



## The Approach of Water-Energy-Land-use change-Environmental Nexus in Zayandeh-Rud Basin

Nesar Nasiri <sup>1</sup>✉ | Ali.A Besalatpour <sup>2</sup>

1. Ph.D. Graduated in Water Resource Management, Civil Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
  2. Senior Researcher, Institute of Resource Management inter3, Berlin, Germany.
- ✉Corresponding Author: [nesar\\_nasiry10@yahoo.com](mailto:nesar_nasiry10@yahoo.com)

Received:  
16 October 2024

Accepted:  
11 December 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Integrated management of surface and groundwater resources,  
Nexus concept,  
Water use,  
Gavkhuni Wetland*

### Extended abstract

#### Introduction

Water resource management in arid regions faces significant challenges due to competing demands from agriculture, industry, domestic needs, and environmental preservation. The Zayandeh-Rud River Basin, a vital water source in central Iran, exemplifies these challenges. This study applies the Nexus Approach, which integrates water, energy, land-use change, and environmental considerations, to understand the interactions and trade-offs among these components. The Nexus concept enables a holistic view of resource management, addressing synergies and conflicts among stakeholders to support sustainable planning and decision-making.

#### Study Area

The about 28,193 km<sup>2</sup> Zayandeh-Rud River Basin (ZRRB) is located between latitudes 31° and 34° north and longitudes 49° and 53° east (see Figure 1). The river begins in the Zagros Mountains, west of Isfahan, and travels 350 km east before flowing into the Gavkhuni Wetland. The Zagros Mountains' yearly snowfall has a significant impact on the river's flow. This region is critically dependent on seasonal snowmelt and rainfall, which are increasingly impacted by climate variability and human interventions. The basin's water resources are heavily utilized for agriculture, industry, urban consumption, and maintaining the wetland's ecological balance.

**Cite this article:** Nasiri, N., B & A. A. (2024). The approach of water-energy-land-use change-environmental nexus in Zayandeh-round basin. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 1-18. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2024.8271.1079>.



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Methodology

The study introduces indicators to evaluate the Nexus components:

1. Water Index: Includes sub-indices for agricultural, industrial, and domestic water consumption, as well as dam management.
2. Energy Index: Focuses on energy production and consumption by hydropower plants and other facilities dependent on the basin's water.
3. Land-Use Change Index: Monitors the expansion of agricultural land uses and its implications for water use and recycling.
4. Environmental Index: Represents the ecological water needs of the Gavkhuni Wetland.

The Pearson correlation method was used to analyze the interactions and trade-offs among these indicators, offering insights into the relationships between different resource demands.

### Results

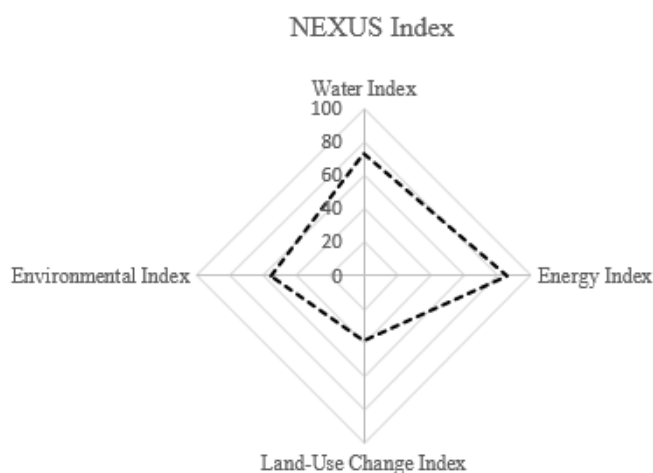
The annual indices of the Nexus components highlight critical insights:

- The Water Index revealed that agriculture consumes the majority of water (76%), followed by domestic (30%) and industrial (15%) uses. The Zayandeh-Rud Dam plays a crucial role in mitigating drought impacts and balancing downstream needs.
- The Energy Index was notable for its high reliance on water resources for energy production, achieving 85% of its potential.
- The Land-Use Change Index indicated significant agricultural expansion, with irrigation systems under pressure due to limited water availability.
- The Environmental Index for the Gavkhuni Wetland was 55%, underscoring its vulnerability and the need for targeted ecological preservation strategies.
- Table 1 summarizes the annual indices for these components, showcasing their relative importance and contribution to the basin's resource dynamics.

**Table 1. The results of calculating the annual index**

Index	Index Component	Values%
(Water Index)	Agricultural Index	61
	Industrial Index	102
	Domestic Index	80
(Energy Index)	Dam	42
	Energy	85
(Land-use Change Index)	Land-use Change	39
(Environmental Index)	Gavkhuni Wetland	55

As shown in Figure 1, the water and energy indices are identified as the major beneficiaries of water resources in the Zayandeh-Rud River Basin, aligning closely with the basin's real-world dynamics. These findings gain critical importance when considering the basin's conditions under climate change scenarios.



**Fig 1. Annual Indices of Nexus Approach at Zayandeh-Rud River Basin**

### Discussion

Pearson's correlation analysis revealed:

- A strong positive correlation ( $r = 0.78$ ) between agricultural water use and land-use changes, signifying their interdependence.
- A negative correlation ( $r = -0.46$ ) between industrial water use and agricultural expansion, reflecting competition for scarce water resources.
- A positive relationship between industrial and domestic water use, driven by urban and industrial growth.

The findings highlight the trade-offs among competing uses. For example, increasing agricultural land area intensifies water demand, adversely impacting industrial water availability. Conversely, synergies exist, such as between industrial growth and domestic water use, where improvements in infrastructure benefit both sectors. This study lays a foundation for future research to analyze the basin's future conditions and propose effective strategies for adapting to climate change and mitigating water scarcity, informed by a comprehensive understanding of the current water resource dynamics.

### Conclusion

This study demonstrates the applicability of the Nexus Approach to the Zayandeh-Rud Basin, providing a framework to address resource management challenges in arid regions. The integration of water, energy, land-use change, and environmental indices offers a comprehensive understanding of stakeholder demands and their interactions. The findings emphasize the need for balanced policies that consider the trade-offs and synergies among these components.

**Key Words:** Integrated management of surface and groundwater resources, Nexus concept, Water use, Gavkhuni Wetland.



## رویکرد هم‌بست آب-انرژی-تغییر کاربری اراضی-زیست محیطی در حوضه آبریز زاینده‌رود

نثار نصیری<sup>۱</sup> | علی اصغر بسالت‌پور<sup>۲</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری رشته مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. پژوهشگر ارشد مؤسسه مدیریت منابع Inter3، برلین، آلمان.

✉ نویسنده مسئول: [nesar\\_nasiry10@yahoo.com](mailto:nesar_nasiry10@yahoo.com)

### چکیده

مدیریت جامع موفق منابع آب سطحی و زیرزمینی، شناخت اجزای تأثیرگذار و مشخص کردن هم‌افزایی و مصالحه میان آن‌ها بسیار حائز اهمیت است و با استفاده از مفهوم هم‌بست امکان‌پذیر می‌شود. می‌توان عوامل تغییردهنده شرایط هیدرولوژیکی را به عنوان اجزای اصلی در مفهوم هم‌بست در نظر گرفت. در حوضه آبریز زاینده‌رود، دسترسی به منابع آب، کاهش اثرات منفی خشکسالی، تأمین نیازهای کشاورزی، صنعت و شرب و نیاز زیست‌محیطی همواره چالش برانگیز بوده است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بررسی جامع تأثیرپذیری متقابل عوامل مختلف در حوضه زاینده‌رود با معرفی شاخص‌هایی در بخش آب، انرژی، تغییر کاربری اراضی کشاورزی و نیاز زیست‌محیطی انتخاب شد که هر کدام از بخش‌ها، یکی از اجزای مفهوم هم‌بست هستند. با روش پیرسون رابطه متقابل اجزای هم‌بست مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، شاخص انرژی و آب به ترتیب از ذینفعان بزرگ منابع آب شناخته شدند و بالاترین هم‌بستگی میان شاخص تغییر کاربری اراضی و شاخص آب کشاورزی در حدود ۰/۷۸ به دست آمد. با توجه به مقدار پیرسون ۰/۴۶- در رابطه شاخص آب صنعتی و تغییر کاربری اراضی کشاورزی، مشخص شد که با افزایش یکی، دیگری به سبب کمبود منابع آب سطحی و زیرزمینی موجود، کاهش یافته است. مفهوم هم‌بست امکان شناخت جامع از منابع آب یک حوضه و تأثیر متقابل عوامل مختلف بر هم را فراهم می‌سازد، تا مدیران و سیاست‌گذاران منابع آب بتوانند برنامه‌های جامع مدیریتی خود را ارائه دهند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

مدیریت جامع منابع آب

سطحی و زیرزمینی،

مفهوم هم‌بست،

مصارف،

تالاب گاوخونی.

## مقدمه

در قرن بیستم، رابطه بین آب، انرژی و غذا چندان روشن نبود و بیشتر سیاستمداران نیز توجه چندانی به این ارتباط متقابل نداشتند. همه بر این باور بودند که می‌توان به آب، انرژی و غذای فراوان و ارزان دسترسی داشت و این دسترسی، هیچ محدودیتی نخواهد داشت. در بخش تولید نیز، باور بر آن بود که آب و انرژی محدودیتی برای تولید ایجاد نمی‌کنند. اما اکنون دیگر رابطه تنگاتنگ میان آب، انرژی و غذا بر کسی پوشیده نبوده و تلاش مدیران در عصر حاضر، بر کنترل روابط این سه بخش متمرکز شده است. بخش کشاورزی، مصرف‌کننده اصلی آب و همچنین کاربر اصلی انرژی است و قیمت انرژی تأثیر به‌سزایی بر قیمت تولیدات کشاورزی خواهد گذاشت (Sharifi Moghadam and Sadeghi, 2019). بنابراین، نگرانی از تأمین آب جامعه‌ای که نیاز به آب و غذایش هر روز بیشتر شده و در همین راستا انرژی بیشتری صرف شده و از طرفی رشد جمعیت و تغییر اقلیم، پژوهش‌گران را بر آن داشته تا با بهره‌گیری از رویکردهای میان‌رشته‌ای مناسب، تعادل و تناسب را بین مصرف و بهره‌برداری از منابع ایجاد کنند (Safaei et al., 2019). امروزه مفهوم هم‌بست به عنوان یک رویکرد میان‌رشته‌ای، با ارتقا مدیریت یکپارچه منابع آب توجه بیشتری را در علم و سیاست بین‌الملل جلب کرده است.

با در نظر گرفتن نقطه‌نظر هم‌بست، سیاست‌های کشاورزی بر مصرف آب و انرژی تأثیرگذارند؛ از طرفی استراتژی‌های تولید انرژی نیز میزان مصرف آب را تعیین می‌کنند؛ مدیریت منابع آب، میزان انرژی مورد نیاز برای استخراج، انتقال و تصفیه آب را مشخص می‌کند و در نهایت سیاست‌های مربوط به نیازهای زیست‌محیطی، محدودیت‌های لازم بر مصرف منابع طبیعی را اعمال می‌کنند. رشد بالای جمعیت، افزایش مصرف، سیاست‌های خودکفایی غذایی و سیاست‌های حاکمیتی نامناسب منجر به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی شده است (Swain and Jägerskog, 2016).

برای یک توسعه پایدار و مدیریت یکپارچه منابع آب، در نظر گرفتن تأثیر متقابل اجزای مختلف در یک سیستم

هیدرولوژیکی بسیار حائز اهمیت است. در همین راستا در سال‌های اخیر مفهوم رویکرد هم‌بست (نکسوس) آب-انرژی-غذا در جوامع مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و توسعه اقتصادی، امنیت دسترسی به منابع کافی آب، غذا و انرژی روزبه‌روز کاهش می‌یابد (Borgomeo et al., 2018). برای تأمین انرژی به آب و برای استخراج، تصفیه و انتقال آب به صرف انرژی نیاز است. از طرفی دیگر تغییر کاربری اراضی با گسترش کاربری شهری، صنعتی و یا کشاورزی منجر به مصرف آب بیشتری می‌شود که در ادامه این چرخه با گسترش کشاورزی، صنعت و شهرها به معنای مصرف بیشتر انرژی و در نتیجه نیاز به منابع آب بیشتر است.

از دیگر مسائلی که در شرایط حاضر باید در نظر گرفت، تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم با افزایش دما، کاهش بارندگی‌ها و گسترش وقایع حدی همانند خشکسالی، منجر به کاهش منابع آب قابل دسترس شده و متعاقباً بر چرخه یادشده تأثیرگذار خواهد بود و نیازهای زیست‌محیطی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از روش‌های کاهش و سازگاری با تغییر اقلیم در نظر گرفتن راهکارها و رویکردهای چندجانبه است. مفهوم هم‌بست یکی از رویکردهای چندجانبه و یکپارچه در جهت ایجاد بازگشت‌پذیری در سیستم‌ها، کاهش مناقشات و افزایش پایداری سیستم‌ها است (Mpandeli et al., 2018).

