳۸۰) | 2.02 | 1.01 | 96.97 |
| 2006(۱۳۸۵) | 3.16 | 2.11 | 94.74 |
| 2011(۱۳۹۰) | 20.83 | 5.21 | 74.00 |
| 2016(۱۳۹۵) | 13.7 | 1.4 | 84.9 |
| 2021(۱۴۰۰) | 23.1 | 6.7 | 70.1 |

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

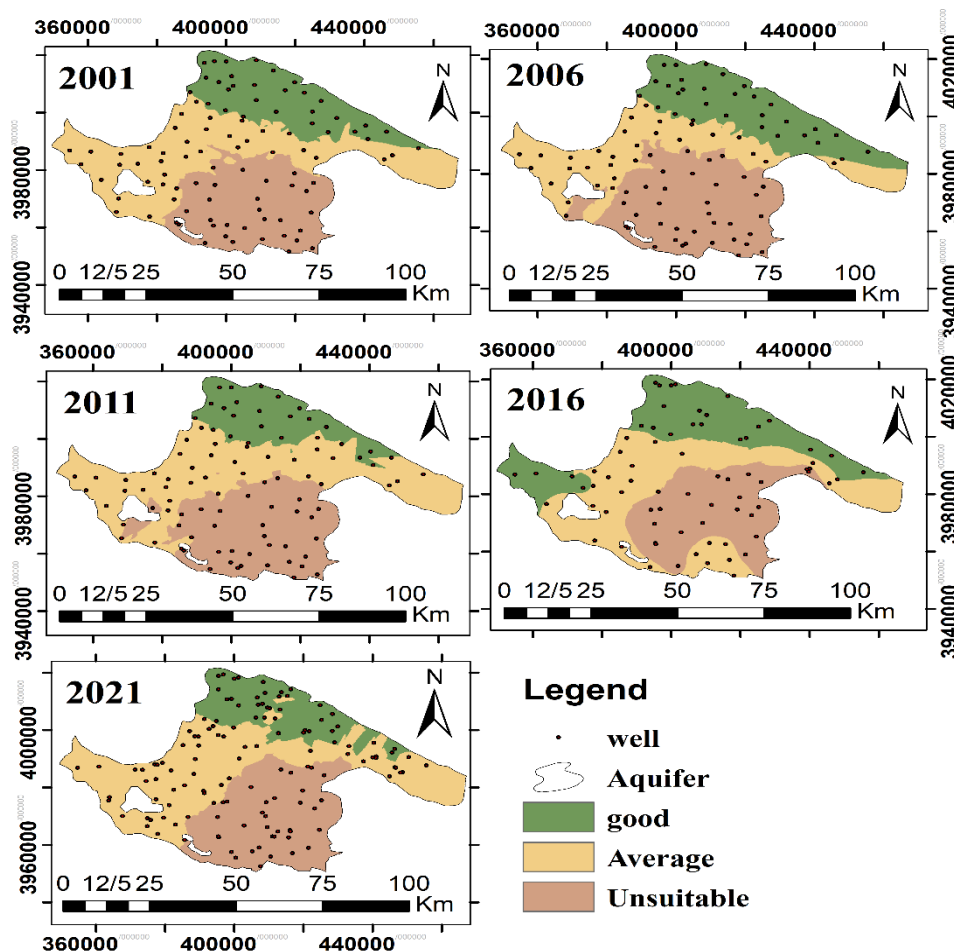
پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۷) نشان داده شده است.

نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین روند تخریب تدریجی و گسترش مکانی را نشان می‌دهند. در سال ۱۳۸۰، مناطق شمالی و شمال شرقی دشت که با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند، کیفیت خوب برای آبیاری داشته‌اند. در سال ۱۳۸۵، مشاهده می‌شود که مساحت مناطق با کیفیت خوب کاهش یافته و مناطق با کیفیت متوسط (رنگ خردلی) به سمت شمال گسترش پیدا کرده‌اند. این روند در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ تشدید شده است و مناطق سبز رنگ به طور محسوسی محدودتر شده‌اند، در حالی که نواحی با کیفیت نامناسب (رنگ قهوه‌ای) در

بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت ثابت مانده یا گسترش یافته‌اند. در نقشه سال ۱۴۰۰، تنها بخش‌های کوچکی از شمال و شمال شرق دشت دارای کیفیت خوب باقی مانده‌اند و غالب سطح آبخوان به مناطق با کیفیت متوسط و نامناسب تبدیل شده است. الگوی مکانی تخریب نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت که احتمالاً با افزایش فعالیت‌های کشاورزی و فشرده‌تر، برداشت بیشتر آب و عوامل زمین‌شناسی و وجود مناطق بایر و شوره‌زار روبه‌رو بوده‌اند همواره وضعیت بدتری داشته‌اند، در حالی که مناطق شمالی به دلیل تغذیه بهتر و فشار کمتر برداشت، کیفیت نسبتاً بهتری را حفظ کرده‌اند. این تغییرات مکانی-زمانی بیانگر ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی متفاوت برای نواحی مختلف دشت و توجه ویژه به حفاظت از مناطق شمالی با کیفیت بهتر و بازسازی و احیای مناطق مرکزی و جنوبی با کیفیت نامناسب است.

Quality classification of agricultural water (Wilcox)



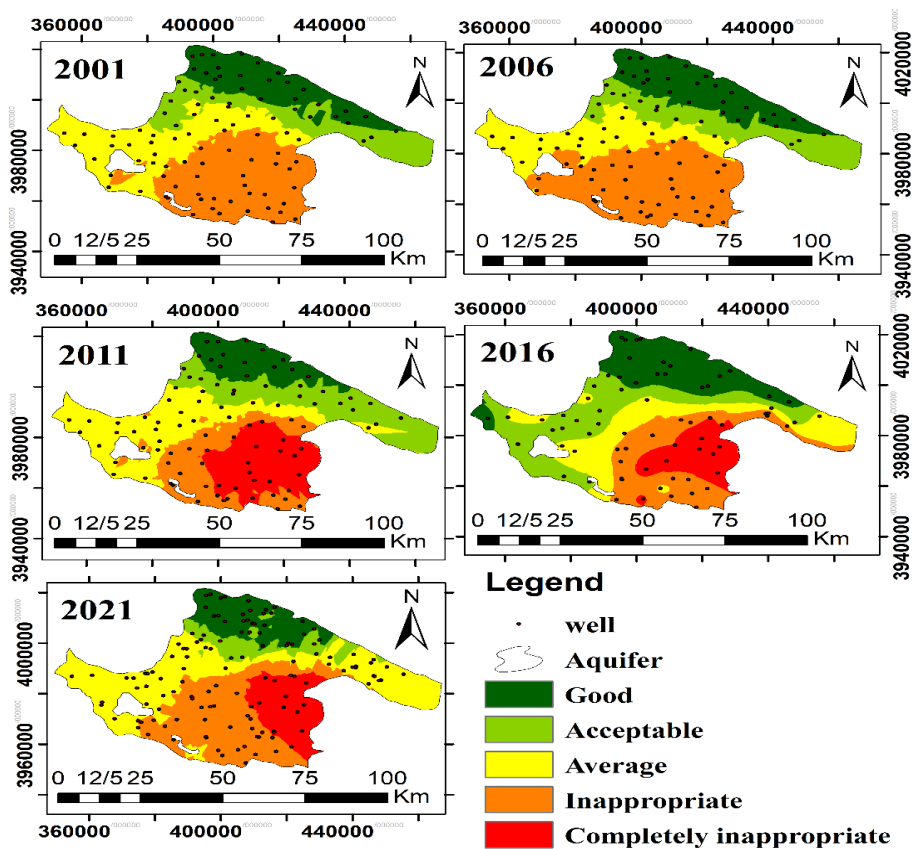
شکل ۷- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Fig. 7- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

جنوب ظاهر شده‌اند و به سرعت گسترش یافته‌اند. در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰، این مناطق قرمز رنگ به طور چشمگیری به سمت مرکز آبخوان پیشروی کرده‌اند و در ۱۴۰۰ تقریباً نیمی از بخش جنوبی و مرکزی را پوشانده و به بزرگ‌ترین مساحت خود رسیده‌اند، در حالی که فقط بخش شمالی کیفیت نسبتاً خوب خود را حفظ کرده است. این روند نزولی شدید احتمالاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی یا ورود آلاینده‌هاست و نیاز فوری به مدیریت و کنترل برداشت را به‌ویژه در بخش جنوبی آبخوان نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی (TDS) از نظر شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۸) نشان داده شده است. نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی (TDS) دشت قزوین روند تخریب شدید و پیشرونده‌ای را آشکار می‌کنند. در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵، بخش شمالی آبخوان دارای کیفیت خوب تا قابل قبول بوده‌است و تنها بخش جنوبی کیفیت نامناسب داشته‌است، اما از سال ۱۳۹۰ به بعد، مناطق یا کیفیت کاملاً نامناسب (قرمز رنگ) در

Quality classification of drinking water (Schuller)



شکل ۸- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس روش شولر

Fig. 8- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of drinking water based on the Schuller method

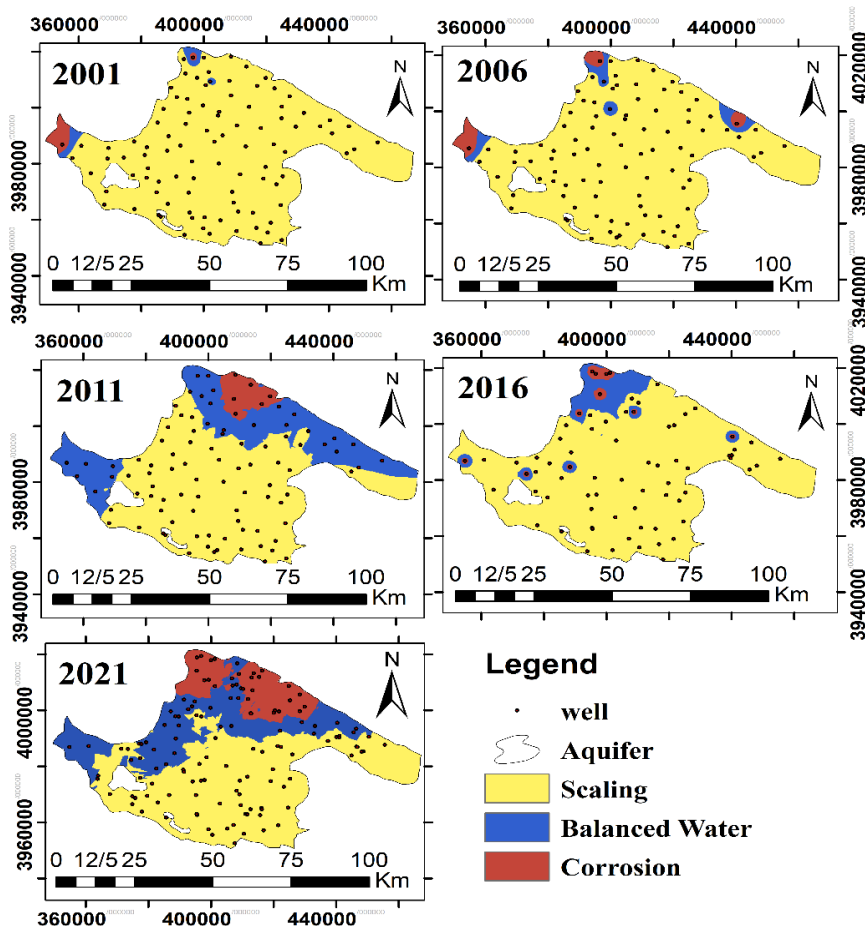
یافته‌اند. این وضعیت هرچند در سال ۱۳۹۵ کمی کاهش یافته اما در سال ۱۴۰۰ به‌طور چشمگیری گسترش پیدا کرده است. وضعیت در سال ۱۴۰۰ بدترین سناریو را نشان می‌دهد، زیرا همزمان هم مناطق رسوب‌گذار (جنوب و شرق) و هم مناطق خورنده (شمال و مرکز) وجود دارند که هر دو برای صنایع مشکل‌ساز هستند. در واقع، رسوب‌گذاری باعث انسداد لوله‌ها و خوردگی باعث تخریب فلزات و تجهیزات می‌شود و نیازمند آن‌اند که پیش از استفاده شدن تصفیه شوند. این تغییرات احتمالاً ناشی از تغییرات pH، دما یا ترکیب شیمیایی آب است و نیاز فوری به بررسی دلایل و مدیریت کیفیت آب برای حفاظت از زیرساخت‌های صنعتی را نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت

تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانتزلیه به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۹) نشان داده شده است.

نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین روند تخریب شدید و نگران‌کننده‌ای را آشکار می‌کنند. در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵، تقریباً کل آبخوان در وضعیت رسوب‌گذاری (زرد رنگ) بوده که پتانسیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در لوله‌ها و تجهیزات صنعتی را داشته است. از سال ۱۳۹۰ تغییر اساسی آغاز شده است و مناطق در وضعیت آب متعادل (آبی رنگ) و وضعیت خوردگی (زرشکی رنگ) در بخش‌های شمالی و غربی گسترش

Quality classification of industrial water (LSI)



شکل ۹- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانژیله

Fig. 9- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

نتیجه‌گیری

دارد، تعداد چاه‌های پایش و پراکنش آن‌ها مناسب است و کیفیت آب زیرزمینی و مشکلات آن در این دشت قابل تامل است. در گام اول پژوهش، داده‌های کیفیت آب زیرزمینی جمع‌آوری گردید و پیش‌پردازش روی داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین صورت گرفت. در گام دوم پژوهش تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از نمودار پاپیر تعیین گردید. در گام سوم پژوهش، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی با توجه طبقه‌بندی ویلکاکس، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ شرب با توجه طبقه‌بندی شولر و طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ صنعت با توجه شاخص لانژیله به‌اجرا در

تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. شناخت ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی برای مدیریت و حفاظت از منابع آب امری ضروری به‌نظر می‌رسد و بنابراین هدف از این تحقیق، طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت و بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت در نظر گرفته شد.

دشت قزوین از آن رو انتخاب شد که یکی از دشتهای مهم کشاورزی است، وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی

بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است. این روند تخریبی، که به ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی دشت شدیدتر است، ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی تفکیک‌شده را از طریق کنترل برداشت، تغییر الگوی کشت و توسعه سیستم‌های زهکشی پیشرفته برای حفاظت از مناطق شمالی با کیفیت نسبتاً بهتر و احیای آبخوان در بخش‌های آسیب‌دیده ضروری می‌سازد.

از نظر آب شرب، در مناطق شمالی آب‌های با کیفیت خوب از ۲۹ تا ۳۹ درصد به ۲۲ تا ۲۴ درصد کاهش یافته است و از سال ۱۳۹۰ مناطق کاملاً نامناسب در جنوب ظاهر شده‌اند که این وضعیت نشان می‌دهد مناطق جنوبی برای مصرف شرب مستقیم نامناسب‌اند و نیازمند تصفیه هستند. از نظر صنعتی، آب متعادل که ایده‌آل‌ترین حالت است، تنها ۱ تا ۶/۷ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد. بیش از ۹۳ درصد آب‌های دشت در دسته‌های خوردگی یا رسوب‌گذاری قرار دارند که هر دو برای صنایع مشکل‌ساز هستند و به ترتیب باعث خوردگی تجهیزات فلزی یا گرفتگی و رسوب در لوله‌ها می‌شوند.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد دشت قزوین با چالش‌های جدی کیفی در منابع آب زیرزمینی خود مواجه است. الگوی مکانی به طور مشخص نشان می‌دهد که آلودگی و تخریب کیفیت از جنوب به شمال در حال پیشروی است و مناطق شمالی کیفیت نسبتاً بهتری دارند اما در معرض خطر تخریب تدریجی هستند. روند کلی در هر سه کاربری (شرب، کشاورزی و صنعت) حاکی از افزایش شوری، سختی و تغییرات شیمیایی نامطلوب است که ناشی از برداشت بی‌رویه، کاهش تغذیه آبخوان، و احتمالاً نفوذ آب‌های شور یا آلوده است. این وضعیت نیازمند راهبردهای فوری و جامع مدیریتی شامل کنترل برداشت، افزایش تغذیه مصنوعی، تصفیه آب‌های برگشتی کشاورزی و جلوگیری از گسترش بیشتر آلودگی به سمت شمال است. بدون اتخاذ تدبیرهای اساسی، پایداری منابع آب زیرزمینی دشت قزوین در آینده نزدیک به شدت تهدید خواهد شد.

آمد. در گام چهارم پژوهش، به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس، پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس روش شولر و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانژلیه تهیه گردید.

بررسی نمودارهای پایپر در پنج دوره زمانی نشان داد که دشت قزوین در دو دهه اخیر (۱۴۰۰-۱۳۸۰) با تخریب شدید کیفیت آب زیرزمینی همراه بوده است. تحول رخساره‌ها از حالت غالب کلسیم-بی‌کربناته در سال ۱۳۸۰ به رخساره‌های مختلط و شور با غلبه سدیم-کلره و سدیم-سولفات در سال ۱۴۰۰، همراه با افزایش چشمگیر پراکندگی و تنوع رخساره‌ها، و کاهش چشمگیر نمونه‌های با کیفیت مناسب همگی هشدارهای جدی برای آینده منطقه هستند. این وضعیت بیانگر وقوع فرآیندهای مخرب شامل برداشت بیش از حد، تبادل یونی و نفوذ املاح است. نتایج به دست آمده هشدار است جدی مبنی بر ضرورت اتخاذ راهبردهای فوری مدیریتی برای جلوگیری از تخریب غیرقابل بازگشت آبخوان، زیرا ادامه روند فعلی می‌تواند منجر به بحران آب و پیامدهای جبران‌ناپذیر اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در منطقه گردد.

بر اساس ارزیابی جامع طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ از سه نظر کشاورزی، شرب و صنعتی، وضعیت منابع آب زیرزمینی روند نگران‌کننده‌ای از تخریب کیفیت را نشان می‌دهد. از نظر توزیع مکانی، یک الگوی مشترک در هر سه کاربری (کشاورزی، شرب و صنعت) مشاهده می‌شود که مناطق شمالی و شمال شرقی دارای بهترین کیفیت‌اند، در حالی که مناطق جنوبی و جنوب شرقی با بدترین کیفیت مواجه هستند و روند تخریب از جنوب به شمال در حال پیشروی است.

از نظر کشاورزی، مناطق با کیفیت خوب از بخش‌های شمالی و شمال شرقی به سمت محدودیت شدید پیش رفته و سهم آب‌های با کیفیت متوسط و نامناسب از ۷۵ درصد به

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سردبیر و دو داور ناشناس به خاطر نظرات و بازخوردهای ارزشمندشان که به طور قابل توجهی کیفیت مقاله را بهبود بخشیده است صمیمانه سپاسگزارند. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای قزوین به خاطر فراهم آوردن داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش، قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور مساوی در تعریف مسأله و نگارش پیش‌نویس اصلی و متن نهایی مشارکت داشتند. ش.آ.ر.، روش‌شناسی، پیشینه تحقیق و گردآوری داده‌ها و تهیه پیش‌نویس نتایج اولیه را انجام داده است. ا.ا. و م.خ. نظارت بر اجرای پروژه و اعتبارسنجی نتایج را انجام داده‌اند. امکانات لازم برای انجام کار توسط م.خ. فراهم شده است. ا.ا. و م.خ. مسئولیت بازبینی نهائی و ویرایش متن را به صورت مشترک انجام داده‌اند. نسخه منتشر شده از مقاله، مورد تأیید هر سه نویسنده است.

منابع

- Abu-Khalaf, N., Khayat, S., & Natsheh, B. (2013). Multivariate Data Analysis to Identify the Groundwater Pollution Sources in Tulkarm Area / Palestine. In *Science and Technology* (Vol. 3, Issue 4, pp. 99–104). <https://doi.org/10.5923/j.scit.20130304.01>
- Amini, H., Ashrafzadeh, A., & Khaledian, M. (2024). Enhancing groundwater salinity estimation through integrated GMDH and geostatistical techniques to minimize Kriging interpolation error. *Earth Science Informatics*, 17(1), 283–297. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01157-7>
- Amiri-Bourkhani, M., Khaledian, M. R., Ashrafzadeh, A., & Shahnazari, A. (2017). The temporal and spatial variations in groundwater salinity in mazandaran plain, Iran, during a long-term period of 26 years. *Geofizika*, 34(1). <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.4>
- Azadeh Ranjbar, S. (2025). *Groundwater Management Framework Based on Artificial Intelligence*. University of Tehran.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- El Bilali, A., Taleb, A., & Brouziyne, Y. (2021). Groundwater quality forecasting using machine learning algorithms for irrigation purposes. *Agricultural Water Management*, 245, 106625. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106625>
- Faraji, Z., Kaviani, A., & Ashrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2), 463–476. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>
- Farnia, E., Ghorbani, K., & Salarijazi, M. (2018). Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in ground water level zoning. *Water and Soil Conservation*, 25(1), 165–182. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12528.2723> (in Persian)
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th ed.). Prentice-Hall, Inc.
- Fotamy, M. J., Kholghi, M., Abdeh, A., & Roostaei, M. (2023). The Performance of the Evidence Weighting in GIS for Determining the Effective Factors on the Land Subsidence in Qazvin Plain. *Iran-Water Resources Research*, 19(3).
- Gökçekuş, H., Kassem, Y., & Rizza, T. (2025). Groundwater quality assessment for irrigation in coastal region (Güzelyurt), Northern Cyprus and importance of empirical model for predicting groundwater

- quality (electric conductivity). *Environmental Earth Sciences*, 84(8), 224. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12190-8>
- Hussein, E. E., Derdour, A., Zerouali, B., Almaliki, A., Wong, Y. J., Ballesta-de los Santos, M., Minh Ngoc, P., Hashim, M. A., & Elbeltagi, A. (2024). Groundwater Quality Assessment and Irrigation Water Quality Index Prediction Using Machine Learning Algorithms. *Water (Switzerland)*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/w16020264>
- Jalali, M., Karami, S., & Marj, A. F. (2016). Geostatistical Evaluation of Spatial Variation Related to Groundwater Quality Database: Case Study for Arak Plain Aquifer, Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6), 707–719. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9506-6>
- Mahmoudpour, H., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2023). Optimal Design of Groundwater Quality Monitoring Network Using Aquifer Vulnerability Map. *Water Resources Management*, 37(2), 797–818. <https://doi.org/10.1007/S11269-022-03404-W>
- Mohammed, M. A. A., Szabó, N. P., Mikita, V., & Szűcs, P. (2025). Tracking the spatiotemporal evolution of groundwater chemistry in the Quaternary aquifer system of Debrecen area, Hungary: integration of classical and unsupervised learning methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(11), 6884–6903. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36175-z>
- Mohammed, M. A., Khleel, N. A., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2023). s40808-022-01638-6.pdf. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2501–2516. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01638-6>
- Pappaka, R. K., Somagouni, S. G., Chinthala, K., & Nakkala, A. B. (2024). Appraisal of groundwater quality for suitability of drinking and irrigation purposes of pandameru river basin, anantapur district, AP, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11827-x>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions of the American Geophysical Union (Trans. American Geophysical Union)*, 25(6), 914–928.
- Piroozfar, P., Alipour, S., Modabberi, S., & Cohen, D. (2018). Hydrogeochemical investigation and water quality assessment in the Sarough watershed, Takab minig district. *Geosciences*, 106(February), 13–28.
- Salari, M. (2024). Investigating groundwater quality using water quality indicators for drinking, agriculture and industry (Case study: Shiraz plain). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(4), 7574–7586. (in Persian)
- Schoeller, H. (1962). *L'eaux souterraines*. Masson.
- Sunkari, E. D., Abu, M., Bayowobie, P. S., & Dokuz, U. E. (2019). Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: Implication for domestic and irrigation purposes. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.002>
- Torkamanitombeki, H., & Khomehchiyan, M. (2025). Investigating the Quality of Surface Water at Hydrometric Stations in the Study Area of Sarni Dam, Minab County, for Various Uses Using Aq.QA Software. *Journal of Environmental Studies*, 50(4), 413–434. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.372054.1008479> (in Persian)
- Wilcox, L. (1955). Classification and use of irrigation waters (No. 969). US Department of Agriculture.

Research Article

**The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions
(Case study: West of Sistan)**

Mansor Jahantigh^{1✉}, Moien Jahantigh²

1. Department of Soil Conservation and Water Management, Sistan Agriculture and edition Natural Resources Research Center (AREEO) Zabol, Iran.
2. Department of Soil Conservation and Water Management, Sistan Agriculture and edition Natural Resources Research Center (AREEO) Zabol, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** mjahantigh2000@yahoo.com)

ARTICLE INFO

Received: 21 September 2025

Revised: 3 November 2025

Accepted: 3 December 2025

Available Online: 10 February 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jahantigh, M., & Jahantogh, M (2026). The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions (Case study: West of Sistan). V.26, No.100, P: 56-74

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370760.1631>

Extended Abstract

Introduction

Currently, water shortage is one of the challenges that has affected many regions, especially arid areas, due to population growth and irrational and unscientific use of water. So that excessive use of water from wells, the groundwater level has been lowered significantly, resulting in a decrease in the water flow of aqueducts and wells, and even the loss of some of these water resources. In order to solve the problem of water scarcity for various purposes such as providing agricultural water resources, permeability water into the groundwater table, increasing the vegetation cover, improving the environment, etc., earthen dams have been constructed in some susceptible areas, including arid regions. However, sedimentation in the reservoirs of these structures and subsequent disruption of the rate of infiltration into the ground is one of the problems that the construction of such dams brings. On the other hand, the factors that disrupt the infiltration of water into the groundwater table are sedimentation in the reservoirs of these earthen dams, which in some places turn into evaporation ponds due to the accumulation of sediment inside their reservoirs. Sedimentation of materials inside dam reservoirs is the result of sedimentation of materials carried by tributaries and reduces their permeability capacity. The intensity of this sedimentation process depends on the roughness of the watershed, its use, soil types, and the intensity and duration of rainfall. The type and location of the reservoir, as well as the hydrological regime of the river, also play an important role in this regard. So that their capacity may be reduced by up to 80 percent and cause the reservoir to lose its water storage function. In addition to the fact that these sediments play an effective role in reducing the volume of reservoirs, another important aspect is their pollution. The chemical composition of the sediments depends on the type of soils in the watershed, their agricultural use, and also the type of industry in the region. Considering that Sistan is one of the regions facing a water crisis and that numerous earthen dams have been constructed in its western highlands, there is a need to investigate the performance of these structures regarding their permeability status with the witness area so that, if necessary, reforms can be made for their optimal exploitation. Therefore, this research was conducted in the reservoirs of dams constructed in the western highlands of Sistan.

Methodology

To carry out this experiment, five earthen dams in the region, which were constructed in the 1970s, were selected and the amount of aging infiltration from the reservoir of these constructed dams and the control area was measured at different depths based on the standard *double* cylinder method at different times. By sampling the soil of the studied treatments, the physical properties of the soil samples were also determined.

Results and Discussion

The results showed that the infiltration rate in the control area was on average 1.2 times higher than the reservoir of the constructed dams, which showed a significant difference at the one percent level. In addition, the cumulative infiltration of the control area was also higher than that of the dam reservoirs and was statistically significant at the 5% level ($p \leq 0.05$). In examining the effect of accumulated sediments on soil particle size distribution, the findings showed that the percentage of clay, silt, and sand in the soil of earthen dam reservoirs had a significant difference compared to the control area at sampling depths ($p \leq 0.05$). The percentage of clay and silt increased by 14.2 and 3.2 times, respectively, compared to the control area, which consequently caused a change in soil texture from sandy class (control area) to clay loam in the earthen dam reservoir. Changes in the weighted average diameter (MWD) index in the studied treatments also indicated an 18-fold decrease in this index in the earthen dam reservoir compared to the control area. The results of multiple regression analysis to determine the most important factors affecting soil permeability also indicated that the percentage of sand accounted for 96% of the changes in soil permeability in the studied treatments.

Conclusions

The construction of an earthen dam increases the recharge of underground aquifers, which has a favorable effect on the water supply of wells and aqueducts, which in turn plays an effective role in increasing employment generation, improving the living conditions of watershed residents, and reducing their socio-economic problems. However, due to the lack of proper management of the sediments accumulated in the reservoirs of these dams, after several floods entered the reservoirs of these dams, their permeability has decreased significantly, and after a few years of water withdrawal, their reservoirs have become evaporation ponds, and a large part of the water entering these reservoirs evaporates and becomes unavailable without being used. The results of this study also showed that with the accumulation of sediments resulting from the entry of floods into these areas and the change in the physical properties and stability indices of soil aggregates, the permeability of these areas has decreased significantly. In addition, with the accumulation of sediments in the reservoirs of dams and their rising levels, their overflows are easily destroyed, which has led to the intensification of water erosion in the studied areas.

Keywords: Artificial infiltration, Flood, Sediment, Soil physical properties, Water penetration into the soil.

Acknowledgement

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

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article .Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

Authors have read and agreed to the published version of the manuscript. Authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

نوع مقاله: پژوهشی

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک (مطالعه موردی: غرب سیستان)

منصور جهان تیغ^۱✉، معین جهان تیغ^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری خاک بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل سن بند (۱۸ و ۲۲ سال بعد از ساخت)، عمق برداشت (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) و سطوح برداشت (پای بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) بودند. با استفاده از روش استوانه مضاعف میزان نفوذپذیری و با نمونه‌برداری از عمق‌های خاک برخی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های برداشتی در تیمارهای مورد مطالعه و منطقه شاهد تعیین شد. نتایج تحقیق نشان داد که میزان سرعت نفوذ در عمق‌های مختلف برداشت رسوب اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد و کمترین و بیشترین میزان نفوذپذیری به ترتیب مربوط به افق سطحی و عمق ۳۰ سانتی‌متری رسوبات برداشت شده است (به ترتیب ۱/۵۲ و ۲/۳۴ سانتی‌متر بر ساعت). در بررسی اثر رسوبات تجمع یافته بر توزیع اندازه ذرات خاک، یافته‌ها نشان داد که درصد رس، سیلت و شن در خاک مخازن بندهای خاکی تفاوت معنی‌داری نسبت به منطقه شاهد در عمق‌های نمونه‌برداری دارد، به طوری که درصد رس و سیلت به ترتیب ۱۴/۲ و ۳/۲ برابر نسبت به منطقه شاهد افزایش یافته است که به تبع آن باعث تغییر بافت خاک از کلاس شنی (منطقه شاهد) به لومی رسی در مخزن بندهای خاکی شده است. تغییرات شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در تیمارهای مورد مطالعه نیز بیانگر کاهش محسوس این شاخص در مخازن بندهای خاکی نسبت به منطقه شاهد بود. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون چندگانه به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک نیز بیانگر آن است که مقادیر شن ۹۶ درصد تغییرات نفوذپذیری خاک را در تیمارهای مورد مطالعه توجیه می‌کند. بر اساس نتایج این تحقیق، تجمع رسوبات در مخازن بندهای احداثی با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شاخص پایداری خاکدانه باعث کاهش نفوذپذیری خاک این مخازن شده است که بهره‌برداری از این رسوبات ضمن افزایش کارایی این بندهای خاکی بستری مناسب برای اصلاح زمین‌های سنگلاخی و سنگریزه‌ای پایین دست فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تغذیه مصنوعی، رسوب، سیلاب، نفوذ آب در خاک، ویژگی‌های فیزیکی خاک

مقدمه

بهره‌برداری از سیلاب‌های فصلی به عنوان منبع مهم آب سطحی بسیار مهم است. از این‌رو برای کنترل این سیلاب‌ها راهکارهای سازه‌ای مانند احداث بندهای خاکی به دلیل صرفه اقتصادی و نیز قابلیت مدیریت رواناب‌های فصلی به‌منظور ذخیره و تغذیه آبخوان‌ها همواره در مناطق خشک به‌کار گرفته شده است. این سازه‌های هیدرولوژیکی که با هدف کنترل

کمبود آب و خشکسالی‌های متوالی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در مناطق خشک است که با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت منابع آبی، سبب تشدید بحران کم‌آبی در این مناطق شده است (Jahantigh & Jahantigh, 2024). با وجود محدودیت منابع آبی در مناطق خشک،

^۱ دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل. (نویسنده مسئول: Email: mjahantigh2000@yahoo.com)

^۲ استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل.

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک

همکاران (Samadi-Boroujeni *et al.*, 2012) با بررسی ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مخزن سد دز نشان دادند که رسوبات تجمع یافته عمدتاً متراکم و از نظر دانه‌بندی به‌طور میانگین شامل ۳۶ درصد رس، ۵۷ درصد سیلت، ۶ درصد ماسه و ۱ درصد شن و جرم مخصوص ظاهری آنها نیز برابر با ۱/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. بالاس و همکاران (Ballas *et al.*, 2018) در پژوهشی با هدف بررسی خواص تکنیکی رسوبات مخازن بندهای سنگی و بتنی در تانزانیا دریافتند که رسوبات انباشت شده به‌طور عمده شامل ذرات ریزدانه و متراکم هستند که نسبت به رسوبات منطقه شاهد وزن مخصوص بالایی دارند و به دلیل چسبندگی ذرات ریزدانه و کاهش خلل و فرج، نفوذپذیری آنها اندک است. نتایج مطالعات کوز و همکاران (Kos' *et al.*, 2021) در بررسی عملکرد مخازن بندها در لهستان بیانگر آن است که تجمع رسوبات ریزدانه توسط جریان‌های سیلابی ضمن کاهش ظرفیت ذخیره مخزن باعث تشکیل لایه‌ای متراکم در لایه سطحی خاک و کاهش میزان نفوذپذیری خاک شد. آسیایی و همکاران (Asiaei *et al.*, 2021) در بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد لتیان با آزمایش‌های متداوم مکانیک خاک از جمله دانه‌بندی، پایداری خاکدانه، وزن مخصوص و سه محوری برای تعیین پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک گزارش می‌دهد که بیش از ۸۹ درصد رسوبات در مخزن سد شامل رس و سیلت است و جرم مخصوص ظاهری خشک این رسوبات برابر با ۱/۱۲۸ گرم بر مترمکعب و مقادیر چسبندگی این رسوبات حدود ۲ برابر بیشتر از مقادیر چسبندگی خاک منطقه شاهد است. از آنجا که رواناب‌های فصلی دارای بار رسوبی بالایی هستند تجمع آنها در مخازن بندهای خاکی و حوضچه‌های تغذیه‌ای سبب بسته شدن خلل و فرج خاک و در نهایت کاهش شدید نفوذ آب در خاک می‌شود. در این خصوص نتایج مطالعات بیات و بصیرپور (Bayat & basir-por, 2009) در بررسی تأثیر مواد رسوبی در تقلیل نفوذپذیری حوضچه‌ها و مخازن طرح‌های تغذیه مصنوعی شهرستان اصفهان با اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری در عمق‌های مختلف رسوبات نشان می‌دهد در یک دوره ۱۰ تا ۱۵ ساله تجمع رسوبات باعث مسدود شدن خلل و فرج خاک و در نتیجه

و ذخیره سیلاب‌های فصلی و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها کاربرد دارد نقش بسزایی در حفاظت آب و خاک و احیای پوشش گیاهی در مناطق خشک دارد (Zhang Sojka *et al.*, 2013; Augustyniak *et al.*, 2020; *et al.*, 2020; عملکرد بندهای خاکی با تحت تأثیر قرار دادن سرعت و ظرفیت حمل رسوبات در جریان‌های رودخانه‌ای، باعث ترسیب حجم قابل توجهی از رسوبات در مخزن این بندها و در نتیجه کاهش حجم ذخیره آنها می‌شود (Madeyski *et al.*, 2008; Polski, 2006; Ballas *et al.*, 2018). از این رو، یکی از بارزترین دغدغه‌های موجود در زمینه مدیریت و نگهداری این بندهای خاکی رسوبگذاری و کاهش حجم مخازن این سازه‌های آبی است که تخصیص آب را برای موارد گوناگونی مانند کشاورزی، شرب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی با چالش‌های متعدد همراه می‌کند (Soleimani & Khani, 2019). ترسیب در مخازن بندها نتیجه فرسایش لایه سطحی خاک در مناطق بالا دست است که مواد رسوبی بر اثر جریان‌های رودخانه‌ای به پایین دست انتقال می‌یابد. به‌طور کلی میزان رسوبدهی در مناطق بالا دست به سطح ناهمواری حوضه آبخیز، کاربری اراضی، نوع خاک و شدت و مدت بارندگی بستگی دارد (Kos' *et al.*, 2021). این موضوع با توجه به کاهش پوشش گیاهی و خاک مستعد به فرسایش در مناطق خشک باعث افزایش میزان رسوبدهی می‌شود که ضرورت مدیریت و نگهداری این بندهای خاکی در این مناطق را دوچندان می‌کند. علاوه بر آن، سن و موقعیت مکانی بندهای خاکی و تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ای نیز بر میزان رسوبگذاری و کارایی این بندهای خاکی بسیار تأثیر می‌گذارد، به‌طوری‌که تأثیر توأم این عوامل ممکن است تا ۸۰ درصد عملکرد این بندها را برای ذخیره‌کردن و تغذیه آبخوان‌ها کاهش دهد (Batuca *et al.*, 2000). از جمله محدودیت‌هایی احداث بندهای خاکی، ترسیب حجم قابل توجهی از رسوبات در مخازن این بندها است که باعث کاهش میزان نفوذ آب، تبخیر آب و خروج از دسترس این منابع آبی مهم در مناطق خشک می‌شود.