روز به‌روز با افزایش جمعیت، فشار مضاعف بر منابع محدود آب و نیاز به منابع مطمئن تأمین انرژی افزایش می‌یابد. ویژگی‌های گوناگونی بر هم‌بست تأثیر گذارند که از آن جمله می‌توان به تغییر اقلیم، سیاست‌های ابلاغی دولت‌ها، منابع طبیعی موجود، گسترش شهرسازی و افزایش روزافزون نیازهای صنعتی و خانگی اشاره نمود. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۸، پیشرفت سیاست‌های ابلاغی دولت استرالیا در بخش آب و انرژی در طی بیست سال گذشته را بررسی و چگونگی مدیریت بحران‌های آبی و خشکسالی این کشور با اعمال سیاست‌های دوجانبه و هماهنگ میان بخش‌های مدیریت منابع آب و تولید انرژی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است (Radcliffe, 2018).

استفاده شده که ارتباطات بین همه بخش‌ها را در نظر می‌گیرند (Gupta et al., 2013; Giupponi and Gian, 2017). مدیریت یکپارچه منابع آب (Agarwal et al., 2000)، مدیریت چند منظوره‌ای را دنبال می‌کند به گونه‌ای که با مدیریت مشترک زمین و آب، بتواند رفاه اقتصادی و اجتماعی را بیشینه نموده بنابراین نقطه ضعف آن در عدم توانایی نشان دادن تعامل بین سیاست بخش‌های مختلف می‌باشد (Hoff, 2011; Benson et al., 2015).

سیاست‌های کشاورزی بر استفاده از آب و انرژی تأثیر بسزایی دارد. استراتژی‌های تولید انرژی بر میزان آب مورد استفاده (مواد غذایی - به عنوان مثال سوخت‌های زیستی) برای تولید انرژی تأثیر دارد. در مقابل مدیریت آب در مقدار انرژی لازم برای برداشت، انتقال و تصفیه آب تعیین‌کننده است و از سمتی دیگر نیز سیاست‌های زیست‌محیطی محدودیت‌هایی برای استفاده از منابع طبیعی و دفع زباله برای هرگونه فعالیت اقتصادی ایجاد می‌کند. پیوند آب-مواد غذایی و انرژی (محیط‌زیست) جدایی‌ناپذیر بوده و مفهوم هم‌بست این روابط متعدد را پوشش می‌دهد و آب را به عنوان یک بخش متقابل و نه یک بخش مجزا در نظر می‌گیرد (Gupta et al., 2013; Hoff, 2011).

تحلیل رویکرد هم‌بست نیازمند شناخت تمامی اجزای تأثیرگذار با توجه به مسئله مورد بررسی و منطقه خاص مورد مطالعه می‌باشد. پرداختن به ارتباطات پیچیده میان اجزای هم‌بست نیازمند توسعه شاخص‌هایی می‌باشد که علاوه بر ارتباط با حوضه مورد مطالعه، برای ذینفعان نیز معنادار باشد و امکان تحلیل هم‌افزایی‌ها و تضادها را فراهم آورد. شناخت دقیق اثرات متقابل هم‌افزایی و تضاد اجزای تأثیرگذار در یک حوضه آبریز در راستای مدیریت یکپارچه منابع آب و سیاست‌گذاری‌های سازگاری و کاهش در مقابله با اثرات تغییر اقلیم از یک سوء و از سوی دیگر درک پیامدهای ترکیبی عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی فعلی و آینده بر حوضه‌های آبریز برای ارزیابی پایداری تامین آب (Nasiri et al. 2022) بسیار چالش‌برانگیز و حائز اهمیت می‌باشد. افزون بر این، توسعه شاخص‌ها و تفسیر نتایج با ذینفعان مربوطه برای اطمینان از شناخت دقیق سیستم پیچیده یک حوضه آبریز رودخانه‌ای، شیوه‌ها و سیاست‌های

در پژوهشی دیگر در ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۹، روشی برای گسترش خشکسالی کشاورزی از نظارت و شناسایی به مدیریت خشکسالی کشاورزی با تلفیق مدل شبیه‌سازی رشد محصول و یک مدل بهینه‌سازی تکنولوژی تولید انرژی، پیشنهاد گردید. در واقع تلفیق مدل شبیه‌سازی رشد محصول و مدل بهینه‌سازی تولید انرژی، گامی در راستای مطالعه هم‌بست آب-انرژی-غذا است که در زمینه شناسایی و مدیریت خشکسالی بسیار کارآمد بوده تا امنیت تأمین آب و غذا فراهم شود. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در بازدهی محصول ذرت در سال‌های خشک نسبت به سال‌تر بود که برای نگه‌داشتن بالای بازدهی محصول، صرف آب و انرژی بالا غیرقابل اجتناب بود. همچنین نتایج نشان داد که بهره‌برداری از سیستم‌های کشاورزی از لحاظ اقتصادی مناسب بوده اما در مقابل پمپاژ با احجام بالا، انرژی زیادی نیز مصرف می‌شود. در مجموع نتایج این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن هم‌بست میان آب، انرژی و غذا بود که با در نظر گرفتن رابطه میان آب، انرژی و غذا سعی شد تا توازن مناسب میان اجزای هم‌بست برقرار گردد (Zhang et al., 2018).

در مطالعه‌ای در منطقه‌ای از هیمالیا با شرایط آب و هوایی خاص و پیچیده از لحاظ مدیریت منابع آب، تأثیر تغییر اقلیم و سناریوهای اجتماعی-اقتصادی بر اجزای هم‌بست را مورد بررسی قرار گرفتند (Mombanch et al., 2019). نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که تغییرات اجتماعی-اقتصادی نسبت به تغییر اقلیم بر اجزای هم‌بست که شامل آب، انرژی و نیاز زیست‌محیطی بوده، اثرگذاری بیشتری داشت. از طرفی دیگر، در این مطالعه امکان بررسی تضاد و هم‌افزایی‌ها در قالب مفهوم هم‌بست میان اجزای مختلف آن فراهم و با توجه به آن، تصمیمات مدیریتی جهت کاهش و سازگاری با تغییر اقلیم و تغییرات اجتماعی-اقتصادی اتخاذ گردید.

تأمین آب در فضا و زمان برای اغلب رقبای مصرف‌کننده آب، نیاز به رویکردهای جامع دارد که کلیه نیازهای انسان و حفاظت از محیط‌زیست را به عنوان یکی از متغیرهای وابسته و جدایی‌ناپذیر به حساب آورد (Cao and Warford, 2006; Bakker, 2014; Giupponi and Gian, 2017). رویکردهای زیادی برای پشتیبانی از مدیریت منابع آب

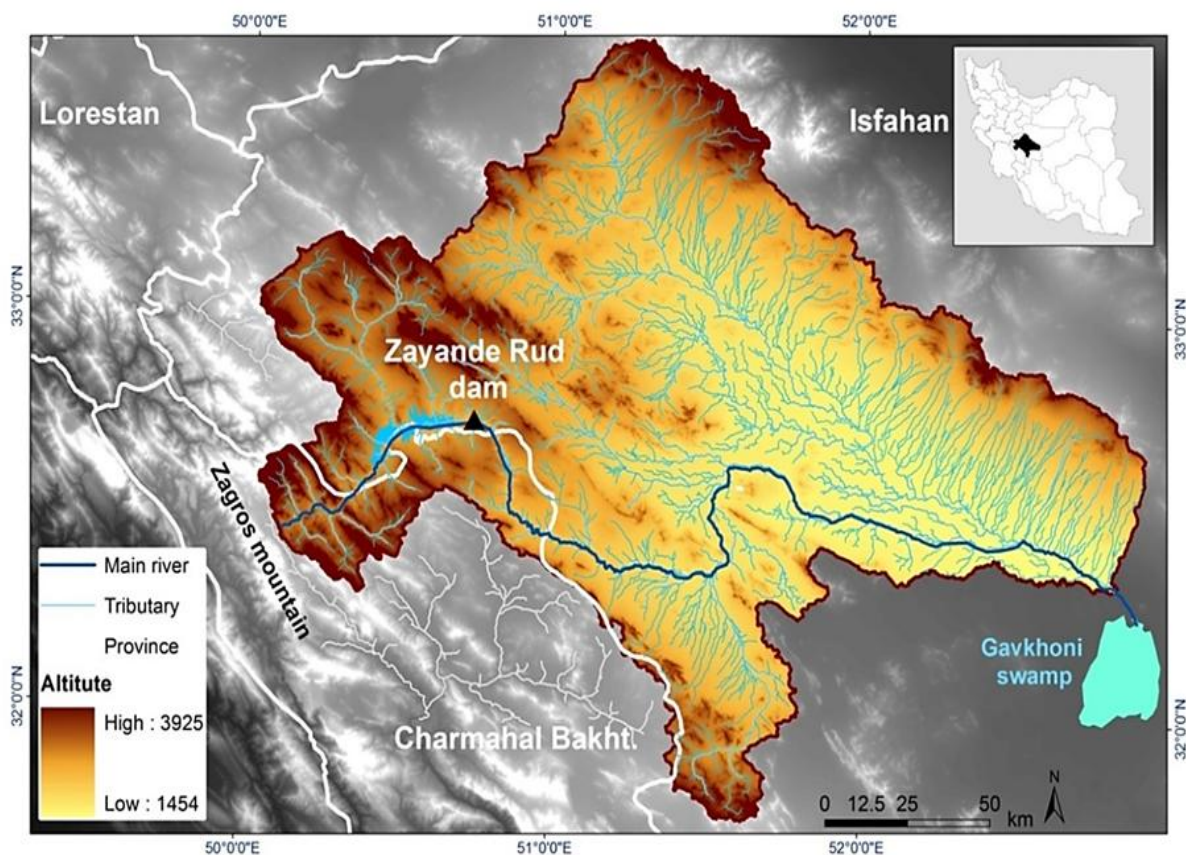
شاخص آب شامل شاخص‌های دربرگیرنده فعالیت‌های مهم انسانی در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود مصرف آب کشاورزی، مصرف آب صنعت، مصرف آب شرب و سد و همچنین شاخص تغییر کاربری اراضی کشاورزی می‌باشد. شاخص انرژی و شاخص نیاز زیست‌محیطی نیز با توجه به اهمیت تأمین نیاز تالاب گاوخونی مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های در نظر گرفته شده به عنوان اجزای هم‌بست، با توجه به شرایط خاص حوضه، شناخت دقیق حوضه آبریز زاینده‌رود و عوامل تأثیرگذار در وضعیت منابع آب قابل دسترس حوضه صورت گرفته است. از سوی دیگر، پیشنهاد شاخص برای هم‌بست آب که شامل مصرف آب در بخش‌های کشاورزی صنعت و شرب و تأمین آب پایین‌دست با مدیریت سد است، امکان بررسی وضعیت منابع آب موجود در حوضه را در ارائه طرح‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری آینده فراهم می‌نماید.

### منطقه مورد مطالعه

#### حوضه زاینده‌رود

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحتی حدود ۲۸۲۰۰ کیلومتر مربع، در بین عرض جغرافیایی ۳۱ تا ۳۴ شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ تا ۵۳ درجه شرقی قرار دارد (شکل ۱). رودخانه زاینده‌رود به عنوان بزرگ‌ترین رودخانه در فلات مرکزی ایران در این حوضه واقع شده که از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت حدود ۳۵۰ کیلومتر به تالاب گاوخونی منتهی می‌شود. این رودخانه نقش مهم و حیاتی در تأمین آب بخش‌های شرب و صنعت و توسعه کلیه فعالیت‌های اقتصادی به‌ویژه کشاورزی منطقه مرکزی ایران دارد. رودخانه زاینده‌رود شدیداً تحت تأثیر بارش برف در ارتفاعات زاگرس بوده و لذا تأثیرپذیری بالایی از تغییرات آب و هوایی دارد. ارتفاع آن از سطح دریا از ۱۴۵۴ تا ۳۹۲۵ متر بوده که این امر دامنه تأثیر قابل توجه تنوع آب و هوایی را نشان می‌دهد.