در بررسی ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مخازن بندهای ذخیره و تغذیه‌ای آبخوان مطالعات متعددی صورت گرفته است که به برخی پژوهش‌ها در این زمینه اشاره می‌شود. بروجنی و

کاهش ۴۰ تا ۸۰ درصد از میزان نفوذپذیری مخازن حوضچه‌های احداثی شده است. در پژوهشی دیگر، سلیمی و همکاران (Salimi et al., 2014) تغییرات میزان نفوذپذیری بستر حوضچه‌های تغذیه را در حوضه آبخیز معین‌آباد شهرستان فسا بررسی کردند و نشان دادند که به دلیل ورود رسوبات در حد ماسه ریز و رس به مخازن این حوضچه‌ها، بعد از گذشت حدود یک دهه میزان نفوذپذیری این مخازن ۵۰ درصد کاهش یافته است که چنین وضعیتی نقش مؤثری در کاهش تغذیه آب به سفره‌های زیرزمینی و در مقابل تشدید فرسایش خاک شده است. خیر اندیش و همکاران (Khayrandish et al., 2015) در بررسی بندهای احداثی در دم‌تنگ داراب با نمونه‌برداری از مواد رسوبی در عمق‌های مختلف و تعیین اندازه ذرات دریافتند که رسوبات مخزن این بندها در مقایسه با مناطق حاشیه آبراهه بافت ریزدانه و متراکم دارد که با گذشت زمان باعث کاهش ۵۰ درصد از میزان نفوذپذیری این مخازن شده است. نتایج مطالعات ماستی و همکاران (Masetti et al., 2016) در بررسی تاثیر بار رسوبی سیلاب‌های فصلی روی حوضچه‌های تغذیه‌ای در لیون فرانسه نشان داد که در صورت نفوذ نیافتن بار معلق سیلاب به پروفیل خاک، میزان نفوذ در حوضچه تغذیه بیش از ۵ برابر میزان نفوذ به صورت طبیعی است. این محققان تغذیه در حالت طبیعی حوضچه‌های مورد مطالعه را در حدود ۱ متر بر ساعت گزارش داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri et al., 2019) در بررسی تغییرات سرعت نفوذ در حوضچه‌های تغذیه‌ای در شهریار استان تهران با استفاده از روش استوانه مضاعف در عمق‌های مختلف برداشت رسوب دریافتند که میانگین نفوذپذیری در عرصه‌های مجاور مخزن تغذیه مصنوعی در حدود ۲۹/۵ و ۳۰/۲ سانتی‌متر بر ساعت متغیر است در حالی که با تجمع رسوبات در مخازن حوضچه‌های تغذیه‌ای به ۵/۷ تا ۱۸/۶ سانتی‌متر بر ساعت کاهش یافته است. آنان همچنین عمق برداشت رسوبات تا ۲۰ سانتی‌متر را به‌طور معنی‌دار باعث افزایش میزان نفوذپذیری آب در خاک گزارش داده‌اند. بررسی منابع گویای این موضوع است که رسوبات تجمع یافته در مخازن بندهای احداثی با تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک نقش مؤثری بر کاهش میزان نفوذپذیری آب در خاک دارد که توجه به این آن به منظور

مدیریت بندهای احداثی برای بهره‌برداری از رواناب‌های فصلی در مناطق خشک بسیار اهمیت دارد.

منطقه سیستان از جمله مناطق خشک و بحرانی کشور به‌شمار می‌رود که طی خشکسالی‌های اخیر و از طرفی محدود بودن منابع آبی در این منطقه با بحران بی‌آبی شدید همراه بوده است. با توجه به احداث بندهای خاکی متعدد در مسیر رودخانه‌های اصلی در غرب منطقه سیستان، رسوبات سیلابی در مخازن این بندها باعث کاهش میزان نفوذپذیری آب در خاک شده است و اینکه آیا این کاهش نفوذ مشکل ساز بوده است یا نه پرسشی است که این پژوهش درصدد پاسخ دادن به آن است. از این رو هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر رسوبات بر ویژگی‌های خاک و تغییرات نفوذپذیری آن در مخزن بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان است.

مواد و روش‌ها

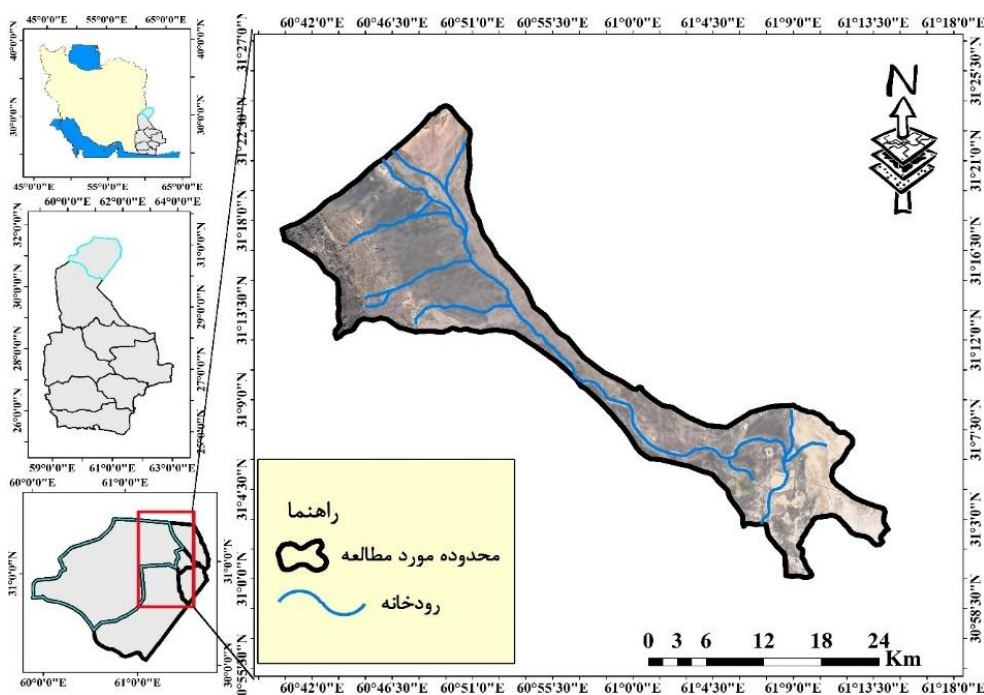
محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در شمال استان سیستان و بلوچستان و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری غرب شهرستان زابل و حدود ۱۰ کیلومتری جنوب بندان از توابع خراسان جنوبی با مختصات جغرافیایی ۶۰ درجه، ۴۵ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱۳ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۱ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی و در ارتفاع حدود ۹۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد شکل (۱). از لحاظ اقلیمی، این محدوده گرم و خشک است. میانگین بارندگی سالانه این منطقه حدود ۶۰ میلی‌متر ولی در ارتفاعات به ۸۰ میلی‌متر می‌رسد که بخش عمده آن در فصل زمستان باریده می‌شود. میانگین دمای سالانه منطقه ۱۸ درجه سانتی‌گراد است که در فصل تابستان بیشینه آن به ۴۸ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. این ناحیه به دلیل بالابودن دما و از طرفی وزش بادهای شدید در تابستان، تبخیر و تعرق بالایی نیز دارد، به‌طوری‌که متوسط سالانه آن حدود ۵ متر است که بخش عمده‌ای از آن در ماه‌های بحرانی (خرداد، تیر و مرداد) سال اتفاق می‌افتد. رطوبت نسبی این منطقه کم است و متوسط سالانه آن به حدود ۲۸ درصد می‌رسد. از مهم‌ترین ویژگی‌های آب و هوایی این منطقه وزش باد است که به بادهای ۱۲۰ روزه

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک

لایه‌هایی از آهک ماسه‌دار تشکیل می‌دهد که در برخی از مکان‌ها فسیل‌های با سن ژوراسیک نیز نمایان است. در این منطقه، نهشته‌های کواترنری شامل طبقات مارنی-گچی و آبرفت‌های قدیمی و جوان نیز دیده می‌شود (Safari *et al.*, 2021).

سیستان معروف است و از اواسط خرداد ماه شروع می‌شود و تا اوایل مهرماه ادامه دارد. پوشش گیاهی این منطقه را گز، تاغ، خارشتر ارمک، نی، اسپند و تعداد محدودی دیگر گیاهان نواحی خشک تشکیل می‌دهد. از لحاظ زمین‌شناسی قدیمی‌ترین واحد شناخته شده در منطقه را ترکیبی از مارن‌های صورتی تا زرد رنگ، باشیل‌های خاکستری تیره و ماسه سنگ همراه با میان



شکل ۱- موقعیت محل پژوهش در منطقه سیستان، استان و کشور

Fig. 1- Geographical location of the research site in province and in the country

دیواره بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد طول رسوب بند در سه عمق سطح رسوب (صفر)، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر از رسوب سطحی) تا نقاط نمونه‌برداری بیانگر شرایط نفوذپذیری کل مخزن بند خاکی باشد. برای تعیین شرایط طبیعی نفوذ در هریک از بندهای احداثی دو منطقه شاهد در مجاور مخزن بند اصلاحی انتخاب شد که به لحاظ بافت خاک و ساختار زمین‌شناسی دارای شرایط یکسانی بودند. تیمارهای مورد مطالعه شامل سن بند (۱۸ و ۲۲ سال ساخت)، عمق برداشت (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) و سطوح برداشت (پای بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) است که به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار اجرا شد. برای اندازه‌گیری میزان نفوذ و سرعت نفوذ، از استوانه مضاعف به قطر ۳۰ و ۶۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر

روش پژوهش

برای اجرای این پژوهش در ابتدا با بررسی نقشه موقعیت مکانی بندهای احداثی در منطقه سیستان پنج بند خاکی انتخاب و از این بندها بازدید شد. سن بندهای خاکی مورد مطالعه ۱۸ (۳ بند خاکی) و ۲۲ (۲ بند خاکی) سال است که روی رودخانه‌های اصلی احداث شده است. برای نمونه‌برداری از مخزن بندهای خاکی، با توجه به متفاوت بودن توزیع اندازه ذرات رسوبی در مخزن بندهای احداثی که نقش موثری بر میزان نفوذپذیری خاک دارد، مطابق با مطالعات برخی از محققان مانند جعفری و همکاران (Jafari *et al.*, 2024) و شمس-ناطری و همکاران (Shams-Nateri *et al.*, 2019) طول مخازن بندهای اصلاحی به چهار بخش تقسیم شد (پای

و فلز با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. تمام مراحل اندازه‌گیری میزان نفوذ بر اساس نشریه شماره ۲۴۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۰) با عنوان "استاندارد دستورات عمل اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در خاک با روش استوانه مضاعف" صورت گرفت. برای شروع کار، ابتدا حلقه کوچک ۱۵-۱۰ سانتی‌متر با ضربات چکش داخل خاک فرو برده شد و حلقه بزرگ‌تر به‌صورت متحدالمرکز و فواصل بین آنها ۱۵ سانتی‌متر در داخل زمین تعبیه شد. در ادامه با استفاده از اشل مدرج ارتفاع آب در فواصل بین حلقه‌ها در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه و تا زمان ثابت شدن سرعت نفوذ آب اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری سطحی خاک بر اساس جدول (۱) طبقه‌بندی شد. به‌منظور تعیین بافت خاک نیز با نمونه‌برداری از رسوب تجمع یافته در مخزن بند و منطقه شاهد بافت خاک بر اساس روش هیدرومتری و الک استفاده شد. علاوه بر بافت خاک، پایداری خاکدانه نیز به عنوان یکی از شاخص‌های فیزیکی خاک نقش موثری بر خلل و فرج و میزان نفوذپذیری آب در خاک دارد (Saadat et al., 2019). از این رو در این تحقیق برای بررسی پایداری خاکدانه‌های رسوبات در مخزن بندهای خاکی از

شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) براساس معادله ۱ استفاده شد.

$$MWD = \sum_i^n \binom{n}{k} X_i W_i \quad (1)$$

در این معادله: MWD = میانگین وزنی قطر ذرات خاک (mm)، X_i = متوسط قطر خاکدانه‌ها باقی‌مانده بر روی هر الک i (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی)، W_i = مقدار نسبی خاکدانه‌های با قطر X_i و n = تعداد الک‌ها و نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک مورد استفاده است. در ادامه؛ برای تعیین وزن مخصوص ظاهری از روش کلوخه و برای تعیین درصد رطوبت اشباع خاک با اندازه‌گیری اختلاف وزن گل اشباع و گل خشک شده در آون بر اساس معادله (۲) استفاده شد.

$$SP = (W_{moist} - W_{dry} / W_{dry}) \times 100 \quad (2)$$

داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ تجزیه و تحلیل شدند. بدین منظور با بررسی نرمال بودن داده‌ها برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. به‌منظور بررسی مؤثرترین متغیرهای فیزیکی خاک بر میزان نفوذپذیری خاک از رگرسیون چندگانه استفاده شد (Pichand, 2017; Vahabzadeh Kebria et al., 2016).

جدول ۱- طبقه‌بندی نفوذپذیری سطحی خاک

Table 1- Classification of soil surface permeability

| طبقه سرعت نفوذ Penetration rate class | سرعت نفوذ (سانتی‌متر در ساعت) Penetration speed (cm/h) |
|--|---|
| خیلی سریع Very fast | More than 25.4 |
| سریع Fast | 25.4-12.7 |
| کمی سریع A little fast | 12.7-6.33 |
| متوسط Average | 6.33-2 |
| کمی آهسته A little slow | 2-0.5 |
| آهسته Slow | 0.5-0.127 |
| خیلی آهسته Very slow | Less than 0.127 |

شمس - ناطری و همکاران، ۱۳۹۸

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی خاک

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول (۲) ارائه شده است. توزیع اندازه ذرات در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر بیانگر تغییرات محسوس مقادیر درصد شن، سیلت و رس در تیمارهای مورد مطالعه است که به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) را در سطح پنج درصد نشان می‌دهد. در بررسی تغییرات درصد سیلت و رس، یافته‌ها گویایی این موضوع است که بیشترین درصد این متغیرها مربوط به مخزن بندهای خاکی است که به‌طور محسوس بیشتر است تا در منطقه شاهد. با توجه به نتایج، توزیع اندازه ذرات در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز مشابه لایه سطحی تغییرات محسوسی را نشان داد و ذرات سیلت و رس در مخازن بندهای خاکی به‌طور معنی‌دار بیشتر بود تا در منطقه شاهد. با توجه به منحنی دانه‌بندی نمونه‌های برداشتی دامنه تغییرات اندازه ذرات در منطقه شاهد در محدوده ۱/۶۸ تا ۰/۰۳۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد درحالی‌که اندازه ذرات در بندهای خاکی در محدوده ۰/۰۷۴ تا ۰/۰۳۲ میلی‌متر متغیر بود. با تعیین بافت خاک نمونه‌های برداشتی، یافته‌ها نشان داد که بافت خاک در منطقه شاهد به‌طور عمده در کلاس شنی-لومی و شنی طبقه‌بندی می‌شود درحالی‌که بافت خاک در مخزن بندهای احداثی در کلاس لومی-رسی تا رسی قرار دارد (شکل ۲). محمودآبادی و مظاهری (Mazaheri, 2012) & Mahmoodabadi می‌گویند تفاوت در اندازه ذرات با تغییر در دانه‌بندی پروفیل خاک ضمن تغییر بافت خاک میزان رطوبت اولیه و رطوبت اشباع خاک در اعماق مختلف را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به نتایج مقایسه تغییرات رطوبت اشباع خاک و رطوبت اولیه در عمق‌های مختلف مخزن بندهای احداثی نیز متفاوت و به لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) است به‌طوری‌که افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی باعث افزایش ۲ برابری رطوبت اولیه نسبت به منطقه شاهد در لایه سطحی و زیرسطحی شده است. این شرایط بنا به نظر غجه پور و همکاران (Ghojehpour et al., 2020) باعث کاهش اندازه خلل و فرج خاک و وزن مخصوص ظاهری می‌شود که با تغییر شرایط هیدرولیکی خاک

میزان نفوذپذیری خاک را تقلیل می‌دهد. از طرفی، با افزایش درصد شن و وزن مخصوص میزان منافذ و خلل فرج نیز افزایش می‌یابد که به‌طور مستقیم باعث افزایش میزان نفوذپذیری خاک می‌شود. در بررسی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) نتایج بررسی‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) در توزیع اندازه ذرات خاکدانه‌ها در مخزن بندهای احداثی و منطقه شاهد وجود دارد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر برابر با ۱/۲۱ و ۰/۰۳۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که به ترتیب مربوط به منطقه شاهد و مخزن بندهای خاکی بود (شکل ۳). مقایسه تغییرات این شاخص در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز بیانگر تفاوت معنی‌دار این شاخص در تیمارهای مورد مطالعه بوده است. براساس نتایج به دست آمده، افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی ضمن تغییر بافت خاک باعث کاهش اندازه خلل و فرج خاک شده است. نتایج به دست آمده با یافته‌های تافته و همکاران (Taftah et al., 2020)، گاکوماتوس و همکاران (Giakoumatos et al., 2025) و هیل و بچم (Hill & Beecham, 2018) مبنی بر تأثیر توزیع اندازه ذرات خاکدانه‌ها بر میزان نفوذپذیری خاک همخوانی دارد.

بررسی نفوذپذیری مخزن بندهای خاکی

اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری خاک سطحی در قرائت‌های زمانی مختلف نشان داد که میانگین سرعت نفوذ در پای دیواره بندهای خاکی برابر با ۱/۹۶ سانتی‌متر در ساعت است که براساس طبقه‌بندی صورت گرفته در کلاس نفوذپذیری کمی آهسته قرار دارد (شکل ۴) و جدول (۳). متوسط نفوذ تجمعی پای دیواره بندهای مورد مطالعه در مدت زمان آزمایش (۲۱۳ دقیقه) برابر با ۱۰/۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. با بررسی تغییرات نفوذپذیری خاک در سطوح مکانی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد مخزن بندهای خاکی نتایج بیانگر آن است که میزان نفوذپذیری در این سطوح مکانی در کلاس نفوذپذیری کمی آهسته قرار دارد. درحالی‌که نفوذپذیری خاک در منطقه شاهد در کلاس نفوذپذیری متوسط قرار دارد و میانگین سرعت نفوذ و میزان نفوذ تجمعی خاک سطحی در این منطقه به

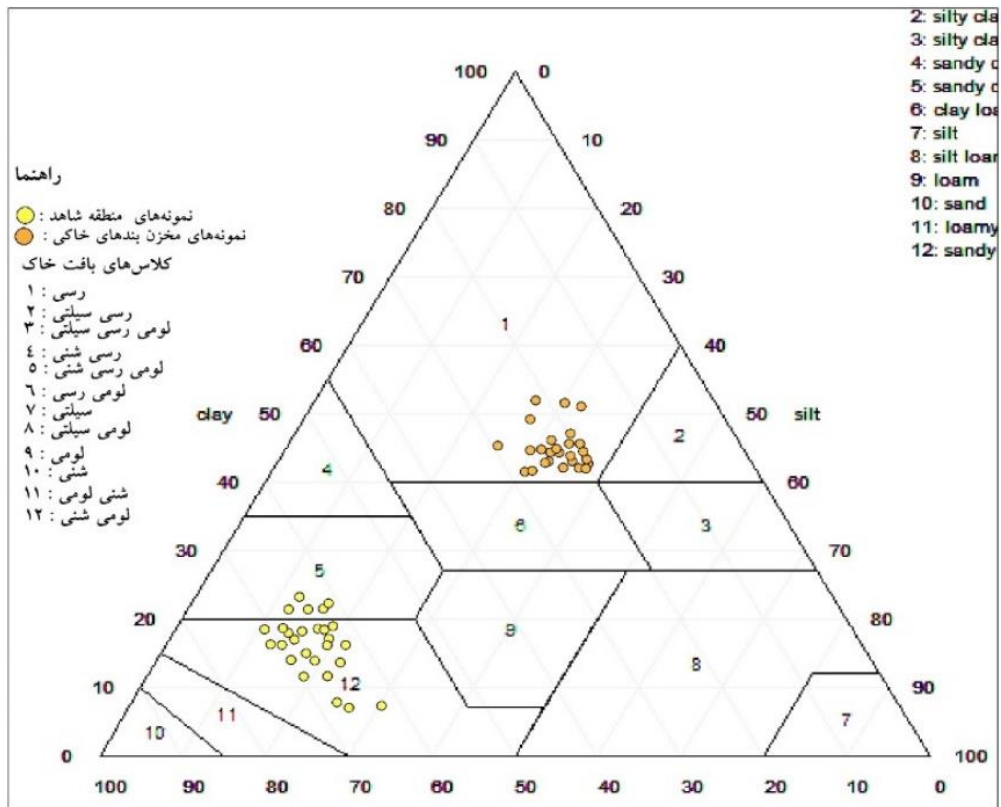
ترتیب ۱/۳ و ۱/۶ برابر بیشتر است تا در مخزن بندهای خاکی مورد مطالعه. با ترسیم منحنی نفوذ پایه برای بندهای مورد مطالعه شکل (۵ و ۶) نتایج بیانگر آن است که میزان نفوذپذیری خاک با شروع آزمایش روند صعودی و با گذشت اندک زمان روند نزولی داشته است. در مطالعات محمود آبادی و مظاهری (Mahmoodabadi & Mazaheri, 2012) این روند به دلیل ورود آب به ترکی‌های سطحی موجود در رسوبات و پرشدن منافذ و همچنین نفوذ آب به لایه‌های زیرسطحی گزارش شده است. علیزاده (Alizadeh, 2005) بر اهمیت ایجاد پتانسیل ماتریک قوی بین ذرات ریزدانه در خاک‌های سنگین تاکید کرده است که با توجه به بافت ریزدانه (کلاس لومی-رسی تا رسی) در مخزن بندهای خاکی توجه به این موضوع بر افزایش شدت نفوذ خاک با اهمیت است. در مطالعات پیشرو و همکاران (Razzaghi & Pishro *et al.*, 2021)، رزاقی و رضایی (Rezaie, 2017) و محمودی آبادی و مظاهری (Mahmoodabadi & Mazaheri, 2012) می‌گویند رفتار هیدرولیکی خاک متأثر از تغییر اندازه ذرات در لایه‌های مختلف است که به‌طور مستقیم میزان نفوذپذیری خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج به دست آمده از این تحقیق با گفته‌های این محققان همخوانی دارد.

جدول ۲- مقایسه میانگین (اشتباه معیار ± میانگین) برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در تیمارهای مورد مطالعه

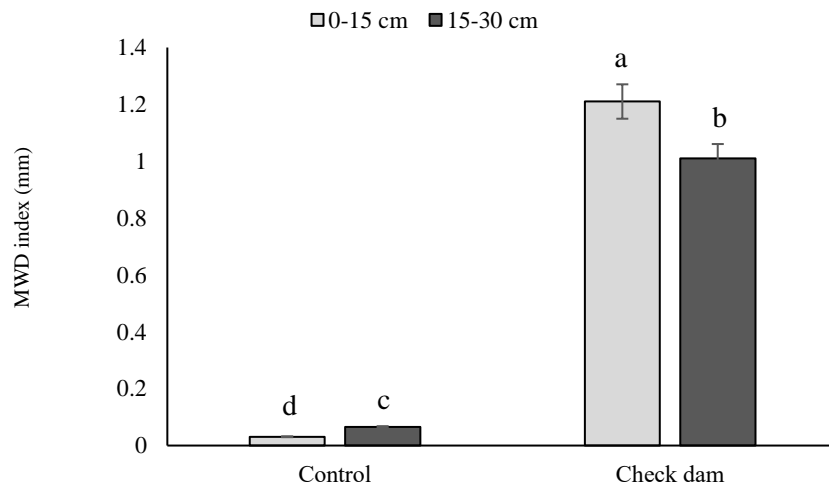
Table 2 - Comparison of the mean (standard error ± mean) of some soil physical properties in the studied treatments

| معنی‌داری | مقدار F | منطقه شاهد | مخزن بند خاکی | محل برداشت | متغیر در عمق‌های مختلف (cm) |
|-------------------|---------|---------------------------|----------------------------|--|--|
| Significant level | F value | Witness area | Dam reservoir | collection site | Variable at different depths (cm) |
| 0.000 | 59.91 | 80.1 (1.2±) ^a | 12.1 (± 1.2) ^d | عمق ۰-۱۵ Depth 0-15 | شن (%) sand |
| 0.000 | 7.3 | 18.1 (± 2.1) ^d | 32.1 (± 2.1) ^c | | سیلت (%) silt |
| 0.000 | 24.7 | 3.9 (2.2±) ^e | 55.9 (± 2.2) ^a | | رس (%) clay |
| 0.000 | 4.3 | 5.3 (± 3.2) ^b | 11.9 (± 3.2) ^a | | رطوبت اولیه (%) Initial Soil Moisture (%) |
| 0.000 | 31.1 | 34.1 (± 1.1) ^a | 23.1 (± 1.2) ^b | | رطوبت اشباع (%) Saturated percentage (%) |
| 0.021 | 31.1 | 1.5 (0.1±) ^a | 1.21 (0.1 ±) ^b | | وزن مخصوص (gr.cm ⁻³) Balk Density |
| 0.000 | 36.11 | 64.1 (± 3.2) ^b | 18 (± 1) ^{cd} | | عمق ۱۵-۳۰ Depth 15-30 |
| 0.000 | 11.31 | 20.1 (± 2.5) ^c | 42.1 (± 1.1) ^b | سیلت (%) silt | |
| 0.000 | 9.21 | 14.9 (± 2.5) ^d | 39.9 (± 4.2) ^{bc} | رس (%) clay | |
| 0.000 | 3.7 | 6.1 (± 2.2) ^b | 10.9 (± 3.2) ^a | رطوبت اولیه (%) Initial Soil Moisture (%) | |
| 0.000 | 28.1 | 35.1 (± 2.1) ^a | 22.1 (± 1.1) ^b | رطوبت اشباع (%) Saturated percentage (%) | |
| 0.047 | 2.1 | 1.46 (0.2±) ^a | 1.22 (0.1 ±) ^b | وزن مخصوص (gr.cm ⁻³) Balk Density | |

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۲- تعیین بافت خاک نمونه‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه
Fig. 2- Determination of soil texture of samples taken in the study area



شکل ۳- مقایسه میانگین شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در مخزن بندهای خاکی و منطقه شاهد
Fig. 3 - Comparison of the average weighted average diameter (MWD) index in the earthen dam reservoir and the control area



الف- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند در منطقه شاهد
A-Measuring the permeability of the dam reservoir in the test area
ب- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند در پای بند
B-Measuring the permeability of the dam reservoir at the next of the dam

شکل ۴- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند و منطقه شاهد

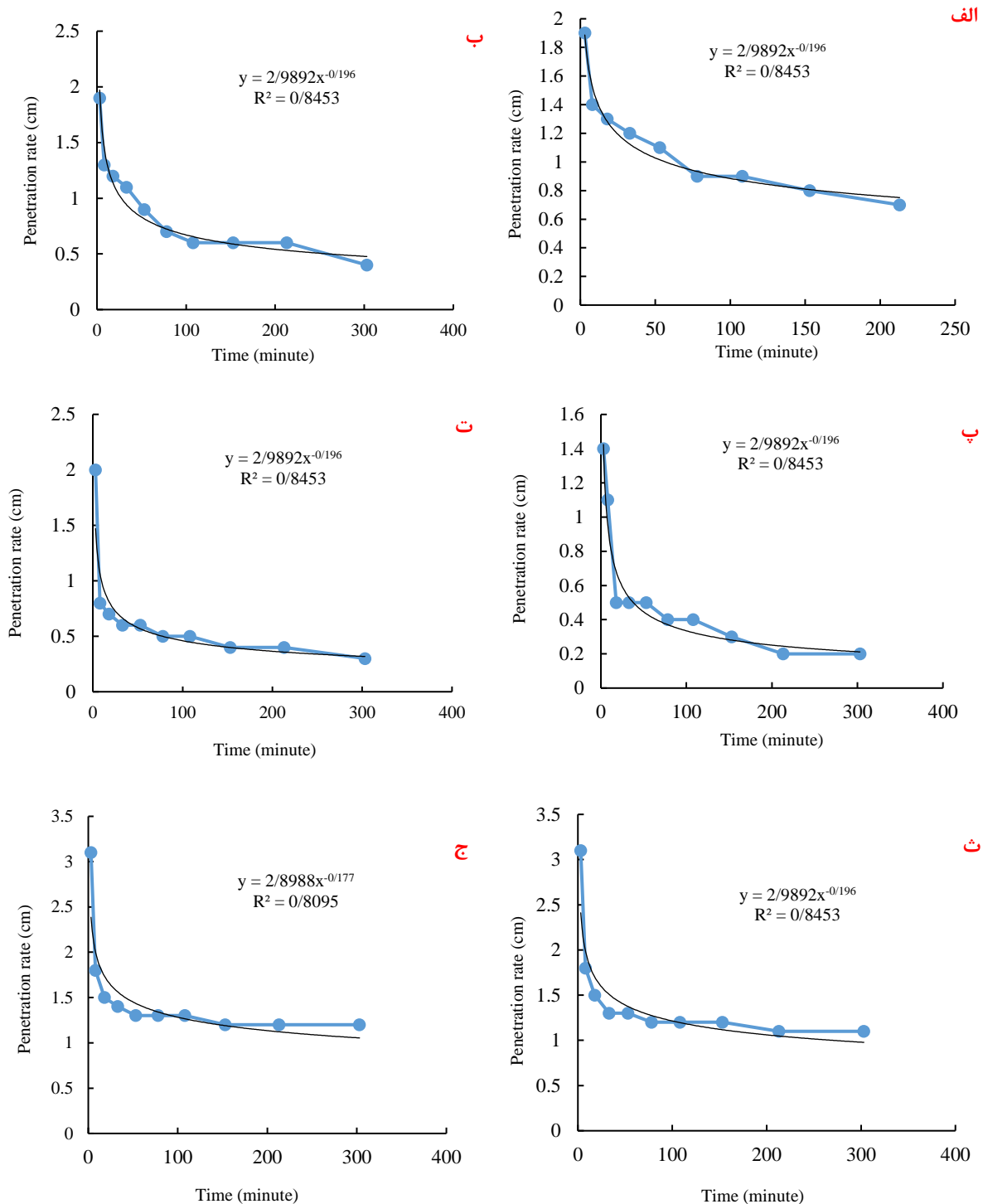
Fig. 4 - Measurement of the permeability of the dam reservoir and the control area

جدول ۳- ویژگی‌های نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت) در سطح رسوب مخازن بندهای مورد آزمایش

Table 3 - Infiltration characteristics (cm) in the sediment surface of the reservoirs of the tested dams

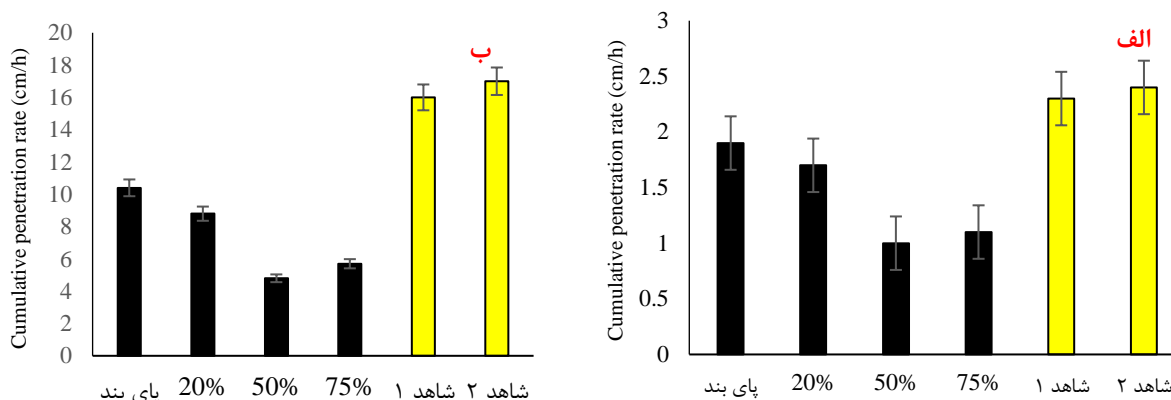
| شماره بند | پای دیواره بند | ۲۵ درصد طول رسوب | ۵۰ درصد طول بند | ۷۵ درصد طول بند | شاهد ۱ | شاهد ۲ | محل برداشت | Number of dam |
|-----------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|--|---------------|
| | Next to dam | 25% Sediment length | 50% Sediment length | 75% Sediment length | Control area 1 | Control area 2 | Test site | |
| ۱ | ۱.۹ | ۱.۷ | ۱ | ۱.۱ | ۲.۳ | ۲.۴ | میانگین سرعت نفوذ Average penetration speed | |
| | ۱۰.۴ | ۹.۳ | ۴.۸ | ۵.۷ | ۱۶ | ۱۷ | نفوذ تجمعی Cumulative influence | |
| ۲ | ۲ | ۱.۹ | ۱.۴ | ۱.۲ | ۲.۴ | ۲.۵ | میانگین سرعت نفوذ Average penetration speed | |
| | ۱۱ | ۱۰.۴۵ | ۷.۷ | ۶.۶ | ۱۷ | ۱۷.۷ | نفوذ تجمعی Cumulative influence | |
| ۳ | ۱.۷ | ۱.۸ | ۱.۵ | ۱.۲ | ۲.۴ | ۲.۳ | میانگین سرعت نفوذ Average penetration speed | |
| | ۹.۳ | ۹.۹ | ۸.۲ | ۶.۶ | ۱۷ | ۱۶.۳ | نفوذ تجمعی Cumulative influence | |
| ۴ | ۲.۱ | ۱.۶ | ۱.۲ | ۱.۴ | ۲.۵ | ۲.۷ | میانگین سرعت نفوذ Average penetration speed | |
| | ۱۱.۵ | ۸.۷ | ۶.۶ | ۷.۷ | ۱۷.۷ | ۱۹.۱ | نفوذ تجمعی Cumulative influence | |
| ۵ | ۲.۱ | ۱.۸ | ۱.۴ | ۱.۵ | ۲.۶ | ۲.۷ | میانگین سرعت نفوذ Average penetration speed | |
| | ۱۱.۸ | ۹.۳ | ۷.۱ | ۹.۹ | ۱۸.۱ | ۱۸.۴ | نفوذ تجمعی Cumulative influence | |

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۵- منحنی نفوذ پایه در سطوح مختلف مخزن بند خاکی شماره ۱ و منطقه شاهد (الف: منحنی نفوذ پایه در پای دیواره بند، ب: منحنی نفوذ پایه در ۲۵ درصد طول بند، پ: منحنی نفوذ پایه در ۵۰ درصد طول بند، ت: منحنی نفوذ پایه در ۷۵ درصد طول بند، ث: منحنی نفوذ پایه در شاهد ۱ و ج: منحنی نفوذ پایه در شاهد ۲)

Fig. 5 - Base penetration curve at different levels of earthen dam reservoir No. 1 and the control area (A: Base penetration curve at the foot of the dam wall, B: Base penetration curve at the bottom of the dam wall) C: Base penetration curve at 50% of the dam length, D: Base penetration curve at 75% of the dam length, E: Base penetration curve in control 1 and C: Base penetration curve in control 2)



شکل ۶ - مقایسه میانگین سرعت نفوذ (الف) و میزان نفوذ تجمعی (ب) در بندهای خاکی و منطقه شاهد

Fig. 6 - Comparison of average infiltration rate (a) and cumulative infiltration rate (b) in earthen dams and the control area

جدول ۴ - تجزیه واریانس اثر بند خاکی، عمق و محل برداشت بر میزان نفوذپذیری خاک

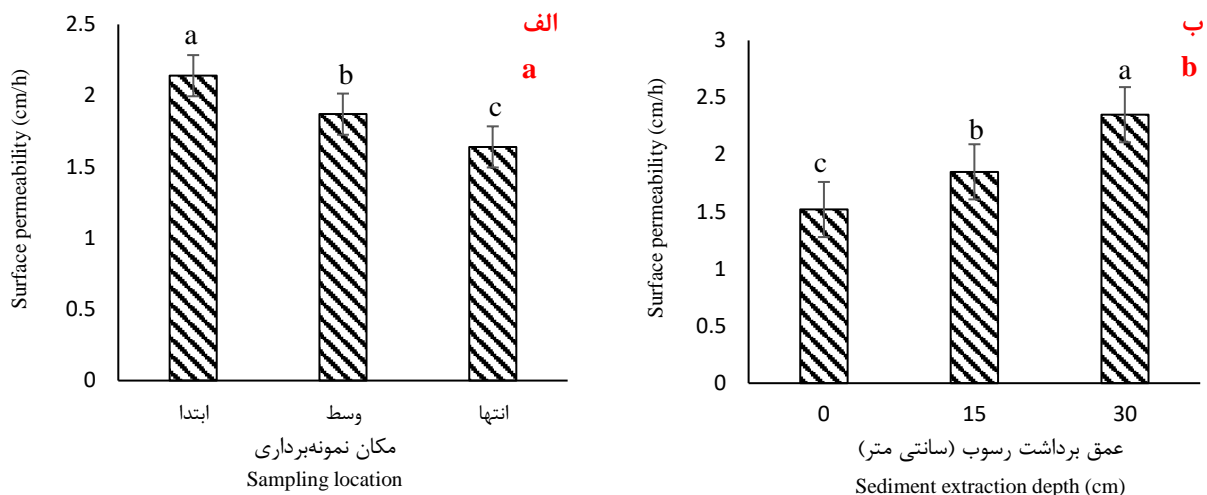
Table 4- Analysis of variance of the effect of soil barrier, depth and harvesting location on soil permeability

| میانگین مربعات (Mean squares) نفوذپذیری خاک (Soil infiltration) | درجه آزادی (df) | منبع تغییر |
|--|--------------------|---|
| 307.434 ^{ns} | 3 | تکرار (Repeat) |
| 2.506 [*] | 1 | سال احداث (Construction year) |
| 0.873 [*] | 2 | عمق برداشت (Sampling depth) |
| 2.635 [*] | 3 | محل برداشت (Sampling area) |
| 0.132 [*] | 2 | عمق برداشت (Sampling depth) × سال احداث (Construction year) |
| 0.072 [*] | 3 | سطوح برداشت (Sampling area) × سال احداث (Construction year) |
| 0.081 [*] | 6 | محل برداشت (Sampling area) × عمق برداشت (Sampling depth) |
| 0.012 ^{**} | 6 | سطوح برداشت (Sampling area) × عمق برداشت (Sampling depth) × سال احداث (Construction year) |
| | 72 | خطا (Error) |

نفوذپذیری سطحی خاک، یافته‌ها بیانگر آن است که در ابتدای مخزن بندهای احداثی میزان نفوذپذیری به ترتیب ۱۳ و ۲۴ درصد بیشتر است تا در سطوح میانی و انتهایی شکل (۷). اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک در شرایط برداشت رسوب از عمق‌های مختلف بیانگر آن است که کمترین (برابر با ۱/۵۲ سانتی‌متر بر ساعت) و بیشترین (۲/۳۴ سانتی‌متر بر ساعت) میزان نفوذپذیری به ترتیب مربوط به افق سطحی و عمق ۳۰ سانتی‌متری مخزن بندهای خاکی است که در سطح ۵ درصد اختلاف آماری را نشان می‌دهد به طوری که با برداشت لایه‌های رسوب از سطح مخازن در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری به ترتیب ۲۲ و ۳۶ درصد افزایش یافته است.