مدیریتی مرتبط با آن، ضروری است. حوضه آبریز زاینده‌رود در طول قرن‌ها نقش محوری در اقتصاد منطقه داشته و این حوضه با رشد کشاورزی و صنعت، سهم قابل‌توجهی در اقتصاد ملی ایفا کرده است. اما در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت، شهرنشینی، و نبود مدیریت مؤثر منابع، باعث فشار زیاد بر منابع آب و ایجاد بحران کم‌آبی شده است. در راستای مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود در طی سال‌های اخیر مطالعاتی با بهره‌گیری از رویکرد هم‌بست در این حوضه انجام شده است. در پژوهشی به بررسی هم‌زمان کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش‌های شرب و کشاورزی، پرداخته شده که با بهره‌گیری از شاخص‌های یکپارچه رد پای آب زیرزمینی و همچنین توسعه شاخص یکپارچه آب‌های سطحی به بررسی وضعیت منابع آب پرداختند (Najafi et al. 2021). در مطالعه دیگری با بهره‌گیری از مدل مدیریتی WEAP، حوضه آبریز زاینده‌رود در بخش آب و غذا تحت سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده و شاخص‌های پایداری سیستم با رویکرد هم‌بست آب-غذا-انرژی مورد بررسی قرار گرفت (Aghili et al. 2021). به طور کلی در مطالعات قبلی در حوضه آبریز زاینده‌رود، تأثیرات دورن بخشی اجزای هم‌بست شامل هم‌افزایی و تضاد میان آن‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین هدف پژوهش حاضر در راستای اهمیت فراهم کردن آب برای ذینفعان مختلف در یک حوضه آبریز و بهره‌گیری از یک چارچوب و مفهوم جامع که افزون بر تأمین نیازهای آبی مصرف‌کنندگان بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و خانگی، نیازهای زیست‌محیطی و همچنین تأثیر عواملی چون تغییر کاربری اراضی را در نظر بگیرد، قرار گرفت. بدین ترتیب، با توجه به مشکلات دسترسی به منابع آب سطحی و زیرزمینی برای ذینفعان مختلف در حوضه آبریز زاینده‌رود، رویکرد هم‌بست برای بررسی و شناخت اثرات متقابل بخش‌های مختلف بر یکدیگر استفاده شد. در راستای به‌کارگیری رویکرد هم‌بست، مجموعه‌ای از شاخص‌ها جهت تبیین هم‌افزایی‌ها و تضادها بین اجزای هم‌بست و بهبود تصمیم‌گیری توسعه یافته است. رویکرد هم‌بست پیشنهاد شده در این پژوهش، هم‌بست آب-انرژی-تغییر کاربری اراضی کشاورزی-زیست‌محیطی است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز زاینده‌رود.

Fig 1. Geographical location of the Zayandeh-Rud Basin.

بهاره بوده و در طول تابستان به تدریج خروجی خود را تنظیم می‌نماید. این نحوه عملکرد باعث توسعه کشت‌های تابستانه (برنج و ذرت)، تولید برق به میزان ۵۵/۲ مگاوات، توزیع آب جهت صنایع و مصارف شهری و کنترل سیلاب‌های بهاره گردیده است.

در راستای تحقق اهداف این پژوهش، اطلاعات مصارف (کشاورزی، صنعت و شرب) در پایین‌دست سد زاینده‌رود، اطلاعات جریان خروجی سد زاینده‌رود، اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت کشاورزی در پایین‌دست سد زاینده‌رود و مقادیر نیازهای زیست‌محیطی ایستگاه ورزانه در نزدیکی تالاب گاوخونی و ایستگاه قلعه‌شاهرخ در بالادست حوضه در مقیاس سالانه از سازمان آب منطقه‌ای اصفهان دریافت شد.

#### مواد و روش‌ها

هدف اصلی این پژوهش، معرفی شاخص‌هایی در بخش آب، انرژی، تغییر کاربری اراضی کشاورزی و نیاز

میزان تولید سالانه طبیعی آب در حوضه آبریز زاینده‌رود در حدود ۸۰۰ میلیون مترمکعب بوده که این مقدار باید جواب گوی نیاز مصرف‌کننده‌های کشاورزی، صنعت، شرب و نیاز محیط‌زیست باشد. کشاورزی به عنوان پرمصرف‌ترین بخش آب محسوب می‌شود. به علت ریزش‌های کم و غیر قابل اعتماد در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه، کشاورزی (گندم، جو، گیاهان علوفه‌ای، سیب‌زمینی، پنبه، کشت شالی و غیره) نقش مهمی در حیات این مناطق دارد. در حوضه زاینده‌رود نزدیک به ۲۶۰۰ کیلومتر مربع اراضی تحت‌آبیاری وجود دارد که از ۹ شبکه اصلی از زاینده‌رود و همچنین چاه‌های برداشت منابع آب زیرزمینی، قنات و چشمه‌های واقع در دامنه دره‌ها آبیاری می‌شوند. همچنین سد چندمنظوره زاینده‌رود با متوسط خروجی سالانه ۴۷/۵ میلیون متر مکعب در ثانیه در سال ۱۹۷۲ جهت تنظیم آب رودخانه و تأمین آب در مواقع کم‌آبی و خشک‌سالی احداث گردید. با حجم مخزنی برابر ۱/۵ میلیارد مترمکعب، این سد قادر به مهار رواناب‌های



شاخص آب در مفهوم همبست شامل چهار عامل سد، مصرف آب کشاورزی، مصرف آب صنعتی و مصرف آب شرب است که هر کدام از این عوامل خود یکی از فعالیت‌های انسانی هستند که بر کمبود منابع آب ( Nasiri et al. 2022) تأثیرگذار می‌باشند. برای هر کدام از این عوامل، شاخص‌هایی تعریف شدند.

### شاخص مصرف آب کشاورزی

این شاخص بر اساس مقادیر تحویل آب به شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی در پایین دست حوضه در ۱۳ نقطه‌ی برداشت در طول مسیر رودخانه زاینده‌رود که داده‌های آن قابل دسترس بود، تعریف شد.

$$\text{Agriculture Index} = \frac{\sum_n \sum_t \frac{\text{D demanded Volume}}{\text{Max Demanded Volume}}}{n * t} * 100 \quad (1)$$

دوره مورد بررسی مشاهده شده است (برحسب میلیون مترمکعب).

### شاخص مصرف آب صنعت

این شاخص بر اساس ۱۶ فعالیت صنعتی موجود و کارخانه‌های صنعتی در پایین دست حوضه که طبق قراردادهای مصوب، آب به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، محاسبه شد.

$$\text{Industrial Index} = \frac{\sum_n \sum_t \frac{\text{D demanded Volume}}{\text{Max Demanded Volume}}}{n * t} * 100 \quad (2)$$

از صنایع اختصاص یافته است (برحسب میلیون مترمکعب).

### شاخص مصرف آب شرب

این شاخص نشان‌دهنده آبی است که برای تأمین نیاز شرب، از آب سطحی در مسیر رودخانه زاینده‌رود برداشت شده است.

زیست‌محیطی در حوضه آبریز زاینده‌رود است که هر کدام از بخش‌ها می‌توانند یکی از اجزای مفهوم همبست در حوضه باشند. مفهوم رویکرد همبست امکان شناسایی و داشتن یک دید کلی و جامع از منابع آب یک حوضه و تأثیر متقابل عوامل مختلف بر هم را فراهم می‌سازد، بنابراین با تحلیل شاخص‌های همبست و بررسی ارتباط تنگاتنگ شاخص‌های آن در حوضه امکان پیش‌بینی، مدیریت و برنامه‌ریزی برای مدیران و سیاست‌گذاران منابع آب فراهم خواهد شد تا با در دست داشتن شرایط کلی حوضه برنامه‌های جامع مدیریتی خود را ارائه دهند.

### شاخص آب

در این رابطه  $n$  تعداد شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی،  $t$  تعداد ماه‌ها (اگر ماهانه بررسی شود) و یا تعداد سال‌ها (چنانچه سالانه) مورد بررسی قرار گیرد. منظور از Demanded Volume مقدار آبی است که ماهانه یا سالانه به هر شبکه آبیاری در نقاط برداشت آن‌ها در طول مسیر رودخانه زاینده‌رود تحویل داده شده و منظور از Max Demanded Volume بیشترین مقدار آبی است که در

در این رابطه،  $n$  تعداد فعالیت‌های صنعتی موجود و  $t$  تعداد ماه‌ها و یا سال‌های مورد بررسی است. در اینجا نیز منظور از Demanded Volume مقدار آبی است که در واقعیت طبق آمار، به فعالیت‌های صنعتی اختصاص داده شده، Max Demanded Volume مقدار آبی است که طبق قراردادهای مصوب باید به فعالیت‌های صنعتی اختصاص داده می‌شد که گاهی در برخی موارد که در بخش نتایج به آن پرداخته می‌شود، حتی آب بیشتری به برخی

$$\text{Domestic Index} = \frac{\sum_n \sum_t \text{Demanded Volume}}{n * t} * 100 \quad (3)$$

### شاخص سد

هدف از ساخت سد زاینده‌رود، افزایش اطمینان در تأمین نیازهای پایین‌دست بوده، که با ذخیره آب در ماه‌های پرآب، امکان تأمین و رهاسازی آب را در ماه‌های کم‌آب فراهم می‌کند. بنابراین شاخص سد، با توجه به عملکرد سد در تأمین نیازهای پایین‌دست شامل مصرف آب کشاورزی، شرب و صنعت تعریف شده است.

$$\text{Dam Index} = \frac{\sum_t \text{Released Volume}}{\sum_t \text{Demanded Volume}} * 100 \quad (4)$$

این شاخص بر اساس آمار انرژی تولیدی و مصرفی نیروگاه‌های موجود در پایین‌دست حوضه که از آب سطحی در مسیر رودخانه زاینده‌رود برداشت داشته و امکان دسترسی به آمار مقدار انرژی تولید شده آن‌ها وجود داشته، تعریف گردیده است.

در این رابطه n تعداد نقاط برداشت جهت تأمین آب شرب در طول مسیر رودخانه زاینده‌رود، تعداد ماه‌ها و یا سال‌های مورد بررسی است. در رابطه (۳)، Demanded Volume مقدار آب برداشتی در نقاط برداشت آب به منظور تأمین نیاز شرب بوده و Max Demanded Volume؛ بیشینه‌ی برداشت از آب سطحی در نقاط برداشت آب شرب در دوره زمانی مورد بررسی بوده است (برحسب میلیون مترمکعب).

در رابطه (۴)، تعداد ماه‌ها و یا سال‌های مورد بررسی، Released Volume مقدار آب رها شده در طول دوره مدنظر بوده و Demanded Volume؛ به صورت مجموع نیازهای کل پایین‌دست (کشاورزی، صنعت و خانگی) در نظر گرفته شده است (برحسب میلیون مترمکعب).

### شاخص انرژی

$$\text{Energy Index} = \frac{\sum_n \sum_t \text{Produced Energy}}{n * t} * 100 \quad (5)$$

است. همراه با احداث سد زاینده‌رود، کشاورزی در اطراف رودخانه زاینده‌رود نسبت به گذشته توسعه قابل توجهی یافت. افزایش سطح زیر کشت نه تنها باعث افزایش مصرف آب شده بلکه بر قابلیت بازچرخانی آب بر رودخانه نیز تأثیرگذار بوده و به نظر می‌رسد که سهم اراضی در باز چرخش آب به رودخانه کاهش یافته است. بنابراین در مفهوم هم‌بست شاخصی هم برای تأثیر تغییر کاربری اراضی از نوع کشاورزی در نظر گرفته شد.

در رابطه بالا n تعداد نیروگاه‌های آبی، t تعداد ماه‌ها (سال‌ها)، Produced Energy؛ نشان‌دهنده میزان انرژی تولید شده در نیروگاه‌ها طبق آمار و Production Capacity؛ ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها است که بر حسب مگاوات بر ساعت می‌باشد.

### شاخص تغییر کاربری اراضی کشاورزی

تغییرات شدید کاربری به‌ویژه کاربری اراضی کشاورزی از یکی از مشکلات مهم و تأثیرگذار در حوضه زاینده‌رود

$$\text{Land Use Index} = \frac{\sum_n \sum_t \text{Cultivated area under irrigation networks}}{\text{Max Cultivated area under irrigation networks}} * 100 \quad (6)$$

در رابطه (۶)، n تعداد شبکه‌های آبیاری، t تعداد ماه‌ها و یا سال‌ها، و منظور از Cultivated Area under irrigation networks، سطح زیر کشت اراضی کشاورزی تحت پوشش شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی، می‌باشد و Max Cultivated area under irrigation Networks بیشترین سطح زیر کشت مشاهده شده در طول دوره آماری مورد بررسی بوده است.

### شاخص زیست‌محیطی

با توجه به اهمیت بسیار زیاد تالاب گاوخونی که در خروجی حوضه زاینده‌رود قرار دارد، شاخصی نیز در مفهوم هم‌بست به نیاز زیست‌محیطی این تالاب اختصاص داده شد.

$$\text{Environmental Index} = \frac{\text{Environmental Downstream Need}}{\text{Environmental Upstream Need}} * 100 \quad (7)$$

در رابطه (۷)، نیاز زیست‌محیطی تالاب، بر اساس نسبت نیاز زیست‌محیطی ایستگاه ورزنه در ورودی تالاب (Environmental Downstream Need) به نیاز زیست‌محیطی ایستگاه قلعه‌شاهرخ در بالادست سد زاینده‌رود (Environmental Upstream Need) محاسبه شد. مقدار نیاز زیست‌محیطی ایستگاه ورزنه و قلعه‌شاهرخ به ترتیب معادل ۵/۵ و ۱۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد.

جامع مفهوم هم‌بست، برای هر کدام از بخش‌های آب، انرژی، تغییر کاربری و زیست‌محیطی ضریب وزنی یکسانی انتخاب شد تا اثرگذاری بخش‌های آب، انرژی، تغییر کاربری اراضی و زیست‌محیطی در مفهوم هم‌بست، کاملاً به مقادیر شاخص‌های محاسبه شده مرتبط باشد. از سوی دیگر، در شاخص آب که خود شامل اجزای مصرف آب کشاورزی / شرب / صنعت و سد بود با توجه به تأثیرگذاری آن‌ها بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه به‌ویژه کمبود آب قابل دسترس، ضرایب وزنی بر اساس نظر کارشناسان در نظر گرفته شد.

### شاخص جامع مفهوم هم‌بست آب-انرژی-تغییر

#### کاربری اراضی-زیست‌محیطی

با توجه به اجزای مختلف هم‌بست که بر اساس خصوصیات حوضه زاینده‌رود محاسبه شدند، برای تخمین شاخص

$$\text{Nexus Index} = \sum_n W_n * I_n \quad (8)$$

$$n = 4 : I_w, I_e, I_{lu}, I_{en}$$

در رابطه (۸)، منظور از  $I_w$  شاخص آب بوده که شامل شاخص‌های مصرف آب کشاورزی، مصرف آب صنعتی، مصرف آب. شرب و سد است. بر اساس نظر کارشناسان حوضه و با توجه به درجه اهمیت و میزان مصرف هر کدام از بخش‌ها (Nasiri and Besalatpour, 2021)، برای محاسبه  $I_w$  ضریب وزنی در نظر گرفته شد. شاخص آب  $I_w$  با اجزای معرفی شده بدین ترتیب محاسبه می‌شود:

در رابطه (۸)، منظور از  $I_w$  شاخص آب،  $I_e$  شاخص انرژی،  $I_{lu}$  شاخص تغییر کاربری اراضی و  $I_{en}$  شاخص زیست‌محیطی و  $W_n$  ضریب وزنی یکسان معادل ۰/۲۵ اختصاص داده شده به اجزای هم‌بست می‌باشند که مجموع  $W_n$ ‌ها یک در نظر گرفته شد. ناگفته نماند که همه شاخص‌ها بر اساس درصد هستند تا مقایسه میان آن‌ها آسان‌تر باشد.

$$I_w = \sum_n W_n * I_n = W_1 * I_a + W_2 * I_i + W_3 * I_d + W_4 * I_{dam} \quad (9)$$

نکته‌ای که در اینجا قبل از هر مسئله‌ای باید به آن اشاره شود، نحوه محاسبه شاخص‌های مصرف می‌باشد. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها بدان پرداخته شد، با توجه به رابطه محاسبه این شاخص‌ها، اعدادی که بر حسب درصد به دست آمده‌اند، درصد تأمین مصرف آب کشاورزی، صنعتی و بخش شرب نسبت به بیشترین مقدار ممکن آن‌ها در طی سال‌های مورد بررسی بوده است. به عنوان مثال مقدار شاخص ۱۰۲٪ برای صنعت به این معنا بوده که؛ نسبت به بیشترین مقدار آب مصرف شده در دوره مدنظر، آب مورد نیاز صنعت نه تنها کامل تأمین شده، چه بسا بعضی از واحدهای صنعتی آب بیشتری را نسبت به مجوز قرارداد، دریافت نموده‌اند. به عنوان مثال، نیروگاه اسلام‌آباد، که با مصرف سالیانه ۱۲ میلیون مترمکعب، دو برابر مقدار مجوز، آب برداشت نموده است (Industrial Report, 2013).

شاخص آب؛ شامل شاخص‌های مهم مصرف آب کشاورزی، مصرف آب صنعتی، مصرف آب شرب و سد (فعالیتی که نقش کاهش اثرات منفی خشکسالی و تأمین نیاز پایین‌دست را دارد) می‌باشد. برای محاسبه شاخص آب، متناسب با نقش هر کدام از فعالیت‌های انسانی و نتایج مطالعه (Nasiri and Besalatpour, 2021) ضریب وزنی برای هر کدام از اجزای شاخص آب در رابطه (۱۰)، در نظر گرفته شد.

$$I_w = \sum_n W_n * I_n = W_1 * I_a + W_2 * I_i + W_3 * I_d + W_4 * I_{dam} \quad (10)$$

معادل ۱۵٪، انتخاب گردید. ضریب وزنی برای شاخص سد، به عنوان مهم‌ترین فعالیت انسانی در حوضه زاینده‌رود، معادل ۱۰٪ در نظر گرفته شد. با محاسبه شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست این اطمینان حاصل خواهد شد؛ که کلیه بخش‌های ذینفع مرتبط با منابع آب در حوضه زاینده‌رود در نظر گرفته شده‌اند. برای مقایسه بهتر و آسان‌تر میان شاخص‌های مفهوم هم‌بست، کلیه‌ی محاسبات بر حسب درصد صورت گرفته و نتایج برآورد شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست، عددی بین ۰ تا ۱۰۰ گزارش شده است. با توجه به شکل ۱، در میان شاخص‌ها، شاخص آب و انرژی از

در رابطه (۹)،  $I_a$  شاخص مصرف آب کشاورزی،  $I_i$  شاخص مصرف آب صنعتی،  $I_d$  شاخص مصرف آب شرب و  $I_{dam}$  شاخص سد است و  $W_n$ ها وزن‌های اختصاص داده شده به شاخص‌ها طبق نظر کارشناسان است. پس از محاسبه‌ی شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست آب-انرژی-تغییر کاربری اراضی-زیست محیطی، با استفاده از روش پیرسون رابطه متقابل میان اجزای هم‌بست مورد بررسی قرار گرفت تا تضاد میان ذینفعان و هم‌افزایی میان آن‌ها مشخص شود. این کار با بهره‌گیری از ماتریس هم‌بستگی که سطح ثبات میان اجزای هم‌بست را نشان می‌دهد امکان‌پذیر می‌باشد. هم‌بستگی مثبت نشان‌دهنده تغییرات مشابه دو شاخص در طول زمان و هم‌بستگی منفی نشان‌دهنده تغییرات خلاف هم دو شاخص در طول زمان است، بدین معنا که افزایش یکی با کاهش دیگری همراه است. به طور کلی روش رابطه پیرسون جزو روش‌های موفق در پیدا کردن مصالحه میان ذینفعان و هم‌افزایی بوده است (Raudsepp et al., 2010; Erb et al., 2011; Luukkanen et al., 2012).

## نتایج

نتایج حاصل از محاسبه سالانه شاخص‌های هم‌بست در جدول ۱ ارائه شده است.

در حوضه زاینده‌رود حدود ۷۶ درصد از منابع آب، صرف بخش کشاورزی شده (Hosseini and Yasi, 2021)، بنابراین  $W_1$  ضریب مصرف آب کشاورزی به عنوان تأثیرگذارترین فعالیت، ۴۵٪، مدنظر قرار گرفت.  $W_2$  ضریب مصرف آب صنعتی ۱۵٪،  $W_3$  ضریب مصرف آب شرب ۳۰٪ و در نهایت  $W_4$  ضریب سد، ۱٪ در نظر گرفته شد. ضریب مصرف آب شرب ۳۰٪ انتخاب گردید، زیرا بعد از مصرف کشاورزی تأثیرگذارترین فعالیت انسانی، بر تغییر منابع آب قابل دسترس بود. از سوی دیگر، با وجود مقدار ۱۰۲ درصدی شاخص صنعت، ضریب وزنی

حوضه، راهکارهای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم و کمبود آب به بهترین نحو ارائه گردند. از سوی دیگر، در مقایسه میان شاخص زیست‌محیطی و شاخص تغییر کاربری اراضی با مقادیر به ترتیب ۵۵ درصد و ۳۹ درصد، نیاز زیست‌محیطی تالاب گاوخونی نسبت به تأثیرات تغییر کاربری اراضی در اولویت بعد از شاخص آب و انرژی قرار می‌گیرد.

بخش‌های بزرگ ذینفع منابع آب شناخته شده، که کاملاً با واقعیت حوضه نیز هم‌خوانی دارد. این نتایج زمانی که در بحث تغییر اقلیم، شرایط حوضه مورد بررسی قرار گیرد، بسیار اهمیت پیدا خواهند کرد و در این پژوهش، صرفاً دید کلی نسبت به ذینفعان آب در پایین‌دست حوضه به دست می‌دهد، تا در ادامه پژوهش با تحلیل شرایط آینده حوضه و با اطلاع از شرایط جامع منابع آب فعلی

جدول ۱. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های سالانه

Table 1. The results of calculating the annual index

شاخص Index	جزء شاخص Index Component	مقادیر % Values
	شاخص مصرف کشاورزی Agricultural Index	61
	شاخص مصرف صنعتی Industrial Index	102
شاخص آب (Water Index)	شاخص مصرف خانگی Domestic Index	80
	سد Dam	42
شاخص انرژی (Energy Index)	انرژی Energy	85
شاخص تغییر کاربری اراضی (Land-use Change Index)	تغییر کاربری اراضی کشاورزی Land-use Change	39
شاخص زیست‌محیطی (Environmental Index)	تالاب گاوخونی Gavkhuni Wetland	55

مقایسه بهتر و آسان‌تر میان شاخص‌های مفهوم هم‌بست، کلیه محاسبات بر حسب درصد صورت گرفته و نتایج برآورد شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست، عددی بین ۰ تا ۱۰۰ گزارش شده است.

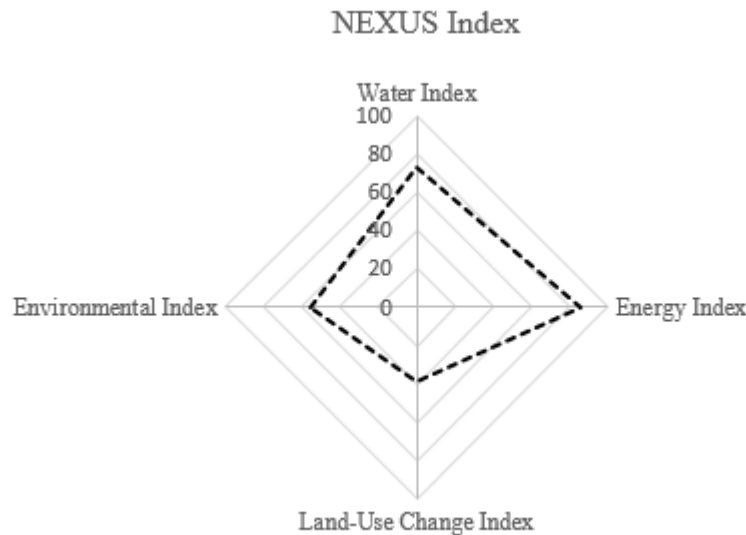
با توجه به شکل ۲، در میان شاخص‌ها، شاخص آب و انرژی از بخش‌های بزرگ ذینفع منابع آب شناخته شده، که کاملاً با واقعیت حوضه نیز هم‌خوانی دارد. این نتایج زمانی که در بحث تغییر اقلیم، شرایط حوضه مورد بررسی قرار گیرد، بسیار اهمیت پیدا خواهند کرد و در این پژوهش، صرفاً دید کلی نسبت به ذینفعان آب در پایین‌دست حوضه به دست می‌دهد، تا در ادامه پژوهش با تحلیل شرایط آینده حوضه و با اطلاع از شرایط جامع منابع آب فعلی حوضه، راهکارهای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم و کمبود آب به بهترین نحو ارائه گردند. از سوی دیگر، در مقایسه میان شاخص زیست‌محیطی و شاخص تغییر کاربری اراضی با مقادیر به ترتیب ۵۵ درصد

در حوضه زاینده‌رود حدود ۷۶ درصد از منابع آب، صرف بخش کشاورزی شده (Hosseini and Yasi, 2021)، بنابراین W1 ضریب مصرف آب کشاورزی به عنوان تأثیرگذارترین فعالیت، ۰/۴۵، مدنظر قرار گرفت. W2، ضریب مصرف آب صنعتی ۰/۱۵، W3 ضریب مصرف آب شرب ۰/۳۰ و در نهایت W4 ضریب سد، ۰/۱ در نظر گرفته شد. ضریب مصرف آب شرب ۰/۳۰ انتخاب گردید، زیرا بعد از مصرف کشاورزی تأثیرگذارترین فعالیت انسانی، بر تغییر منابع آب قابل دسترس بود. از سوی دیگر، با وجود مقدار ۱۰۲ درصدی شاخص صنعت، ضریب وزنی معادل ۱۵/، انتخاب گردید. ضریب وزنی برای شاخص سد، به عنوان مهم‌ترین فعالیت انسانی در حوضه زاینده‌رود، معادل ۱۰/ در نظر گرفته شد.

با محاسبه شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست این اطمینان حاصل خواهد شد؛ که کلیه بخش‌های ذینفع مرتبط با منابع آب در حوضه زاینده‌رود در نظر گرفته شده‌اند. برای

با توجه به مقادیر مجزای شاخص‌ها در مفهوم هم‌بست، شاخص جامع بر اساس رابطه (۸) محاسبه شده و مقدار ۶۳ درصد برای شاخص جامع در مفهوم هم‌بست به دست آمد.