تجزیه واریانس داده‌های نفوذپذیری خاک بیانگر آن است که اثر سال ساخت بند خاکی، عمق و سطوح مکان بر میزان نفوذپذیری خاک در سطح یک درصد معنی‌دار است جدول (۴). اثر متقابل این متغیرها نیز بر میزان نفوذپذیری خاک به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) را نشان می‌دهد. در بررسی اثر سن بندهای خاکی این موضوع روشن است که رسوبات انباشت شده در بندهای با قدمت بیشتر (۲۲ سال ساخت) به دلیل دفعات بیشتر آبیاری مخزن و به تبع آن ترسیب ذرات در آن میزان نفوذپذیری آنها به طور محسوس کمتر است تا در بندهایی با قدمت کمتر (۱۸ سال ساخت) که در مطالعات مصطفایی و همکاران (Mostafaei et al., 2016) به اهمیت این موضوع اذعان شده است. در بررسی تغییرات

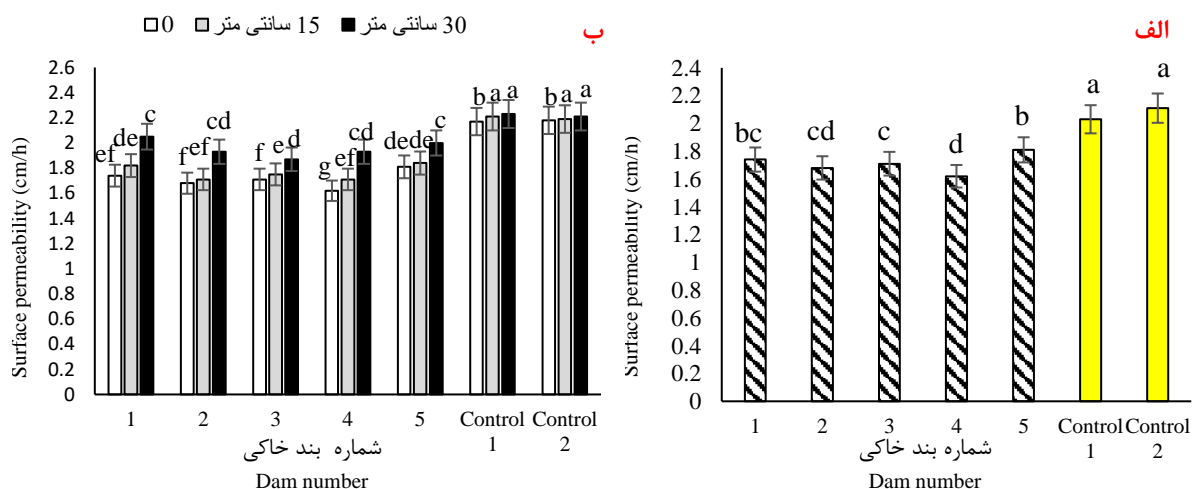
تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۷- مقایسه میانگین تغییرات نفوذپذیری خاک در سطوح (الف) و عمق‌های مختلف (ب) برداشتی از مخزن بندهای خاکی
 Fig. 7 - Comparison of average soil permeability changes at different levels (a) and depths (b) taken from the earthen dam reservoir

شکل (۸، الف و ب) نشان می‌دهد که تغییرات نفوذپذیری در بین بندهای مورد مطالعه و عمق‌های مختلف برداشت رسوب به لحاظ آماری معنی‌دار ($p \leq 0.05$) است به طوری که نفوذپذیری سطحی در مخزن بندهای احداثی با کاهش ۱/۲ برابری نسبت به منطقه شاهد همراه بوده است. در مخزن بندهای خاکی با برداشت رسوبات از عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری نسبت به لایه سطحی به ترتیب ۵ و ۲۶ درصد افزایش یافته و سرعت نفوذپذیری از کلاس نفوذپذیری آهسته به طبقه کمی آهسته تغییر یافته است. این موضوع با پژوهش‌های توتونچی و همکاران (Totonchi *et al.*, 2013) و شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri *et al.*, 2013) همخوانی دارد که می‌گویند برداشت و لایروبی ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک بستر مخزن حوضچه‌های تغذیه‌ای بر سرعت نفوذپذیری خاک موثر است. این در حالی است که در منطقه شاهد با افزایش عمق، تغییرات محسوسی در میزان نفوذپذیری خاک مشاهده نشد و کلاس نفوذپذیری در عمق‌های مختلف در سطح نفوذپذیری متوسط قرار دارد. با توجه به عملکرد بندهای خاکی، چنانچه حد بالای نفوذپذیری متوسط را معیار نامطلوب بودن نفوذپذیری خاک سطحی در نظر بگیریم همه بندهای خاکی احداث شده در شرایط نامطلوب قرار می‌گیرند.

شکل (۸، الف و ب) نشان می‌دهد که تغییرات نفوذپذیری در بین بندهای مورد مطالعه و عمق‌های مختلف برداشت رسوب به لحاظ آماری معنی‌دار ($p \leq 0.05$) است به طوری که نفوذپذیری سطحی در مخزن بندهای احداثی با کاهش ۱/۲ برابری نسبت به منطقه شاهد همراه بوده است. در مخزن بندهای خاکی با برداشت رسوبات از عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری نسبت به لایه سطحی به ترتیب ۵ و ۲۶ درصد افزایش یافته و سرعت نفوذپذیری از کلاس نفوذپذیری آهسته به طبقه کمی آهسته تغییر یافته است. این موضوع با پژوهش‌های توتونچی و همکاران (Totonchi *et al.*, 2013) و شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri *et al.*, 2013) همخوانی دارد که می‌گویند برداشت و لایروبی ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک بستر مخزن حوضچه‌های تغذیه‌ای بر سرعت نفوذپذیری خاک موثر است. این در حالی است که در منطقه شاهد با افزایش عمق، تغییرات محسوسی در میزان نفوذپذیری خاک مشاهده نشد و کلاس نفوذپذیری در عمق‌های مختلف در سطح نفوذپذیری متوسط قرار دارد. با توجه به عملکرد بندهای خاکی، چنانچه حد بالای نفوذپذیری متوسط را معیار نامطلوب بودن نفوذپذیری خاک سطحی در نظر بگیریم همه بندهای خاکی احداث شده در شرایط نامطلوب قرار می‌گیرند.



شکل ۸ - مقایسه تغییرات نفوذپذیری سطحی منطقه شاهد و بندهای خاکی (الف) و عمق‌های مختلف برداشت (ب) مورد مطالعه
 Fig 8 - Comparison of changes in surface permeability of the control area and the studied earth dams (a) and different extraction depths (b).

نقش ویژگی‌های خاک بر نفوذپذیری

افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. ارتباط مثبت درصد شن و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دال بر این موضوع است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان شن ۹۶ درصد تغییرات نفوذپذیری سطحی را در تیمارهای مورد مطالعه توجیه می‌کند جدول (۶). نتایج معادله رگرسیونی برآورد شده مطابق معادله (۳) است.

(۳)

$$Y = -1.466 + 0.12 \text{ Sand (\%)} - 0.034 \text{ Silt (\%)} - 0.029 \text{ Clay (\%)} + 1.803 \text{ MWD}$$

که در آن: $Y =$ میزان نفوذپذیری سطحی خاک، Sand = شن (%، Silt = سیلت (%، Clay = رس (%، و MWD = شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌هاست. بر اساس مدل رگرسیونی به دست آمده، متغیرهای درصد شن و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جهت مثبت بر میزان نفوذپذیری سطحی خاک مؤثرند.

به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک، از رگرسیون چندگانه خطی و روش گام به گام استفاده شد. بدین منظور میزان نفوذپذیری سطحی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله درصد شن، سیلت، رس و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل رگرسیونی شد جدول (۵). نتایج نشان می‌دهد متغیرهای درصد شن و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ارتباط مثبتی با میزان نفوذپذیری خاک دارند. در مقابل، ارتباط هر دو متغیر درصد سیلت و رس با میزان نفوذپذیری خاک منفی بوده است. از آنجا که نفوذپذیری خاک متأثر از توزیع اندازه خلل و فرج و به هم پیوستگی آن‌ها در پروفیل خاک است تفاوت در اندازه ذرات باعث تغییر در دانه‌بندی پروفیل خاک و در نتیجه توزیع ناهمگن خلل و فرج خاک می‌شود (Kutylek, 2004). از این رو، با افزایش ذرات درشت دانه و به تبع آن

جدول ۵ - ضریب‌های مدل رگرسیونی نفوذپذیری سطحی در تیمارها با مؤلفه‌های ویژگی‌های فیزیکی خاک (درصد شن، سیلت، رس و شاخص MWD)

Table 5 - Model Coefficients of regression analysis of surface permeability in treatments with soil physical properties (percentage of sand, silt, clay and MWD index)

| مدل Model | ضریب‌های استاندارد نشده Unstandardized Coefficients | | ضریب‌های استاندارد شده Standardized Coefficients | | معنی‌داری Sig |
|--------------|--|----------------------------|---|---------------|------------------|
| | B | انحراف معیار Std. Error | بتا Beta | آزمون تی t | |
| Sand | 0.12 | 0.53 | 0.983 | 2.156 | 0.01 |
| Silt | -0.034 | 0.13 | -1.083 | -2.61 | 0.042 |
| Clay | -0.029 | 0.21 | -1.012 | -1.379 | 0.026 |
| MWD | 1.803 | 0.45 | 0.651 | 2.98 | 0.07 |

جدول ۶- نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام میزان نفوذپذیری سطحی در تیمارها با مؤلفه‌های ویژگی‌های فیزیکی خاک (درصد شن، سیلت، رس و شاخص MWD)

Table 6 - Results of stepwise regression analysis of surface permeability in treatments with soil physical properties (percentage of sand, silt, clay and MWD index)

| مراحل رگرسیون گام به گام Step-by-step regression steps | |
|---|--|
| 1 | |
| 1.46 | عدد ثابت Constant number |
| 18.8 | درصد شن Sand (%) |
| 0.962 | ضریب تبیین R ^۲ Coefficient of explanation R ^۲ |

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی ضمن تغییر بافت خاک باعث کاهش محسوس نفوذپذیری بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان شده است. سرعت نفوذپذیری خاک سطحی همه بندهای خاکی در کلاس نفوذپذیری آهسته قرار گرفته است و به لحاظ نفوذپذیری این بندها در شرایط نامطلوب قرار دارند و حجم آب ذخیره شده در آنها با توجه به بالا بودن میزان تبخیر در منطقه (بیش از ۵ متر در سال) از دسترس خارج می‌شود. با برداشت رسوبات در عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر تاثیر چشم‌گیری بر میزان نفوذپذیری خاک این بندهای احداثی مشاهده شد که ضرورت مدیریت رسوبات در مخازن این بندهای خاکی را دو چندان می‌نماید. تجمع رسوبات در مخازن بندها علاوه بر کاهش نفوذپذیری خاک باعث کاهش عمر مفید مخزن بندهای خاکی می‌گردد که با توجه به بحران بی‌آبی در منطقه سیستان نیازمند بررسی عملکرد دیگر بندهای احداثی در این منطقه به‌منظور اتخاذ برنامه‌های مدیریتی لازم برای نگهداری این سازه‌های مکانیکی است. یکی از رویکردهای مناسب برای بهره‌برداری اصولی از این بندهای خاکی، برداشت رسوبات سیلابی است که بستری مناسب برای اصلاح زمین‌های سنگلاخی و سنگریزه‌ای پایین دست فراهم می‌کند. این کار ضمن کاهش حجم رسوبات بندهای خاکی امکان توسعه فعالیت‌های کشاورزی و در نتیجه اشتغال‌زایی را برای ساکنان مناطق پایین دست میسر می‌سازد که می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آتی در این منطقه باشد.

منابع

- Alizadeh, A. (2005). Soil physics. *Mashhad*, Emam reza university.
- Asiaei, O., Karimaei Tabarestani, M., Soltani, A., & Payan, M. (2021). Study on Geotechnical Properties of Sediment Deposited in Latian Dam Reservoir Using Field Measurements. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), 2457-2470
- Augustyniak, R., Grochowska, J., Łopata, M., Parszuto, K., & Tandyrak, R. (2020). Characteristics of bottom sediments in polish lakes with different trophic status. In *Polish River Basins and Lakes—Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*; Korzeniewska, E., Harnisz, M., Eds.; Springer: Cham. Switzerland. 1-86.
- Ballas, G., Garziglia, S., Sultan, N., Pelleter, E., Toucanne, S., Marsset, T., Riboulot, V., & Ker, S. (2018).

تشکر و قدردانی

از همکاران محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به‌خصوص آقای دکتر محمود طباطبایی و آقای دکتر نارویی از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان که برای اجرای این پژوهش با نویسندگان مساعدت کرده‌اند سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان مقاله نسخه منتشر شده آنرا خوانده و با آن موافقت کرده‌اند. هر دو نویسنده بطور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نگارش پیش‌نویس‌های اولیه و بعدی آن مشارکت داشته‌اند.

- Influence of early diagenesis on geotechnical properties of clay sediments (Romania, Black Sea). *Engineering Geology*. 240. 175–188.
- Banihabib, M.E., Iranpour, M. (2012). Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. *Irrigation and Water Engineering*. 2(4). 14-25.
- Baran, A., Tarnawski, M., Kaczmarek, M. (2011). Assessment of agricultural utilization of bottom sediments from the Besko reservoir. *Czasopismo Techniczne*. 108. 3–11.
- Batucu, G.D., & Jordaan, M.J. (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*; A.A. Balkema: Rotterdam, The Netherlands.
- Bayat, P., & basir-por, A. (2009). Investigating the effects of sedimentary materials on reducing the permeability of ponds and reservoirs of artificial recharge schemes and strategies to combat this phenomenon. *Second National Water Conference*. Islamic Azad University.
- Becker, A., Bucher, F., Davenport, C.A., & Flisch, A. (2004). Geotechnical characteristics of post-glacial organic sediments in Lake Bergsee, southern Black Forest, Germany. *Engineering geology*. 2004, 74, 91–102.
- Dz.U. (2014). Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów. 1923. Available online:
- Fonseca, R.M., & Barriga, F. (1998). Fyfe, W.S. Reversing desertification by using same reservoir sediments as agriculture soils. *Episodes*. 21. 218–224.
- Jafari, A., Nazarnejad, H., Najafi, S., & Asadzadeh, F. (2024). Sediment Particle Size Distribution behind the Check Dams of the Lashkaran Watershed, Salmas, West Azerbaijan. *J Watershed Manage Res*, 15(2), 65-76.
- Jahantigh, M., & Jahantigh, M. (2024). Effect of Check Dam on Sediment controlling and increasing the area of agricultural lands (A Case study Narun Khash sub-watershed). *Journal of Rainwater Catchment Systems*. 12 (3), 1-8.
- Giakoumatos, S.D., Siontorou, C., & Sidoras, D. (2025). Sedimentation simulation model testing for silty soil water infiltration after Hortonian overland flow. *Advances in Water Resources*. 105020.
- Ghojehpour, E., Jalali, V.R., Jafari, A., & Mahmoudabadi, M. (2020). Copula function and its application to estimate sand and bulk density of soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(1). 47-64.
- Hill, K. D. & Beecham, S. (2018). The Effect of Particle Size on Sediment Accumulation in Permeable Pavements. *Water*. 10(4), 403.
- Madeyski, M., Michalec, B., & Tarnawski, M. (2008). Silting of Small Water Reservoirs and Quality of Sediments. (In Polish: Zamulanie Małych Zbiorników Wodnych i Jakość Osadów Dennyh); *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich (Infrastructure And Ecology Of Rural Areas)*; Polska Akademia Nauk: Kraków, Poland. 11.
- Pichand, M. (2017). The effect of grassland conversion to the other agricultural uses on some soil Physicochemical properties (case study: watershed basin of Amameh). *Natural Ecosystems of Iran*. 8(1), 99-122.
- Pishro, F., Bakhtiari, M., & Shehni Karamzadeh, N. (2021). Experimental Investigation of Grading, Shape Factor and Compaction Effects on Anisotropic Permeability of Coarse Grain Solis. *Water and Soil Science*. 31(1), 1-14.
- Polski, K. (2006). *Normalizacyjny. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania Geotechniczne. Oznaczanie i Klasyfikowanie Gruntów. Część 2: Zasady Klasyfikowania*; Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Poland.

- Khani, A., & Soleimani, F. (2019). The effect of sediment height on recharge reduction in short recharge dams, 8th National Conference on Rainwater Catchment Surface Systems, Mashhad.
- Khayrandish, H., Pishdad, S., & Esmaeilpour, Y. (2015). Qualitative and quantitative assessment of check-dams effectiveness for flood sediment deposition (case study : Dam-tang watershed, Darab). *Quarterly journal of Environmental erosion research*, 2 (15), 1-14.
- Kos´, K., Gruchot, A., & Zawisza, E. (2021). Bottom Sediments from a Dam Reservoir as a Core in Embankments—Filtration and Stability: A Case Study. *Sustainability*, 13, 1221.
- Kutylek, M. (2004). Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res*, 79: 175-184.
- Mahmoodabadi, M., & Mazaheri, M.R. (2012). Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. *Irrigation and Water Sciences and Engineering*, 2(8), 14-25.
- Masetti, M., Pedretti, D., Sorichetta, D., Stevenazzi, S., & Bacci, F. (2016). Impact of a Storm-Water Infiltration Basin on the Recharge Dynamics in a Highly Permeable Aquifer, *Water Resources Management*, 1, 149-165.
- Mostafaei, A., Kalantari, N., Zarkesh, M.K. (2016). Assessing the success of floodwater spreading projects using a fuzzy approach. *Water Science Technology*, 74(8). 1980-1991.
- National Management and Planning Organization, Publication No. 243. (2001). Standard Instructions for Measuring Water Infiltration Rate in Soil by Double Cylinder Method, *National Management and Planning Organization press*. 1-48.
- Razzaghi, F., & Rezaie, N. (2017). Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures.
- Shams-Nateri, E., Fazloul, R., & Emadi, A.R. (2019). Investigation of Soil Surface Permeability Changes in Artificial Recharge Networks (Case Study: Artificial Recharge Network of Shahriar Plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2). 367-377.
- Saadat, S., Esmaeelnejad, L., Rezaei, H., Mirkhani, R., & Seyedmohammadi, J. (2019). Comparing aggregate stability tests as one of the soil physical quality indicators. *Water and Soil*, 33(2). 289-303.
- Safari, M., Manouchehri-Niya, M., & Nakhaee, M. (2021). Geological, mineralogical, and fluid inclusion studies of the Bandan-Neyghan ore district, South Khorasan Province, Iran. *Advanced Applied Geology*, 11(2). 225-237.
- Salimi, L., Adelpor, A., & Abass-zadeh, M. (2014). Investigating the impact of artificial nutrition projects on soil permeability. The first national desert conference, SeP. 15. Yazd. Iran.
- Samadi-boroojeni, H., Fathimoghadam, M., & Zalaghi, E. (2012). Survey Physical Properties of the Always Submerged Sediments in Dez Dam Reservoir Using the Field Data and the Empirical Methods Application. *Irrigation Sciences and Engineering*, 36(1), 57-67.
- Sojka, M., Siepak, M., & Gnojka, E. (2013). Assessment of heavy metal concentration in bottom sediments of Stare Miasto pre-dam reservoir on the Powa River. (In Polish: Ocena zawartości metali ciężkich w osadach dennych wstępnej części zbiornika retencyjnego Stare Miasto na rzece Powie). *Annul. Set Environ. Prot. Rocznik Ochrona Środowiska*, 15. 1916–1928.
- Szara, M., Baran, A., Klimkowicz-Pawlas, A., & Tarnawski, M. (2020). Ecotoxicological characteristics and] cological risk assessment of trace elements in the bottom sediments of the Rożnów reservoir (Poland). *Ecotoxicology*, 29. 45–57.
- Szal, D., & Gruca-Rokosz, R. (2020). Anaerobic oxidation of methane in freshwater sediments of Rzeszów reservoir. *Water*, 12. 398.
- Tafteh, A., Ghalebi, S., & Mallah, S. (2020). Evaluating Automatic Detector of Wetting Front for Monitoring Water Movement in Soil. *Environment and Water Engineering*, 6(1). 1-12.

- Totonchi, A., Brhamnd, N., Khandashti, M.R., & Homauon, R. (2013). Study and investigation of the effect of the type of coating and the concentration of suspended particles on the phenomenon of surface pore blockage in the bed of artificial feeding ponds, The First National Conference on Agricultural Engineering and Management, Environment and Sustainable Natural Resources. Dec.21. Hamedan University, Iran.
- Vahabzadeh Kebria, G., Reiahi, M.R., & Roshun, S.H. (2016). Investigation of land use change on physicochemical characteristics and soil erosion in Kaftargar basin of Behshahr. *Environmental Erosion Research Journal*. 6(2). 75-88.
- Wiśniowska-Kielian, B., & Niemiec, M. (2007). Effect of bottom sediment addition to the substratum on the quality of produced maize biomass. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*. 14, 581–589.
- Zhang, Y., Zhang, X., Bi, Z., Yu, Y., Shi, P., Ren, L., & Shan, Z. (2020). The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*. 718. 137305.



Review Paper

Systems Thinking: The Missing Paradigm in Water Management in Iran

Nader Abbasi¹ 

1- Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

(✉) **Corresponding Author:** n.abbasi@areeo.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 5 January 2026

Revised: 9 February 2026

Accepted: 10 February 2026

Available Online:

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Abbasi, N (2026). Systems Thinking: The Missing Paradigm in Water Management in Iran. V.26, No.100, P: 75-104

[https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.367811.1638](https://doi.org/10.22092/idser.2026.367811.1638)

Extended Abstract

Introduction

The accelerated and multidimensional growth of the contemporary world in both technical and social domains has significantly increased the complexity of human interactions—among individuals and with nature. Consequently, the concept of development, once primarily examined through an engineering lens, has evolved into a comprehensive paradigm encompassing technological, economic, social, political, environmental, and governance dimensions (Rosely and Voulvoulis, 2024). This paradigm emphasizes equity and sustainability, particularly the resilience of ecosystems. In domains such as water resource management, where human needs and behaviors intersect with ecological requirements and the carrying capacity of nature, this shift in perspective assumes heightened importance. Systems thinking offers a holistic framework that conceptualizes issues as interconnected systems. It accounts for the interactions among components, the multi-causality of events, foresight, dynamism, and the outcome-oriented nature of actions, while integrating technical, environmental, and social considerations. Although the importance of systems thinking in managing the complexities facing the world has now become apparent and has been more or less noticed in recent years, it is still in the educational and cultural stages, and its application to various issues has not been fully operationalized (Ross and Wade, 2024). Therefore, it seems that it is very necessary to explain the necessity and importance of this approach in solving today's complex problems, including water resources management, especially in Iran. This article attempts to briefly introduce the principles and foundations of the system and systems thinking, mention some global experiences, explain its role and position in the management and engineering of Iranian water resources, and present strategies and suggestions in this regard.

Methodology

This study begins by reviewing the complexities of contemporary phenomena, with particular emphasis on water management. It then outlines the principles and foundations of systems thinking, highlighting the necessity of adopting systems thinking approaches in water management and engineering. Subsequently, it introduces methods and tools for systemic analysis of water resources and presents selected global experiences in applying this approach. The analysis then turns to Iran's water resources, employing the iceberg model as a systems tool. Within this framework, water-related challenges are examined across four conceptual layers: events, patterns, structures, and mental models, with illustrative examples provided at each level as follows (Senge, 1990; McLean *et al.*, 2019; Kim, 1994).

- **Events** include phenomena such as the sharp decline in dam and well water levels, the reduction of potable water reserves, the drying of wetlands and rivers, the occurrence of land subsidence, the deterioration of water quality, the decline in agricultural production, and the intensification of social and security tensions.

- **Patterns** encompass recurring trends such as declining groundwater levels, rising salinity of water and soil, shifts in climatic indicators (temperature and precipitation), expansion of cultivated land and water consumption, and the growth of supply-driven activities.
- **Structures** refer to institutional and policy-related issues, including the multiplicity of water authorities, inefficiencies in allocation systems, subsidy and export policies, weaknesses in legislation, and the predominance of structural (engineering) solutions.
- **Mental models** capture underlying beliefs and assumptions, such as the absence of systemic thinking, the perception of water resources as inexhaustible, prioritization of sectoral and regional interests, and the pursuit of production irrespective of land-use planning and water availability. These factors are identified as root causes of structural inefficiency, reinforcing problematic trends and triggering adverse events.

Results

Studies on Iran's water resources show that the country's water crisis is no longer merely a scientific warning. Its symptoms—such as water scarcity, land subsidence, and the drying of dams, wells, wetlands, and rivers—are now visible to everyone. The situation has moved beyond abstract indicators and has become a serious issue with social, economic, and even security implications. The analysis conducted in this study using the Iceberg Model indicates that although natural and climatic factors contribute to the crisis, the core of the problem lies in water management practices, institutional structures, and development mindsets shaped over recent decades. Water management in Iran has largely focused on maximizing extraction, and the absence of a systems thinking in policymaking has led to the challenges we face today. Many current events stem from repetitive patterns and fragmented decision-making in the past, whereas sustainable water management requires a comprehensive, forward-looking approach that recognizes the interactions and mutual impacts among different components of the system. Furthermore, the paper proposes solutions tailored to each layer, prioritized from the deepest level upward: reforming beliefs and rethinking mental models, restructuring institutions and governance, and implementing adaptive, preventive, and remedial measures. Finally, the transition from traditional approaches to systems thinking is proposed as the fundamental step and the cornerstone of any effective and sustainable reform across all layers.

Conclusion

The analysis also shows that addressing Iran's water crisis requires looking beyond surface-level symptoms and focusing on the deeper structural and cognitive roots of the problem. This means that merely changing policies or launching new projects will not be sufficient. Instead, fundamental shifts in values, mindsets, and institutional structures are necessary. Without transformation at these deeper levels, resolving the water crisis will not be possible. Furthermore, considering the points discussed, it can be concluded that Iran's water crisis is a multidimensional national challenge, and the most fundamental step is shifting from fragmented, sector-based thinking to a holistic, systems-thinking approach. Global experiences show that systems thinking in water resources management provides a comprehensive framework that, through integrated and basin-level management, stakeholder and local community participation, the use of systemic analytical tools, and attention to social and ecological resilience, enables participatory decision-making and sustainable policymaking. Given these experiences and the current conditions of water resources—especially in arid and semi-arid regions—it is clear that transitioning from sectoral and infrastructure-focused management to a system-based approach is not merely an option but a vital necessity for ensuring the long-term sustainability of water resources.

Keywords: Water governance, System dynamics, Integrated water management, Water crisis

Acknowledgement

The author would like to thank all referees of the present study.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

The author has read and agreed to the published version of the manuscript.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.367811.1638>

نوع مقاله: علمی مروری

تفکر سیستمی؛ پارادایم مفقوده در مدیریت آب ایران

نادر عباسی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ | تاریخ انتشار:

چکیده

رشد پرشتاب و چندبعدی جهان معاصر در عرصه‌های فنی و اجتماعی موجب افزایش پیچیدگی در روابط و تعاملات انسان با یکدیگر و با طبیعت شده است. از این رو، مفاهیم توسعه که در گذشته عمدتاً از دریچه مهندسی نگریسته می‌شد، در جهان امروز به دیدگاهی جامع شامل ابعاد فناوری، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، زیست‌محیطی و حاکمیتی و به شیوه‌ای عادلانه‌تر و با رویکرد پایداری اکوسیستم در حال تغییر است. در مسائلی مانند مدیریت منابع آب که هم با نیازها و نوع رفتار انسان‌ها و هم با نیازهای بوم‌شناختی و ظرفیت طبیعت مرتبط است، این تغییر نگرش و رفتار جایگاه و اهمیت بیشتری دارد. تفکر سیستمی رویکردی است کل نگر که مسائل را در قالب یک سیستم و با توجه به تعامل و ارتباط بین اجزا، چند علیتی بودن وقایع، دوراندیشی، پویایی و پیامد محور بودن اقدامات به صورت جامع و در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف فنی، زیست محیطی، و اجتماعی بررسی می‌کند. در این نوشتار ضمن مرور پیچیدگی‌ها، به ویژه در حوزه مدیریت آب، برخی اصول و مبانی سیستم‌ها و تفکر سیستمی تشریح شده و ضرورت توسعه دیدگاه و تغییر نگرش به سمت سیستمی در حوزه مدیریت و مهندسی آب به میان آمده است. روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده برای تحلیل سیستمی منابع آب معرفی و برخی تجربیات جهانی در خصوص استفاده از این رویکرد ارائه شده است. وضعیت منابع آب ایران با بهره‌گیری از مدل کوه یخی به عنوان یکی از ابزارهای سیستمی بررسی و تحلیل شده است. بر این اساس، مسائل آب ایران منطبق با لایه‌های مدل مفهومی کوه یخی در چهار سطح رخدادها، روندها، ساختارها و مدل‌های ذهنی تحلیل گردیده و مصادیقی متناسب با هر لایه معرفی شده است. در سطح رخدادها، پدیده‌هایی مانند کاهش شدید آب سدها و چاه‌ها، کاهش ذخایر آب آسمانی، خشک شدن برخی تالاب‌ها و رودخانه‌ها، پدیده فرونشست، زمین، کاهش کیفیت منابع آب، کاهش تولید محصولات کشاورزی و افزایش تنش‌های امنیتی و اجتماعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سطح روندها الگوهای تکرارشونده‌ای مانند روند نزولی سطح آب زیرزمینی، روند صعودی شوری آب و خاک، تغییر شاخص‌های اقلیمی مانند دما و میزان بارندگی، افزایش سطح کشت و مصارف آب، و رشد فعالیت‌های عرضه‌محور تحلیل شده‌اند. در سطح ساختارهای نهادی مواردی از قبیل تعدد دستگاه‌های متولی آب، ناکارآمدی نظام تخصیص آب، سیاست‌های یارانه‌ای و صادراتی، ضعف قوانین و مقررات و ناکارآمدی قوانین موجود و تمرکز بر راه‌حل‌های سازه‌های معرفی شده‌اند. در سطح مدل‌های ذهنی و باورها مواردی مانند نبود تفکر سیستمی، باور به بی‌پایانی منابع آب، تقدم منافع بخشی و منطقه‌ای، و تفکر تولید بیشتر و در هر جا بدون توجه به آمایش سرزمین و آب به عنوان عوامل و دلایل اصلی ناکارآمدی ساختاری و تسهیل روندها و بروز رویدادها شناسایی و معرفی شده‌اند. در ادامه راهکارهایی با ماهیت‌های مختلف و متناسب با مصادیق هر لایه به ترتیب اولویت از عمیق‌ترین سطح مشتمل بر؛ اصلاح باورها و بازاندیشی مدل‌های ذهنی، اصلاح ساختارهای نهادی و حکمرانی، اقدامات تطبیقی و پیشگیرانه، و علاج بخشی و اصلاحی ارائه شده است. سرانجام اینکه تغییر نگرش از جزئی‌نگری و بخشی‌نگری به تفکر سیستمی به عنوان اصلی‌ترین راهکار، و اساس هرگونه اصلاح اثربخش و پایدار در سایر لایه‌ها پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: حکمرانی آب، پویایی سیستم، مدیریت یکپارچه، وضعیت بحرانی آب

^۱ استاد، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

نویسنده مسئول: (Email: n.abbasi@areco.ac.ir)

پایداری سیستم و بدون آینده نگری و پیامدسنجی، رشد فزاینده ای گرفت که استمرار آن تا به امروز موجب افت کمی و کیفی قابل توجه در وضعیت منابع آب ایران شده است. سرانه منابع تجدیدپذیر از حدود ۴۵۰۰ مترمکعب آب در سال (در چند دهه قبل)، امروزه در اغلب مناطق ایران به ویژه در فلات مرکزی به کمتر ۱۰۰۰ مترمکعب آب در سال کاهش یافته و شاخص برداشت از منابع آب تجدیدپذیر در کشور بسیار بیشتر از میزان متعارف و توصیه شده (۴۰ درصد) است. بطوریکه وضعیت منابع آب ایران بر اساس شاخص های بین المللی فالکن مارک و سازمان ملل متحد به ترتیب در شرایط "کمبود آب" و "تنش شدید آبی" گزارش شده است (Yazdani and Mohammadjani, 2014). بسیار روشن است با وقوع خشکسالی ها و برداشت های بی رویه و نیز بروز مسائل نوظهور سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اقلیمی طی سال های اخیر، وضعیت آب در ایران در حال حاضر بحرانی تر از سال های گذشته است و با ادامه روند جاری در آینده بسیار بغرنج تر از حال نیز خواهد شد.