و ۳۹ درصد، نیاز زیست‌محیطی تالاب گاوخونی نسبت به تأثیرات تغییر کاربری اراضی در اولویت بعد از شاخص آب و انرژی قرار می‌گیرد.



شکل ۲. شاخص‌های سالانه حوضه زاینده‌رود در رویکرد هم‌بست.

Fig 2. Annual Indices of Nexus Approach at Zayandeh-Rud Basin.

میان شاخص‌های کاربری اراضی، مصرف آب کشاورزی، مصرف آب صنعت، مصرف آب شرب و شاخص سد، مورد بررسی قرار گرفت.

ضریب  $r$  پیرسون بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند که هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد؛ یعنی افزایش یک شاخص همراه با افزایش شاخص دیگری است و برعکس آن نیز حاکم می‌باشد؛ یعنی هر چه به -۱ نزدیک‌تر باشد، افزایش یکی همراه با کاهش دیگری اتفاق می‌افتد.

طبق اصل گفته شده، برای شاخص تغییر کاربری اراضی و شاخص مصرف آب کشاورزی بیش‌ترین  $r$  ۰/۷۸ به دست آمد که در راستای فرضی که در این مطالعه برای محاسبه تغییر کاربری اراضی کشاورزی بر اساس آب کشاورزی در نظر گرفته شده بود، قرار گرفت. مقدار  $r$  قابل توجه دیگر، مربوط به رابطه میان مصرف آب صنعتی و تغییر کاربری اراضی کشاورزی است؛ که با افزایش یکی از این دو فعالیت انسانی، دیگری کاهش یافته که علت آن نیز به‌خاطر کمبود دسترسی به منابع آب است. بدین معنا که؛ افزایش سطح کاربری اراضی کشاورزی به‌معنای افزایش مصرف

با بهره‌گیری از شاخص جامع تعریف شده در این مطالعه امکان بررسی شرایط حوضه آبریز زاینده‌رود تحت سناریوهای مختلف مدیریتی، تغییر اقلیم و یا ترکیبی از هر دو وجود دارد که در ادامه این پژوهش در آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در واقع با مقایسه ارقام به‌دست آمده برای شاخص جامع در مفهوم هم‌بست تحت سناریوهای مختلف، می‌توان اثرات سیاست‌گذاری‌های مختلف مدیریتی را با توجه به اثرگذاری بخش‌های آب، انرژی، کاربری اراضی و زیست-محیطی بر مقدار شاخص جامع در مفهوم هم‌بست مورد بررسی قرار داد و با توجه به هدف سیاست‌گذاری بهترین سناریو را در حالی که بخش‌های اساسی و مهم در سطح حوضه در نظر گرفته شده است، را انتخاب کرد.

در ادامه مطالعات، با رابطه پیرسون که بارها در مشخص نمودن مصالحه میان ذینفعان و هم‌افزایی میان عوامل مختلف به صورت موفقیت‌آمیز مورد استفاده قرار گرفته است ( Radsepp et al., 2010; Erb et al., 2011; Luukkanen et al., 2012; Hicks et al., 2013). رابطه

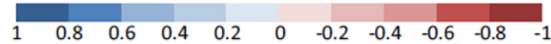
آن افزایش مصرف آب شرب قابل انتظار خواهد بود. شاخص‌های مصرف آب صنعتی، آب شرب و آب کشاورزی برخلاف شاخص سد، که باید نقش کاهش اثرات کمبود آب در پایین‌دست را داشته باشد عمل می‌کنند، که افزایش مصرف در این بخش‌ها، باعث افزایش عدم تأمین نیاز در پایین‌دست خواهد شد.

آب کشاورزی بوده که در تقابل با مصرف آب صنعتی می‌باشد، که این نتیجه در  $r$  به‌دست آمده میان مصرف آب کشاورزی و مصرف آب صنعتی نیز قابل مشاهده است. از سوی دیگر، با توجه به مقدار  $r$  شاخص مصرف آب صنعتی در راستای افزایش شاخص مصرف آب شرب می‌باشد، که این امر بدین معناست که؛ با گسترش صنعت و افزایش کیفیت و سطح زندگی، افزایش جمعیت و به‌تبع

جدول ۲. نتایج حاصل از ماتریس رابطه با روش پیرسون.

Table 2. Results of Pearson correlation matrix.

مقدار $r$ پیرسون Pearson correlation	تغییر کاربری اراضی Land-use Change	مصرف صنعت Industrial use	مصرف کشاورزی Agricultural use	مصرف شرب Domestic use	سد Dam
تغییر کاربری اراضی Land-use Change	-	-0.46	0.799	-0.042	-0.128
مصرف صنعت Industrial use	-0.460	-	-0.312	0.344	-0.382
مصرف کشاورزی Agricultural use	0.799	-0.312	-	0.109	-0.185
مصرف شرب Domestic use	-0.042	0.344	0.109	-	-0.285
سد Dam	-0.128	-0.382	-0.185	0.285	-



کشاورزی بوده که در سال‌های اخیر تأثیر به‌سزایی در مصرف منابع آب چه سطحی و چه منابع آب زیرزمینی حوضه داشته است. از سوی دیگر، نیاز زیست‌محیطی تالاب گاوخونی نیز در تعریف شاخص کلی، با توجه به اهمیت این تالاب در نظر گرفته شد. طبق نتایج حاصل شده از محاسبه شاخص جامع آب-تغییر کاربری اراضی کشاورزی-زیست‌محیطی، مؤلفه انرژی، آب، زیست‌محیطی و تغییر کاربری اراضی به ترتیب با مقادیر ۸۵ درصد، ۷۳ درصد، ۵۵ درصد و ۳۹ درصد از مهم‌ترین ذینفعان آب در حوضه زاینده‌رود شناخته شدند. از سوی دیگر، با توجه به نتایج بررسی رابطه پیرسون، جزءهای مصرف آب کشاورزی و مصرف آب صنعت، بخش‌هایی با اهداف متقابل همدیگر و جزءهای مصرف آب شرب و مصرف آب صنعت اهداف هم‌راستای یکدیگر مشخص شدند.

نتایج حاصل شده از مطالعه انجام شده، در درک صحیح، جامع و به‌هم‌پیوسته شرایط ذینفعان در حوضه پیچیده زاینده‌رود از نقطه‌نظر مدیریت منابع آب سطحی و منابع بالارزش آب زیرزمینی و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی بسیار

## نتیجه‌گیری

پژوهش‌گران و دانشمندان حوزه آب، همواره در تلاش بوده‌اند تا راهکاری جامع برای مدیریت منابع آب و رفع بحران و تنش آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیدا کنند (Masaeli et al., 2022). رویکرد هم‌بست، رویکرد جامع و یکپارچه‌ای بوده که در سال‌های اخیر توجه دانشمندان بسیاری را به خود جلب کرده است (Barjesteh et al., 2020). در مفهوم هم‌بست، تأثیر هم‌زمان و متقابل مؤلفه‌های مورد نظر، بر یکدیگر مشخص شده و هدف تأمین هم‌زمان همه مؤلفه‌ها با در نظرگیری اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر است.

در این پژوهش شاخص جامع آب-تغییر کاربری اراضی کشاورزی-زیست‌محیطی در حوضه آبریز زاینده‌رود محاسبه شد. اجزای شاخص کلی هم‌بست، شامل بخش‌های بسیار مهم و حیاتی در سطح حوضه زاینده‌رود می‌باشد. شاخص آب دربرگیرنده مصرف آب کشاورزی، صنعت و شرب و همچنین تأثیر سد زاینده‌رود در تأمین آب مورد نیاز پایین‌دست، بود. یکی دیگر از مسائل مهم در سطح حوضه، بحث تغییرات کاربری اراضی در بخش

Gupta, J., Pahl-Wostl, C., & Zondervan, R. (2013). 'Glocal' water governance: a multi-level challenge in the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 573-580.

Hicks, C. C., Graham, N. A., & Cinner, J. E. (2013). Synergies and tradeoffs in how managers, scientists, and fishers value coral reef ecosystem services. *Global environmental change*, 23(6), 1444-1453.

Hoff, H. (2011). *Understanding the nexus*. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus, Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm, Sweden.

Industrial Report, Zayandeh\_Roud Basin IWRM, 2013.

Luukkanen, J., Vehmas, J., Panula-Ontto, J., Allievi, F., Kaivo-oja, J., Pasanen, T., & Auffermann, B. (2012). Synergies or Trade-offs? A New Method to Quantify Synergy between Different Dimensions of Sustainability. *Environmental policy and governance*, 22(5), 337-349.

Masaeli, H., Gohari, A., & Shayannejad, M. (2022). Evaluation of different irrigation methods using water, energy, food, and carbon nexus approach. *Water and Irrigation Management*, 12(3), 511-525.

Momblanch, A., Papadimitriou, L., Jain, S. K., Kulkarni, A., Ojha, C. S., Adeloje, A. J., & Holman, I. P. (2019). Untangling the water-food-energy-environment nexus for global change adaptation in a complex Himalayan water resource system. *Science of the Total Environment*, 655, 35-47.

Mpandeli, S., Naidoo, D., Mabhaudhi, T., Nhemachena, C., Nhamo, L., Liphadzi, S., & Modi, A. T. (2018). Climate change adaptation through the water-energy-food nexus in southern Africa. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2306.

Najafi, S., Roozbahani, A., Javadi, S & Hashemy Shahdany, S. M. (2021). Evaluation of Water Resources in Zayandeh Rood Basin Using Integrated Surface and Groundwater Footprint Indices. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11 (1), 15-30.

Nasiri, N., & Besalatpour, A. A. (2021). *Assessment of dam management and applied loading impacts on hydrological drought characteristics in Zayandeh\_Rud catchment*. 5<sup>th</sup> National Congress of Irrigation and Drainage, Birjand, Iran.

Nasiri, N., Asghari, K., & Besalatpour, A. A. (2022). Quantitative analysis of the human intervention impacts on hydrological drought in the Zayande-Rud River Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13 (9), 3473-3495. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.188>.

حائز اهمیت است. در ادامه مطالعات می‌توان بحث تغییراقلیم و تعریف سناریوهای مدیریتی مختلف را در شاخص جامع مفهوم هم‌بست نیز در نظر گرفت و بدین‌ترتیب امکان ارائه راهکارهای سازگاری و کاهش اثرات تغییراقلیم با دید جامع و یکپارچه از شرایط حوضه، فراهم شود.

#### منابع

Agarwal, A., de Los Angeles, M. S., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M.,... & Wright, A. (2000). *Integrated water resources management*. Stockholm: Global water partnership.

Aghili, A. H., Golmohammadi, M. H & Nikooei, A. (2021). Evaluation of Resources Sustainability in Water-Food-Energy Nexus Approach Using Development and Analysis of Management Scenarios with Respect to Virtual Water Content; Case Study: Lenjanat Sub-basin. *Journal of Iran-Water Resources Research*. 16 (4), 77-97.

Bakker, K. (2012). Water management. Water security: research challenges and opportunities. *Science* (New York, N.Y.), 337(6097), 914-915. <https://doi.org/10.1126/science.1226337>.

Barjesteh, H., Qureshi, S.Z., & Mianabadi, H. (2020). Explain the function of the correlation approach in transboundary water hydro-politics. *Iranian Journal of EcoHydrology*, 7, 757-773. (In Persian).

Benson, D., Gain, A. K., & Rouillard, J. J. (2015). Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a 'nexus' approach? *Water Alternatives*, 8(1), 756-773.

Borgomeo, E., Jagerskog, A., Talbi, A., Wijnen, M., Hejazi, M., & Miralles-Wilhelm, F. (2018). *The water-energy-food Nexus in the Middle East and North Africa*.

Cao, Y. S., & Warford, J. (2006). Evolution of integrated approaches to water resource management in Europe and the United States: some lessons from experience.

Erb, M., Balmer, D., De Lange, E. S., Von Meroy, G., Planchamp, C., Robert, C. A.,... & Turlings, T. C. (2011). Synergies and trade-offs between insect and pathogen resistance in maize leaves and roots. *Plant, Cell & Environment*, 34(7), 1088-1103.

Giupponi, C., & Gain, A. K. (2017). Integrated water resources management (IWRM) for climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 17(7), 1865-1867.

Giupponi, C., & Gain, A. K. (2017). Integrated spatial assessment of the water, energy, and food dimensions of the sustainable development goals. *Regional Environmental Change*, 17(7), 1881-1893.



- Sharifi Moghadam, E., & Sadeghi, S. H. (2019). *Application of Water-Food-Energy Nexus in water resources management*. National Conference on Management Strategies of Water Resources & Environmental Challenges, Sari, Iran.
- Swain, A., & Jägerskog, A. (2016). *Emerging security threats in the Middle East: The impact of climate change and globalization*. Rowman & Littlefield.
- Zhang, J., Campana, P. E., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F., & Yan, J. (2018). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. *Applied Energy*, 227, 449-464.
- Radcliffe, J. C. (2018). The water-energy nexus in Australia—the outcome of two crises. *Water-Energy Nexus*, 1(1), 66-85.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D., & Bennett, E. M. (2010). Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(11), 5242–5247. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907284107>.
- Safaei, V., Davari, K., & Puormohammad, Y. (2019). Necessity of Water, Energy, and Food Nexus Based on the Strategic Plan for Sustainable Development. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(2), 9-14.





## Simulation of Sea Water Infiltration in Coastal Aquifer Using MLPG Numerical Method

Elham Karimzadeh<sup>1</sup> | Abolfazl Akbarpour<sup>2</sup> | Ali Mohtashami<sup>3</sup>

1. Master's student in Civil Engineering, Water Resources Management, University of Birjand, Iran.
2. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Assistant Professor of UNESCO Chair on Aflaj Studies (Archaeohydrology), University of Nizwa, Nizwa, Oman.

✉Corresponding Author: [Akbarpour@birjand.ac.ir](mailto:Akbarpour@birjand.ac.ir)

Received:  
05 September 2024

Accepted:  
24 November 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Saline Water Intrusion,  
Flow and Transport  
Equations,  
local Petrov- Galerkin  
Method,  
FEFLOW Model.*

### Extended abstract

#### Introduction

Groundwater contamination, especially through saltwater intrusion into freshwater aquifers, is a significant environmental issue affecting coastal regions worldwide. This phenomenon threatens freshwater supplies, which are crucial for drinking water, agriculture, and industry. Saltwater intrusion is particularly concerning in areas where aquifers are the primary source of water, such as many coastal cities and agricultural regions. To understand and mitigate the effects of saltwater intrusion, numerical and analytical models have become essential tools for simulating and predicting the behavior of this process. These models help scientists and engineers make informed decisions about water management and develop strategies to protect and conserve freshwater resources. One of the widely studied conceptual models for this phenomenon is Henry's problem, a simplified representation of saltwater intrusion in coastal aquifers. Henry's problem has become a benchmark for testing and validating computational methods, offering a straightforward but effective means of studying the dynamics of saltwater intrusion under controlled conditions. This study aims to compare two advanced numerical methods: the local Petrov-Galerkin (MLPG) meshless method and the finite element model FEFLOW, by applying them to the Henry problem.

**Cite this article:** Karimzadeh, E., Akbarpour, A. & Mohtashami, A. (2024). Simulation of sea water infiltration in coastal aquifer using MLPG numerical method. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 19-44. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2024.8115.1076>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Through this comparison, the study assesses the accuracy and effectiveness of both methods in simulating saltwater intrusion dynamics and provides insights into their practical applications for groundwater contamination studies.

### Material and Method

The Henry problem models a vertical cross-section of a homogeneous aquifer that is bounded by impermeable layers. Freshwater enters the aquifer at one boundary with zero salinity, and saline water enters from the opposite boundary. The simulation assumes a porosity of 0.35 for the aquifer material and a molecular diffusion coefficient of  $6.6 \times 10^{-6}$  in SI system, with no longitudinal or transverse dispersivity. The problem is governed by the interaction between the hydraulic head and the salinity concentration, with boundary conditions defined according to Neumann and Dirichlet principles for the hydraulic head and concentration, respectively. The initial salinity condition within the aquifer is assumed to be zero, indicating no contamination at the start of the simulation.

To solve this problem numerically, the computational domain was discretized into a grid with 200 cells and 231 nodes, ensuring sufficient resolution to accurately capture the concentration gradients and fluid flow patterns within the aquifer. This discretization is critical for modeling the complex interactions between freshwater and saline water in the aquifer, as well as for resolving the steep concentration gradients near the boundaries of the saltwater intrusion zone.

In terms of numerical methods, two advanced approaches were employed. The first method is the local Petrov-Galerkin (MLPG) meshless method, which is particularly advantageous in scenarios where high precision is required near boundaries. This method eliminates the need for predefined connectivity between nodes, offering greater flexibility and accuracy in capturing the behavior of complex phenomena such as saltwater intrusion. The second method is the finite element model FEFLOW, a widely used and robust tool for solving groundwater flow and transport problems, particularly for complex geometries and variably saturated flows. FEFLOW serves as a benchmark in this study, allowing for a direct comparison between a traditional finite element approach and a more modern meshless method.

### Result and Discussion

The results of the simulations indicate that both methods—MLPG and FEFLOW—generated comparable concentration contours, with saltwater intrusion extending approximately halfway into the aquifer. Both methods showed similar patterns of saltwater dispersion, with a progressive decrease in salinity concentration as the distance from the saline boundary increased. The concentration contours were evenly spaced, which suggests that the dispersion process was uniform, particularly in the central regions of the aquifer. However, MLPG demonstrated superior accuracy in capturing concentration gradients near the impermeable upper boundary, owing to its meshless nature, which allows for finer resolution in regions where traditional mesh-based methods may struggle.

In addition to concentration contours, the flow velocity vectors derived from the MLPG method revealed significant vertical movement near the saline boundary. These vertical flow paths are driven by hydraulic gradients that oppose gravity, directing the flow upward towards the surface. In contrast, areas farther from the saline boundary exhibited predominantly horizontal flow patterns, as expected in regions where salinity has a minimal effect on flow dynamics. This observation confirms the expected behavior of groundwater flow in coastal aquifers under saltwater intrusion conditions, where the direction of flow is heavily influenced by the concentration gradients and the relative density of the freshwater and saline water.

A sensitivity analysis was also conducted to assess the influence of key aquifer properties on the extent and shape of the saltwater intrusion. The results indicated that hydraulic conductivity was the most significant parameter affecting the intrusion pattern. Variations in hydraulic conductivity had a marked effect on the predicted extent of saltwater intrusion, with higher conductivity leading to greater

penetration of saltwater into the aquifer. Other parameters, such as porosity and boundary discretization, also affected the results, but to a lesser degree. This finding underscores the importance of accurate parameter estimation in groundwater modeling, as even small changes in hydraulic conductivity can significantly impact the accuracy of predictions related to saltwater intrusion.

### **Conclusion**

This comparative study demonstrates the effectiveness of the MLPG and FEFLOW methods in simulating saltwater intrusion and modeling groundwater contamination. Both methods provided reliable and consistent results, validating their applicability in groundwater studies. The MLPG method proved to be particularly advantageous in capturing high-precision concentration gradients near boundaries, making it a valuable tool in situations where boundary resolution is critical. On the other hand, FEFLOW remains a robust and reliable model for solving groundwater flow and transport problems in more general applications, particularly in complex geometries. The sensitivity analysis highlighted the critical role of accurate parameter estimation, particularly hydraulic conductivity, in the predictive modeling of saltwater intrusion. This study not only underscores the value of advanced numerical methods like MLPG and FEFLOW for groundwater contamination problems but also points to the need for further research to explore three-dimensional geometries and incorporate anisotropic aquifer properties. These future extensions could enhance the predictive capabilities of these models and provide more accurate simulations for real-world groundwater systems, ultimately helping to improve water management strategies and mitigate the impacts of saltwater intrusion in coastal areas.



## شبیه‌سازی نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی به کمک روش عددی MLPG

الهام کریم‌زاده<sup>۱</sup> | ابوالفضل اکبرپور<sup>۲</sup> | علی محتشمی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران.
۳. استادیار کرسی یونسکو در مطالعات افلج (باستان‌شناسی)، دانشگاه نیزوا، نیزوا، عمان.

✉ نویسنده مسئول: [Akbarpour@birjand.ac.ir](mailto:Akbarpour@birjand.ac.ir)

### چکیده

آبخوان‌های ساحلی، سفره‌های آب زیرزمینی هستند که در کنار دریا قرار گرفته‌اند. همواره کیفیت آب این آبخوان‌ها مورد توجه بوده و یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌ها در این مورد نفوذ آب‌شور دریا به آبخوان می‌باشد. میزان اثرپذیری آب سفره، به جریان آب زیرزمینی و همچنین غلظت ماده آلاینده نمک بستگی دارد؛ از طرفی میزان شوری وارده نیز به عواملی چون فعالیت‌های کشاورزی و انسانی، تغییرات اقلیمی و غیره وابسته است. امروزه با عنایت به کمبود منابع آب، استفاده از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته است، لذا بررسی پدیده نفوذ آب‌شور امری ضروری تلقی می‌شود که در این مطالعه به بررسی آن پرداخته می‌شود. دو روش بدون شبکه پتروو-گالرکین محلی (MLPG) و روش اجزا محدود FEFLOW برای شبیه‌سازی این پدیده به کار گرفته شد. نتایج حاصل از روش MLPG نشان داد که منحنی‌های هم‌غلظت و بردارهای سرعت به خوبی نحوه توزیع غلظت و مسیر جریان را در آبخوان نشان می‌دهند. غلظت نسبی آب‌شور با افزایش فاصله از مرز آلاینده کاهش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی به روش FEFLOW نیز منحنی‌های مشابهی از هم‌غلظت‌ها ارائه کرد که تطابق مناسبی با نتایج MLPG دارد. همچنین، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی نشان داد که با تغییر فاصله‌بندی از ۰/۱ به ۰/۲، میزان تغییرات غلظت در گره‌ها ناچیز است. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که هر دو روش MLPG و FEFLOW توانایی بالایی در مدل‌سازی دقیق مسئله هنری دارند و اختلاف قابل توجهی در نتایج نهایی مشاهده نشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

نفوذ آب‌شور،

معادلات جریان و انتقال،

روش پتروو-گالرکین محلی،

مدل FEFLOW

## مقدمه

بخش عظیمی از آب شیرین جهان توسط سفره‌های آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. طول عمر این سفره‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ سال متغیر می‌باشد. به‌طور کلی عواملی چون افزایش خشک‌سالی، استخراج بیش از حد آب زیرزمینی و هم‌چنین کاهش بارندگی بر سطح آب زیرزمینی اثر گذاشته و موجب افت آن می‌گردد (Mohtashmi, 2015). در آبخوان‌های ساحلی که بخشی از منابع آب زیرزمینی می‌باشند خطر پدیده نفوذ آب دریا وجود دارد، با کاهش سطح آب کیفیت سفره سریع‌تر به حد نامطلوب می‌رسد (Nick et al., 2013). بنابراین، با ارائه پیشنهاداتی می‌توان خسارات حاصل از این پدیده را کاهش داد. از مباحث مهم در آبخوان‌های ساحلی نفوذ آلاینده‌ها به داخل آبخوان می‌باشد که یکی از این آلاینده‌ها آب‌شور دریا است. استخراج بیش از حد آب زیرزمینی می‌تواند منجر به کمبود آب شیرین و نفوذ آب‌شور به آبخوان گردد (Walther et al., 2012). در لحظه تداخل، آب شیرین به‌علت چگالی کم‌تر نسبت به آب‌شور در بالای آن قرار می‌گیرد (Jamshidzadeh, 2012). در ارتباط با بحث تداخل آب‌شور و آب شیرین باید معادلات انتقال و جریان حل شوند تا مدل‌سازی صورت گیرد. حل معادلات انتقال در خصوص تعیین غلظت شوری و حل معادلات جریان در خصوص تعیین هد و سرعت آب می‌باشد تا در نهایت ارتباط بین غلظت با افزایش و کاهش سطح آب نیز مورد بررسی قرار گیرد (Singh, 2014). برای حل این معادلات روش‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی وجود دارند که به‌علت زمان‌بر بودن روش آزمایشگاهی و هم‌چنین عدم توانایی حل تحلیلی تحت شرایط مرزی پیچیده، روش عددی نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد (Bazari, 2017). اکبرپور و همکاران با استفاده از الگوریتم گام تصادفی و مدل عددی اجزا محدود، حریم کمی چاه‌های یک آبخوان استاندارد و آبخوان آزاد بیرجند را تعیین و ترسیم نمودند و

نتایج نشان داد که کشیدگی حریم به سمت مناطقی با سطح آب زیرزمینی بالاتر و قابلیت انتقال بیشتر است (Akbarpour et al., 2020). یاسی و همکاران با استفاده از روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین و معادله جابه‌جایی-پراکندگی کسری، مدلی جامع برای انتقال آلودگی در رودخانه‌ها ارائه دادند که نتایج نشان داد به‌طور متوسط ۱۱ درصد دقیق‌تر از مدل مایک ۲۱ است (Yasi et al., 2022). از مزیت‌های روش عددی می‌توان به صرفه اقتصادی آن‌ها و از همه مهم‌تر قابلیت حل مسئله حتی تحت شرایط پیچیده اشاره نمود. اساس کار روش‌های عددی استفاده از معادلات دیفرانسیلی است که وابسته به نوع مسئله به‌صورت خطی یا غیرخطی حل می‌شوند (Arzani, 2016). به‌طور کلی روش‌های عددی بر دو دسته شبکه‌بندی شده مانند FEM، BEM، FDM و غیره و بدون شبکه MLPG، PCM و غیره تقسیم‌بندی می‌شوند که وابسته به نوع و شرایط مسئله به‌کار گرفته می‌شوند (Akbarpour et al., 2018). روش‌های بدون شبکه به‌علت عدم استفاده از شبکه و اجزا از سهولت و مزیت بیشتری برخوردار هستند (Arzani, 2016). هابرت حل عددی نفوذ دائمی آب‌شور در آبخوان‌های ساحلی را بر پایه فرضیه فصل مشترک ارائه داد، اگرچه در عمل فصل مشترک تیغه‌ای و آب‌شور با آب شیرین طی فرایند پخش مکانیکی به‌طور تدریجی ادغام می‌گردد. پهنای ناحیه انتشار به خصوصیات آبخوان و جابجایی آب به‌علت جزرومد و نوسانات تغذیه وابسته است (Hubbert, 1940). روش فصل مشترک نیز برای شبیه‌سازی و تهیه مدل دوبعدی و سه بعدی مسئله مذکور به‌کار گرفته می‌شود که فرایند در مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی مسئله نفوذ آب‌شور از روش فصل مشترک استفاده نمود. تعدادی از این مدل‌ها نشان دادند که نفوذ آب‌شور به غلظت سیال وابسته می‌باشد (Frind, 1982). یوکیون و همکارانش مدل عددی سه بعدی را برای شبیه‌سازی نفوذ آب دریا توسعه دادند. آن‌ها توزیع

راستگویی و همکاران روش عددی را برای مطالعه نفوذ دائمی آب‌شور که شامل پخش هیدرو دینامیکی در آبخوان‌های ساحلی است گسترش دادند. مدل استفاده شد تا با بهره‌وری اقدامات کنترل آب دریا شامل تغذیه چاه و سیستم ترکیبی برداشت آب‌شور و تغذیه آب شیرین مورد بررسی قرار دهد (Rastgoi et al., 2004).