بررسی و ارزیابی رویدادهای چند دهه اخیر نشان می دهد شرایط نابسامان امروزی وضعیت منابع و مصارف آب کشور معلول عوامل متعددی است که برخی از آنها ناشی از عوامل طبیعی و محیطی مانند خشکی و محدودیت های ذاتی آب، افزایش جمعیت و تقاضا در بخش های مختلف مصرف آب، تغییر اقلیم و خشکسالی هاست (که عمدتاً خارج از حیطه مدیریتی و تا حدودی اجتناب ناپذیر بوده اند)، و برخی نیز ناشی از عوامل مدیریتی یا انسان زاد بوده است. توسعه نامتوازن زیرساخت ها نسبت به نیازها و ظرفیت اکولوژیک کشور، برداشت بی رویه از منابع آب های زیرزمینی، نبود تفکر کل نگر و یکپارچه در مدیریت منابع آب، عدم اجرای صحیح سیاست ها و قوانین مربوط به آب در کشور، ضعف نظارت بر اجرای سیاست ها و قوانین در حوزه آب، توسعه طرح های آبی بدون توجه به آمایش سرزمین و

نگاهی به گذشته و تاریخ کهن کشور نشان می دهد که سرزمین ایران با وجود برخورداری از تنوع آب و هوایی و منابع طبیعی سرشار، به دلیل آنکه در منطقه ای با اقلیم خشک و نیمه خشک قرار گرفته در سالیان متمادی خشکسالی های متناوب و گسترده ای را از سر گذرانده است. آثار این خشکسالی ها در سنت ها و فرهنگ گذشتگان و سیاست گذاری ها و تدوین قوانین کاملاً مشهود است. در گذشته برای تعدیل مشکلات ناشی از محدودیت منابع آب و خشکسالی ها، ابتکارها و ابداع های گوناگونی در زمینه بهره برداری از منابع آب های سطحی و زیرزمینی در ابعاد سازه ای و مدیریتی صورت گرفته است. واژه هایی چون قنات یا کاریز، آب انبار، بند، جوی، مادی، میراب که از زمان ایران باستان تاکنون رایج هستند گواه معتبری است بر هنر و هوشمندی ایرانیان در مدیریت منابع و مصارف آب از جمله بر کاهش هدر رفت، استحصال آب و نظام تخصیص و بهره برداری از آب. با این حال، در گذشته برداشت از منابع و ذخایر آبی کشور متناسب با نیاز آن روز و آب در دسترس بوده است و اغلب رویکردهای مواجهه با خشکسالی و کم آبی، با توجه به امکانات و سطح فناوری محدود، بسیار خردمندانه و سازگار با شرایط اقلیمی بوده است. با رشد و توسعه جوامع بشری و افزایش جمعیت، ضرورت تامین غذای بیشتر و نیازهای ناشی از صنعتی شدن و تغییر الگوی زندگی، تقاضا برای مصرف بیشتر آب در بخش های مختلف کشاورزی، شرب، صنعت، تاسیسات شهری، بهداشت و سایر بخش های نوظهور افزایش چشمگیری داشت. در چند دهه اخیر علاوه بر عامل "خواستن" که ناشی از افزایش نیاز و تقاضاهای اجتناب ناپذیر برای آب بیشتر بود، با رشد و توسعه فناوری عامل "توانستن" نیز برای برداشت بیشتر آب از منابع سطحی و زیرزمینی در هر زمان و از هر مکان و عمقی فراهم شد. با فراهم بودن شرایط، برداشت آب از منابع به ویژه از منابع آب های زیرزمینی بدون توجه به توان اکولوژیک و

است. در این میان، افزوده شدن مداخله بشر در چرخه آب برای بهره برداری از آب با هدف‌های مختلف، اجزای سیستم و روابط بین آنها را پیچیده‌تر کرده است. بدیهی است مدیریت و برنامه‌ریزی برای چنین سیستم پویا و درهم‌تنیده ای که تمام اجزای آن در ارتباط و متاثر از یکدیگر هستند، مستلزم اتخاذ رویکردی متناسب و سازگار با ویژگی‌ها و رفتار آن سیستم، است. در این رویکرد کل‌نگر که تفکر سیستمی^۱ هم یاد می‌شود، با اتکا به شناخت دقیق و صحیح تمام عوامل درونی و بیرونی مؤثر و توجه به اندرکنش و روابط علت و معلولی آنها، با رویکرد جامع مشتمل بر ترکیب و تجزیه و با اولویت ترکیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. رویکردی که مدیریت منابع آب برای برآوردن نیازهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی فعلی و بدون به خطر انداختن توانایی برآوردن این نیازها در آینده در پیش خواهد گرفت نیازمند مدیرانی است که فراتر از مرزهای اداری و بدون توجه به نیازهای فوری و روزمره خود از منابع و محیط‌های آبی و اکوسیستم‌ها در برابر آلودگی و برداشت بیش از حد محافظت کنند و تغییرات ساختاری و راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر را برای خدمات پایدار آب ارائه دهند (Rosely and Voulvoulis, 2024).

اهمیت تفکر سیستمی در مدیریت پیچیدگی‌های پیش روی جهان اکنون آشکار شده و طی سال‌های اخیر نیز کم و بیش مورد توجه بوده است، ولی این تفکر سیستمی هنوز در مراحل آموزشی و فرهنگ سازی قرار دارد و کاربرد آن در مسائل مختلف به‌طور کامل عملیاتی نشده است (Ross and Wade, 2024). از این‌رو به نظر می‌رسد تبیین ضرورت و اهمیت این رویکرد در حل مسائل پیچیده امروزی، از جمله مدیریت منابع آب به ویژه در ایران، بسیار ضروری است. در این نوشتار سعی شده است ضمن معرفی اجمالی اصول و مبانی سیستم و تفکر سیستمی و ذکر برخی تجربه‌های جهانی، نقش و جایگاه آن در مدیریت و مهندسی منابع آب

ظرفیت‌های اکولوژیکی، حتی شیوه مواجهه با عوامل محیطی و برخی شرایط سیاسی، اقتصادی و اجتماعی ایران و جهان، از مهم‌ترین موارد مرتبط با عوامل انسان زاد به شمار می‌روند. بنابراین، نقش و اهمیت عوامل انسانی و مدیریتی با برنامه ریزی‌ها و راهکارها و نیز راه مواجهه با عوامل طبیعی و محیطی در بروز مشکلات جاری منابع آب کشور بسیار روشن و پررنگ‌تر است. با نگاهی به تجربه‌های گذشته مشاهده می‌شود در سالیان اخیر در زمینه مهندسی آب گام‌های زیادی برداشته شده و زحمات زیادی کشیده شده است ولی مبنای اغلب این گام‌ها و تصمیم‌ها جزئی‌نگری، بخشی‌نگری و تحلیل ناصحیح از اوضاع بوده است، و به همین دلیل نه تنها اثربخشی مطلوبی دیده نشده است، بلکه در بسیاری از موارد همین گام‌ها و تصمیم‌ها عامل و دلیل بروز وضعیت بحرانی کنونی آب نیز شده‌اند. در این میان نادیده انگاری نظم چرخه آب در طبیعت و ظرفیت محدود منابع آب و خاک، بیشتر از دیگر موارد نمود داشته و سایر عوامل نیز به نوعی متاثر از این نوع نگاه و باور بوده است.

بسیار روشن است که چرخه آب در طبیعت فرآیندی است طبیعی و از مرزبندی‌های اداری، سیاسی و جغرافیایی در قالب سیستمی متشکل از اجزای مختلف با مرزهای مشخص به طور مستقل عمل می‌کند. بسته به مرزهای تعیین شده، زیر سیستم‌های بسیار متعددی نیز برای چرخه هیدرولوژیک آب قابل تعریف خواهد بود که هر یک به عنوان یک سیستم منابع آب شناخته می‌شود. هر سیستم منابع آب می‌تواند فقط شامل زیرساخت‌ها و تجهیزات باشد، یا اینکه محیط طبیعی یا عناصر اجتماعی و انسان نیز می‌توانند به آن اضافه شوند (Grigg, 2024). این سیستم نیز مانند دیگر سیستم‌های طبیعی متشکل از اجزای متعدد و به هم وابسته و درهم تنیده است که مدیریت و حفاظت از آن مستلزم شناخت و درک صحیح از اجزای تشکیل دهنده و روابط علت و معلولی حاکم بین متغیرهای کلیدی آن سیستم

^۱ Systems Thinking

در اغلب تعریف‌های ارائه شده توسط محققان طی سدهٔ اخیر سه مولفه اصلی برای سیستم مستتر و مورد تأکید است : مفهوم کلیت، وجود روابط متقابل، و علت معلولی بین اجزا : برای تحقق هدفی مشترک شکل (۱). البته رشد سریع و شتابزدهٔ جهان امروزی در تمام ابعاد اقتصادی، فناوری، اجتماعی و روابط متقابل بین ملت‌ها، موجب شده است تا اجزای سیستم‌ها بیشتر و فرآیند آنها پیچیده تر شود که این موضوع تعریف‌های جدیدتر از سیستم را می‌طلبد (Ross and Wade, 2015). در این میان، جامع‌ترین تعریف ارائه شده برای سیستم، تعریف راسل ایکاف (Ackoff, 1970) است. بر اساس این تعریف سیستم یک کل متشکل از دو جزء یا بیشتر است که دارای پنج شرط زیر باشد:

۱. هر سیستم یک کل است که نمی‌توان آن را به اجزای مستقل تقسیم کرد.
 ۲. هر جزء سیستم ویژگی‌هایی دارد که اگر از سیستم جدا شود آن ویژگی‌ها را از دست می‌دهد.
 ۳. هر سیستم ویژگی‌هایی دارد که در هیچ یک از اجزا به طور مستقل وجود ندارد.
 ۴. سیستم وقتی به اجزایی مستقل تقسیم شود، برخی از ویژگی‌های ضروری خود را از دست می‌دهد.
 ۵. اگر اجزای یک موجودیت با هم تعامل نداشته باشند یک مجموعه تشکیل می‌دهند نه یک سیستم.
- طبق این تعریف، در سیستم جمع اجزای یک موجودیت برابر با خود آن نیست و به همین دلیل هر موجودیتی باید به عنوان یک کل مد نظر قرار گیرد.

ایران تبیین گردد و راهبردها و پیشنهادهایی نیز در این خصوص ارائه شود.

مبانی نظری و عملی تفکر سیستمی

مفاهیم سیستم

واژه "سیستم" ریشه در زبان یونانی دارد و به معنای دلیل قرارگرفتن اجزا در کنار یکدیگر است. در اصطلاح فنی، سیستم ترکیبی از اجزاست که برای رسیدن به هدفی مشترک با همدیگر تعامل دارند. در متون ادبی و فلسفی مختلف در دوره‌های گذشته، مفاهیم اولیه در خصوص سیستم با تعابیر مختلفی ارائه شده است. نظریهٔ وحدت در کثرت در اندیشه‌های هگل، ارسطو و مولانا به ویژه حکایت مشهور فیل مولانا و شواهد بیشماری از این دست، همگی بر توجه و تأکید فلاسفه غرب و عرفای ایرانی بر مفهوم سیستم دلالت دارند. با اینکه نظریهٔ سیستمی از ریشه‌های فلسفی در کل‌گرایی و جزءگرایی آغاز شده است ولی مفاهیم امروزی سیستم از قرن بیستم با نظریهٔ عمومی سیستم‌ها (برتالانفی^۱) و سایبرنتیک^۲ (نوربرت وینر^۳) شکل علمی گرفت و سپس با کارهای جی فارستر^۴ و راسل ایکاف^۵ در دانشگاه MIT به‌عرصهٔ مدیریت و علوم اجتماعی وارد شده است (Faghihipour and Keshavarz, 2019). تاکنون نیز تعاریف مختلفی توسط محققان ارائه شده است. برای نمونه، پیتر سنگه (Senge, 1990) سیستم را ترکیبی از اجزا می‌داند با هدفی مشترک که آن اجزا برای نیل به آن هدف مشترک در ارتباط با یکدیگر قرار گرفته‌اند. سیستم مجموعه‌ای است به هم پیوسته از عناصر که به طور منسجم سازماندهی شده است تا به چیزی دست یابد (Meadows, 2008).

¹ Ludwig von Bertalanffy

² cybernetics

³ Norbert Wiener

⁴ Jay Wright Forrester

⁵ Russell Lincoln Ackoff



شکل ۱- عناصر اصلی یک سیستم
Fig.1- The main elements of a System

جهان هستی بزرگ‌ترین و منظم‌ترین سیستم است و تمام پدیده‌های موجود در آن به‌طور سلسله‌مراتبی زیر سیستم‌های آن عالم هستی به‌شمار می‌آیند. واژه اکوسیستم نیز که کلافا^۱ گیاه‌شناس انگلیسی در دهه ۱۹۳۰ برای نخستین بار معرفی کرد به روشنی به مفهوم سیستم در طبیعت اشاره دارد؛ او اکوسیستم را به‌این صورت تعریف می‌کند "مجموعه عناصر فیزیکی و عناصر زیستی که در کنار هم قرار می‌گیرند و در رابطه با یکدیگر یک سیستم را خلق می‌کنند". با تعابیر امروزی اکوسیستم (بوم‌سازگان) یک سیستم طبیعی شامل گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها (مجموعه موجودات زنده) است که در ناحیه‌ای مشخص با همه عوامل و اجزای فیزیکی غیرزنده محیط در تعامل هستند. یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان یا اکوسیستم‌های طبیعی، بوم‌سازگان آبی^۲ است که به مجموعه‌ای از موجودات زنده (گیاهان، جانوران، میکروارگانیسم‌ها) و عوامل غیرزنده (آب، هوا، نور، مواد معدنی) در یک محیط آبی گفته می‌شود که با هم در تعامل هستند و چرخه انرژی و مواد را شکل می‌دهند (Alexander, 1999). در جهان دو گونه اصلی از بوم‌سازگان آبی شامل بوم‌سازگان آب‌های شور (دریا و

سیستم‌ها با تعابیر و تعریف‌های اشاره شده ویژگی‌ها و انواع متعددی دارند که اغلب بر اساس معیارها و دیدگاه‌های متنوع قابل طبقه‌بندی هستند. از انواع مختلف طبقه‌بندی سیستم‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: باز و بسته (با توجه به محیط)، زنده و غیرزنده (حالت سیستم) ساده و پیچیده (با توجه به پیچیدگی مسئله) انطباق‌پذیر و انطباق‌ناپذیر (توانایی تغییر حالت)، گسسته و پیوسته (کیفیت تغییرحالات)، قطعی و احتمالی (میزان پیش‌بینی رفتار)، مانا و پویا (تغییرحالت در طول زمان)، انتزاعی یا عینی (ماهیت اجزا) و موارد متعدد دیگر. دامنه تغییر انواع سیستم از یک وسیله مکانیکی متشکل از دو قطعه کوچک تا سیستم جهان هستی گسترده است. بدن انسان یا هر موجود زنده دیگر، انواع وسایل مکانیکی یا الکترونیکی، خانواده، سازمان‌ها، جامعه، بازار، کشاورزی، وزارتخانه، مدرسه، حوضه آبریز، جنگل، و موارد بیشمار دیگر نمونه‌هایی از یک سیستم هستند که هر یک از آنها ضمن داشتن زیر سیستم‌های متعدد دیگر خود نیز زیر سیستم یک سیستم بالادستی است.

¹ Roy Clapham

² Aquatic Ecosystem

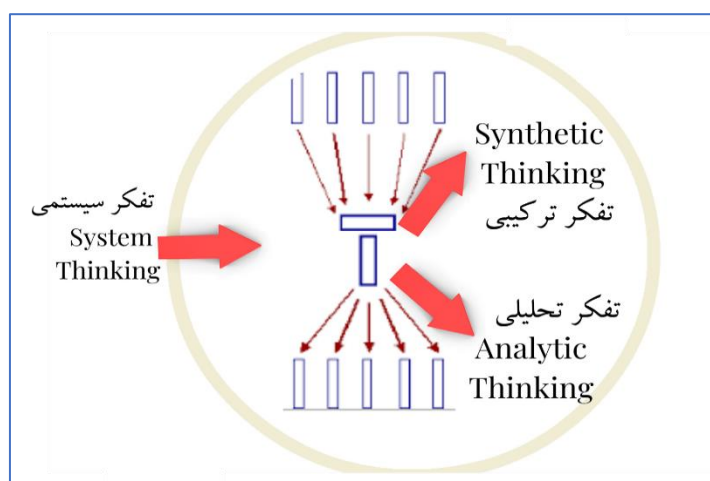
اقیانوس) و بوم‌سازگان آب‌های شیرین وجود دارد. اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها از مهم‌ترین بوم‌سازگان آبی هستند و هریک از آنها نیز زیر سیستم‌های متعددی دارد که مدیریت و بهره‌برداری از آنها مستلزم رعایت ویژگی‌های سیستمی آنهاست.

شناسایی علل ریشه‌ای مسائل، پیش‌بینی نتایج بالقوه و ابداع راه‌حل‌های مؤثرتر و پایدارتر کمک می‌کند. در تفکر سیستمی به جای تمرکز بر اجزای منفرد، بر الگوهای ارتباطی، بازخوردها و پویایی‌های درونی سیستم توجه می‌کند و تلاش دارد تصویری جامع از عملکرد آن ارائه دهد (Meadows, 2008).

مفاهیم و ماهیت تفکر سیستمی

ماهیت تفکر سیستمی، شناخت مبتنی بر تجزیه^۱ (تحلیل) و ترکیب^۲ به‌منظور دستیابی به درک کامل و جامع موضوع در محیط پیرامون خویش است شکل (۲). در دنیای پیچیده امروزی مسائل کلان تنها با تکیه بر تجزیه و تحلیل اجزای مستقل سیستم قابل حل نیستند. تحلیل (تجزیه) به تنهایی ویژگی‌های مهم سیستم را از بین می‌برد. دلیل این موضوع آن است که سیستم یک کل است با تحلیل (تجزیه) قابل درک نیست. ولی ترکیب که یکی از اصول بنیادین تفکر سیستمی است، با درک سیستم به عنوان یک کل یک‌پارچه این نقص را جبران می‌کند و برای تفکر سیستمی موضوعی است کلیدی. در واقع، در تفکر سیستمی تجزیه و ترکیب مکمل هم هستند و توصیه می‌شود که ترکیب پیش از تحلیل رخ دهد.

تفکر سیستمی، تفکری کل‌نگر و نوعی نگاه کلان به جهان هستی و پدیده‌های آن است. به بیانی دیگر، تفکر سیستمی چارچوبی نظام‌مند و روشی منطقی برای درک پیچیدگی‌ها و فهم کل سیستم و اجزای آن، روابط بین اجزا و کل و روابط بین کل با محیط آن است. در این رویکرد فکری، برای درک پیچیدگی‌های جهان و پدیده‌های آن، به جای تجزیه مسئله یا سیستم به اجزای منفرد، آن مسئله یا سیستم در قالب یک کل و روابط میان اجزا بررسی می‌شود. تفکر سیستمی بر نحوه ارتباط بین بخش‌های مختلف سیستم و نحوه عملکرد سیستم‌ها طی زمان و در چارچوب سیستم‌های بزرگ‌تر تمرکز دارد تا مشکلات پیچیده با دیدن تصویر بزرگ‌تر، به جای اجزای جداگانه، درک و حل شود. با شناخت الگوها و وابستگی‌های متقابل، تفکر سیستمی به



شکل ۲- ماهیت تفکر سیستمی مبتنی بر تجزیه و ترکیب (Parajapati, 2021)
Fig.2- The nature of systems thinking based on analysis and synthesis

¹ Analysis
² Synthesis

ویژگی های تفکر سیستمی

توسعه دیدگاه از نظر زمانی و مکانی یکی دیگر از اصول تفکر سیستمی است. توجه به سناریوهای بلندمدت و تحلیل روندها، بخش جدایی‌ناپذیر این رویکرد است. یکی از مهم‌ترین خطاهایی که در روش‌های مدیریتی مرسوم (غیر سیستمی) در بررسی مسائل رخ می‌دهد این است که از نظر زمانی به مقطع زمانی نزدیک به حال و از نظر مکانی نیز متمرکز بر محدوده‌ای عمل می‌شود که نشانه‌های مشکل آنجا مشاهده شده‌اند و یا در حیطه اختیار و مسئولیت محدودی عمل می‌شود که وجود دارد. ولی در رویکرد سیستمی از نظر زمانی هم به گذشته توجه کافی می‌شود تا درک صحیحی به دست آید از اینکه مسئله چگونه به وجود آمده است و هم آنقدر زمان آینده دیده می‌شود که درک شود با روند فعلی وضعیت سیستم چگونه خواهد شد. با چنین توسعه‌ای در دیدگاه است که این امکان به دست می‌آید تا اثر اقدام‌ها و تصمیم‌ها بررسی گردد. برخی راه‌حل‌های اساسی و درست مثل اقدامات درمانی و پزشکی، سیاست‌های اقتصادی کلان و غیره در ابتدا وضعیت سیستم را بدتر می‌کند اما پس از مدتی اثر بهبود آن ظاهر می‌شود (بدتر قبل از بهتر). ولی برخی راه‌حل‌های غیر اساسی و مقطعی ابتدا بهبود اندکی در سیستم ایجاد می‌کنند ولی در دراز مدت ممکن است وضعیت سیستم به حالتی بدتر از حالت اول بر گردد (بهتر قبل از بدتر) (Mokhtari, 2015). وجود رابطه علت و معلولی بین متغیرها ویژگی دیگر تفکر سیستمی است. همبستگی و علیت دو مفهوم کاملاً متفاوتی هستند که می‌توانند در یک زمان وجود داشته باشند ولی الزاماً یکی بر دیگری دلالت نمی‌کند. بود یا نبود همبستگی آماری بین دو متغیر برای بود یا نبود علت و معلولی بین آنها کافی نیست. از این رو پس از مشخص شدن همبستگی بین دو متغیر لازم است بود یا نبود رابطه علت و معلولی بررسی شود. علیت زمانی اتفاق می‌افتد که یک متغیر بر دیگری

نگرش سیستمی مانند هر موضوع یا هر نظریه دارای اصول و ویژگی‌های خاصی است که توجه به آنها بسیار مهم و ضروری است. کل‌نگری، توسعه دیدگاه از نظر زمانی و مکانی، تعامل و ارتباط بین اجزا، چند علیتی، دوراندیشی، پیامد محور بودن، و پویایی از مهم‌ترین اصول و ویژگی‌های تفکر سیستمی هستند. بر اساس اصل کل‌نگری، سیستم به‌عنوان یک کل یکپارچه دیده می‌شود و اجزای آن تنها در بستر روابط متقابل معنا پیدا می‌کنند. این ویژگی یادآوری می‌کند که تمرکز صرف بر اجزای منفرد می‌تواند باعث نادیده گرفتن پیامدهای کلان شود. ویژگی دیگر تفکر سیستمی، بازخورد^۱ است که نشان می‌دهد رفتار سیستم‌ها طی زمان تحت تأثیر چرخه‌های مثبت و منفی قرار می‌گیرد. چرخه‌های مثبت می‌توانند تغییرات را تقویت کنند، در حالی که چرخه‌های منفی نقش تعدیل‌کننده دارند. درک این بازخوردها برای فهم پویایی‌های سیستم ضروری است (Senge, 1990). از دیگر ویژگی‌های این رویکرد می‌توان به وابستگی متقابل اجزا اشاره کرد. هیچ جزئی از سیستم به‌طور کامل مستقل نیست؛ عملکرد هر جزء به تعاملات آن با دیگر اجزا وابسته است. تفکر سیستمی به جای تمرکز بر رویدادهای منفرد، بر الگوها و ساختارهای بنیادین مولد رفتارهای سیستم توجه دارد. این نگاه کمک می‌کند تا به جای واکنش به نشانه‌های سطحی، به ریشه‌های عمیق‌تر مشکلات پرداخته شود. ویژگی مهم دیگر تفکر سیستمی تمرکز بر نقاط اهرمی^۲ است؛ نقاطی که تغییر کوچک در آنها می‌تواند اثرهای بزرگی بر کل سیستم داشته باشد. این مفهوم به‌ویژه در سیاست‌گذاری و مدیریت اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد همه اقدام‌ها ارزش یکسان ندارند و برخی تغییرات می‌توانند تحولات بنیادین ایجاد کنند (Senge, 1990).

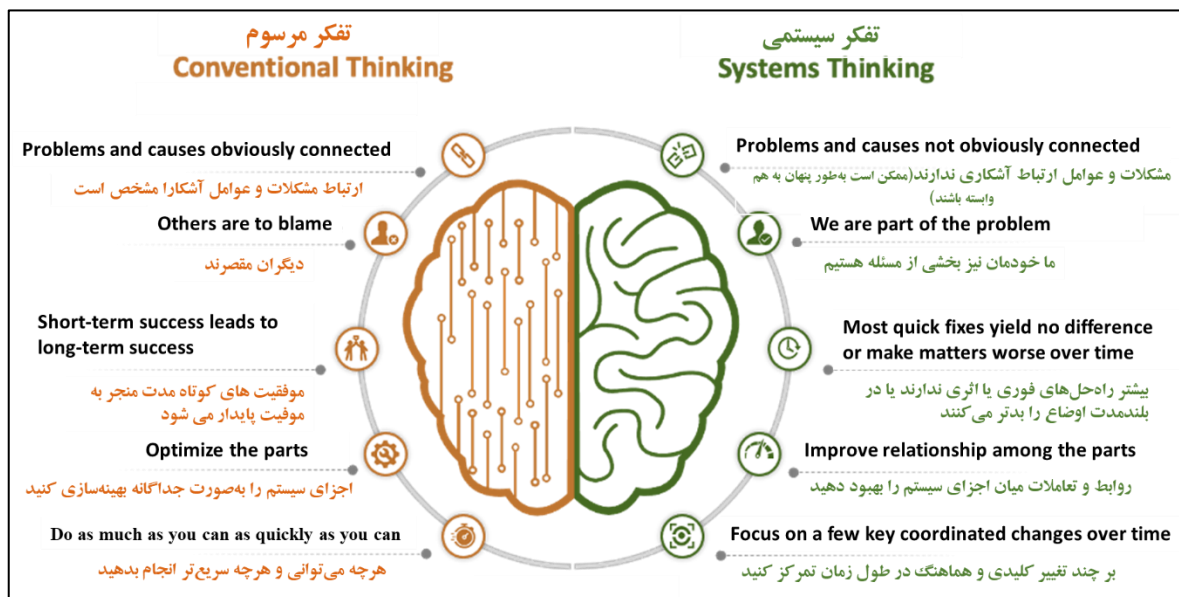
¹ Feedback

² Leverage Points

تفکر سیستمی؛ پارادایم مفقوده در مدیریت آب ایران

است. به عبارتی، تفکر سیستمی اندیشیدن در طول زمان است و هر تصمیمی زنجیره‌ای از اتفاقات را رقم می‌زند. در رویکرد سیستمی برای حل مسئله باید به تمام مشخصه‌ها و ویژگی‌های آن مسئله توجه و عمل گردد. اگر چنین نشود، راه‌حل‌های مقطعی و جزءنگری در مسائل نه تنها کارساز نخواهند بود بلکه منشأ مشکلات جدی‌تر و جدیدتری خواهند شد. به‌طور کلی، مدل‌های ذهنی و باورها در تفکر سیستمی با تفکر رایج و مرسوم بسیار متفاوت است. برخی از این تفاوت‌ها در شکل (۳) ارائه شده است.

تأثیر می‌گذارد، در حالی که همبستگی فقط دلالت بر وجود رابطه بین دو متغیر دارد. علاوه بر این، در رویکرد سیستمی اغلب پدیده‌ها ناشی از ترکیب علل و عوامل متعدد و به عبارتی چند علیتی در مقابل تفکر خطی حاکم است. برخلاف الگوهای ساده خطی که علت را به یک معلول مستقیم مرتبط می‌کنند، روابط در سیستم‌ها پیچیده، چندلایه و غیرخطی هستند. همین ویژگی باعث می‌شود تا پیامد تصمیم‌های انسانی یا طبیعی گاه بسیار متفاوت از پیش‌بینی‌های ساده باشد (Mokhtari, 2015). دوراندیشی و پیامدار بودن راه‌حل‌ها از ویژگی بارز دیگر تفکر سیستمی



شکل ۳- تفاوت تفکر سیستمی و تفکر مرسوم

Fig.3- Comparison of conventional and systems thinking

مفاهیم به دیدگاهی جامع شامل ابعاد فناوری، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، زیست‌محیطی و حاکمیتی و به شیوه‌ای عادلانه‌تر و با رویکرد پایداری اکوسیستم در حال تغییرند. در چنین شرایطی با توجه به اینکه تمام فرآیندها و پدیده‌های طبیعی و مصنوعی در چارچوب سیستم عمل می‌کنند، هر اقدامی که بدون شناخت دقیق ویژگی‌های سیستم‌ها و روابط بین آنها باشد، عملکرد سیستم را دیر یا زود مختل خواهد کرد. از این‌رو در مواجهه با پدیده‌های طبیعی و حتی

در گذشته، اگرچه بسیاری از مسائل ذاتاً پیچیده بودند، اما به دلیل محدود بودن تعاملات، نیازها و فشارهای انسانی این پیچیدگی‌ها کمتر نمود پیدا می‌کردند. با رشد سریع علوم، فناوری، اقتصاد و ساختارهای اجتماعی، میزان وابستگی‌ها و سرعت تغییرات افزایش یافته و در نتیجه پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌ها به بخش جدایی‌ناپذیر مسائل امروز تبدیل شده‌اند. مفاهیم توسعه در گذشته عمدتاً از دریچه مهندسی نگریسته می‌شد، اما در جهان امروز این

ابزارهای بسیار متنوع و متفاوتی برای گسترش تفکر سیستمی در زمینه‌های مختلفی از جمله سلامت و بهداشت، محیط زیست، مسایل اقتصادی و کسب و کار، مطالعات اجتماعی، سیاستگذاری، مهندسی سیستم‌ها و مدیریت و به ویژه مدیریت و مهندسی آب توسعه یافته اند. روزلی و ولولیس (Rosely and Voulvoulis, 2024) با بررسی بیش از سی و پنج مطالعه درخصوص کاربرد ابزارهای سیستمی در حوزه مهندسی آب از منابعی شامل مقالات داوری شده، فصل‌هایی از کتاب‌های درسی دانشگاهی و منابع خاکستری (از وبسایت‌ها، وبلاگ‌ها و مقالات در دست اقدام) حدود ۴۰ ابزار سیستمی را بر اساس نحوه عملکرد و کاربردشان در ده گروه مختلف متناسب با هدف‌های بررسی شامل؛ طوفان فکری، شناسایی بازیگران و عوامل، تسهیل ارتباط بین ذی‌نفعان، تجسم سیستم، بررسی الگوهای رفتار، تعیین اهداف، بررسی علل، مدل‌سازی کامپیوتری، ارزیابی گزینه‌ها و نظارت و ارزیابی، شناسایی و طبقه‌بندی کرده‌اند شکل (۴). این محققان می‌گویند ابزارهای سیستمی جایگزینی برای تفکر سیستمی نیستند بلکه می‌توانند نقش مهمی در تسهیل این فرآیند داشته باشند. در واقع، این ابزارها هم به تصمیم‌گیری بهتر و هم با ایجاد ذهنیت مشترک، به اجرایی شدن این راه حل‌ها کمک می‌کنند. از مهم‌ترین ابزارهای تفکر سیستمی که در حوزه مهندسی آب نیز کاربرد بیشتری دارند، می‌توان به مواردی مثل نمودارهای حلقه‌های علیت^۱، نمودارهای انباشت و جریان^۲، مدل کوه یخ^۳، نمودارهای رفتار در طول زمان^۴ (BOT)، کهن الگوی سیستمی^۵، تصاویر غنی^۶، نقشه‌های ذهنی^۷، نقاط اهرمی^۸، شبیه‌سازی سیستم

مصنوعی که در قالب یک سیستم عمل می‌کنند، اتخاذ رویکرد سیستمی بسیار حیاتی و اجتناب ناپذیر است. امروزه تفکر سیستمی نه تنها در حوزه مدیریت و سازمان‌ها، بلکه در تمام علوم از جمله علوم طبیعی، محیط زیست، فناوری و سیاست‌گذاری عمومی و به ویژه مدیریت منابع آب نیز کاربرد گسترده‌ای یافته است. این رویکرد، به‌عنوان یک چارچوب نظری قدرتمند، امکان تحلیل مسائل پیچیده را فراهم می‌کند که با روش‌های مرسوم تقلیل‌گرایانه و جزءنگر قابل توضیح و تبیین نیستند. تغییر نگرش و تکامل در مفهوم امنیت آبی به سمت بررسی جامع‌تر ارزش‌ها، ذی‌نفعان و دیدگاه‌های متنوع با ارائه اولویت‌های انسان‌محور و مبتنی بر اکوسیستم به شیوه‌ای عادلانه‌تر است (Alamanos et al., 2025). در مجموع، مبانی نظری تفکر سیستمی بر این نکته تأکید دارند که برای درک و مدیریت مسائل پیچیده باید از بخشی‌نگری و نگاه خطی فاصله گرفت و به جای آن روابط، بازخوردها و پویایی‌های کل سیستم را در نظر گرفت. این رویکرد نه تنها به فهم بهتر پیچیدگی‌ها کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های پایدار و جامع در حوزه‌های گوناگون است (Meadows, 2008; Senge, 1990).

ابزارها و روش‌های تفکر سیستمی

برای پیاده‌سازی و عملیاتی کردن هر ایده یا هر رویکرد نیاز به ابزار و روش‌های خاصی است که تفکر سیستمی نیز از این قاعده مستثنی نیست. ابزارهای تفکر سیستمی مجموعه ابزارهایی هستند که برای شناخت و تحلیل مسئله، ایجاد ذهنیت مشترک در مورد مسئله، و طراحی راه‌حلی برای بهبود وضعیت به کار گرفته می‌شوند. تاکنون روش‌ها و

¹ Causal Loop Diagrams

² Stock and Flow Diagrams

³ Iceberg Model

⁴ Behavior Over Time Graphs

⁵ System Archetypes

⁶ Rich Picture

⁷ Mental Models

⁸ Leverage Points

ها، نمودارهای حلقه های بازخورد^۲، و تحلیل ساختار سیستم^۳ اشاره کرد (Rosely and Voulvoulis, 2024; Naeem et al., 2023; Barbrook and Penn, 2022). پرداختن به جزئیات تک تک این روش ها خارج از عهده این نوشتار است و مخاطبان می توانند به منابع مرتبط رجوع کنند. ولی با توجه به اینکه در این مطالعه از روش مدل کوه یخی برای بررسی وضعیت ایران استفاده شده است، این روش به طور اجمالی معرفی می شود.



شکل ۴- ابزارهای مختلف مورد استفاده در تفکر سیستمی

Fig.4- System tools grouped based on their main functions (Rosely and Voulvoulis, 2024)

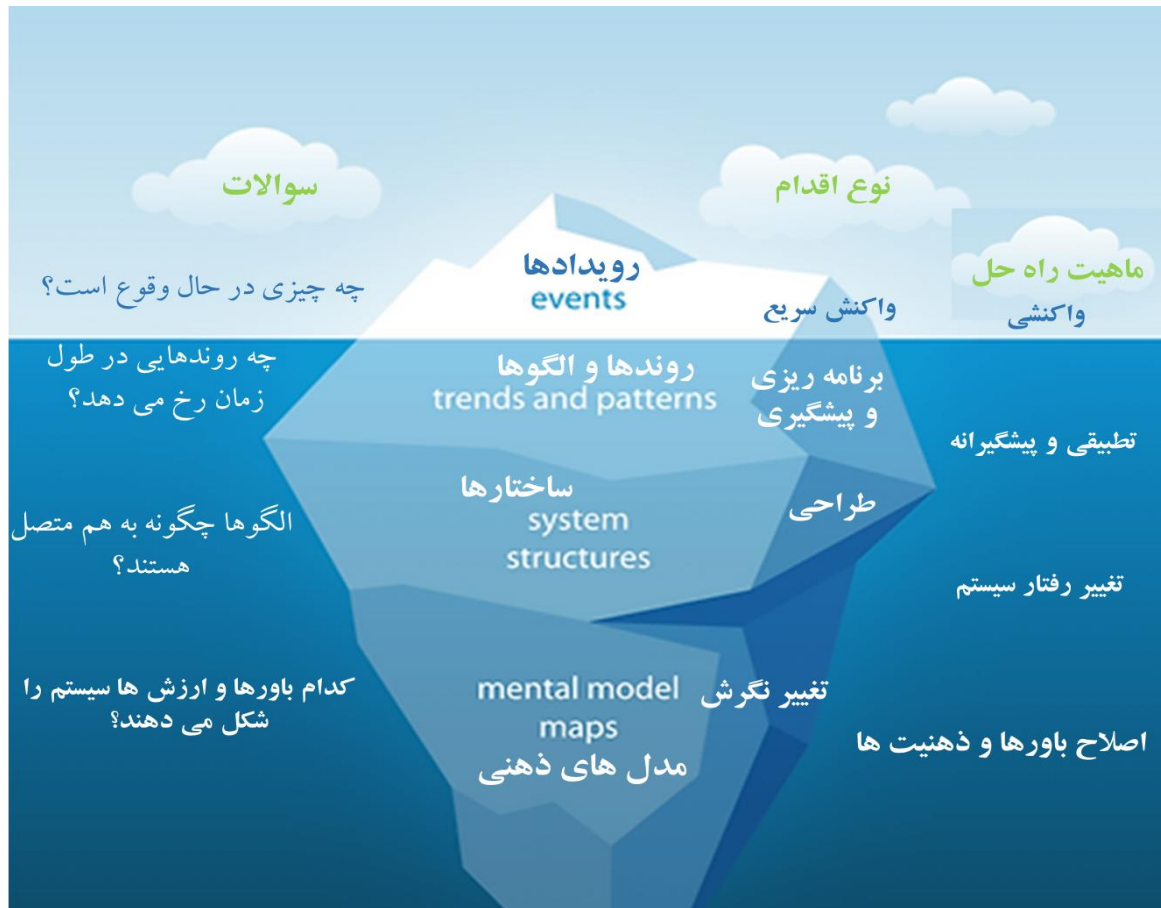
شده است که مشکلات قابل مشاهده تنها بخش کوچکی از واقعیت هستند. در حالی که بخش عمده‌ای از علل و عوامل تعیین کننده مسئله در لایه‌های زیرین پنهان هستند. براساس نظریه مدل کوه یخی، مطابق شکل (۵) مسئله در چهار سطح عمقی شامل رویداد^۴ الگوها و روندها^۵

ابزار سیستمی مدل کوه یخ

مدل کوه یخ یکی از ابزارهای تفکر سیستمی است که درک و فهم عمیق تری از مسائل را فراهم می کند. مدل کوه یخ برگرفته از پدیده فیزیکی کوه یخی در دریاست بدین نحو که معمولا بخش کوچکی از کوه یخ روی آب دیده می شود و بخش بزرگ تر آن زیر آب است. این مدل بر پایه این اصل بنا

¹ System Simulations
² Feedback Loop Diagrams
³ System Structure Analysis
⁴ Events
⁵ Patterns and Trends

ساختارها، و مدل های ذهنی^۲ بررسی و در هر سطح رویکردی متفاوت برای حل مسئله ارائه می‌شود (Senge, 1990; McLean et al., 2019; Kim, 1999). این رویکرد به سازمان‌ها و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا به جای تمرکز بر نشانه‌های سطحی، به ریشه‌های مشکلات بپردازند و راه‌حل‌های پایدار ارائه دهند.



شکل ۵- ویژگی لایه های مختلف در مدل کوه یخی

Fig. 5-Characteristics of different layers in the iceberg model

رویدادها: رویدادها بخش قابل مشاهده مسئله است که به سادگی برای مردم و رسانه ها قابل درک و لمس‌اند و مورد پیگیری عموم قرار می‌گیرند. بعد از مشاهده شدن رویداد، فشار زیادی برای حل مسئله در کوتاه‌ترین زمان ممکن به وجود می‌آید و همه منتظرند گامی برداشته شود. از این رو معمولاً راه‌حل‌های ارائه شده در این سطح از نوع واکنشی هستند که اغلب نه تنها ممکن است بهترین راه‌حل نباشند، بلکه ممکن است اثرهای مخرب بزرگتری نیز به همراه داشته باشند.

الگوها و روندها: در لایه زیرین رویدادها، الگوهایی قرار دارند که از تکرار رخدادها طی زمان شکل می‌گیرند و نشان می‌دهند که بحران‌ها یا تغییرات تصادفی نیستند بلکه حاصل روندهای پایدار و تکرار شونده هستند. شناسایی الگوها و روندها این امکان را فراهم می‌کند که رویدادهای آینده

¹ Structures

² Mental Models

مرزهای سیاسی و اداری عمل می‌کند. این چرخه از اجزای متعددی تشکیل شده که در قالب روابط بازخوردی، تبادل ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم با محیط را تنظیم می‌کنند. (Bozorg-Haddad and Seifollahi, 2019). در میان زیرسیستم‌های چرخه هیدرولوژی، حوضه آبریز جایگاه ویژه‌ای دارد. حوضه آبریز سیستمی با مرزهای هیدرولوژیک مشخص است که از اجزای فیزیکی مانند آبراهه‌ها، رودخانه‌ها، دشت‌ها، سکونتگاه‌ها، صنایع، زیستگاه‌های طبیعی و تالاب‌ها و نیز اجزای نهادی مانند سازمان‌های دولتی، تشکلهای خصوصی، نهادهای محلی و بهره‌برداران بخش‌های مختلف تشکیل شده است. کارکرد مطلوب این سیستم مستلزم تعامل هماهنگ و مؤثر اجزا و درک روابط علت و معلولی میان آنهاست. بی‌توجهی به این روابط نادیده گرفتن بازخوردهای طبیعی می‌تواند موجب بروز پیامدهای زنجیره‌ای و برهم خوردن تعادل کل سیستم شود (Senge, 1990; Meadows, 2008). نمونه بارز آن برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی است که افت سطح آبخوان‌ها، فرونشست زمین و کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آب را به دنبال دارد و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای ایجاد می‌کند.

پیچیدگی‌های ذاتی سیستم آب ضرورت اتخاذ نگاه سیستمی در مدیریت منابع آب را برجسته می‌سازد. چالش‌هایی مانند تغییر اقلیم، رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و فشارهای اجتماعی دارای ماهیتی چندبعدی و غیرخطی‌اند و تصمیمات بخشی و کوتاه‌مدت می‌توانند به تشدید مشکلات در بلندمدت منجر شوند. تفکر سیستمی با تأکید بر کل‌نگری، بازخوردها، پویایی‌های زمانی و روابط غیرخطی، امکان درک جامع‌تری از این پیچیدگی‌ها را فراهم می‌کند. در این رویکرد، مدیریت آب نه مجموعه‌ای از اقدامات منفرد، بلکه سیستمی یکپارچه تلقی می‌شود که در آن سیاست‌ها، فناوری‌ها، رفتارهای اجتماعی و ساختارهای نهادی در تعامل با یکدیگر قرار دارند. مطالعات نشان می‌دهد فقدان نگاه

پیش‌بینی شوند. از این رو اقدام‌ها و راه حل‌های مورد استفاده در این سطح می‌توانند به جای واکنشی‌بودن، از نوع پیش‌گیرانه و تطبیق با روندها باشند.

ساختارها: پایین‌تر از سطح روندها، ساختارها یعنی قوانین، سیاست‌ها، زیرساخت‌ها و روابط نهادی قرار دارند که الگوها را شکل می‌دهند. شناخت پدیده در قالب سیستم و درک ساختارهایی که الگوها را شکل می‌دهند کمک می‌کند تا بخش‌هایی از سیستم را شناسایی کند که ممکن است نیاز به تغییر و تنظیم داشته باشند. این کار از بروز مشکلات تکراری جلوگیری کند. ساختارها علت و دلیل ایجاد روندها هستند. حل مسئله در سطح ساختار سیستم با هدف تغییر روندها و در نتیجه تغییر رفتار سیستم عملی می‌شود.

مدل‌های ذهنی: در عمیق‌ترین سطح، مدل‌های ذهنی یعنی باورها، ارزش‌ها و پیش‌فرض‌هایی قرار دارند که رفتار افراد و نهادها را شکل می‌دهند. در سطح مدل ذهنی، مسئله با تغییر نگرش، هدف‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری حل می‌شود که با تغییر و بهبود مدل‌های ذهنی، زمینه ایجاد ساختارهای پایدار فراهم خواهد آمد که رفتار سیستم را بهبود می‌دهند. اصل کلیدی مدل کوه یخی آن است که برای دستیابی به راه‌حل‌های پایدار نمی‌توان تنها به سطح رخدادها واکنش نشان داد بلکه باید با تحلیل الگوها، اصلاح ساختارها و بازاندیشی در مدل‌های ذهنی، تغییراتی واقعی و پایدار ایجاد کرد (Meadows, 2008; McLean et al., 2019; Ison et al., 2013; Kim, 1999; Pahl-Wostl, 2007).

تفکر سیستمی و مدیریت منابع آب

آب در طبیعت بخشی از یک نظام پیچیده و سلسله مراتبی است که در آن کره زمین، به‌عنوان زیرسیستمی از نظام هستی، خود شامل مجموعه‌ای از سیستم‌های به‌هم‌پیوسته مانند جو، خشکی، آب، تنوع زیستی و ساختارهای اجتماعی است. چرخه هیدرولوژیک آب یکی از بنیادی‌ترین فرآیندهای طبیعی و سیستمی پیوسته و بدون آغاز و پایان است که با مرزهای طبیعی مشخص و مستقل از

نشان می‌دهند گذار از مدیریت بخشی و سازه‌ای به رویکرد سیستمی نه یک انتخاب بلکه ضرورتی حیاتی برای پایداری منابع آب است. امروزه در بسیاری از کشورها نگاه سیستمی در مدیریت حوزه‌های مختلف علوم به ویژه مدیریت اکوسیستم‌ها و منابع آب به شکل‌های متفاوتی نهادینه شده است (Yıldız, 2023).

اروپا یکی از پیشگامان در نهادینه‌سازی رویکرد سیستمی در مدیریت منابع آب است. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۰ با تصویب دستورالعمل چارچوب آب^۱ (WFD) توانست مدیریت منابع آب را از سطح اداری به سطح حوضه‌های آبریز منتقل کند. الزام به مشارکت عمومی ذی‌نفعان در فرآیند تصمیم‌گیری، در اولویت قراردادن کیفیت منابع آب و حفاظت از اکوسیستم‌ها، استفاده از ابزارهای سیستمی مانند مدل‌سازی دینامیکی، پایش کیفی و کمی منابع، و تحلیل سناریوها از مهم‌ترین مفاد این دستورالعمل بود. نتیجه این رویکرد کاهش آلودگی صنعتی، ارتقای کیفیت آب آشامیدنی و احیای تالاب‌ها بود. این تجربه نشان داد که مدیریت حوضه‌ای و نگاه سیستمی می‌تواند بحران‌های پیچیده را مهار کند (Kalis and Butler, 2001; European Parliament and Council, 2000).

ایالات متحده طی دهه‌های اخیر به‌طور جدی به سمت استفاده از ابزارهای سیستمی و مدل‌سازی پویایی سیستم در مدیریت منابع آب حرکت کرده است. در نیمه دوم قرن بیستم، این کشور پروژه‌های عظیم سدسازی و انتقال آب را اجرا کرد که در کوتاه‌مدت توانستند نیازهای کشاورزی و شهری را پاسخ دهند؛ اما در بلندمدت پیامدهای منفی همچون تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش کیفیت آب و تشدید مصرف بی‌رویه را به همراه داشتند (Gleick, 2003). همین تجربه موجب شد تا نگاه سیستمی به‌عنوان جایگزین رویکرد سازه‌ای مطرح شود و سیاست‌گذاران به اهمیت تحلیل روابط غیرخطی و بازخوردهای بلندمدت در مدیریت منابع آب پی

سیستمی اغلب به سیاست‌های ناپایدار و نتایج کوتاه‌مدت منجر می‌شود (Yıldız, 2023; Rosely and Voulvoulis, 2017; Athari et al., 2024).

امروزه با توجه به وضعیت بحرانی کمیت و کیفیت منابع آب، تشدید مسائل زیست‌محیطی، اثرهای تغییر اقلیم و تغییر الگوهای مصرف، مدیریت منابع آب بیش از هر زمان دیگری نیازمند رویکردی سیستمی، یکپارچه و مبتنی بر شناخت دقیق ساختار و پویایی‌های این نظام پیچیده است. چنین رویکردی زمینه‌ساز تدوین راهبردهای پایدار و تصمیم‌گیری‌های خردمندانه در مسیر توسعه متوازن و پایدار خواهد بود.

تجربه‌های جهانی در استفاده از رویکرد سیستمی برای مدیریت منابع آب

امروزه موضوع بحران آب یا کم‌آبی محدود به کشور یا منطقه‌ای خاص نیست، بلکه اغلب نقاط دنیا به دلایل مختلفی از جمله رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییرات اقلیمی با درجات مختلفی از تنش آبی مواجه هستند. در کشورهای در حال توسعه، نگرانی اصلی در خصوص کم‌آبی، توزیع نامناسب آب موجود، و دسترسی نداشتن به آب آشامیدنی سالم است ولی در کشورهای توسعه‌یافته چالش‌های اصلی عمدتاً در ارتباط با ساختارهای نهادی ضعیف، مسائل مرتبط با کیفیت و کمیت آب، نگرانی‌های مربوط به با صرفه بودن و هزینه‌های اقتصادی شوک‌های اقلیمی است (Alamanos et al., 2025).

شواهد و رویدادهای متعدد در سطح جهان نشان داده‌اند که رویکردهای رایج مبتنی بر احداث سازه‌های بزرگ یا مدیریت بخشی نگر و جزئی نگر به‌تنهایی قادر به حل بحران نیستند و حتی در مواردی آن را تشدید کرده‌اند. در مقابل، تفکر سیستمی با نگاه کل‌نگر، توجه به بازخوردها و مشارکت ذی‌نفعان توانسته است مسیرهای پایدار و تاب‌آور را برای مدیریت منابع آب ایجاد کند. تجربه‌های جهانی

¹ EU Water Framework Directive

و جوامع محلی با بحران اقتصادی و اجتماعی مواجه شدند (Abdullaev *et al.*, 2020). در این تجربه که سرنوشتی مشابه دریاچه ارومیه داشت، استفاده بی رویه از آب برای آبیاری مزارع، کاربرد وسیع آفت کش‌ها، سموم دفع آفات و کودهای شیمیایی برای نزدیک به ۴ دهه، بخشی از علل شکل‌گیری فاجعه زیست محیطی بود که تاکنون آثار مخرب اکولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و بهداشتی آن زندگی جمعیت نزدیک به چهار میلیون نفری این حوضه را تحت تاثیر قرار داده است. پس از فروپاشی شوروی، قزاقستان با حمایت بانک جهانی پروژه‌ای برای احیای بخش شمالی آرال آغاز کرد. ایجاد نهادهایی مانند کمیسیون بین‌دولتی هماهنگی آب (ICWC) در سال ۱۹۹۲ و ساخت سد کوک‌کارال (Kok-Aral Dam) در سال ۲۰۰۵ از مهم‌ترین گام‌ها در این زمینه بود که باعث شد سطح آب در بخش شمالی تا ۴ متر افزایش پیدا کند و شوری آب نیز به‌طور چشمگیر کاهش یابد. با بازگشت برخی گونه‌های ماهی صنعت شیلات نیز دوباره فعال و اقتصاد محلی احیا شد. این تجربه نشان داد که حتی پس از یک بحران شدید، با مدیریت حوضه‌ای، اقدامات سازه‌ای هدفمند و توجه به بازخوردهای اکولوژیکی می‌توان بخشی از اکوسیستم‌های تخریب‌شده را احیا کرد (Berndtsson and Tussupova, 2020)

حوضه ماری-دارلینگ بزرگ‌ترین سامانه رودخانه‌ای استرالیا است که بخش زیادی از آب آبیاری کشاورزی آبی استرالیا را تأمین می‌کند. برداشت بی‌رویه آب برای مقاصد کشاورزی و توسعه شهری و خشکسالی‌های مکرر باعث شد تا رودخانه‌ها و تالاب‌ها در این حوضه با افت کمی و کیفی آب روبه‌رو شود و آسیب‌دیدگی جدی اکوسیستم تبدیل به یک بحران زیست‌محیطی و اجتماعی شود (Chen *et al.*, 2021). در سال ۲۰۱۲، دولت استرالیا طرح حوضه^۱ را برای برون رفت از بحران ایجاد شده تصویب کرد. این طرح با رویکرد سیستمی برای مصارف بخش‌های مختلف سقف

برند. یکی از نوآوری‌های مهم آمریکا، استفاده گسترده از مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌ها در مدیریت منابع آب بود. این مدل‌ها امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف عرضه و تقاضا و بررسی پیامدهای سیاست‌ها را در افق‌های بلندمدت فراهم کردند. برای مثال، در مدیریت منابع آب شهری لاس‌وگاس، مدل پویایی سیستم نشان داد که کاهش مصرف فضای سبز خانگی نسبت به کاهش مصرف داخل خانه اثر بیشتری بر پایداری منابع آب دارد (Stave, 2003). در حوضه رودخانه ریوگرانده در نیومکزیکو، استفاده از مدل‌های سیستمی همراه با مشارکت جامعه توانست تاب‌آوری سیستم را در برابر خشکسالی افزایش دهد و سیاست‌های پایدارتر را شکل دهد (Tidwell *et al.*, 2004). در سطح کلان، تحلیل‌های سیستمی در مدیریت رودخانه کلرادو نشان دادند که افزایش عرضه آب از طریق سدها بدون مدیریت تقاضا، تنها به افزایش مصرف و بحران‌های جدید منجر می‌شود. این یافته‌ها سیاست‌گذاران را به سمت راهکارهایی مانند مدیریت تقاضا، بازچرخانی آب و ارتقای بهره‌وری هدایت کرد (OECD, 2015; UNESCO, 2019).

تجربه آسیای مرکزی و بحران دریاچه آرال یکی از روشن‌ترین نمونه‌های شکست مدیریت بخشی و سازه‌ای و ضرورت رویکرد سیستمی در مدیریت منابع آب است. در دوران اتحاد جماهیر شوروی و در دهه ۱۹۶۰، بیش از ۷۰ درصد جریان رودخانه‌های آمودریا و سیردریا در راستای سیاست توسعه کشاورزی آبی برای کشت پنبه و محصولات صادراتی به شبکه‌های آبیاری منحرف شد. این سیاست اگر چه در کوتاه‌مدت موفقیت اقتصادی زیادی داشت، اما در بلندمدت پیامدهای فاجعه‌باری به همراه آورد. بطوریکه سطح دریاچه آرال از ۶۸ هزار کیلومتر مربع در سال ۱۹۶۰ به کمتر از ۱۰ هزار کیلومتر مربع در سال ۲۰۱۰ کاهش پیدا کرد و شوری آب از ۱۰ گرم در لیتر به بیش از ۱۰۰ گرم در لیتر رسید و بیش از ۶۰ هزار شغل مرتبط با شیلات از بین رفت

^۱ Basin Plan

موارد متعدد این اقدامات اثربخشی کافی نداشته‌اند و توفیقات مقطعی نیز با گذشت زمان بی اثر یا منجر به بدتر شدن اوضاع شده است. برای مثال، در برخی موارد سد سازی و تلاش برای استفاده بهینه از منابع آبی منجر به خشک شدن بخش زیادی از دریاچه‌ها و تالاب‌ها شده است. حتی تقدم و تاخر در ساخت سدها، شبکه های اصلی و فرعی موجب خسارت‌های زیادی شده است. توسعه روش های نوین آبیاری و گلخانه‌ها به رغم افزایش بهره وری، افزایش تولید و ارتقای امنیت غذایی، منجر به کاهش برداشت از منابع آب نشده است (Perry, 2017). امروزه دشت‌هایی که پیشرو در توسعه فناوری‌های نوین و بهینه‌سازی مصرف آب بوده اند، به دلیل برداشت بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی، علاوه بر مواجه شدن با بحران آب در معرض بحران فرونشست قرار دارند. این موارد در حالی است که اغلب این اقدامات با اهداف و انگیزه‌های متعهدانه و استانداردهای علمی نسبتاً مناسب بوده است. ویژگی‌هایی مانند کل نگری، تعامل و ارتباط بین اجزا، چند علیتی بودن وقایع، دوراندیشی، پویایی و پیامدمحور بودن اقدامات، که از ویژگی‌ها و مصادیق تفکر سیستمی هستند، در این اقدامات مغفول بوده اند. برنامه‌ریزی‌ها و اقدامات توسعه‌ای بر اساس آمایش سرزمینی و توان اکولوژیک مناطق نبوده است. به عبارت دیگر، اغلب مسائل و مشکلات امروزی ناشی از نبود تفکر سیستمی در مدیریت و برنامه‌ریزی‌های دیروزی بوده و درمان‌های غیرسیستمی نیز بدتر از خود مرض بوده اند (Senge, 1990).

در این پژوهش، برای تحلیل جامع‌تر و دقیق‌تر وضعیت بحرانی آب ایران و ارائه راهکارهای علاج‌بخش از ابزار سیستمی مدل کوه یخ استفاده شد. در بخش‌های قبلی گفته شد که در مدل کوه یخی مسئله در چهار سطح عمقی از معلول به علت شامل رویداد، الگوها و روندها، ساختارها، و مدل های ذهنی بررسی می‌شود و رویکردها و راه‌های حل مسئله در هر سطح متناسب با مقتضیات آن سطح ارائه

برداشت مشخصی را تعیین کرد تا مصرف انسانی و کشاورزی با نیازهای زیست‌محیطی متعادل شود. علاوه بر این، با مشارکت جوامع بومی و محلی و ایجاد بازارهای آب و تجارت حقایق تخصیص منابع آب را انعطاف‌پذیرتر کرد. در مجموع این سیاست توانست بخشی از جریان‌های طبیعی رودخانه‌ها را احیا و تاب‌آوری حوضه را در برابر خشکسالی و تغییرات اقلیمی افزایش دهد. هرچند چالش‌هایی مانند فشار کشاورزی و اختلافات ایالتی همچنان باقی است (Chen *et al.*, 2021).

تجربه‌هایی از این دست در دیگر کشورها از جمله چین، هند، آفریقای جنوبی، کره و ژاپن گزارش شده‌اند که به دلیل پرهیز از طولانی‌شدن مطالب مقاله از ذکر جزئیات آنها خودداری می‌شود. بدین ترتیب تجربه‌های جهانی نشان می‌دهند که تفکر سیستمی در مدیریت منابع آب ابزاری تحلیلی نیست، بلکه رویکردی است جامع که ابعاد نهادی، اجتماعی، اکولوژیک و فناورانه را در کنار هم قرار می‌دهد. این رویکرد با تاکید و تکیه بر مدیریت یکپارچه و حوضه‌ای، مشارکت ذی‌نفعان و جوامع محلی، استفاده از ابزارهای تحلیلی سیستمی، توجه به تاب‌آوری اجتماعی و اکولوژیک و ترکیب دانش بومی و علمی امکان تصمیم‌گیری مشارکتی و سیاست‌گذاری پایدار را فراهم می‌آورد (Athari *et al.*, 2017; Rosely and Voulvoulis, 2024; Alamanos *et al.*, 2025). بدین ترتیب با توجه به تجربه‌های موجود در سطح دنیا و شرایط حاکم بر وضعیت منابع و مصارف آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان می‌توان گفت گذار از مدیریت بخشی و سازه‌ای به رویکرد سیستمی، نه یک انتخاب بلکه ضرورتی حیاتی برای پایداری منابع آب است.

تحلیل وضعیت مدیریت منابع آب ایران از منظر سیستمی

طی سالیان اخیر در مهندسی آب ایران گام‌های ارزشمند برداشته شده، زحمات شایسته‌ای کشیده شده، سرمایه گذاری‌های هنگفتی شده و توفیقات زیادی حاصل شده است. ولی شواهد و تجربه‌ها موجود نشان می‌دهد در

افزایشی را در برخی شاخص های مدیریت آب طی سالیان گذشته نشان می داد و با وجود هشدارهای کارشناسان، به آنها توجه نمی شد می توان به شرح زیر ارائه کرد:

- افت سطح آب های زیرزمینی در اثر برداشت بی رویه از منابع زیرزمینی برای مصارف مختلف.
- روند افزایشی شوری منابع آب های سطحی و زیرزمینی.
- روند کاهش میزبان بارندگی متوسط کشور.
- روند افزایشی متوسط دما در سطح ملی و جهانی.
- روند افزایشی مصرف آب در بخش های مختلف.
- گسترش سطح زیرکشت با سامانه های نوین آبیاری به جای کاهش مصرف.
- توسعه گلخانه ها بدون توجه به ظرفیت اکولوژیک و محدودیت منابع.
- کشت محصولات پرآب بر در مناطق خشک (برنج، محصولات تابستانی).
- بی توجهی به مدیریت تقاضا و تمرکز صرف بر افزایش عرضه.
- روند آشکارسازی سیاست های عرضه محور (سدسازی، انتقال آب بین حوضه ای).
- آشکارسازی وجود تعارض و تضاد بین دستگاهی و حتی درون دستگاهی.

این روندها و الگوها نشان می دادند که بحران آب در ایران نه یک حادثه مقطعی، بلکه نتیجه تداوم رفتارها و سیاست های مشابه در چندین دهه است.

سطح سوم: ساختارها

در این سطح، ساختارهای نهاد و حکمرانی قرار دارند که این روندها و الگوهای تکرار شونده را شکل می دهند و به نوعی دلایل اصلی وقوع روندها هستند. به سخنی دیگر، حکمرانی جاری در مدیریت منابع و مصارف آب عامل اصلی وقوع روندها و الگوهای ذکر شده در بخش قبلی بوده است. برای نمونه، بررسی وضعیت مدیریت آب در حوضه های زاینده رود و کارون نشان داده است با اینکه در هر دو حوضه قابلیت

می گردد. بر این اساس، مسائل مرتبط با وضعیت بحرانی آب در ایران مطابق مدل مفهومی کوه یخی ارائه شده در شکل (۲) در چهار سطح عمقی و به شرح زیر ارائه می شوند.

سطح اول: رویدادها و نشانه های قابل مشاهده

این سطح همان قله کوه یخی است، یعنی مشکلاتی که به طور مستقیم دیده و تجربه می شوند و بیشتر در رسانه ها و افکار عمومی منعکس می گردند. از جمله مسائلی که امروزه در ایران در قالب وضعیت بحرانی آب ظاهر شده و برای عموم مردم واضح و قابل لمس اند به شرح زیر هستند:

- کمبود آب آشامیدنی در بسیاری از شهرها و روستاها.
- فرونشست زمین در اغلب دشت های کشور به ویژه دشت های مرکزی.
- خشک شدن تالابها و رودخانه ها (زاینده رود، دریاچه ارومیه، هامون و ...).
- کاهش حجم ذخیره سدها و حتی خشک شدن برخی از آنها.
- کاهش کیفیت منابع آب های سطحی و زیرزمینی به دلیل ورود آلاینده های صنعتی، کشاورزی و شهری.
- افزایش تعارضات اجتماعی و استانی بر سر حقایقها.
- کاهش تولید محصولات کشاورزی در برخی مناطق به دلیل کمبود آب.
- افزایش هزینه تأمین آب شهری (نمک زدایی، انتقال بین حوضه ای).
- مهاجرت روستاییان از مناطق کم آب به شهرها.
- افزایش تنش های امنیتی و اجتماعی در مناطق بحرانی.

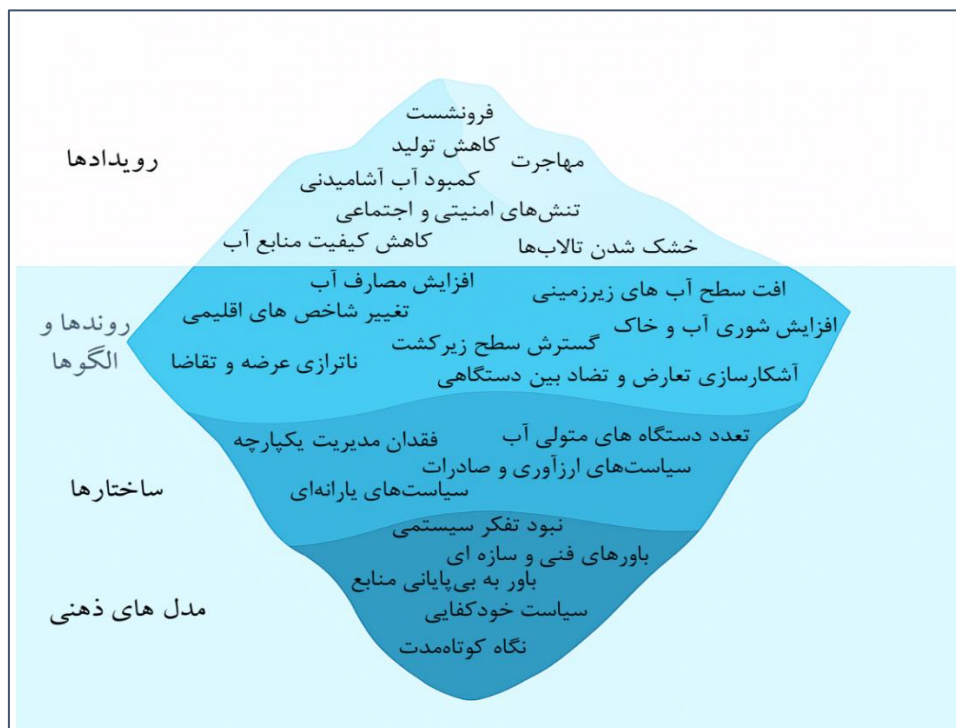
سطح دوم: روندها و الگوهای تکرار شونده

این سطح نشان دهنده رفتارها و سیاست هایی است که بارها و بارها تکرار شده اند و بحرانها را بازتولید می کنند. اصلی ترین الگوهای تکرار شونده که روندهای کاهش ی

- دستیابی به مدیریت مناسب در شرایط بحرانی وجود داشته ولی حکمرانی موجود موفق نبوده است (Najafabadi et al., 2024). از مهم‌ترین مصادیق این نوع ساختار نهادی و حکمرانی می‌توان به این موارد اشاره کرد:
- تعدد سازمان‌های متولی آب با وظایف پراکنده و متعارض.
- فقدان مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز.
- تمرکز بر پروژه‌های عمرانی به‌عنوان شاخص موفقیت مدیریتی.
- ضعف قوانین و مقررات در کنترل برداشت‌ها.
- ناکارآمدی در اجرای قوانین موجود (تحويل حجمی آب و ...).
- نبود سازوکارهای مشارکت ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان در فرآیند تصمیم‌گیری.
- درپیش گرفتن سیاست‌های یارانه‌ای (برای انرژی، آب، نهاده‌های کشاورزی)؛ مشوق برداشت بی‌رویه آب.
- سیاست‌های ارزآوری و صادرات محصولات پرآب‌بر (محصولات باغی، سبزی و تابستانی).
- توسعه بدون توجه به آمایش سرزمین؛ استقرار صنایع و کشاورزی در مناطق کم‌آب.

سطح چهارم: ذهنیت‌ها و ارزش‌های دیرین

- مدل‌های ذهنی ریشه‌های فرهنگی و ارزشی دارند که در عمیق‌ترین سطح، باورها، ارزش‌ها و ذهنیت‌هایی را می‌سازند، این باورها رفتارها و ساختارهای نهادی را شکل می‌دهند. از جمله این مدل‌های ذهنی و باورها در مدیریت منابع آب در ایران می‌توان به مواردی به شرح زیر اشاره کرد:
- باور به بی‌پایانی منابع طبیعی از جمله آب.
 - باور به خودکفایی بدون تعیین حدود و ثغور.
- بدین ترتیب دیده می‌شود مطابق شکل (۶) هریک از مصادیق وضعیت بحرانی آب که به‌صورت مشکل قابل مشاهده برای عموم ظاهر شده است، تنها همان نوک کوه یخ است که منتج از الگوهای تکرارشونده برآمده از ساختارهای نهادی و حکمرانی جزیره‌ای در لایه‌های زیرین است که خود ریشه در ارزش‌ها و مدل‌های ذهنی اجتماعی و سیاسی دارد. تحلیل صورت گرفته بر اساس مدل مذکور نشان می‌دهد که برای حل بحران آب در ایران، به جای نشانه‌های سطحی باید به ریشه‌های ساختاری و ذهنی توجه کرد. این تغییر در سیاست‌ها و پروژه‌ها باز هم موثر نخواهد بود بلکه باید تغییر در ارزش‌ها، ذهنیت‌ها و ساختارهای نهادی صورت گیرد و بدون تغییر در این سطوح، اصلاح بحران آب ممکن نخواهد بود..



شکل ۶- تحلیل ریشه‌های مصادیق بحران آب ایران بر اساس مدل کوه یخی
 Fig.6- Analyzing the Roots of Iran's Water Crisis Based on the Iceberg Model

منابع آب هستند که نقش عوامل مدیریتی پررنگ تر و تعیین کننده تر است. به عبارتی، مدیریت و برنامه ریزی منابع آب بر مبنای بهره‌برداری حداکثری از منابع آب بوده است (Mousavi *et al.*, 2017). گرچه عوامل طبیعی و اقلیمی در شرایط بحرانی امروز آب در ایران تا حدودی دخیل هستند، لیکن وضعیت بحرانی یا حتی فراتر از بحرانی آب در ایران تنها ناشی از کمبود منابع طبیعی نیست، بلکه حاصل ساختارهای نهادی، الگوهای مدیریتی و ذهنیت‌های توسعه‌ای است که طی دهه‌ها شکل گرفته‌اند (Maleki *et al.*, 2025). حتی اگر خشکسالی‌های اخیر هم رخ نمی‌داد، وقوع چنین وضعیتی در آینده‌ای نزدیک بسیار محتمل بود. همان طور که گفته شد منشأ اصلی و اساسی عوامل انسان زاد نیز ریشه در باورها و مدل‌های ذهنی دارد که حکمرانی ناموفق امروزی محصول آنهاست. نبود تفکر سیستمی در مدل‌های ذهنی و باورهای توسعه‌ای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان بخش آب بارزترین و مهم‌ترین مصداق این

جمع بندی و نتیجه گیری

امروزه وضعیت بحرانی آب در ایران فارغ از استناد به هر نوع شاخص علمی برای تعیین سطح تنش آبی در کشور، در قالب مصادیق متعدد مانند کم آبی، فرونشست، و خشک شدن سدها، چاه‌ها، تالاب‌ها و رودخانه همانند قله کوه یخی به صورت آشکار و قابل لمس و قابل مشاهده برای عام و خاص است. به عبارتی دیگر، وضعیت از سطح شاخص‌ها فراتر رفته و در قالب رویدادهای آشکار و پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و امنیتی خود را نمایان ساخته است. استمرار این روند می‌تواند امنیت غذایی، زیست‌محیطی و حتی امنیت اجتماعی و ملی کشور را با تهدید جدی مواجه کند. عوامل بسیار متنوع و متعددی موجب شده است تا مدیریت منابع و مصارف آب کشور با چالش‌ها و تهدیدهای جدی یاد شده مواجه باشد. پیش‌تر هم گفته شد این عوامل شامل دو گروه کلی عوامل طبیعی و عوامل انسان زاد مرتبط با مدیریت

تغییر و اصلاح در باورها و ذهنیت‌ها

همانطوریکه اشاره شد ریشه اصلی و اساسی بسیاری از مشکلات مدیریت آب که بصورت رویدادهایی قابل مشاهده هستند و حتی اشکالات مطرح شده در ساختارهای نهادی و حکمرانی، در باور و ذهنیت‌های سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری بوده است. پایداری و اثربخشی هرگونه برنامه اصلاحی یا راهکار پیشنهادی مستلزم اصلاح یا تغییر در این باور و ذهنیت‌هاست و بدون تغییر در این سطح، اصلاح بحران آب ممکن نخواهد بود. برخی از مصادیق این باورها در بخش قبلی بیان شدند که عمده ترین موارد آنها به شرح زیر قابل بیان هستند.

- تغییر نگرش به تفکر سیستمی
- توسعه بر مبنای توان اکولوژیک
- اصلاح نگاه کوتاه‌مدت سیاسی
- اصلاح فرهنگ مصرف و ذهنیت اجتماعی

مهم‌ترین تغییر در این مرحله، تغییر نگرش از رویکرد رایج تفکر خطی و جزئی‌نگر به تفکر سیستمی و کل‌نگر است. شاید بتوان گفت تفکر سیستمی حلقه مفقوده‌ای بوده است که نبود آن منشأ اصلی مشکلات امروزی است. تغییر رویکرد به تفکر سیستمی می‌تواند اجزای از هم جدا افتاده چرخه مدیریت آب را به هم پیوند دهد و زمینه‌ساز تحول در حکمرانی درست منابع آب شود. این رویکرد با تأکید بر کل‌نگری، بازخوردها، پویایی‌های زمانی و روابط غیرخطی امکان درک بهتر پیچیدگی‌های منابع آب را فراهم می‌آورد. با ایجاد زبان مشترک میان رشته‌ها و نهادها، بستری برای گفت‌وگوی مؤثر، تصمیم‌گیری مشارکتی و سیاست‌گذاری پایدار ایجاد می‌کند (Hjorth and Madani, 2013; Rosely) (Voulvoulis, 2024). در واقع، بهره‌گیری از رویکرد تفکر سیستمی به نوعی اتخاذ سیاست بی‌طرفی آب^۱ در حکمرانی و پرهیز از نگاه بخشی و جزیره‌ای به مسائل است که می‌تواند مسیر حرکت را از ناکارآمدی‌های موجود به سوی

مسئله است. به عبارتی، تمام رویدادهای قابل مشاهده امروزی، حاصل روندها و الگوهای تکرار شونده برآمده از ساختارهای نهادی و حکمرانی برآمده از رویکردها و باورهای جزئی‌نگر و فقدان رویکرد سیستمی دیروز بوده است. رویکردی که جامع‌نگری، تعامل و ارتباط بین اجزا، چند علیتی، دوراندیشی، پیامدمحور بودن و پویایی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن است.