به‌منظور صحت‌سنجی روش‌ها و نتایج حاکی از آن‌ها می‌توان از مسئله استاندارد هنری که نفوذ آب‌شور را مطرح می‌کند استفاده نمود. لیو و همکارانش مدل دوبعدی حجم محدود را برای مدل‌سازی نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی ارائه دادند. در این مطالعه جریان پایدار و غلظت متغیر در نظر گرفته شد و در انتها به اعتبارسنجی مدل با مسئله هنری تحت شرایط دائم و ماندگار پرداختند (Liu et al., 2001).

در مطالعه حاضر، ابتدا از روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین برای گسسته‌سازی معادلات استفاده شده تا مسئله استاندارد هنری را حل و مدل‌سازی کند و اعتبارسنجی نیز صورت گیرد (Croicher et al., 1995). از مدل اجزا محدود FEFLOW نیز برای شبیه‌سازی آلودگی وارده استفاده شد تا در انتها بتوان نتایج حاصل از روش بدون شبکه را با اجزا محدود (FEM) مقایسه نمود. هدف اصلی این مطالعه بررسی پدیده تداخل آب‌شور و شیرین در آبخوان ساحلی با محیطی همگن و همسان است، که در این رابطه بررسی پارامترهایی از قبیل سرعت، هد جریان و هم‌چنین غلظت ناشی از ورود ماده آلاینده مهم می‌باشد؛ به این منظور معادلات جریان و انتقال محلول به‌کار می‌روند. برای گسسته‌سازی این معادلات به‌کمک توابع شکل حداقل مربعات متحرک (MLS) و وزن کیوبیک اسپلاین از روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین استفاده می‌شود و تغییرات شوری و اثر افزایش و کاهش سطح آب زیرزمینی بر آن بررسی می‌شود. در پایان نتایج با مدل اجزا محدود FEFLOW مقایسه می‌شوند.

فصل مشترک را بین آب دریا و آب شیرین و هم‌چنین سیر تکاملی ناحیه انتقال را مطالعه کردند. در پایان میزان نفوذ آب دریا را به‌علت پمپاژ آب زیرزمینی تخمین زدند (Yuqun et al., 1998). اسبای و همکاران نیز مدل اجزا محدود را برای پیش‌بینی نفوذ آب‌شور تحت شرایط دائم و پایدار بر مبنای فرضیه فصل مشترک توسعه دادند و نتایج را با مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه نمودند (Sbai et al., 1998). در این میان برخی از محققین به محدودیت‌های روش فصل مشترک پی بردند برای نمونه ساکر مدل دوبعدی اجزا محدود را برای شبیه‌سازی انتقال محلول برحسب غلظت ارائه دادند و محدودیت‌های روش فصل مشترک را در آبخوان ساحلی تحت شرایط دائمی و غیردائمی بررسی نمود (Saker, 1999). در رابطه با بحث تداخل مطالعات متعدد دیگری صورت گرفته که به شرح زیر است:

شریف و همکاران مدل عددی دوبعدی اجزا محدود را برای شبیه‌سازی نفوذ آب‌شور در آبخوان محصور تحت شرایط دائم ارائه دادند. مدل برای شبیه‌سازی نفوذ آب دریا در آبخوان وسیع به‌کار گرفته شد و نتایج نشان داد که ایزوکلر ۳۵ از فاصله ۶۵ کیلومتری مرز دریا در پایین آبخوان نفوذ می‌کند (Sherif et al., 1988).

یاسی و همکاران با استفاده از روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین، مدل‌سازی عددی انتقال آلاینده در رودخانه مری‌برن را انجام دادند و نتایج نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای این روش نسبت به روش‌هایی مانند تفاضل محدود و اجزای محدود بود (Yasi et al., 2021).

بژیو و همکاران مدل اجزا محدود انتقال محلول و جریان را برای پیش‌بینی محدوده نفوذ آب دریا در مقطع عمودی برای جریان پایدار توسعه دادند. مطالعه ثابت کرد که آبخوان با نفوذ آب دریا در مجاورت با تالاب تهدید می‌شود (Bixio et al., 1998).



این روش با استفاده از فرم ضعیف محلی، معادلات را حل می‌کند و برای اولین بار توسط آتلوری و ژو ارائه شد ( Atluri & Zhu., 1998). تابع تقریب در این روش حداقل مربعات متحرک می‌باشد و همچنین به منظور حل معادلات انتگرالی از روش انتگرال گیری گوسی استفاده می‌گردد.

### فرمول بندی روش محلی بدون شبکه پتروو-گالرکین (MLPG)

برای مسائل استاتیک دو بعدی که معادله تعادل و شرایط مرزی روی دامنه  $\Omega$  و مرز  $\Gamma$  احاطه شده است، به صورت روابط (۵۴)، (۵۵) و (۵۶) نوشته می‌شوند و شکل ۱ دامنه مسئله به همراه شرایط مرزی ضروری و طبیعی را نشان می‌دهد که در آن  $X_Q$ : نقطه گوسی،  $\Omega_s$ : دامنه پایه،  $\Omega_q$ : دامنه انتگرال گیری،  $\Omega_w$ : دامنه تابع وزن،  $\Gamma_{qi}$ : مرز درونی دامنه انتگرال گیری،  $\Gamma_{qu}$ : قسمتی از مرز ضروری و  $\Gamma_{qt}$ : قسمتی از مرز طبیعی می‌باشد (Liu and Gu, 2005).

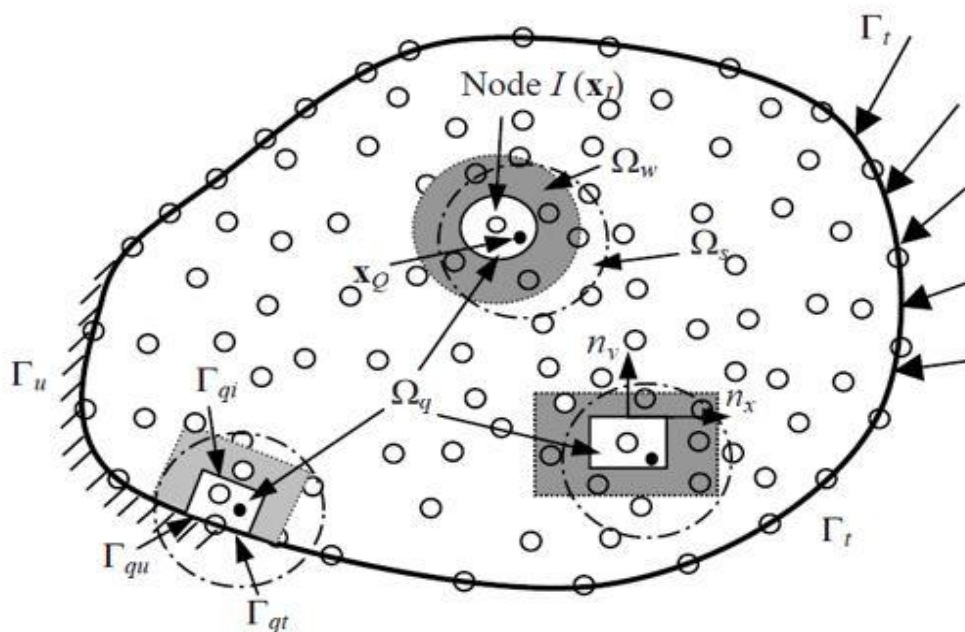
نوآوری این مطالعه مدل سازی پدیده تداخل آب شور و آب شیرین به روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین برای آبخوان ساحلی در حالت دوبعدی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

بسته به اینکه مبنای کار روش‌های بدون شبکه بر پایه روند فرمول بندی، تقریب یا درون یابی، یا نمایش دامنه باشد، می‌توان روش‌های مختلفی را در نظر گرفت. روش محلی پتروو-گالرکین یکی از روش‌های بدون شبکه می‌باشد (Liu, 2002; Atluri and Zhu, 1998). در این مطالعه کلیه مراحل مدل سازی و حل معادلات در نرم افزار برنامه نویسی متلب انجام شده است.

### روش عددی بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین (MLPG)

روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین یکی از روش‌های بدون شبکه واقعی است، زیرا در هیچ یک از مراحل تحلیل اعم از تقریب متغیر میدان و انتگرال گیری عددی معادلات فرم ضعیف، نیازی به شبکه بندی بر روی دامنه مسئله ندارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز زاینده رود.

Fig 1. Geographical location of the Zayande-Rud Basin.

در حالت کلی شکل قوی معادله در مکانیک جامدات به

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad \text{معادله تعادل} \quad (1)$$

$$u = \bar{u} \quad \text{شرط مرزی اساسی} \quad (2)$$

رابطه تنش و کرنش روی مرز طبیعی:

$$\sigma_{ij} \cdot n_j = \bar{t} \quad \text{شرط مرزی طبیعی} \quad (3)$$

فرم ضعیف پتروو-گالرکین بر روی دامنه محلی حول گره I ام می‌تواند به صورت معادله (۱) نوشته شود:

$$\int_{\Omega_q} (\sigma_{ij,j} + b_i) W_I d\Omega = 0 \quad (4)$$

$W_I$  تابع وزن است. با استفاده از انتگرال گیری جزء به جزء و قضیه دیورژانس رابطه (۴) را می‌توان ساده‌تر نمود:

$$\int_{\Omega_q} W_I \sigma_{ij,j} d\Omega = \int_{\Gamma_q} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma - \int_{\Gamma_{\Omega_q}} W_{I,j} \sigma_{ij} d\Omega \quad (5)$$

در نهایت با جای‌گذاری معادله (۵) در معادله (۴) انتگرال‌ها بر روی دامنه و مرزها تعیین می‌شوند:

$n_j$  = مولفه زام بردار واحد قائم بر مرز به سمت خارج

$$\int_{\Gamma_q} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma - \int_{\Omega_q} [W_{I,j} \sigma_{ij} - W_I b_i] d\Omega = 0 \quad (6)$$

انتگرال مرزی ترم اول معادله (۶) در حالت کلی شامل سه انتگرال مرزی داخلی، ضروری و طبیعی است. پس:

$$\int_{\Gamma_{qi}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma + \int_{\Gamma_{qu}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma + \int_{\Gamma_{qt}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma d\Omega - \int_{\Omega_q} [W_{I,j} \sigma_{ij} - W_I b_i] = 0 \quad (7)$$

به‌منظور ساده‌سازی انتگرال فرم ضعیف محلی اغلب تابع وزن طوری تعیین می‌شود که ترم انتگرال داخلی حذف شود. بنابراین رابطه فوق ساده‌تر شده:

$$\int_{\Gamma_{qu}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma + \int_{\Gamma_{qt}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma d\Omega - \int_{\Omega_q} [W_{I,j} \sigma_{ij} - W_I b_i] = 0 \quad (8)$$

با جای‌گذاری رابطه (۳) در (۸):

$$\int_{\Omega_q} W_{I,j} \sigma_{ij} d\Omega - \int_{\Gamma_{qu}} W_I n_j \sigma_{ij} d\Gamma = \int_{\Gamma_{qt}} \bar{t} W_I d\Gamma + \int_{\Omega_q} W_I b_i d\Omega \quad (9)$$

تقریب جابجایی با به‌کارگیری توابع  $\Phi_i$  که تابع شکل MLS هستند و به شکل ماتریس ارائه می‌شوند به فرم زیر می‌باشد:

$$U_{2 \times 1}^h(X) = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \dots & \Phi_n & 0 \\ 0 & \Phi_1 & \dots & 0 & \Phi_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \dots \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} = \Phi_{(2 \times 2n)} u_{(2n \times 1)} \quad (10)$$

به صورت دستگاه معادلات می باشد. که:

$$K_I u = F_I$$

$$K_I = \int_{\Omega_q} V_I^T D B d\Omega - \int_{\Gamma_{qu}} W_I^T n D B d\Gamma$$

$$F_I = \int_{\Omega_q} W_I^T b d\Omega + \int_{\Gamma_{qt}} W_I^T t d\Gamma$$

توسعه‌ای معرفی کردند. بلچکو و همکاران در سال ۱۹۹۴ و آلتوری و ژو در سال ۱۹۹۸ برای ساخت توابع شکل خود به ترتیب در روش‌های بدون المان گالرکین و روش بدون شبکه محلی پتروو-گالرکین از تابع تقریب حداقل مربعات متحرک بهره برده‌اند ( Atluri et al., 1998; Belytschko et al., 1994).