راهکارهای پیشنهادی برای برون رفت از بحران

بحران‌ها معمولاً حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل هستند و تا زمانی که این عوامل به‌درستی شناسایی نشوند، ارائه هرگونه راهکار نمی‌تواند اثربخش باشد. بحران آب نیز از این قاعده مستثنی نیست. همان‌گونه که در بخش‌های پیشین و در چارچوب مدل مفهومی "کوه یخی" تشریح شد، وضعیت نامطلوب کنونی منابع آب ایران ریشه در لایه‌های عمیق‌تری مانند الگوهای ذهنی، ساختارهای نهادی و الگوهای رفتاری دارد و رویدادهای قابل مشاهده تنها نمود سطحی این عوامل هستند. راهکارهای پیشنهادی این پژوهش نیز بر همین مبنا تدوین شده‌اند؛ به این معنا که از عمیق‌ترین سطح یعنی مدل‌های ذهنی و ساختارهای شکل‌دهنده وضعیت موجود آغاز می‌شوند و تا سطح رویدادها و اقدامات اجرایی امتداد می‌یابند. تنها با چنین رویکردی می‌توان به آینده‌ای امیدوار بود که در آن آب، به‌عنوان حیاتی‌ترین منبع، به شکلی پایدار و کارآمد و عادلانه در دسترس همگان قرار گیرد. بدین ترتیب، مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه متناسب با سطح مسئله در نظریه کوه یخی ولی برعکس آنچه در تحلیل کوه یخی برای شناخت مسئله به کار می‌رود، از علت به معلول یعنی از باورها به رویدادها به ترتیب از عمیق‌ترین سطح و به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

¹ Water Neutrality Governance

مانع از شکل‌گیری رویکردهای پایدار و سیستمی می‌شود. نمونه بارز آن، پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای است که در کوتاه‌مدت نیازهای برخی استان‌ها را تأمین می‌کند، اما در بلندمدت موجب تخریب اکوسیستم‌های حوضه مبدأ و افزایش تعارضات اجتماعی می‌شود (Hjorth and Madani, 2013; Maleki and Akbari, 2025). در این راستا پیگیری‌های حقوقی و تصمیم‌گیری حاکمیتی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- توسعه بر اساس توان اکولوژیک تعیین حد و میزان استفاده از منابع طبیعی: با روی آوردن به مطالعات و پژوهش‌های کاربردی آمایش سرزمین و به‌طور اخص آمایش آب در سطح دشت‌ها و استان‌های کشور، ظرفیت حدی هر منطقه یا ناحیه به‌طور قانونی و نهادی مشخص و هرگونه سیاست توسعه‌ای در چارچوب ظرفیت‌های طبیعی منطقه و کشور تعریف و اجرا شود. بدین معنی که کشاورزی، صنعت و شهرسازی تنها در مناطقی گسترش یابند که از منظر توان طبیعی و زیست‌محیطی قابل توجیه هستند.
- تعیین پتانسیل خودکفایی: خودکفایی در تولید محصولات کشاورزی اگر بدون توجه به محدودیت‌های آبی و اکولوژیک دنبال شود، بحران را تشدید می‌کند. بنابراین لازم است تصمیم‌سازان پتانسیل خودکفایی را مشخص و تصمیم‌گیران حد خودکفایی را در قالب سناریوهای مختلف در چارچوب توان اکولوژیک و با لحاظ کردن تجارت و امنیت غذایی و امنیت ملی تعیین کنند.
- ترجیح دادن منافع ملی بر منافع گروهی، سیاسی و منطقه‌ای: بسیاری از بحران‌های آب ناشی از تصمیم‌هایی بوده‌اند که منافع کوتاه‌مدت گروه‌ها یا مناطق خاص را بر منافع ملی ترجیح داده‌اند. هسته تصمیم‌گیری باید به‌طور شفاف اعلام کند که منافع

حکمرانی مؤثر و پایدار منابع آب هموار سازد (Zhou et al., 2025). البته نهادینه‌سازی تفکر سیستمی نیازمند اصلاحات ساختاری، آموزش تخصصی، مشارکت ذی‌نفعان و تغییر در ارزش‌ها و شاخص‌های توسعه است. بدون این تحول، سیاست‌های آب همچنان در سطح نشانه‌ها باقی خواهند ماند و بحران‌ها بازتولید خواهند شد. بنابراین، تفکر سیستمی نه یک انتخاب، بلکه ضرورتی حیاتی برای آینده مدیریت آب در ایران است (Alamanos et al., 2025). علاوه بر این، بسیاری از سیاست‌های آبی در ایران تحت تأثیر ملاحظات سیاسی و اجتماعی کوتاه‌مدت هستند. پروژه‌های بزرگ سدسازی یا انتقال آب اغلب به‌عنوان نماد موفقیت مدیریتی معرفی می‌شوند، در حالی که پیامدهای بلندمدت آن‌ها بر منابع آب و محیط زیست نادیده گرفته می‌شود. این نگاه کوتاه‌مدت مانع از شکل‌گیری رویکردهای پایدار و سیستمی می‌شود. علاوه بر تغییر نگرش به تفکر سیستمی، ضروری است هسته مرکزی تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری کشور به‌طور شفاف و قاطع اراده خود را در موضوع‌های کلیدی روشن سازد. این موضوع‌ها شامل پایان دادن به بهره‌برداری بی‌حد و حصر از منابع طبیعی، بازنگری در سیاست‌های خودکفایی کشاورزی بر اساس توان اکولوژیک، ترجیح منافع ملی بر منافع گروهی، سیاسی و منطقه‌ای، پرهیز از توسعه یکجانبه سازه‌ای و سخت‌افزاری، و حرکت به‌سوی توسعه مبتنی بر آمایش سرزمین و ظرفیت‌های زیست‌محیطی است. چنین رویکردی باید بر اساس مصالح کلی و امنیت ملی تعریف شود تا مدیریت آب از یک مسئله بخشی به یک اولویت راهبردی ملی ارتقا یابد. بسیاری از سیاست‌های آبی در ایران تحت تأثیر ملاحظات سیاسی و اجتماعی کوتاه‌مدت و بدون توجه به ظرفیت‌های طبیعی و توان اکولوژیک هستند. پروژه‌های بزرگ سدسازی یا انتقال آب، تولید بیشتر و صادرات محصولات کشاورزی اغلب نماد موفقیت مدیریتی معرفی می‌شوند، در حالی که پیامدهای بلندمدت آن‌ها بر منابع آب و محیط زیست نادیده گرفته می‌شود. این نگاه کوتاه‌مدت

ملی و امنیت پایدار کشور بر هر منفعت بخشی مقدم است. در این راستا تدوین قوانین و ضوابط شفاف و قابل اجرا و پایش ضروری است.

• ایجاد هماهنگی و همگرایی بین اهداف اسناد بالادستی.

• پرهیز از توسعه یکجانبه سازه‌ای و سخت‌افزاری: تجربه نشان داده است تمرکز صرف بر سدسازی و انتقال آب بدون توجه به مدیریت تقاضا و پیامدهای زیست‌محیطی، بحران را عمیق‌تر می‌کند. بنابراین، باید روشن شود که توسعه سازه‌ای تنها بخشی از راه‌حل است و باید در کنار مدیریت نرم‌افزاری، مشارکت اجتماعی و فناوری‌های نوین قرار گیرد.

• توجه به مصالح و امنیت ملی: باید روشن شود که مدیریت آب نه یک موضوع بخشی، بلکه یک موضوع امنیت ملی است. تصمیمات باید با نگاه به مصالح کلی کشور اتخاذ شوند، زیرا بحران آب می‌تواند به مهاجرت، نابرابری اجتماعی و حتی تهدیدهای امنیتی منجر شود.

اصلاح ساختارهای نهادی و حکمرانی

پیش از این هم گفته شد که هرگونه اصلاح در ساختارهای نهادی و حکمرانی پس از اصلاح در مدل‌های ذهنی و باورها امکان‌پذیر است. ساختارهای نهادی و حکمرانی باید بر اساس اصول نگرش سیستمی برای رسیدن به حکمرانی مطلوب تغییر یابند. در این راستا، اقدامات زیر ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد:

- اصلاح ساختار حکمرانی در راستای ایجاد نهاد ملی هماهنگ‌کننده.
- مدیریت یکپارچه منابع آب.
- تمرکز بر مدیریت تقاضا.
- تدوین نظام حقوق آب به شکلی شفاف و اولویت‌بندی تخصیص.
- توسعه سامانه‌های پایش و داده‌محوری.
- بهبود نظام حکمرانی داده و آمار منابع آب.
- مشارکت اجتماعی و حکمرانی چندسطحی.

گذار از سیاست عرضه‌محور به تقاضامحور یکی دیگر از

اصلاحات ساختاری است. سیاست‌های پنج دهه اخیر عمدتاً بر مدیریت عرضه با سدسازی و انتقال آب و توسعه کشاورزی آبی متمرکز بوده‌است. رویکرد عرضه‌محور با فشار بر منابع آب و خاک موجب افت کمی و کیفی این دو نهاد حیاتی تولید و تشدید مخاطرات زیست‌محیطی مانند خشک شدن

پراکندگی اطلاعات بین نهادهای مختلف و نبود استانداردهای مشترک موجب شده تا تصمیم‌ها اغلب بر پایه داده‌های ناقص یا متناقض گرفته شود. پژوهش‌های بین‌المللی نشان می‌دهند که کیفیت تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب ارتباط مستقیم با کیفیت داده‌های هیدرولوژیک و سامانه‌های پایش دارد. به عبارتی دیگر، منابع آب را نمی‌توان مدیریت کرد مگر اینکه مشخص شود کجا هستند، چه کمیت و کیفیتی دارند و در آینده قابل پیش‌بینی چقدر متغیر خواهند بود (Stewart, 2015). به همین دلیل ایجاد پایگاه‌های داده ملی و فرابخشی که اطلاعات منابع آب سطحی و زیرزمینی، کیفیت آب، الگوی مصرف و شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی را گردآوری کنند، ضرورتی انکارناپذیر است. تجربه‌های جهانی مانند پایگاه داده سازمان فائو¹ نشان می‌دهد که طراحی چنین سامانه‌هایی بر اساس استانداردهای بین‌المللی نه تنها شفافیت و اعتماد اجتماعی را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه‌ساز هماهنگی نهادی و اتخاذ سیاست‌های پایدار در سطح ملی خواهد بود. پایش بلادرنگ داده‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین امکان ثبت تغییرات منابع آب را در زمان واقعی فراهم می‌سازد و تصمیم‌گیران را قادر می‌سازد تا بر پایه شواهد علمی اقدام کنند (Chen, 2024). همان‌طور که یونسکو در گزارش جهانی آب تأکید کرده است، داده‌های معتبر و سامانه‌های پایش مستمر زیربنای مدیریت پایدار منابع آب و مقابله با فشارهای رو به رشد بر این منابع حیاتی هستند (UNESCO, 2019). در سال‌های اخیر اسناد متعددی مانند برنامه هفتم توسعه، سند سازگاری با کم‌آبی، نقشه راه آب، سند امنیت غذایی و سند الگوی کشت تدوین و منتشر شده‌اند. هر یک از این اسناد هدف‌ها و رویکردهای خاص خود را دنبال می‌کند، اما نبود هماهنگی و همگرایی میان آنها موجب پراکندگی سیاست‌ها و کاهش اثربخشی اقدامات شده است. ضروری است یک سازوکار نهادی برای یکپارچه‌سازی

تالاب‌ها، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و فراگیر شدن پدیده فرسایش در اغلب مناطق و دشت‌های کشور شده است. تغییر رویکرد به مدیریت تقاضا و بهره‌وری، کلید اصلاح پایدار است. بدون اصلاح اساسی در سیستم حکمرانی آب، هیچ فرصتی برای اجرای راه‌حل‌های سیستمی و کاهش دادن یا پایان دادن به بحران آب در ایران وجود ندارد (Samadi Froushani, et al., 2022).

تدوین قوانین شفاف و اولویت بندی تخصیص آب یکی دیگر از موارد اصلاح ساختاری برای تدوین نظام حقوق آب است. تخصیص آب در بسیاری از مناطق به جای قوانین شفاف و پایدار بر اساس عرف و فشار اجتماعی است. این امر موجب برداشت بی‌رویه و رقابت ناسالم بین بخش‌ها شده است. قوانین باید اولویت شرب، محیط‌زیست و کشاورزی را به صورت شفاف مشخص کنند. گرچه نظام تخصیص به شدت متأثر از سنت‌ها و الگوهای تجربی استفاده از آب است، ولی مسائل پیچیده امروزی و فشارهای روبه‌رشد فعلی بر منابع آب تدوین و اجرای نظام تخصیص سنجیده را بیش از پیش ضروری می‌نماید. تدوین چنین نظامی، موجب می‌شود تا برنامه تخصیص آب در شرایط گوناگون به‌ویژه در بحرانی عملکرد خوبی داشته باشد و خود را با حداقل هزینه با تغییر شرایط تطبیق دهد (Molle and Berkoff, 2007; OECD, 2015; Gupta, et al., 2024).

مشارکت کشاورزان و جوامع محلی در مدیریت منابع آب به همراه ارتقای دانش و توانمندی مدیران محلی و کشاورزان برای اجرای سیاست‌های پایدار، اثربخشی سیاست‌ها را افزایش می‌دهد و حکمرانی چندسطحی موجب می‌شود مدیریت آب در سه سطح ملی، استانی و محلی هماهنگ شود تا تصمیمات متناسب با شرایط منطقه‌ای اتخاذ گردد (Naeem et al., 2023).

یکی از پیش‌شرط‌های اساسی در مدیریت پایدار منابع آب، دسترسی به داده‌های دقیق، معتبر و به‌روز است.

¹ FAO AQUASTAT

بنابراین، سازگاری با تغییرات اقلیمی نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت برای مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. مدیریت تقاضا، بازچرخانی آب، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم، استفاده از فناوری‌های آبیاری هوشمند در کشاورزی، توسعه آبخوانداری از جمله راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت و سازگاری با اقلیم هستند.

همانطوریکه اشاره شد، اصلاحات در سطح روندها و الگوها، نقش پیشگیرانه دارند و مانع از آن می‌شوند که بحران‌ها به سطح رویدادهای آشکار مانند فرونشست زمین یا خشکیدگی تالاب‌ها برسند. در واقع، با تغییر مسیر الگوهای تکرارشونده، می‌توان آینده‌ای پایدارتر برای منابع آب کشور رقم زد.

علاج بخشی رویدادها

در کنار برنامه‌ریزی برای اصلاحات بنیادین در سطوح عمیق‌تر مدل کوه یخی یعنی باورها، الگوهای ذهنی و ساختارهای نهادی، ضروری است که برای مدیریت پیامدهای ملموس و روزمره بحران آب نیز اقدامات مستقیم و علاج‌بخش طراحی و اجرا شود. این اقدامات نقش مهمی در کاهش فشارهای فوری بر جوامع، بخش‌های اقتصادی و محیط‌زیست دارند و باید هم‌زمان یا حتی با اولویت زمانی بیشتر، متناسب با شرایط هر مسئله، به اجرا درآیند. در این سطح، تمرکز بر اقداماتی با ماهیت کنترل و علاج بخشی است که بتوانند به سرعت اثر قابل مشاهده ایجاد کنند. از جمله این اقدامات می‌توان به مواردی نظیر؛ افزایش بهره‌وری و کاهش اتلاف در بخش‌های مختلف، اصلاح الگوی تولید و مصرف، مدیریت تقاضا، و تنوع‌بخشی به منابع آب با بهره‌گیری از رویکردهای فناورانه و نوآورانه اشاره کرد. این مداخلات باید مسئله‌محور، متناسب با ویژگی‌های هر منطقه و مبتنی بر تحلیل دقیق وضعیت باشند تا بتوانند ضمن کاهش شدت بحران، فرصت و زمان لازم برای اجرای اصلاحات عمیق‌تر را فراهم کنند. جزئیات اجرایی هر اقدام،

هدف‌ها و هم‌راستاسازی برنامه‌ها ایجاد شود تا تمامی اسناد بالادستی در چارچوبی مشترک و منسجم عمل کنند. این هماهنگی نه تنها از تعارضات بین‌بخشی جلوگیری می‌کند، بلکه منابع مالی و اجرایی کشور را به سوی تحقق هدف‌های ملی در حوزه آب و امنیت غذایی هدایت خواهد کرد.

اقدامات تطبیقی و پیشگراانه

همانطور که پیش از این بیان شد، روندها و الگوهای تکرار شونده در مدل کوه یخی بلافاصله زیر رویدادهای قابل مشاهده قرار دارند که نتیجه لایه زیرین خود یعنی ساختارهای نهادی هستند. به عبارتی دیگر، بحران‌های امروز در مدیریت منابع آب حاصل تداوم روندها و الگوهای نادرست طی زمان هستند. بدون تردید مدیریت پایدار منابع آب نیازمند اصلاح روندها و الگوهای مصرف، تولید و تصمیم‌گیری است. ماهیت راه‌حل‌ها و اقدامات اصلاحی در این سطح، از نوع پیشگیری و تطبیق است تا چرخه‌های مخرب به چرخه‌های سازگار تبدیل شوند. مهم‌ترین اقدام‌ها در این مرحله عبارت‌اند از:

- اصلاح الگوی مصرف و تقاضا: لازم است روند مصرف خانگی، کشاورزی و صنعتی از الگوی پرمصرف به الگوی بهره‌ور، از طریق آموزش، قیمت‌گذاری واقعی و فناوری‌های کم‌مصرف تغییر یابد و اصلاح شود.
- اصلاح الگوی کشت و تولید: در این راستا جایگزینی محصولات پربار با محصولات سازگار با اقلیم و بازار، و هدایت روندهای تولید به سمت بهره‌وری و ارزش افزوده بیشتر می‌تواند بسیار موثر باشد.
- اصلاح روندهای توسعه شهری و صنعتی: برنامه‌ریزی و اقدام عملی برای جلوگیری از تمرکز صنایع آب‌بر در مناطق خشک و هدایت توسعه به مناطقی با ظرفیت اکولوژیک مناسب توصیه می‌شود.
- سازگاری با شرایط اقلیمی: بحران آب در قرن ۲۱ بیش از هر چیز با تغییرات اقلیمی گره خورده است.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم که با پیشنهادات خود موجبات ارتقای کیفی مقاله را فراهم کردند، سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده نسخه منتشر شده مقاله را خوانده و با آن موافقت کرده است.

بسته به ماهیت مسئله و شرایط محلی، قابل طراحی و برنامه‌ریزی است. اما نکته قابل توجه در اینجا این است که این اقدامات لازم است با رویکرد سیستمی و در امتداد اصلاحات ساختاری و ذهنی قرار گیرند، تا از تکرار چرخه بحران جلوگیری شود.

در مجموع و با عنایت به مطالب عنوان شده می‌توان گفت بحران آب ایران چالشی است ملی چندبخشی و اساسی‌ترین اقدام تصمیم به تغییر رویکرد از بخشی‌نگری و جزئی‌نگری به رویکرد کل‌نگر تفکر سیستمی است. تجربه‌های جهانی نشان دادند که تفکر سیستمی در مدیریت منابع آب رویکردی است جامع که با تاکید و تکیه بر مدیریت یکپارچه و حوضه‌ای، مشارکت ذی‌نفعان و جوامع محلی، استفاده از ابزارهای تحلیلی سیستمی، توجه به تاب‌آوری اجتماعی و اکولوژیک امکان تصمیم‌گیری مشارکتی و سیاست‌گذاری پایدار را فراهم می‌آورد. بدین ترتیب با توجه به تجربه‌های موجود و شرایط حاکم بر وضعیت منابع و مصارف آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان می‌توان گفت گذار از مدیریت بخشی و سازه‌ای به رویکرد سیستمی، نه یک انتخاب بلکه ضرورتی حیاتی برای پایداری منابع آب است.

منابع

- Abdullaev, I., Wegerich, K., and Kazbekov, J. 2020. History of water management in the Aral Sea basin. *Water for sustainable development in Central Asia*. 8–24.
- Ackoff, R. L. (1970). *A Concept of Corporate Planning*. Wiley-Interscience.
- Alamanos, A., Xenarios, S., Assubayeva, A., et al. 2025. Systems-thinking innovations for water security. *Frontiers in Water*, 6:149269
- Alexander, David E. (1999). *Encyclopedia of Environmental Science*. Springer. ISBN 0-412-74050-8.
- Athari, Z., Pezeshki Rad, G., Abbasi, E., Alibaygi, A., & Westholm, E. (2017). Designing a model for integrated watershed management in Iran. *Water Policy*, 19(6), 1143–1159.
- Barbrook-Johnson, P., Penn, A.S. (2022). *Systems Mapping. How to build and use causal models of systems*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01919-7_4
- Berndtsson, R.; Tussupova, K. (2020). The Future of Water Management in Central Asia. *Water*, 12(8), 2241. <https://doi.org/10.3390/w12082241>
- Bozorg-Haddad, O. and Seifollahi, S. (2019). *Introduction to Uncertainty Analysis in Water Resources Systems*. Tehran University Press

- Chen, Y. (2024). Real-time data monitoring of water resources environment based on computer remote data collection and image analysis. *Optical and Quantum Electronics*, 56(618). <https://doi.org/10.1007/s11082-024-05618-7>
- Chen, Y., Colloff, M. J., Lukasiewicz, A., & Pittock, J. (2021). A trickle, not a flood: Environmental watering in the Murray–Darling Basin, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 72(5), 601–619. <https://doi.org/10.1071/MF20172>
- European Parliament and Council. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73. Available at: EUR-Lex
- Faghihipour, J. and Keshavarz, M. (2019). *Systems Thinking of Leadership as the Foundation of the Organization*, Tehran, Dar Al-Fonun Publications, First Edition.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (n.d.). AQUASTAT – FAO’s global information system on water and agriculture. Retrieved from <http://www.fao.org/aquastat>
- Grigg, N. S. (2023). Systems engineering and water resources management: A closer relationship is needed. *Systems Engineering*, 26(5), 557–570. <https://doi.org/10.1002/sys.21725>
- Gleick, P. H. (2003). Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. *Science*, 302(5650), 1524–1528.
- Gupta, J., Müller, A. B., Bosch, H., van Vliet, L., & Karg, A. (2024). SDG 16 and water (re)allocation: Promoting the rule of law for water justice. *Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs*. United Nations.
- Hjorth, P., & Madani, K. (2013). Systems Analysis to Promote Frames and Mental Models for Sustainable Water Management. In *Sciforum Electronic Conference Series (Vol. 3)*. Sciforum.net. <https://doi.org/10.3390/wsf3-f003>
- Ison, R., Blackmore, C., & Iaquinto, B. (2013). Managing systemic change: systems thinking and policy making in the water sector. *Water Policy*.
- Kallis, G., and Butler, D. (2001). The EU Water Framework Directive: Measures and implications. *Water Policy*, 3(2), 125–142. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(01\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00007-1)
- Kim, D. H. (1994). *Systems Archetypes II: Using Systems Archetypes to Take Effective Action*, Vol. 2. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Kim, D. H. (1999). *Introduction to Systems Thinking*. Pegasus Communications.
- Loucks, D. P., and van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Cham: Springer.
- Maleki Ghaleh, H., Ardakanian, R., Bagheri, A. (2025). Diagnosis of Existing Laws Affecting Water Resources Management in Iran with a System Dynamics Approach. *Iranian Water Resources Research*. Volume 21, Issue 3 - Serial Number 75
- Maleki P. and Akbari, M. (2025). Requirements for Establishing an Effective Governance System for Water and Soil Resources in Iran: A Systematic Review. *Iranian Water Resources Research*. Volume 21, Issue 3 - Serial Number 75
- McLean, S., Gemma J. M., Adam, H., Karl, D., Colin, S. and Paul M. S. 2019. Beyond the Tip of the Iceberg: Using Systems Archetypes to Understand Common and Recurring Issues in Sports Coaching. *Sec. Physical Education and Pedagogy*. Volume 1, <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00049>
- Meadows, D. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing.
- Mokhtari, Gh. 2015. *Systems thinking; Principles, Tools and Methods*. University of Ghom Press
- Molle, F., & Berkoff, J. (2007). *Water resources allocation: Policy and socioeconomic issues in agriculture*. Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Mousavi, S J. *Water resources Management; A System Approach*. 2017. Amikabir University of the technology Press.
- Nabiafjadi, S., Sharifzadeh, M., Shabanali Fami, H., Ahmadvand, M. (2024). A Comparative Analysis of Good Water Governance in Iran’s Water-Poor Basins. *Water Resources Management*, 38, 6025–6044.

- Naeem, K.; Zghibi, A.; Elomri, A.; Mazzoni, A.; Triki, C. A Literature Review on System Dynamics Modeling for Sustainable Management of Water Supply and Demand. *Sustainability* 2023, 15(8), 6826. <https://doi.org/10.3390/su15086826>
- Nile S. Grigg, 2024, Systems engineering and water resources management: A closer relationship is needed, *Systems Engineering*, Volume 27, Issue 2, pp: 440-444, <https://doi.org/10.1002/sys.21725>
- OECD. (2015). *Water resources allocation: Sharing risks and opportunities*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development Publishing.
- Pahl-Wostl, C. (2007). *Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change*. Water Resources Management.
- Prajapati, S. 2021. Synthetic Thinking vs Analytical Thinking. *Innopreneurs*. <https://innopreneurs.substack.com/p/synthetic-thinking-vs-analytical>
- Perry, C. 2017. Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. FAO. Rome. Italy.
- Rosely, W.I.H., Voulvoulis, N. 2024. System Thinking for Sustainable Water Management: The Use of System Tools in Sustainability Transitions. *Water Resour Manage* 38, 1315–1337 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03723-6>
- Ross D. Arnold, Jon P. Wade, 2015. A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach, *Procedia Computer Science*, Volume 44, Pages 669-678, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- Samadi-Foroushani, M., Keyhanpour, M.J., Musavi-Jahromi, S.H., & Ebrahimi, H. (2022). Integrated Water Resources Management Based on Water Governance and Water-food-energy Nexus in Iran. *Water Resources Management*, 36, 6093–6113.
- Senge, P. M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art & Practice of The Learning Organization*. Currency. Amazon
- Stave, K. A. (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management*, 67(3), 303–313.
- Stewart, B. (2015). Measuring what we manage – the importance of hydrological data to water resources management. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 366, 80–85. <https://doi.org/10.5194/piahs-366-80-2015>
- Tidwell, V. C., Passell, H. D., Conrad, S. H., & Thomas, R. P. (2004). System dynamics modeling for community-based water planning: Application to the Middle Rio Grande. *Aquatic Sciences*, 66(4), 357–372.
- U.S. Bureau of Reclamation. (2022). *Colorado River Simulation System (CRSS) and Colorado River Mid-term Modeling System (CRMMS): General Modeling Information*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Retrieved from. <https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/riverops/model-info.html>
- UNESCO. (2019). *World water development report 2019: Leaving no one behind*. Paris: UNESCO Publishing.
- Yazdani, N., & Mohammadjani, E. (2014). Analysis of the water crisis in Iran and the requirements for its management. *Ravand Quarterly*, Vol. 21, No.65–66, pp:117–144.
- Yıldız, D. (2023). Why is a systems-thinking approach needed to address the global water problems? *World Water Management, Diplomacy & Science News*. TRIS: 12018-10030
- Zhou, K., Puchol-Salort, P., Pluchinotta, I., Beriro, D., Zimmermann, N., & Mijic, A. (2025). Systems thinking in water neutrality governance: Moving from system failures to resilient urban water systems. *Journal of Cleaner Production*, 512, 145655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145655>

Research Article

Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation

Arab Atefeh¹, Ahmadi Hojjat^{✉2}, Haghdoost Nourali², Nourani Bahram³

1- Phd Candidate, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

2- Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

3- Department of Water Engineering, University of Tabriz, Iran

(✉ Corresponding Author: hojjat.a@gmail.com)

ARTICLE INFO

Received: 24 December 2025

Revised: 17 February 2026

Accepted: 19 February 2026

Available Online: 18 April 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Arab, A., Ahmadi, H., Haghdoost, N., Nourani, B., (2026). Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation. V.26, No.100, P: 105-127

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.371869.1635>

Extended Abstract

Introduction

Earth dams are the most common type of dams due to their cost-effectiveness, and they make up the majority of the world's dams. Water seepage is one of the most important issues in the design and safety of earth dams, as it can lead to increased pore water pressure, reduced shear strength, the occurrence of piping phenomena, and ultimately dam failure. Statistics show that approximately 35% of dam failures are directly or indirectly related to seepage. This risk is particularly exacerbated in dams built on permeable alluvial foundations.

To control seepage, various measures are employed, including drainage systems in the dam body and foundation. Blanket drains, toe drain, and chimney drain, whose main roles are to collect leaked water, reduce pore water pressure, and lower the water table. Although the use of chimney drains has become more common in recent years, new studies show that horizontal drains, especially their length, can have a significant impact on reducing pore water pressure and improving dam stability, while parameters such as drain thickness, height, and angle play a lesser role.

Seepage in earth dams is examined using numerical and experimental methods. Numerical methods are fast and cost-effective, but laboratory studies are of high importance as a basis for validating numerical results and for a detailed examination of the dam's actual behavior. Given that the impact of different drainage geometries with the same length has not been fully investigated to date, this study designs a laboratory model of a homogeneous earth dam to examine the effect of various drainage types with equal lengths and different geometries on seepage discharge and flow patterns in an earth dam located on an alluvial bed.

Methodology

In this study, a homogeneous earth dam was constructed using glass bead material, which contains glass particles with sizes ranging from 0.7 to 3.5 millimeters. The dam model was designed in a drainage box with dimensions of 150 cm length, 10 cm width, and 60 cm height, and included 5 piezometers to monitor changes in pore water pressure under the dam structure. The purpose of this experiment was to investigate the effect of the downstream drain's geometric shape on seepage from the dam. To observe the water seepage, artificial sunset yellow dye and potassium permanganate were used to visualize the flow lines. An air tank was also placed above the laboratory box to keep the water level in the dam constant.

The hydraulic conductivity of the material was estimated to be 0.128 cm/s using the constant head permeability test. The height of the constructed dam was 25 cm above the level of the permeable layer, which, considering the location of the overflow weirs, resulted in a reservoir water level of approximately 22 cm. The crest width was 10 centimeters, and the upstream and downstream body slopes were equal to the dam width at the foundation, which was 130 centimeters. Figure 1 illustrate the details of the constructed dam.

To study the effects of different drain system and their geometry, three different drain system involving blanket, toe and chimney drain were studied and compared with the basic state of an earth dam with no drain system. The length of all implemented drains was almost identical equal to 21 cm. The dimensions of the drains were presented in table1. The coarse gravel was used to create the employed drains. To avoid any mixing of the fine glass beads within the coarse materials of drains, a fine mesh fabric was placed around the drain system. The thickness of the gravels in the drains was 3 cm.

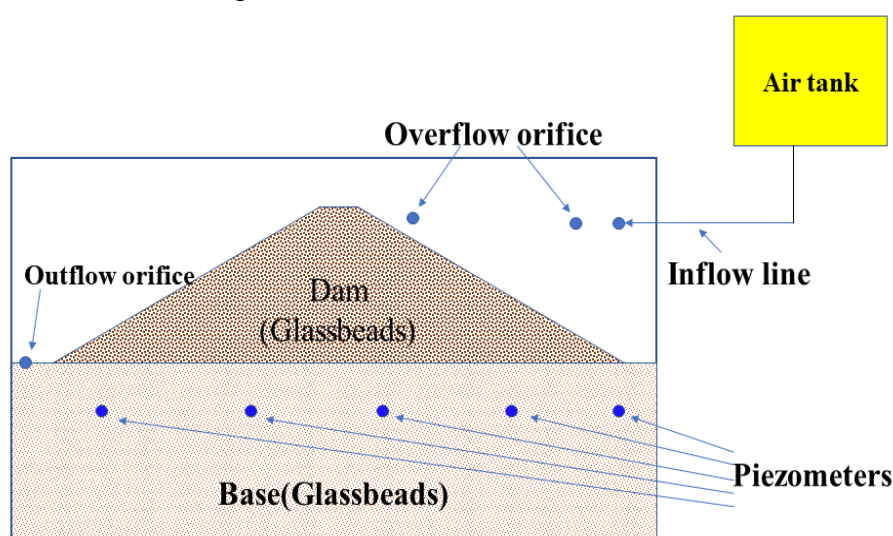


Fig. 1 - Details of the constructed embankment dam along with an image of the constructed earthen dam model

Table1. Details of the employed drainage systems

| Type | Blanket | Toe | Chimney |
|---------------------------|---------|-----|---------|
| parameters | | | |
| Length (cm) | 21 | 21 | 21 |
| Height (cm) | 3 | 8 | 10 |
| Volume (cm ³) | 630 | 945 | 1170 |

Results and Discussion

The summary of the achieved results were presented in figure 2 in terms of pore pressure in the base of the dam. In this figure each curve belongs to the specific drain. As seen, the toe and blanket drains have similar effect in removing of pore water pressure, while the chimney drain is very effective, comparing to other drain.

Additionally, the seepage line was investigated in the toe and blanket types to evaluate the seepage velocity and their lengths. The results are shown in figure 3. As seen in this figure, the seepage path through the earth dam from the identical inlet point has different outlet point. The length of the seepage path in toe drain and blanket drain significantly is shorter than that in no-drain. Among toe drain, blanket drain, and chimney drain , the toe drain has the shortest seepage path.

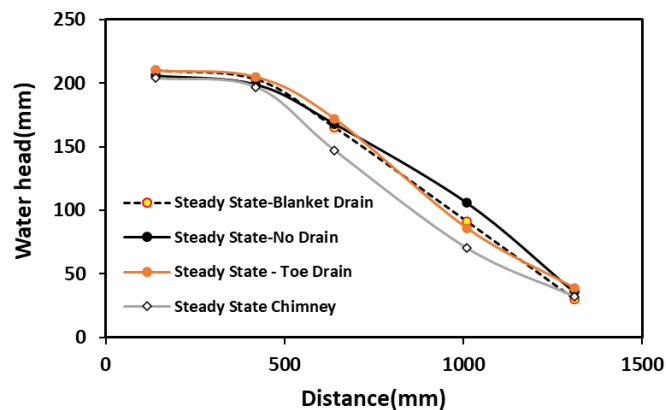


Fig. 2- the effect of drains in damping of developed pore water pressure along the dam

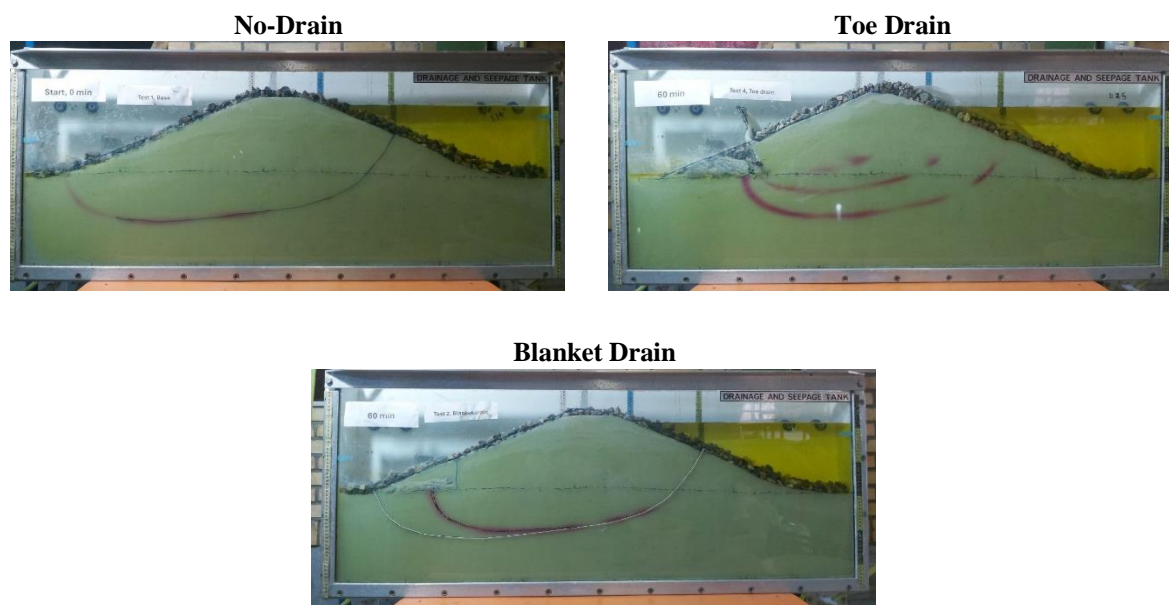


Fig. 3. The seepage line through the earth dam under different drain conditions comparing to the no-drain state

Conclusions

The objective of this study is to evaluate the performance of various drainage systems in controlling seepage and mitigating pore water pressure within a homogeneous earthen dam constructed on an alluvial foundation under laboratory conditions. To quantitatively assess the influence of drainage systems on the seepage rate and the dam's hydraulic behavior, three drain configurations: horizontal or blanket drains, toe drains, and chimney drains, were investigated. Their performance was subsequently compared to a control scenario with no drainage system. The findings of this investigation demonstrate that chimney drains are superior comparing to other drain types in reducing pore water pressure; however, they concurrently lead to a higher rate of seepage. When drain length is held constant, horizontal drains are preferable to toe drains. Nevertheless, the implementation of toe drains can enhance the structural stability of the dam body due to the incorporation of a substantial volume of coarse-grained material. This particular aspect, however, warrants further investigation to enable a quantitative comparison of its outcomes with those of other drainage configurations. Based on a value analysis conducted by considering three parameters—pore water pressure reduction, seepage discharge, and the volume of material utilized as a cost factor—the chimney drain yields

the highest value, whereas the toe drain yields the lowest. It is noteworthy that the differential in value between the chimney drain and the toe drain is marginal.

Keywords: Blanket Drain, Chimney Drain, Permeable base, Seepage Rate, Toe Drain

Acknowledgement

The author would like to thank all referees of the present study.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

The author has read and agreed to the published version of the manuscript.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.371869.1635>

نوع مقاله: پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در بدنه سد خاکی همگن واقع بر بستر آبرفتی

عاطفه عرب^۱، حجت احمدی^۲، نورعلی حق دوست^۳، بهرام نورانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب و شکست سدهای خاکی، پدیده نشست و پیامدهای جانبی ناشی از آن است. کنترل نشست نقش اساسی در افزایش ایمنی و پایداری سدهای خاکی دارد. هدف از این پژوهش، مقایسه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در کنترل نشست و کاهش فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی همگن ساخته شده روی بستر آبرفتی است. در این مطالعه، یک مدل فیزیکی از سد خاکی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر واقع بر بستر آبرفتی همگن به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر ساخته شد. به منظور بررسی کمی تأثیر زهکش‌ها بر میزان نشست و رفتار هیدرولیکی سد، سه نوع سیستم زهکشی شامل زهکش افقی، زهکش پنجه و زهکش دودکشی ساده بررسی و نتایج آنها با حالت بدون زهکش مقایسه شد. پارامترهای اصلی شامل دبی نشست، مسیر جریان و فشار آب منفذی در زیر بدنه اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در داده‌های حاصل از پیژومترهای به کار رفته در بدنه سد خاکی مورد مطالعه، زهکش دودکشی عملکرد بسیار بهتری نسبت به زهکش پنجه از خود نشان می‌دهد. این در شرایطی هست که به‌طور متوسط مقدار فشار آب منفذی در پی را به حدود ۲۵ درصد نسبت به دیگر حالات کاهش داد. در این میان، زهکش افقی و زهکش پنجه نتایج مشابهی را در خصوص کاهش فشار آب منفذی از خود نشان دادند. بررسی سرعت نشست و حرکت آب در داخل بدنه سد برای دو حالت زهکش افقی و پنجه با حالت بدون زهکش نیز مقایسه شد و نتایج این بررسی نشان داد که در زهکش پنجه سرعت حرکت آب به میزان جزئی حدود ۲ درصد بیشتر از زهکش افقی است و نسبت به حالت بدون زهکش سرعت جریان ۱۰ درصد بیشتر است. با این حال، طول مسیر نشست به میزان ۲۶ درصد کوتاه تر شده است. نتایج این پژوهش در انتخاب سیستم مناسب زهکش برای سدهای خاکی همگن موثر و مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بستر نفوذپذیر، زهکش افقی، زهکش پنجه، زهکش دودکشی، دبی نشست

مقدمه

به دلیل ماهیت دانه‌ای مصالح تشکیل‌دهنده و متخلخل بودنشان در برابر نفوذ آب مقاوم نیستند به طوری که بخش‌های هسته رسی آن نیز قابلیت عبور را در گرادیان‌های بالای هیدرولیکی دارد (Liu et al., 2019). بنابراین مخاطرات و اثرهای ناشی از ورود آب به بدنه سد خاکی

تقریباً ۷۰ درصد از سدهای جهان یا مصالح خاکی ساخته شده‌اند (Mohamad et al., و Javani et al., 2015). این سازه‌ها با اینکه در برابر نیروهای خارجی و حتی زلزله بسیار مقاوم‌اند (Zheng et al., 2021)

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه ارومیه، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران (تویسنده مسئول: Email: hojjat.a@gmail.com)

^۳ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران

^۴ دانش آموخته دکترای مهندسی آب-سازه های آبی، دانشگاه تبریز، ایران

شبیه‌سازی فیلتر و زهکش در برآورد نشت در سدهای خاکی نشان دادند افزایش میزان گرادیان هیدرولیکی در نزدیکی دیوار آب‌بند می‌تواند به ایجاد رگاب بینجامد و در این خصوص لازم است برای مهار آن تدبیری اندیشید. در این بین، بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی مصالح بدنه سدهای خاکی و استفاده از مشخصات درست آن در تحلیل‌های عددی و در به‌دست آوردن نتایج قابل اعتماد تاثیر بسزایی دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2017.a) نشان دادند که مطالعه نشت در سدهای خاکی مستلزم بررسی و تخمین مناسب از توابع هدایت هیدرولیکی مصالح است به‌طوری که برای تعیین موقعیت دقیق خط نشت لازم است تابع هیدرولیکی مصالح پوسته یا فیلتر به‌جای مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به‌کار گرفته شود. استفاده از تابع هدایت هیدرولیکی، به‌جای هدایت هیدرولیکی اشباع، می‌تواند تا ۲۰ برابر مقدار دبی عبوری از بدنه سد خاکی را دقیق‌تر نشان دهد (Ahmadi et al., 2017.b).

سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی تمهیداتی هستند که برای جمع‌آوری و هدایت آب‌های نشت‌یافته به نواحی پایین‌دست طراحی می‌شوند و به اجرا در می‌آیند (Mahmoud et al., 2016). "زهکش‌ها را می‌توان با توجه به شکل و موقعیت آنها به سه زهکش پنجه‌ای، افقی و دودکشی طبقه بندی کرد (Mahmoud et al., 2024). در زهکش‌های افقی که در گذشته در سدهای خاکی همگن و کم ارتفاع به کار می‌رفت، یک لایه زهکشی افقی در زیر ناحیه پایین‌دست سد قرار می‌گرفت و هدف آن جمع‌آوری آب نشتی و هدایت آن به خارج از بدنه سد بود (Mahmoud et al., 2024). زهکش‌های افقی با جمع‌آوری و هدایت آب نشت یافته دو عملکرد اصلی دارند: (۱) کاهش میزان نشت کل و (۲) پایین آوردن سطح نشت در پایین‌دست و در نتیجه کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی که مهم‌ترین عامل در شروع پدیده رگاب است (Sazzad and Islam, 2019). استفاده از زهکش افقی در عمل رایج است اما

اجتناب‌ناپذیر است. این امر موجب شده است تا مطالعه پدیده نشت و عبور آب از بدنه سدهای خاکی اهمیت یابد. به عبارت دیگر، مطالعه نشت یا تراوش یکی از مهم‌ترین مطالعات در طراحی سدهای خاکی است که در آن مقدار آب تراوش شده از سد، مقدار و توزیع فشار آب منفذی در قسمت‌های مختلف بدنه و پی، شیب یا گرادیان هیدرولیکی و سرعت حرکت آب تعیین می‌گردد. قابل توجه است که بسیاری از خرابی‌های سدها، به‌ویژه در سدهای خاکی همگن و ناهمگن، اگر سرعت حرکت آب زیاد باشد منجر به جابه‌جایی ذرات خاک می‌شود. این پدیده رگاب شناخته می‌شود که عامل مهمی در تخریب سدهای خاکی است (Zhang et al., 2009). آمارها حدود ۳۵ درصد از شکست سدها را به مسائل مربوط به نشت نسبت می‌دهند (Garg et al., 2013). حالت‌های مختلف خرابی به طور مستقیم یا غیرمستقیم با نشت ارتباط دارند، به‌طوری که ۱۵ درصد از خرابی‌ها در بدنه سدهای خاکی ناشی از لغزش بدنه است که طور مستقیم با افزایش فشار آب منفذی ناشی از عبور آب از بدنه سد مرتبط است (Rahimi, 2015).

فرسایش داخلی سدها پدیده‌ای است پنهان که می‌تواند منجر به خرابی و ایجاد فاجعه‌ای غیرمنتظره برای سد شود و لازم است بازرسی ایمنی برای سدهای خاکی-سنگی صورت گیرد (Zhang et al., 2022). روش‌های مختلفی برای کنترل و جمع‌آوری جریان عبوری از بدنه سد ابداع و ارائه شده است. رحیمی (Rahimi, 2015) به‌کارگیری انواع مختلفی از روش‌ها مانند استفاده از ترانشه رسی، پتوی رسی و انواع زهکش‌ها را در کنترل و هدایت مطمئن جریان نشت از بدنه سدهای خاکی پیشنهاد کرده است. نصرالهی (Nasrolahi, 2011) با بررسی ترکیب‌های مختلف عمق ترانشه و بلانکت رسی برای کاهش نشت از سد خاکی ستارخان اهر به این نتیجه رسید که ترکیب پتوی رسی و ترانشه آب‌بند میزان نشت از پی را کمتر می‌کند. موهبت‌زاده و همکاران (Mohebatzadeh et al., 2011) با بررسی

کمی‌سازی اثرهای آن بر پارامترهای مختلف نشت در شرایط مختلف، نیازمند مطالعات دقیق است. تقاطع خط فریاتیکی با شیب پایین‌دست، پایداری سدخاکی را به دلیل گرادیان خروجی زیاد تحت تاثیر قرار می‌دهد (Shirazi et al., 2023). زمانی که خاکریز سد ناهمگن است یا ناحیه پایین‌دست سدخاکی نفوذ پذیری مشکوک دارد، از زهکش افقی برای نگهداری خط فریاتیکی داخل بدنه سد استفاده می‌شود تا امکان زهکشی را به خاکریز و فونداسیون بدهد و بدین ترتیب رگاب از داخل آنها محدود شود. از این رو خط فریاتیکی نباید شیب پایین‌دست را قطع کند (Mahmoud et al., 2016). در مطالعه‌ای، اثر مشخصات زهکش افقی بر رفتار سدهای خاکی ساخته شده روی بستر نفوذناپذیر بررسی شد که در آن سدخاکی همگن را با زهکش افقی در نظر گرفتند. دقت در نتایج به دست آمده مشاهده شد، با تغییر ضخامت زهکش تغییر چندانی در خط نشت به وجود نمی‌آید. تنها با دو برابر شدن ضخامت زهکش، مقدار اندکی فشار آب حفره‌ای تغییر می‌کند. همچنین معلوم شد با افزایش ضخامت زهکش مقدار دبی عبوری از محور مرکزی سد تغییر چندانی نداشته است و بیشترین افزایش در دبی زمانی بوده است که ضخامت زهکش دو برابر شده و دبی به مقدار ۵ درصد افزایش پیدا کرده است (Calamak et al., 2018). در برخی از منابع معتبر علمی استفاده از زهکش‌های پنجه و افقی محدود به سدهای با ارتفاع کمتر از ۲۵ متر اعلام شده است در سدهای مدرن کاربرد زهکش‌های دودکشی مرسوم است (Rahimi, 2018). با این همه، طراحی این زهکش‌ها بر اساس سد خاکی واقع بر بستر نفوذناپذیر ارائه شده است. بررسی عملکرد زهکش‌های پنجه با وجه قائم و شیب‌دار در سد خاکی ساخته شده روی بستر نفوذناپذیر نشان می‌دهد عملکرد زهکش‌های با وجه مایل بهتر از عملکرد زهکش‌های با وجه قائم است (Sazzad and Islam, 2019). مطالعات اخیر نشان داده است طول زهکش افقی می‌تواند تاثیر بهتری نسبت به ارتفاع یا ضخامت انواع زهکش‌ها داشته باشد

محققان معتقدند زمانی که سد روی بستر آبرفتی نفوذپذیر احداث گردد، خطرهای ناشی از نشت افزایش می‌یابند (Omofunmi et al., 2017). بررسی‌ها در طراحی زهکش‌ها در مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این مطالعات روی سدهای همگن یا ناهمگنی بوده است که روی پی‌های نفوذناپذیر بنا شده‌اند. معدود مطالعات عملکرد زهکش‌ها روی بستر نفوذپذیر محدود به ارائه روش‌های طراحی برای یک زهکش خاص مانند زهکش دودکشی است (Djehiche

برابر ۲/۵: ۱ و عرض سد در محل پی برابر با ۱۳۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. روند ساخت بدین ترتیب بود که ابتدا بخش پی سد به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر به صورت اشباع ساخته شد. در این حالت تانک به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر با آب حاوی مقدار بسیار اندکی دترژانت پر شد. دلیل اضافه شدن دترژانت حذف بار الکتریکی احتمالی از ذرات گلس‌بید و جلوگیری از حبس هوا در بین ذرات بود. ذرات گلاس‌بید به صورت یکنواخت داخل آب ریخته شد و با یک میله فلزی این ذرات به هم زده می‌شد تا لایه‌ای یکنواخت از ذرات روی هم رسوب کنند. پس از ساخت بخش پی، قسمت بدنه سد نیز به روش مشابه ساخته شد. با این تفاوت که بدنه سد در لایه‌های ۵ سانتی‌متری اجرا شد. برای این کار لایه آب به ارتفاع ۵ سانتی‌متر در هر مرحله در تانک بالا آورده می‌شد و ذرات گلاس‌بید در داخل تانک ریخته می‌شد و به کمک میله فولادی به تراکم یکنواخت می‌رسید. پیش از اجرای لایه بعدی، شیب بدنه مطابق با نقشه بدنه سد، که پیشتر در سطح شیشه‌های مدل ترسیم شده بود، اجرا می‌شد و به منظور پایداری و تثبیت آن لایه‌ای نازک از گراول روی بدنه چیده شد. هدایت هیدرولیکی مصالح بدنه و پی به کمک آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت ۰/۱۲۸ سانتی‌متر در ثانیه تخمین زده شد. شکل (۱) جزئیات مدل آزمایشگاهی به همراه سیستم تامین آب مخزن و تصویر آن را نشان می‌دهد. در شکل (۲) نیز منحنی دانه‌بندی مصالح گلاس‌بید ارائه شده است. دیگر ویژگی‌های مربوط به بدنه و همچنین برخی از مشخصات مخزن در جدول (۱) ارائه شده است.

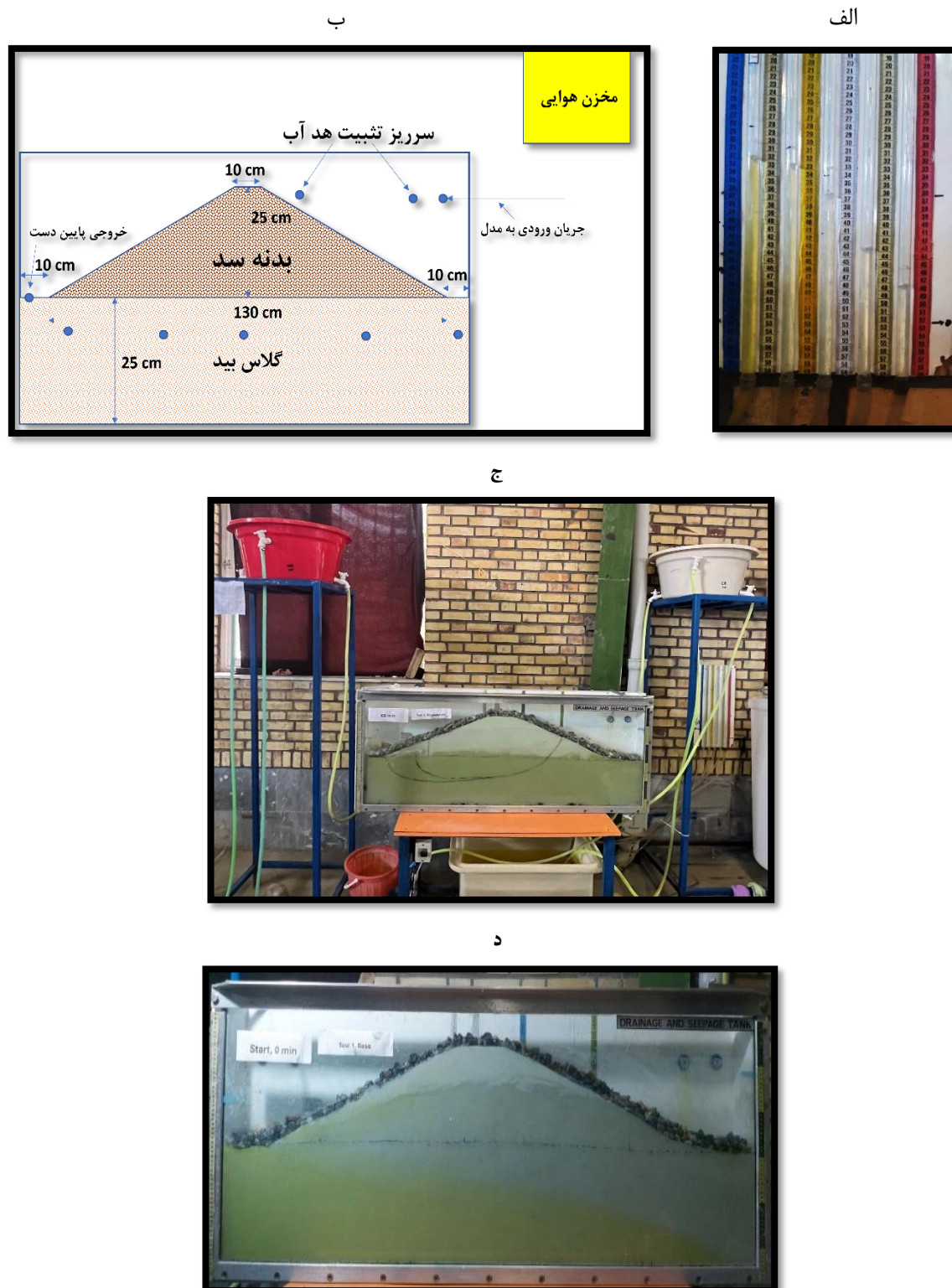
(*et al.*, 2012) ولی بین عملکرد زهکش‌های مختلف روی بسترهای نفوذپذیر مقایسه‌ای صورت نگرفته است (Kashef, 1969; Refaiy *et al.*, 2021, Kouhpeyma *et al.*, 2021). در واقع، حتی بسیاری از روش‌ها و مبانی طراحی بر اساس سد واقع بر بستر نفوذناپذیر است. از این رو در این طرح‌ها جریان نشت از بخش‌های فوقانی زهکش وارد آن می‌شود و اثر جریان‌های ورودی از پی و از کف زهکش در مطالعات دیده نشده است. بدین ترتیب یک مدل آزمایشگاهی از سد خاکی همگن طراحی و ساخته شد تا به صورت آزمایشگاهی تاثیر وجود انواع زهکش با طول یکسان و هندسه متفاوت بر میزان دبی نشت و تغییرات الگوی مسیر جریان در یک سد خاکی همگن واقع بر بستر آبرفتی بررسی گردد تا عملکرد این زهکش‌ها در شرایط وجود پی نفوذپذیر ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر یک سد خاکی همگن با مصالح گلاس‌بید^۱ به صورت ذرات گرد و شفاف شیشه‌ای با قطر ذرات ۰/۷ میلی‌متر تا ۰/۳۵ میلی‌متر ساخته شد. این مدل در یک تانک زهکشی به طول ۱۵۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ساخته شد. ارتفاع سد ساخته شده برابر با ۲۵ سانتی‌متر از سطح لایه نفوذپذیر در نظر گرفته شد که با احتساب موقعیت سرریزهای تخلیه ارتفاع آب مخزن حدود ۲۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. عرض تاج برابر با ۱۰ سانتی‌متر و شیب بدنه بالادست و پایین‌دست

^۱ Glass bead



شکل ۱- جزئیات بدنه سد خاکی ساخته شده به همراه تصویر مدل سد خاکی ساخته شده. الف: سیستم اندازه‌گیری پیزومترها، ب: اجزای هندسی مدل آزمایشگاهی، ج: شمای کلی اجزای سیستم آزمایشگاهی، د: هندسه بدنه سد،

Fig. 1 - Details of the constructed earth dam body along with an image of the constructed earth dam model.

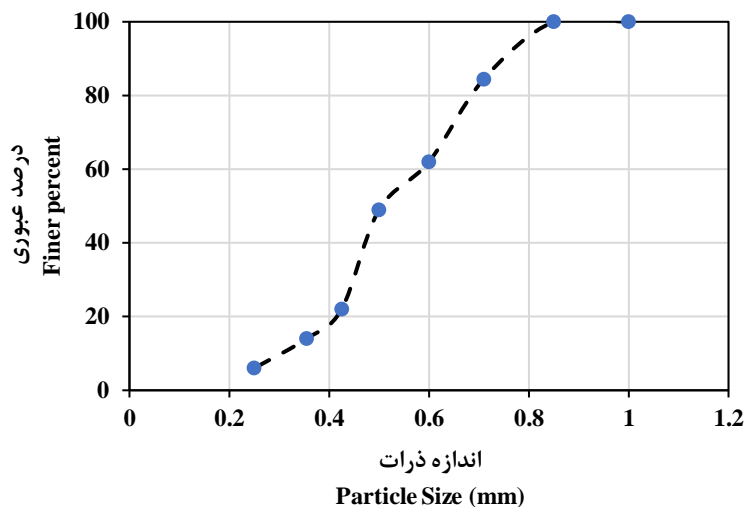
هندسه‌های بیان شد در سد ساخته شده استفاده شد. این زهکش‌ها با مصالح شن درشت‌دانه یکنواخت رودخانه‌ای به اندازه یک تا دو سانتی‌متر در طول ۲۱ سانتی‌متر، معادل ۱۶ درصد از عرض پی در نظر گرفته شد. ضخامت زهکش افقی و دودکشی حدود ۳ سانتی‌متر و زهکش پنجه به شکل مثلث متساوی الساقین و طول قاعده ۲۱ سانتی‌متر ساخته شد. دلیل استفاده از طول یکسان برای همه زهکش‌ها، مقایسه شکل هندسی آنها تحت طول یکسان بر پدیده نشت بود. برای جلوگیری از نفوذ مصالح بدنه به داخل زهکش، از یک لایه پارچه توری استفاده شد. در زهکش دودکشی ارتفاع بخش مایل برابر با ۱۰ سانتی‌متر و شیب آن در حدود ۱:۲ انتخاب شد. به منظور جلوگیری از اختلاط بخش ریزدانه بدنه سد با مصالح زهکش استفاده شده برای زهکش دودکشی از یک لایه پارچه توری روی مصالح زهکش استفاده شد. این پارچه طوری انتخاب شد تا مقاومتی در برابر جریان آب ورودی به زهکش ایجاد نکند زیرا ورود مواد ریز به داخل زهکش‌ها می‌تواند عملکرد آن‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار دهد و منجر به نتیجه‌گیری اشتباه در مقایسه عملکرد آنها شود (Al Yaqoubi *et al.*, 2024). با این حال شکل‌های عمومی و کلی زهکش‌های مورد بررسی در این تحقیق تفاوت عمده با یکدیگر دارند و به صورت زهکش افقی، زهکش پنجه و زهکش دودکشی به کار گرفته شد و با حالت بدون زهکش مقایسه گردید. شکل (۳) تصاویر مدل‌های ساخته شده را برای حالت‌های مختلف به کارگیری زهکش‌ها نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در بدنه این باکس ۵ پیرومتر برای پایش تغییرات فشار آب منفذی در پی سد تعبیه گردید و به تابلو قرائت با دقت ۱ میلی‌متر متصل شد. موقعیت پیرومترها در جدول (۲) نشان داده شده است.

به منظور آبیاری سد، از یک تانک هوایی با تراز سطح آب ثابت استفاده شد. هنگام آزمایش، آب به درون این تانک پمپ می‌شد و مازاد جریان از طریق دو سرریز تعبیه شده در بدنه مدل تخلیه می‌گردید و سطح آب بدین ترتیب در این تانک ثابت بود. از این فرآیند برای ایجاد جریان ماندگار ورودی به مخزن استفاده می‌شد. شدت جریان ورودی به مخزن از طریق یک شیر تنظیم جریان قابل کنترل بود. ورودی جریان به مخزن از بخش فوقانی صورت می‌گرفت. در پایین دست مدل یک دریچه برای زهکشی جریان نشستی از پی و بدنه سد تعبیه شده بود که علاوه بر تخلیه جریان نشستی، در تعیین مقدار نشت به روش وزنی استفاده می‌شد. از رنگ مصنوعی خوراکی نارنجی^۱ برای مشاهده نشت آب یا حرکت آب در بدنه سد استفاده شد و مطابق با آن برای نمایان شدن خطوط جریان نشستی از بدنه سد از پرمنگنات پتاسیم استفاده شد. در شکل (۳)، تصاویر مربوط به زهکش‌های با هندسه‌های مختلف و طول بخش افقی یکسان نشان داده شده است.

هدف عبارت است از مطالعه تاثیر زهکش‌های افقی و پنجه و دودکشی بر فرآیند نشت و از این رو زهکش‌هایی با

^۱ Sunset yellow FCF



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مربوط به گلاس‌بید، مصالح بدنه سدهای خاکی ساخته شده

Fig. 2 – Particle size distribution curve for glass beads, the body material of the earth dam.

جدول ۱- مشخصات سد خاکی ساخته شده در تحقیق حاضر

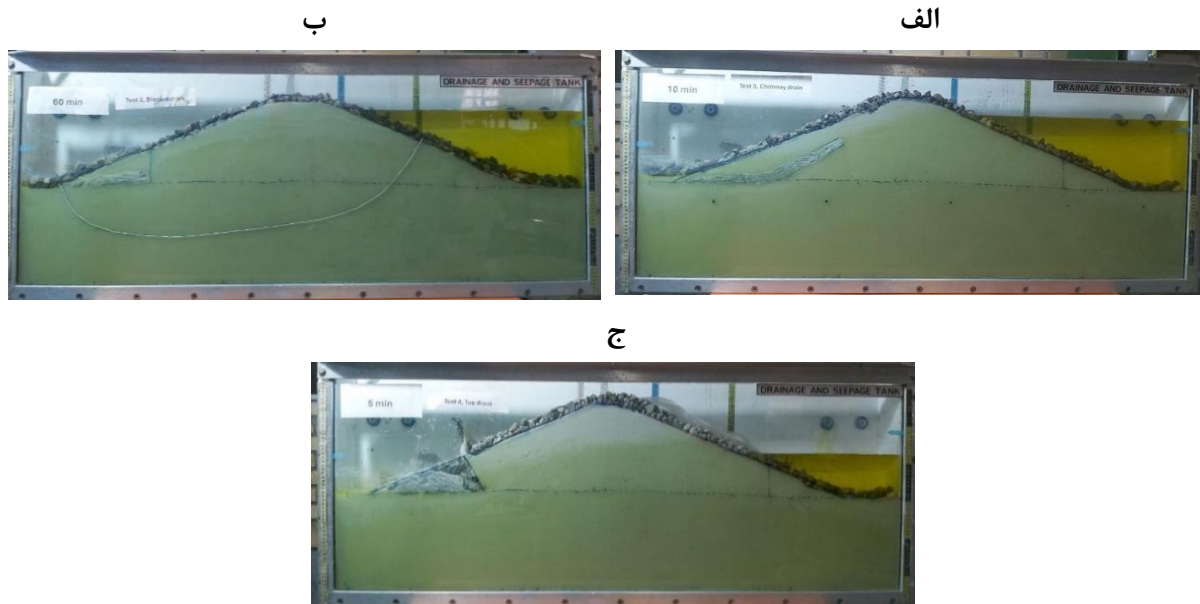
Table 1 - Characteristics of the earth dam constructed in the present study

| مقدار Amount | پارامترها Parameter |
|-----------------|--------------------------------------|
| 10 سانتی‌متر | عرض تاج سد (B) |
| 150 سانتی‌متر | طول مخزن سد (L) |
| 25 سانتی‌متر | ارتفاع سد (H) |
| 25 سانتی‌متر | عمق بستر آبرفتی (D) |
| 10-20 سانتی‌متر | عمق آب (h_w) |
| 1:2.5 | شیب پایین دست و بالادست (z:1) |
| 0.128 cm/s | هدایت هیدرولیکی بدنه سد (k) |
| 0.4 | نسبت عرض تاج به ارتفاع سد (B/H) |
| 6 | نسبت طول پی سد به ارتفاع سد (L/H) |
| 0.8 | نسبت عمق آب به ارتفاع سد (h_w/H) |
| 60 سانتی‌متر | ارتفاع باکس (H_{box}) |

جدول ۲- مختصات پیزومترهای نصب شده بر بدنه مدل نسبت به گوشه پایین پی در بالادست.

Table 2 - Coordinates of piezometers installed on the model body regarding the bottom of the foundation at the upstream.

| فاصله از سطح پی Distance from foundation surface (mm) | Y(mm) | X(mm) | شماره پیزومتر Piezometer number |
|--|-------|-------|------------------------------------|
| 65 | 185 | 140 | پیزومتر ۱ |
| 55 | 195 | 420 | پیزومتر ۲ |
| 55 | 195 | 640 | پیزومتر ۳ |
| 65 | 185 | 1010 | پیزومتر ۴ |
| 65 | 185 | 1310 | پیزومتر ۵ |



شکل ۳- تصاویر مربوط به زهکش‌های با هندسه‌های مختلف و طول بخش افقی یکسان. الف: زهکش دودکشی، ب: زهکش افقی، ج: زهکش پنجه

Fig. 3. View of different drains employed in the studied earth dams

$$C = \frac{V_T - V}{V_T} \quad (4)$$

در این رابطه‌ها: \bar{U} فشار آب حفره‌ای نرمال شده در زهکش، U_{no} نیروی فشار آب حفره‌ای در حالت بدون زهکش، \bar{Q} دبی نشت نرمال شده زهکش، Q دبی زهکش، Q_{no} دبی نشت در حالت بدون زهکش، V_T حجم کل بدنه سد، و V حجم زهکش است. برای نیروی فشار آب حفره‌ای ضریب اثر ۰/۷ و برای دبی ضریب ۰/۳ انتخاب شد. این ضریب‌ها بر اساس اهمیت فاکتور فشار آب حفره‌ای نسبت به دبی نشت انتخاب شدند.

نتایج و بحث

نتایج این تحقیق به صورت جداگانه به بررسی و تفسیر هر یک از آزمایش‌ها و مقایسه آنها پرداخته است که این موارد در زیر ارائه می‌گردد.

الف- حالت بدون زهکش

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر وجود زهکش افقی بر پدیده نشت، یک حالت پایه بدون زهکش در نظر

آنالیز ارزش

به منظور مقایسه بهتر زهکش‌های مختلف بکار رفته در این تحقیق و توصیه زهکش مناسب، آنالیز ارزش بر مبنای چند فاکتور مهم و تاثیرگذار صورت گرفت در این بررسی، مشابه با توصیه‌های النشر و همکاران (Elnashr *et al.*, 2023) از رابطه زیر برای ارزیابی و مقایسه زهکش‌های به کار رفته استفاده شد:

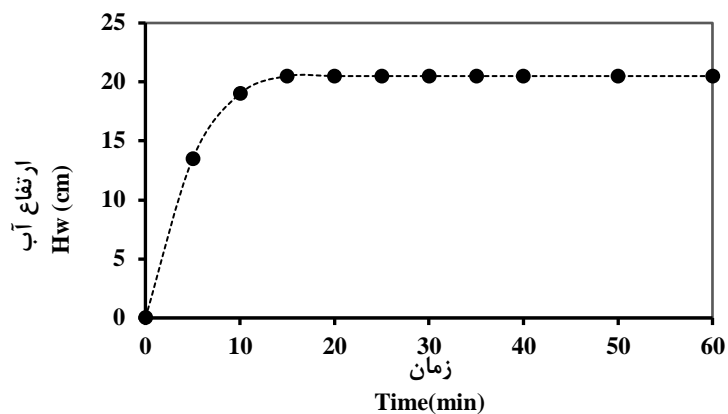
$$Value = \frac{F}{C} \quad (1)$$

که در آن: Value ارزش زهکش، F عملکرد زهکش و C هزینه ساخت است. در تعریف عملکرد زهکش از دو فاکتور متفاوت شامل کاهش فشار آب حفره‌ای و دبی نشت و برای هزینه حجم مصالح به کار رفته در نظر گرفته شد. برای نرمال سازی هر یک پارامترهای به کار رفته از رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$\bar{U} = \frac{U_{no} - U}{U_{no}} \quad (2)$$

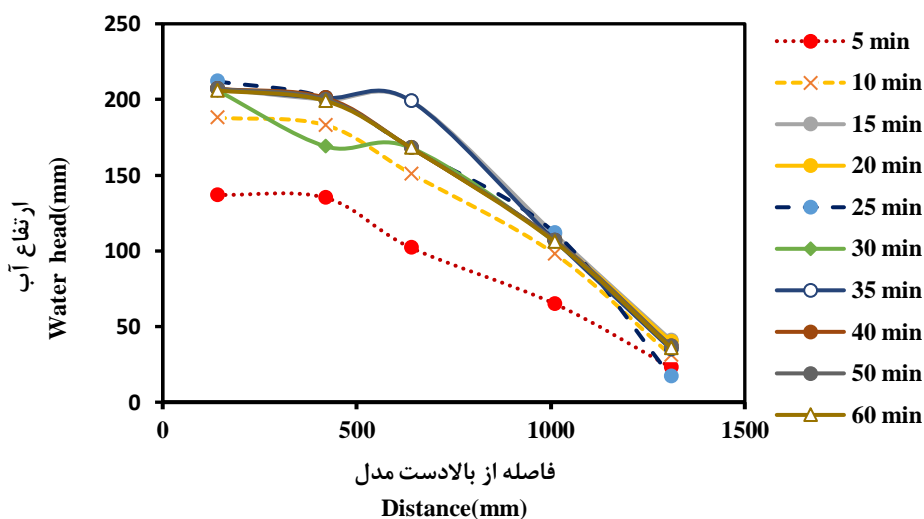
$$\bar{Q} = \frac{Q_{no} - Q}{Q_{no}} \quad (3)$$

گرفته شد و مدل آزمایشگاهی آن ساخته شد. شکل (۴) مدت ۱۵ دقیقه صورت گرفت و پس از آن سطح آب در الگوی آبیگری و افزایش تراز آب در مخزن سد را نشان می‌دهد. طبق این شکل، آبیگری با به صورت پیوسته در



شکل ۴- روند آبیگری و افزایش تراز آب در مخزن بالادست سد خاکی همگن مطالعه شده در حالت بدون زهکشی
 Fig. 4 – Water level raising in the reservoir of the studied earth dam in case of no drainage system.

بررسی و ثبت داده‌های مربوط به تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت اخیر بدون زهکشی در شکل (۵) ارائه شده است. در این بررسی در فاصله‌های زمانی معین و با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه، ارتفاع آب در هر پیزومتر قرائت و نسبت به سطح مبنای معین فشار آب در هر یک محاسبه شده است. طبق داده‌های ارائه شده در این شکل، در دقیقه ۳۰ ام در پیزومتر واقع در مختصات طولی ۴۲۰ میلی‌متر، فشار آب منفذی به صورت غیرعادی کمتر است تا در دقیقه ۱۰ ام. بررسی‌ها در زمان آزمایش نشان از وجود حباب هوا در لوله‌های پیزومتر داشت که در روند آزمایش با هواگیری مشکل رفع شد. همین امر موجب ایجاد نوسان در فشار آب منفذی در پیزومتر شماره ۳ در دقیقه ۳۵ ام شد و به صورت موقت مقدار فشار آب منفذی در این حالت بیشتر از مقدار معمول ثبت شده است. به‌طور خلاصه، با پیشرفت آزمایش و بعد از دقیقه ۴۰ ام آزمایش به حالت پایدار رسیده و تغییرات فشار آب منفذی در پیزومترها ثابت شده است.

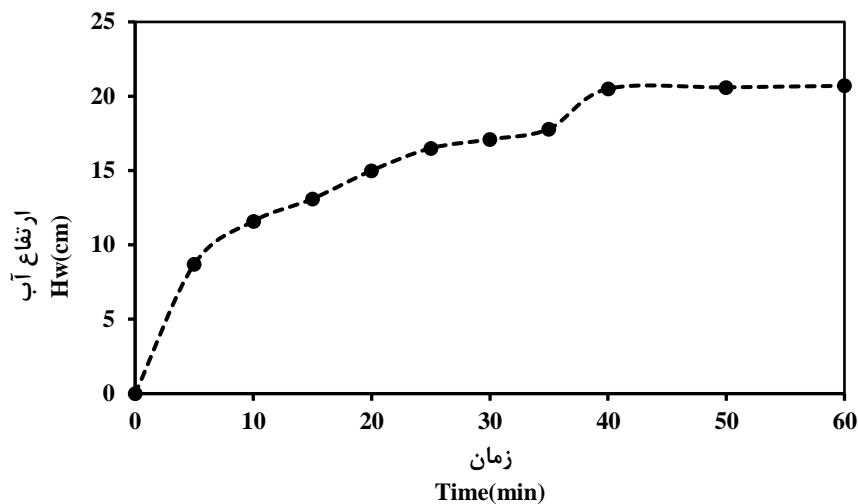


شکل ۵- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت بدون زهکشی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش
 Fig. 5 – pressure head changes in piezometers for the No drain condition at 5 to 10 minute intervals

ب- حالت زهکش افقی

افزایش پیدا می‌کند که طی ۵ دقیقه تراز سطح آب به سرریزهای تعبیه شده می‌رسد و عمق آب در مخزن ثابت شده است. استفاده از سرعت متغیر موجب افزایش عمق آب با سرعت متفاوت در مخزن بود و دلیل این کار بررسی پاسخ پیزومترها و برای حصول اطمینان از پاسخ دهی صحیح آنها بود. در واقع، در صورت عملکرد صحیح پیزومترها باید رفتار مشابه با تغییرات سرعت افزایش تراز آب در مخزن در فشار ثبت شده پیزومترها مشاهده می‌شد.