اگر  $U^h(x)$  یک تابع تغییرات میدانی در محدوده مورد بررسی  $\Omega$  باشد، تقریب  $U(x)$  در نقطه  $x$  با  $U^h(x)$  نشان داده می‌شود. تقریب حداقل مربعات متحرک که متغیر میدان را به صورت محلی از ضرب ماتریس چند جمله‌ای در ماتریس ضرایب توصیف می‌کند به فرم رابطه (۱۴) بیان می‌شود.

$$U^h(x) = \sum_j^m p_j(x) a_j(x) = p^t(x) a(x)$$

$$a^T(x) = \{a_1(x) \ a_2(x) \ \dots \ a_m(x)\}$$

چند جمله‌ای کامل از مرتبه  $m$  طبقه رابطه (۱۶) بیان می‌گردد:

$$p^T(x) = \{1 \ x \ x^2 \ \dots \ x^m\}$$

$$p^T(x, y) = \{1 \ x \ y \ x^2 \ xy \ y^2 \ \dots \ y^m\}$$

به منظور تعیین ضرایب مجهول  $a(X)$ ، تابع وزن دار نرم در رابطه (۱۸) باید حداقل شود.

$$J = \sum_I^n W(X - X_I) [P^T(X_I) a(X) - U_I]^2$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۰) در مولفه جابجایی معادله (۱) فرم ضعیف و گسسته شده معادلات در روش MLPG (۱۱)

$K_I$  = ماتریس سختی گره  $I$  ام،  $u$  = ماتریس مجهولات و  $F_I$  = بردار نیروی گرهی

$$(۱۲)$$

$$(۱۳)$$

در رابطه (۱۲) (۱۳)،  $W$  ماتریس وزن کلی و  $V$  مشتق تابع وزن و  $D$  ثابت ماده است. لازم به ذکر است که مقادیر  $K_I$  و  $F_I$  با انتگرال گیری گوسی به دست می‌آیند.

### تابع تقریب حداقل مربعات متحرک

از این تابع برای درون‌یابی نقاط با مقادیر متغیر استفاده می‌کنند. این تابع بیشتر در روش‌های بدون شبکه شکل ضعیف کاربرد دارد. از ویژگی‌های آن می‌توان به ایجاد محیط پیوسته برای درون‌یابی تابع میدان و تقریب‌سازی با مرتبه دلخواه اشاره نمود. این تابع به سه پارامتر تابع وزن نقطه‌ای، تابع چندجمله‌ای و مجموعه ضرایبی که به موقعیت نقاط بستگی دارند وابسته می‌باشد ( Akbarpour et al., 2019). به طوری که اولین بار نیرولز و همکاران در سال ۱۹۹۲ این تابع را به منظور گسترش روش المان

$$(۱۴)$$

که در آن  $m$  تعداد جملات تشکیل‌دهنده،  $p(x)$  و  $a(x)$  بردار ضرایب  $p(x)$  است که به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$(۱۵)$$

در رابطه (۱۵)،  $p(x)$  یک بردار از توابع پایه است، که اغلب شامل حداکثر تک جمله‌ای‌های لازم برای حصول حداقل کامل بودن، می‌باشد. در فضای یک بعدی، یک پایه

$$(۱۶)$$

و در فضای دو بعدی  $(x, y)$ :

$$(۱۷)$$

به طور کلی بردار  $p(x)$  بر اساس مثلث خیام-پاسکال ساخته می‌شود.

$$(۱۸)$$

است به نحوی که تابع وزن  $W_i(X)$  مقادیر غیر صفری در آن خواهد داشت. به منظور مینیمم کردن تابع  $J$  شرط رابطه (۱۹) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 0$$

$$a(x) = A^{-1}(X)B(X)U_S$$

$$A(X) = \sum_I^n W(X_I)p(X_I)P^T(X_I) \quad (21)$$

$$B(X) = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n] \quad (22)$$

$$B(X) = [W_1p(x_1)W_2p(x_2) \ \dots \ W_np(x_n)] \quad (23)$$

$$U_S = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n] \quad (24)$$

$$U^h(X) = \sum_I^n \sum_j^m P_j(X)(A^{-1}(X)B(X))_{jI}U_I \quad (25)$$

$$U^h(X) = \sum_I^n \phi_I(X)U_I \quad (26)$$

رابطه (۲۷) بیان می‌گردد:

$$\phi_I(X) = \sum_j^m P_j(X)(A^{-1}(X)B(X))_{jI} = P^T A^{-1}B_I \quad (27)$$

دلخواه، کاهش می‌یابد.

- مقدار تابع وزن به میزان مناسبی روی مرزها هموار عمل می‌کند.

این تابع به صورت‌های گوسی و اسپیلاین مورد استفاده قرار می‌گیرد، از آن جایی که در این مطالعه از تابع وزن اسپیلاین استفاده شده است، نحوه محاسبه آن در رابطه (۲۸) شرح داده می‌شود.

$$W_i(X) = \begin{cases} 2/3 - 4r_i^2 + 4r_i^3 & \bar{r}_i \leq 0.5 \\ 4/3 - 4\bar{r}_i + 4r_i^2 - 4/3r_i^3 & 0.5 \leq \bar{r}_i \leq 1 \\ 0 & \bar{r}_i \geq 1 \end{cases} \quad (28)$$

وزن‌های غیر صفر بزرگ‌تر از تعداد تک تک جملات موجود در چند جمله‌ای باشند. ( $n > m$ )

معادلات نفوذ آب شور

در رابطه (۱۸)،  $W_i(X)$  نشان دهنده تابع وزن مربوط به نقطه گره‌ی  $I$  و مقدار داخل کروشه اختلاف بین مقدار تخمین زده شده در نقطه  $I$  و مقدار داده شده در همان نقطه می‌باشند. همچنین  $n$  تعداد نقاط در ناحیه حمایتی

(۱۹)

که نهایتاً منجر به رابطه خطی (۲۰) می‌شود.

(۲۰)

در معادله (۲۰)،  $A(X)$ ،  $B(X)$  و  $U_S$  به ترتیب در روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۴) تعریف می‌شوند.

با جای‌گذاری رابطه (۲۰) در رابطه (۱۴) تقریب حداقل مربعات متحرک به صورت روابط (۲۵) و (۲۶) ارائه می‌گردند:

که در آن  $U^h(X)$  تقریب تابع  $\phi_I(X)$  تابع شکل و  $U_I$  پارامتر گره‌ی می‌باشد. به عبارتی دیگر تابع شکل بصورت

(۲۵)

(۲۶)

## تابع وزن

انتخاب تابع وزن نقش مهمی در عمل تقریب‌سازی توسط تابع تقریب حداقل مربعات متحرک دارد. ویژگی‌های تابع وزن به شرح زیر می‌باشد (Akbarpour et al., 2019):

- مقدار تابع وزن در داخل دامنه حمایتی مثبت است.
- مقدار تابع وزن در خارج دامنه حمایتی صفر است.
- مقدار تابع وزن به صورت یکنواخت نسبت به نقطه

(۲۸)

در رابطه (۲۸)،  $\Gamma_W$  شعاع تأثیر نقطه گره‌ی  $X_i$  می‌باشد. برای هر نقطه،  $\Gamma_W$  باید به گونه‌ای انتخاب شود که تعداد

محیط متخلخل و همسان مطابق زیر نوشته می‌شوند (Rastogi, 2004).

### معادله جریان

معادله داریسی:

$$q_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \left[ \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho \cdot g \cdot e_j \right] \quad (29)$$

مولفه بردار واحد جاذبه  $(LT^{-2})$ ،  $g =$  شتاب جاذبه  $(LT^{-2})$

معادله جریان:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot q_i) = 0 \quad (30)$$

$$\rho = \rho_f (1 + \varepsilon \cdot C)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

$$\frac{\rho}{\rho_f} - 1 = \rho_r = \varepsilon \cdot C$$

$$h = \frac{p}{\rho_f \cdot g} + y$$

با جای گذاری روابط (۳۳) و (۳۴) در رابطه (۲۹):

$$q_i = -k_{ij} \left[ \frac{\partial h}{\partial x_j} + \varepsilon \cdot C \cdot e_j \right]$$

متغیرهای بدون بعد:

$$x' = \frac{x}{d}, y' = \frac{y}{d}, h' = \frac{h}{d}, C' = \frac{C}{C_S}, k'_{Lyy} = \frac{k_{yy}}{k_{Lxx}}, k'_{Lxx} = \frac{k_{xx}}{k_{Lxx}}, V'_x = \frac{V_x}{V}, V'_y = \frac{V_y}{V} \quad (36)$$

$$\alpha'_T = \frac{\alpha_T}{\alpha_L}, \alpha'_L = \frac{\alpha_L}{\alpha_L} = 1, d_L = \frac{d}{\alpha_L}$$

با جای گذاری روابط (۳۶) در رابطه (۳۰) و مشتق گیری از آن‌ها در حالت دوبعدی معادلات جریان مطابق زیر می‌باشند:

$$k_{Lxx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{Lyy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \quad (37)$$

در این مطالعه از روش جریان با جرم مخصوص متغیر استفاده گردید. غلظت نمک محلول در آب با نفوذ به داخل آبخوان با حل همزمان دو معادله جریان و انتقال محلول به دست می‌آید. معادلات جریان و انتقال محلول در

$k_{ij}$  نفوذپذیری ذاتی در محیط متخلخل  $(L^2)$ ،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال  $(ML^{-1}T^{-1})$ ،  $p$  فشار سیال  $(ML^{-1}T^{-2})$ ،  $\rho$  چگالی سیال  $(ML^{-3})$ ،  $e_j$

رابطه بین چگالی سیال و غلظت مطابق زیر می‌باشد:

$$(31)$$

$\rho_f =$  چگالی آب شیرین  $(ML^{-3})$ ،  $C =$  غلظت آلاینده  $(ML^{-3})$

$$(32)$$

$\rho_s =$  چگالی آب شور  $(ML^{-3})$

$$(33)$$

$$(34)$$

$y =$  ارتفاع از مبدأ  $(L)$ ،  $h =$  هد آبخوان  $(L)$

$$(35)$$

$k_{ij} =$  تنسور هدایت هیدرولیکی  $(LT^{-1})$

$V =$  سرعت خطی میانگین  $(LT^{-1})$ ،  $d =$  عمق آبخوان ساحلی محصور  $(L)$ ،  $C_S =$  غلظت آب دریا  $(ML^{-3})$ ،  $k_{yy}, k_{xx} =$  مولفه‌های تنسور هدایت هیدرولیکی در بالاترین آبخوان  $(LT^{-1})$ ،  $k_{Lyy}, k_{Lxx} =$  مولفه‌های تنسور هدایت هیدرولیکی در پایین‌ترین آبخوان  $(LT^{-1})$

$$(37)$$

سرعت خطی میانگین  $V_x$  و  $V_y$  در حالت بدون بعد برای سیستم مختصات دوبعدی به شرح زیر است:

$$V_x = -\frac{A}{\theta} \cdot k_{Lxx} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) \quad (38)$$

$$V_y = -\frac{A}{\theta} \cdot k_{Lyy} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \varepsilon \cdot C\right) \quad (39)$$

### معادله انتقال

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial x_j} \right) - V_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 \quad (40)$$

گرفته و معادله حاکم بر انتقال در حالت بدون بعد برای سیستم مختصات دوبعدی به شکل زیر می‌باشد:

$$D_{xx} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{xy} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x \cdot \partial y} + D_{yx} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y \cdot \partial x} - \left( V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) \cdot d_L = 0 \quad (41)$$

که در آن:

$$D_{xx} = \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_T \cdot \frac{V_y^2}{|V|} \quad (42)$$

$$D_{yy} = \frac{V_y^2}{|V|} + \alpha_L \cdot \frac{V_x^2}{|V|} \quad (43)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (1 - \alpha_T) \cdot \frac{V_x \cdot V_y}{|V|} \quad (44)$$