برای بررسی اثر زهکش افقی در پدیده نشت مدل آزمایشگاهی، حالت پایه با اجرای تغییرات و اضافه کردن یک لایه شن درشت بر اساس آنچه در بخش مواد و روش‌ها بیان شد به حالت زهکش افقی اصلاح شد. شکل (۶) روند آگیری در مخزن را برای این حالت نشان می‌دهد. بر اساس نمودار ارائه شده، آگیری با سرعت تقریباً یکنواخت تا دقیقه ۳۵ ادامه دارد اما پس از دقیقه ۳۵ ام دبی ورودی به مخزن

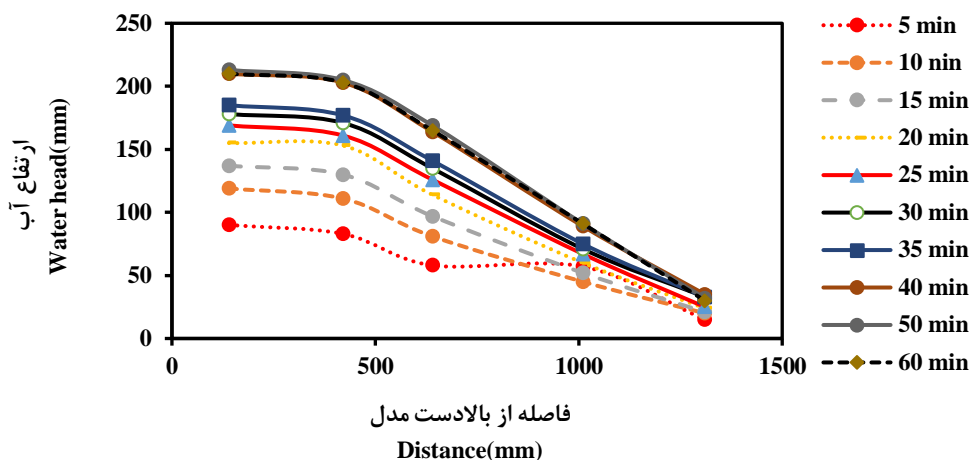


شکل ۶- روند آگیری در مخزن سد در حالت استفاده از زهکش افقی

Fig. 6 - Image of the homogeneous earth dam laboratory model in the horizontal drainage type, along with the reservoir water level from the start of the experiment.

از سد، فشار به حالت عادی برگشته است. علاوه بر این، همان‌طور که از این شکل مشخص است، در فاصله ۳۵ دقیقه ۴۰ ام که افزایش سریع در سرعت آگیری رخ داده است، پیزومترها هم متناسب با آن پاسخ داده‌اند و فاصله منحنی‌های مربوط افزایش چشمگیر نسبت به سایر حالات داشته است که بدان معناست در فاصله زمانی دقیقه‌های ۳۵ ام و ۴۵ ام که سرعت افزایش سطح آب حالت جهشی پیدا کرده است، فشار در پیزومترها هم در این ۵ دقیقه به صورت معنی‌دار با شدت و مقدار بیشتری افزایش را ثبت کرده است. طبق این نتایج، زمان تاخیر قابل توجهی بین افزایش سطح آب در مخزن و پاسخ پیزومترها وجود ندارد که می‌تواند به دلیل هدایت هیدرولیکی بالای محیط و مصالح سازنده بدنه سد باشد.

بررسی و ثبت داده‌های مربوط به تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکش افقی در شکل (۷) ارائه شده است. در این بررسی در فاصله‌های زمانی معین و با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه ارتفاع آب در هر پیزومتر قرائت شده و نسبت به سطح مبنای معین فشار آب در هر یک محاسبه شده است. بر اساس داده‌های منعکس شده در شکل مذکور، در شروع آزمایش و در پیزومتر ۴، فشار آب منفذی به صورت غیر عادی بیشتر نشان داده می‌شود. این موضوع به دلیل وجود حباب هوا در پیزومتر یا هوای محبوس در بین ذرات پیش از اشباع شدن کامل محیط است. به عبارتی، جبهه حرکت جریان نشت به دلیل برخورد با هوای محبوس در اطراف این پیزومتر ممکن است موجب بالا رفتن موقت فشار شده باشد که پس از تخلیه هوای محبوس و حرکت آب به سمت بیرون



شکل ۷- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکشی افقی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه

Fig. 7 - Water level changes in piezometers for horizontal drainage with 5 to 10 minute intervals.

ج- زهکشی دودکشی

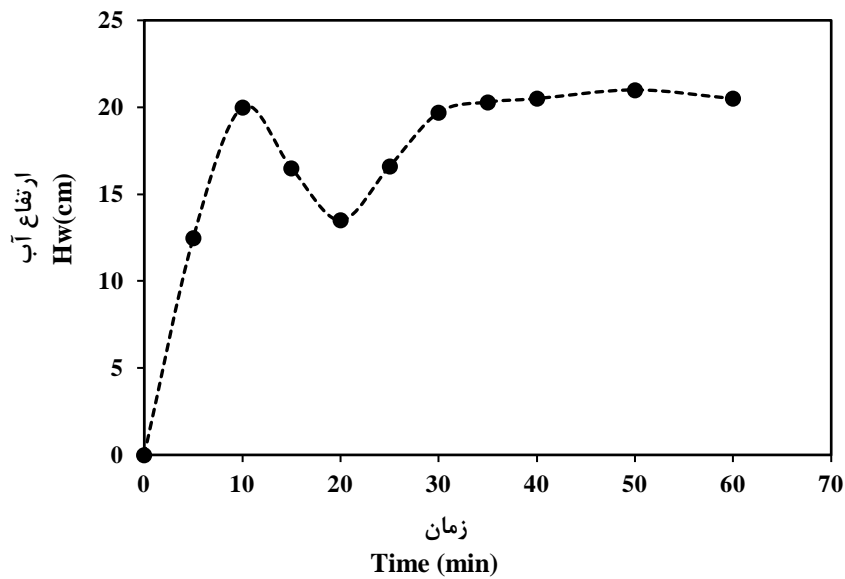
سانتی‌متر در اولین پیزومتر افزایش یافت. نوسان‌های سطح آب و پایین‌افتادن تراز آب در مخزن و سپس افزایش آن در عملکرد و پاسخ پیزومترها به خوبی مشاهده می‌شود، به طوری که در دقیقه ۱۵ ام و ۲۰ ام تراز آب در پیزومترها پایین افتاده و سپس افزایش پیدا کرده است.

د- حالت زهکشی پنجه

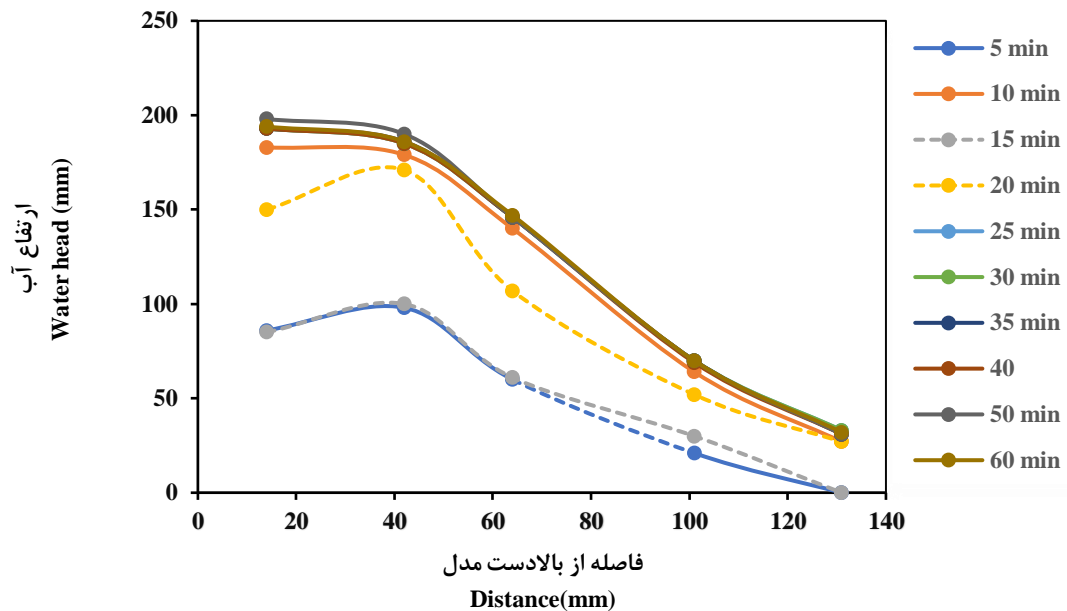
زهکشی پنجه یکی از انواع متداول زهکشی‌ها در کنترل نشت در سدهای خاکی همگن کوچک است که در این تحقیق به کار گرفته شد. زهکشی مورد نظر به صورت یک بخش مثلثی در پنجه سد ساخته شد. برای ساخت این زهکشی بخشی از پنجه سد حذف گردید و با مصالح درشت دانه ای جایگزین شد که برای ساخت دیگر زهکشی‌ها استفاده شده بود. هندسه این زهکشی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. طول بخش پایینی (قاعده) زهکشی برابر با ۲۱ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سد در این حالت به صورت پیوسته آبدگیری شد. ارتفاع افزایش تراز آب مخزن در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. تغییرات فشار آب منفذی در محل نصب پیزومترها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. طبق این شکل، افزایش تدریجی فشار آب در پیزومترها با گذشت زمان و افزایش تراز آب در پیزومترها قابل مشاهده است.

مشابه با حالت زهکشی افقی، زهکشی دودکشی به صورت یک زهکشی افقی در ترکیب با یک زهکشی مایل به سمت بالادست سد، در بدنه سد کار گذاشته شد. برای مصالح زهکشی دودکشی از همان مصالح زهکشی افقی استفاده شد. پس از ایجاد بدنه سد بخش مخزن با ورودی جریان آب آبدگیری شد. از آنجایی که بخشی از این تحقیق برای تحلیل‌های غیرماندگار استفاده خواهد شد، بر کردن مخزن به صورت افزایشی، کاهشی و سپس افزایشی در نظر گرفته شد. منحنی آبدگیری سد در شکل (۸) ارائه شده است. بعد از حدود ۴۰ دقیقه، مخزن پر شد و تراز آب به حداکثر رسید. طبق داده‌های این گراف بعد از ده دقیقه از شروع آبدگیری عمق آب به حدود ۲۰ سانتی‌متر رسید و سپس پایین آورده شد و مجدداً افزایش یافت. دلیل این کار ایجاد نوسان در پیزومترها بود تا عملکرد صحیح آنها کنترل شود. پس از این نوسان‌ها، شرایط ماندگار و ثابت عمق آب در مخزن شکل گرفت.

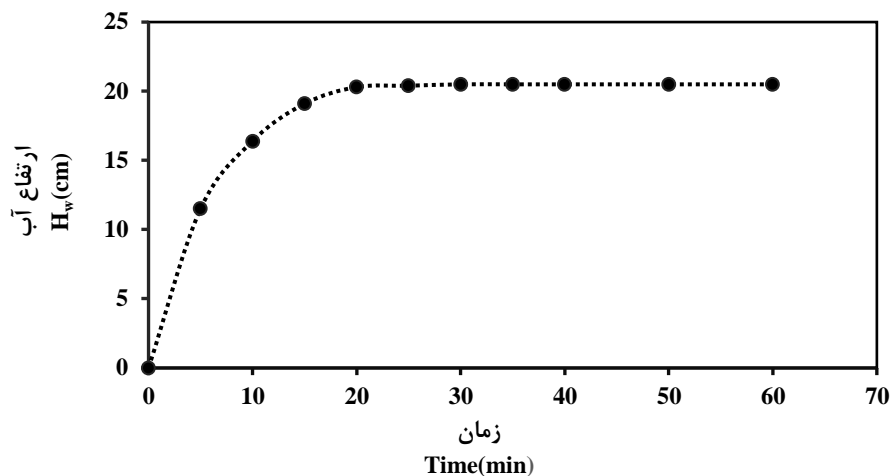
بر اساس داده‌های ثبت شده از پیزومترها، تغییرات فشار آب منفذی در پی سد در شکل (۹) ارائه شده است. طبق این شکل، فشار آب منفذی پس از شروع آبدگیری در پیزومترها افزایش پیدا کرد و در مدت ده دقیقه به حدود ۱۸



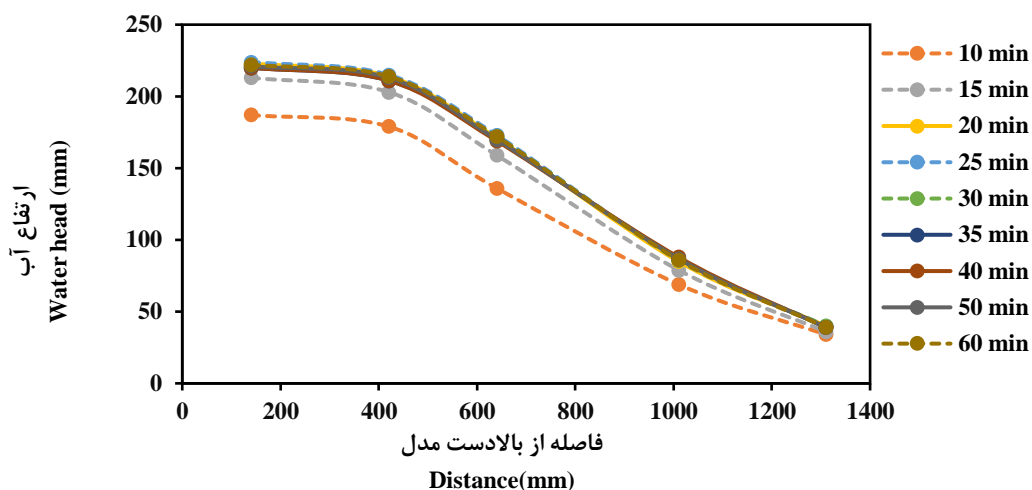
شکل ۸- تصویر مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در حالت زهکشی دودکشی به همراه ارتفاع آب مخزن از لحظه شروع آزمایش
 Figure 8 - Image of the homogeneous earth dam laboratory model with chimney drain, along with reservoir water level from the start of the test.



شکل ۹- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکشی دودکشی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه
 Fig. 9 - Changes in water level in piezometers for chimney drainage mode with an interval of 5 to 10 minutes



شکل ۱۰- تصویر مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در حالت زهکش پنجه به همراه ارتفاع آب مخزن از لحظه شروع آزمایش
 Fig. 10 - Image of the laboratory model of a homogeneous earth dam in the toe drainage type along with the reservoir water height from the moment the test started



شکل ۱۱- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکش پنجه با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه
 Fig. 11 - Changes in water level in piezometers for the toe drainage mode with an interval of 5 to 10 minutes

ج- تاثیر هندسه زهکش

(۱۲)، مقایسه روند کاهش منحنی‌ها نشان می‌دهد که زهکش پنجه و زهکش افقی تاثیر مشابهی بر تغییرات فشار آب منفذی داشته‌اند اما زهکش دودکشی نسبت به بقیه حالات افت بیشتری در مقدار فشار آب منفذی ایجاد کرده است. طول زهکش‌های به کار رفته برای حالت‌های مختلف یکسان است ولی از نظر شکل هندسی و مقدار مصالح به کار رفته در ساخت آنها تفاوت‌های زیادی باهم دارند. جدول (۳) حجم مصالح به کار رفته در ساخت هر یک از زهکش‌ها را به

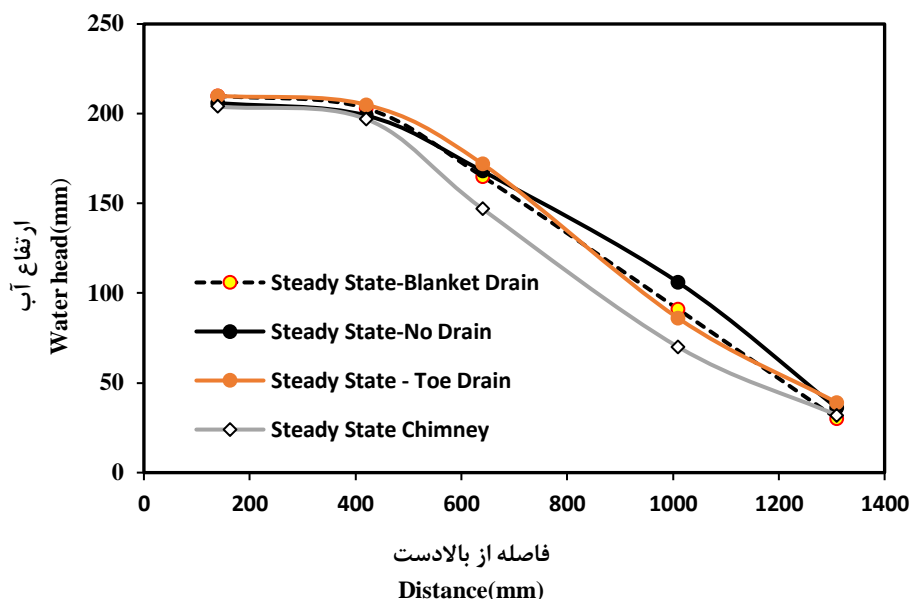
شکل (۱۲) تغییرات فشار آب منفذی در پیزومترها را برای حالت ماندگار در چهار حالت آزمایش شامل حالت بدون زهکش و سه نوع زهکش مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات ارائه شده در شکل، مقدار فشار آب منفذی در پی و عمق حدود ۵۶ میلی‌متر از پی سد در طول بدنه سد روند کاهشی دارد و از سمت مخزن به سمت بدنه پایین دست مقدار فشار کاهش یافته است. طبق نتایج ارائه شده در شکل

خط نشت نشان داده شده توسط رنگ تزریقی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اطلاعات طول مسیر نشت اندازه‌گیری شده با استفاده چسباندن نخ روی مسیر نشت ثبت شده (شکل ۱۳ - زهکش افقی) و سرعت حرکت ماده رنگی در جدول (۴) گنجانده شده است. طبق اطلاعات ارائه شده در شکل (۱۳) و جدول (۴)، مسیر سرعت حرکت ماده رنگی از یک نقطه ثابت برای دو حالت مختلف از زهکش‌ها نسبت به حالت بدون زهکش تفاوت بسیار زیادی دارد و طول مسیر نشت در حالت زهکش افقی و پنجه به ترتیب حدود ۱۷ و ۲۰ درصد کوتاه شده است بر همین اساس سرعت جریان نیز در حدود ۱۱ درصد در زهکش پنجه و ۹ درصد در حالت زهکش افقی بیشتر از حالت بدون زهکش است. این نتایج نشان دهنده این موضوع است که گرادیان هیدرولیکی نشت در حالت وجود زهکش افزایش قابل توجهی نسبت به حالت بدون زهکش دارد و جریان نشت به سمت زهکش پنجه سریع‌تر رخ می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل حجم بالای مصالح درشت‌دانه بکار رفته و تاثیر آن در کاهش مسیر نشت جریان‌هایی باشد که از بخش‌های بالادست بدنه وارد بدنه سد می‌شوند. موضوعی که از این بخش تحقیق می‌توان استنباط کرد این است در سدهایی که از زهکش پنجه استفاده می‌شود، به دلیل بالاتر بودن سرعت نشت، به دلیل بالارفتن گرادیان هیدرولیکی احتمال خطر رگاب بیشتر از زمانی است که از زهکش افقی استفاده شود هر چند این دو فرم از زهکش به یک میزان مقدار فشار آب منفذی را در بدنه سد پایین می‌اندازند. در واقع می‌توان این‌گونه گفت که در حالت وجود پی نفوذپذیر در سد خاکی همگن، زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی به شکل بهتری جریان عبوری از پی را جمع‌آوری می‌کند. اما از آنجایی که تغییرات مقدار فشار آب منفذی در دو حالت یکسان است، بر میزان نشت کلی اختلاف قابل توجهی ایجاد نمی‌کنند.

همراه فاصله افقی بالادست زهکش تا پنجه سد در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. با توجه جدول ارائه شده، میزان حجم مصالح به‌کار رفته در زهکش دودکشی تقریباً دو برابر (۱/۸۲ برابر) و حجم مصالح استفاده شده در زهکش پنجه حدود یک و نیم برابر (۱/۴۸ برابر) حجم مصالحی است که در زهکش افقی به‌کار رفته است. با این همه، تاثیر زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی قابل توجه نیست زیرا طبق شکل (۱۲)، منحنی‌های توزیع فشار در دو حالت اخیر تقریباً بر هم منطبق شده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده، حجم مصالح در هندسه زهکش افقی و پنجه تاثیر قابل توجهی نداشته زیرا با وجود حجم بالای مصالح زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی، در فشار آب منفذی اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و طول زهکش نقش مهم‌تری در کاهش فشار آب منفذی دارد.

علاوه بر بررسی تاثیر زهکش بر فشار آب منفذی پی، دبی نشت عبوری از بدنه سد در دو حالت مطالعه شده نیز بررسی گردید. جدول (۳)، دبی نشت اندازه‌گیری شده را برای حالت وجود زهکش افقی و حالت بدون زهکش نشان می‌دهد. بررسی و مقایسه مقدار دبی نشت عبوری از بدنه سدها نشان می‌دهد که وجود زهکش افقی موجب افزایش دبی نشت به میزان ۱۶ درصد نسبت به دبی حالت بدون زهکش شده است. بررسی اعداد مربوط به نشت نشان‌دهنده افزایش در میزان نشت در کلیه حالات نسبت به حالت بدون زهکش است. با این حال، مقایسه مقادیر نشت بین زهکش‌های مختلف اختلاف قابل توجه را بین مقادیر نشت ایجاد شده در بدنه سد نسبت به هم نشان نمی‌دهد.

به منظور بررسی سرعت جریان نشت و طول مسیر آن در زهکش‌های مختلف رنگ مصنوعی پرمنگنات پتاسیم از یک نقطه ثابت در بالادست مخزن وارد جریان نشت شد که طی آن طول مسیر و زمان حرکت رنگ ردیاب وارد شده از لحظه ورود تا رسیدن به زهکش ثبت شد. شکل (۱۳) مسیر



شکل ۱۲- مقایسه فشار آب منفذی در پیژومترها برای زهکش‌های مختلف در شرایط ماندگار

Fig. 12 - Comparison of pore water pressure in piezometers for different drains under steady-state conditions

جدول ۳- حجم مصالح به کار رفته برای ساخت هر یک از زهکش‌ها به همراه طول افقی آنها (از منتهای بالادست تا پایین دست)

Table 3- Volume and the horizontal length of the employed drainage system

| طول افقی کلی زهکش (cm) Length of Drain in Horizon (cm) | حجم مصالح به کار رفته (cm ³) Material Volume (cm ³) | نوع زهکش Drain Type |
|---|--|--------------------------------|
| 21 | 630 | زهکش افقی (Blanket Drain) |
| 21 | 932 | زهکش پنجه (Toe Drain) |
| 33.6 | 1147 | زهکش دودکشی (Chimney Drain) |

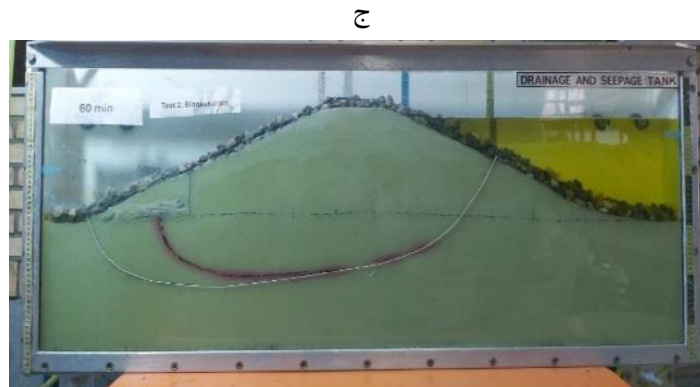
جدول ۴- مقایسه طول مسیر خط نشست در سدهای خاکی همگن

Table 4 - Comparison of seepage line lengths in homogeneous earth dams

| زهکش افقی Blanket Drain | زهکش پنجه Toe Drain | بدون زهکش No Drain | حالت Type پارامتر parameter |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|---|
| 91 | 89 | 108.8 | طول مسیر نشست (سانتی متر) length drain(cm) |
| 1200 | 1152 | 1560 | زمان طی مسیر (ثانیه) (sec) Time route |
| 4.55 | 4.63 | 4.18 | سرعت نشست سانتی متر بر دقیقه (cm/min) seepage rate |

جدول ارزش زهکش‌های به کار رفته بر اساس آنچه در نهایی در خصوص قضاوت بهترین زهکش ممکن گردد. بخش مواد و روش‌ها بیان شد تکمیل گردید تا تصمیم‌گیری جدول (۵) نتایج مربوط به این بررسی را نشان می‌دهد. طبق

داده‌های ارائه شده در جدول، از لحاظ فاکتور کاهش فشار آب حفره‌ای زهکشی دودکشی بهترین عملکرد و زهکش افقی ضعیف‌ترین نتیجه را نشان می‌دهد. در مورد فاکتور دبی نشت، کمترین مقدار نشت مربوط به زهکش افقی است به همین دلیل فاکتور مربوط (\bar{Q}) برای زهکش افقی بیشترین و برای زهکش دودکشی کمترین مقدار محاسبه شده است.



شکل ۱۳- مسیر نشت از یک نقطه مشترک در سد خاکی با زهکش‌های مختلف

Fig. 13 - Seepage path from a common point in an earth dam with different drains

جدول ۵- جدول آنالیز ارزش زهکش‌های مختلف به کار رفته در سد خاکی همگن مطالعه شده

Table 5- Value analysis of the employed drainage systems in the studied earth dam

| Value | F | پارامتر Parameter | | | زهکش Drain |
|----------|----------|----------------------|-----------|-----------|------------------------------|
| | | C | \bar{Q} | \bar{U} | |
| 0.051403 | 0.051403 | 0.964 | 0.159498 | 0.00508 | زهکش افقی Blanket Drain |
| 0.046044 | 0.046044 | 0.947 | 0.143116 | 0.00442 | زهکش پنجه Toe Drain |
| 0.097219 | 0.090851 | 0.934 | 0.148861 | 0.06599 | زهکش دودکشی Chimney Drain |

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی به وضوح مؤید کارایی بالای زهکش در کاهش فشار آب منفذی ایجاد شده در بدنه سد و بهبود عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی همگن روی بسترهای آبرفتی است. مقایسه نتایج حاصل از بررسی کاربرد سه نوع زهکش مختلف به شرح زیر است:

۱- با به کارگیری انواع زهکش‌های مختلف مقدار فشار آب منفذی در پی سد خاکی کاهش پیدا می‌کند.

۲- بر اساس داده‌های به دست آمده از پی‌زومترهای به کار رفته در بدنه سد خاکی مورد مطالعه، زهکش دودکشی، نسبت به زهکش افقی و پنجه، عملکرد بسیار بهتری در کاهش فشار آب منفذی از خود نشان داد. در این میان، زهکش افقی و زهکش پنجه نتایج مشابهی در خصوص کاهش فشار آب منفذی از خود نشان دادند. بر اساس یافته‌های رفای و همکاران (Refaiy *et al.*, 2021) این موضوع می‌تواند به دلیل طول بیشتر تصویر افقی این زهکش باشد.

۳- بررسی دبی نشت از بدنه سد خاکی در حالات مختلف از زهکش به کار رفته نشان داد که بیشترین مقدار نشت مربوط به حالت زهکش دودکشی است در حالی که زهکش پنجه و زهکش افقی نتایج مشابهی در مقدار نشت عبوری از بدنه سد به دست دادند.

۴- طول مسیر نشت برای ذره آب ورودی از یک نقطه یکسان در وجه بالادست در زهکش پنجه ۱۸ درصد و در زهکش دودکشی حدود ۱۶ درصد نسبت به حالت بدون زهکش کوتاه‌تر شده است و همین موضوع موجب افزایش دبی نشت در این دو زهکش نسبت به حالت بدون زهکش شده است.

۵- سرعت نشت و حرکت آب در داخل بدنه سد برای دو حالت زهکش افقی و پنجه با حالت بدون زهکش مقایسه

و نشان داده شد که در زهکش پنجه سرعت حرکت آب بیشتر است تا در زهکش افقی و نسبت به حالت بدون زهکش ۱۰ درصد بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که احتمال وقوع رگاب در سدهای خاکی همگن با زهکش پنجه بیشتر از زمانبست که از زهکش افقی استفاده می‌گردد. البته این یافته به این معنا نیست که در زهکش پنجه حتما رگاب رخ خواهد داد، وقوع آن بستگی دارد به نسبت گرادیان خروجی و گرادیان بحرانی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد. با این حال، هر چه سرعت حرکت آب در خاک بیشتر باشد گرادیان بالاتر است و نیز در مقایسه با سرعت‌های جریان نشت کم، احتمال رگاب بیشتر است.

۶- بر اساس آنالیز ارزش صورت گرفته بر مبنای سه فاکتور کاهش فشار آب حفره‌ای، دبی نشت و حجم مصالح به کار رفته به عنوان فاکتور هزینه، زهکش دودکشی بیشترین و زهکش پنجه کمترین ارزش را نشان می‌دهد. البته اختلاف ارزش بین زهکش دودکشی و زهکش پنجه بسیار اندک است. این یافته‌ها با توصیه‌های منابع علمی (Rahimi, 2015) در خصوص طراحی زهکش‌ها مطابقت دارد.

نتایج این تحقیق نشان از برتری کاربرد زهکش دودکشی نسبت به زهکش‌های دیگر در استهلاک فشار آب منفذی دارد هرچند زهکش دودکشی موجب هدررفت و نشت بیشتری از آب می‌شود. در حالات یکسان از طول زهکش، زهکش افقی نسبت به زهکش پنجه برتری دارد. با این حال وجود زهکش پنجه به دلیل به کارگیری حجم بالایی از مصالح درشت‌دانه می‌تواند به پایداری بدنه سد کمک کند. این موضوع نیاز به بررسی بیشتری دارد تا به صورت کمی نتایج آن با حالات دیگر از کاربرد زهکش‌ها مقایسه شود.

منابع

- Ahmadi, H., Abtahi, T. & Aghazadeh, N. (2017b). Effect of hydraulic functions in transient seepage analysis through the earth dam and its foundation (Case study: Derik Earth Dam). *Iranian Water Researches Journal*, 11(4), pp.1–11.
- Ahmadi, H. & Rezaei, H. & Zeinalzadeh, K. (2017a). An experimental study of the influence of hydraulic conductivity function on modeling seepage through earth dam cores. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(3), pp.299–307. (in Persian)
- Ahmadi, H., Salimi, H. & Hemmati, M. (2018). Analysis of seepage through earth dams by using finite difference numerical method and extended pressure technique. *Journal of Research in Irrigation and Drainage Engineering Structures*, 19(72), pp.1–14. (in Persian)
- Ahmadi, H. & Vahid, R. (2014). Investigation on the effects of hydraulic conductivity function in unconfined seepage analysis (Case study: Hassanlu Earth Dam). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(3), pp.430–442.
- Al-Yaqoubi, S., Al-Maktoumi, A., Obnosov, Y. & Kacimov, A. (2024). Clogging of toe drain drastically affects phreatic seepage in earth dams. *Advances in Water Resources*, 190, 104737.
- Amr, R., Refaiy, N. M., Aboul, A., Neveen, Y., Saad, D. A. & Molla, E. (2021). Modeling the effect of downstream drain geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*, 12, pp.101–113.
- Çalamak, M., Bingöl, A. N. & Yanmaz, A. M. (2018). Effect of drainage properties on seepage behavior of earth-fill dams. *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Istanbul, Turkey.
- Djehiche, A., Amieur, R. & Gafsi, M. (2012). Seepage through earth dams with chimney drain on pervious foundation. *Advanced Materials Research*, 452, pp.538–542.
- Elnashar, W., Abd-Elhamid, H. F., Zelenáková, M. & Elyamany, A. (2023). Value engineering approach to evaluate the agricultural drainage water management strategies. *Water*, 15(4), 831.
- Garg, S. K. (2013). *Irrigation engineering and hydraulic structures* (23rd rev. ed.). New Delhi, India: Khanna Publishers.
- Hassan, W. H. & Zwain, H. M. (2024). The influence of drain pipe location and diameter on seepage through an earth dam. *Ain Shams Engineering Journal*, 15, 102475.
- Javani, A., Yusefzadeh-Fard, M. & Moradi, G. (2015). A study on the effect of implementing waterproof membrane on reduction of water seepage from earthen dams (Case study: Shahid Madani Earth Dam, Tabriz, Iran). *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3), pp.2693–2717.
- Kashef, A. A. I. (1965). Seepage through earth dams. *Journal of Geophysical Research*, 70(24), pp.6121–6128.
- Kouhpeyma, A., Kilanehei, F., Hassanlourad, M. & Ziaie-Moayed, R. (2022). Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), pp.292–302.
- Liu, K., Vardon, P. J. & Hicks, M. A. (2019). Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. *Environmental Geotechnics*, 6(5), pp.294–306.
- Mahmoud, A., Badakhshan, M. & Seifi, A. (2016). The effect of horizontal drain length on seepage discharge, uplift force and hydraulic gradient in homogeneous earth dams by numerical simulation. *Specialized Scientific Quarterly of Construction Engineering and Management*, 1(3), pp.45–55. (in Persian).
- Malekpour, A., Farsadzadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A. & Sadrekarimi, J. (2012). Effect of horizontal drain size on the stability of an embankment dam in steady and transient seepage conditions. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 36, pp.139–152.

- Mohebat Zadeh, A., Meshkal, M. & Hedayat, N. (2011). Seepage analysis in earth dams with clay core using SEEP/W software (Case study: Karkheh Earth Dam). *Proceedings of the 6th National Congress of Civil Engineering*. Semnan University, Iran. (in Persian)
- Mohammed, Y. F., Salama, N. Y. & Al-Labban, F. A. S. (2014). Seepage analysis of a zoned earth dam by finite elements. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(8), pp.128–139.
- Mahmoud, M. M. & Shen, Z. Z. (2024). Seepage behaviour through earth dams with zones of different filling materials. *Water SA*, 50(1), pp.106–120. <https://doi.org/10.17159/wsa/2024.v50.i1.4055>
- Nasrollahi, M. (2011). Investigation of different combinations of trench depth and clay blanket for reducing seepage in earth dams (Case study: Satarkhan Dam) (*M.Sc. Thesis*), Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian)
- 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*, 22(5), pp.1–11.
- Rahimi, H. (2015). *Earth dams*. Tehran, Iran: University of Tehran Press. (in Persian)
- Shirazi, M. G., Rashid, A. S. B. A. & Ganiyu, A. A. (2023). Analysis of seepage control system improvement in an earthen dam. *Dams and Reservoirs*, 33(1), pp.27–33.
- Zhang, L. M., Xu, Y. & Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk*, 3(3), pp.184–189. <https://doi.org/10.1080/17499510902831759>
- Zhang, X. S., Wang, C. Y., Wong, H., Jiang, T. & Dong, J. Y. (2022). Modeling dam deformation in the early stage of internal seepage erosion: Application to the Teton Dam, Idaho, before the 1976 incident. *Journal of Hydrology*, 605, 127378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127378>
- Zheng, H., Shi, Z., Shen, D., Peng, M., Hanley, K. J., Ma, C. & Zhang, L. (2021). Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams. *Frontiers in Earth Science*, 9, 65993



Ministry of Jihad - e - Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 26, No. 100, Autumn 2025

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

Contents

Research Article

Explaining the Role of Farmers' Self-Efficacy and Ease of Technology Application on the Adoption Behavior of Low-Pressure Irrigation Systems

Arezou Mokhtari Hesari, Alireza Nemati 1

Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet.

Saeed Akbari Zade, Ehsan fadaei Kermani, Mahnaz Ghaeini Hesaroeiyeh 17

Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural, and Industrial Uses (Case Study: Qazvin Plain)

Shima Azadeh Ranjbar, Majid Kholghi, Afshin Ashrafzadeh 34

The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions. (Case study: West of Sistan)

Mansor Jahantigh, Moien Jahantigh 56

Systems Thinking: The Missing Paradigm in Water Management

Nader Abbasi 75

Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation

Atefeh Arab, Hojjat Ahmadi, Nourali Haghdoost, Bahram Nourani 105

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research (Agricultural Engineering Research)

Vol. 26 No. 100 2025

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Executive Director: Dr. H. Dehghani-sani, Professor

Editor in Chief: Dr. N. Abbasi, Professor
Assistant Editor: Dr. O. Raja

Editorial Board:

| | |
|--------------------|---|
| F. Abbasi | Professor, Agricultural Engineering Research Institute |
| N. Abbasi | Professor, Agricultural Engineering Research Institute |
| N. Heydari | Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute |
| A. Kiani | Professor, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center |
| S. Koochakzadeh | Professor, University of Tehran |
| M. J. Monem | Professor, Tarbiat Modares University |
| A. Nasser | Associate Professor, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center |
| M. H. Omid | Professor, University of Tehran |
| A. Parvaresh Rizi | Associate Professor, University of Tehran |
| M. Shafai-Bejestan | Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz |

International Editorial Board:

| | |
|-------------------|--|
| M. A. Sharifi | Professor, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente Enschede, Netherlands |
| A. Torabi Haghghi | Professor, Leader of Hydrosystems Engineering & Management research group at Water, Energy, and Environmental Research unit in University of Oulu, Finland |

Text Editor: M. R. Dahi

English Editor: M. R. Dahi

Coordinating Manager: A. Uossef -Gomrokchi

Typesetting & Layout: Sh. Jabbari

Reviewers:

| | | | |
|---------------|---------------|-----------------|----------------|
| - M. Akbari | - A. Khorsand | - N. Abbasi | - M.M. Heydari |
| - F. Taran | - N. Khayat | - M. Ghotbizade | - P. Varjavand |
| - O. Jamshidi | - F. Abbasi | - M. Godarzi | - M.R. Vakili |

AERI Site: www.aeri.ir

Journal Site: <http://idser.areeo.ac.ir>

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir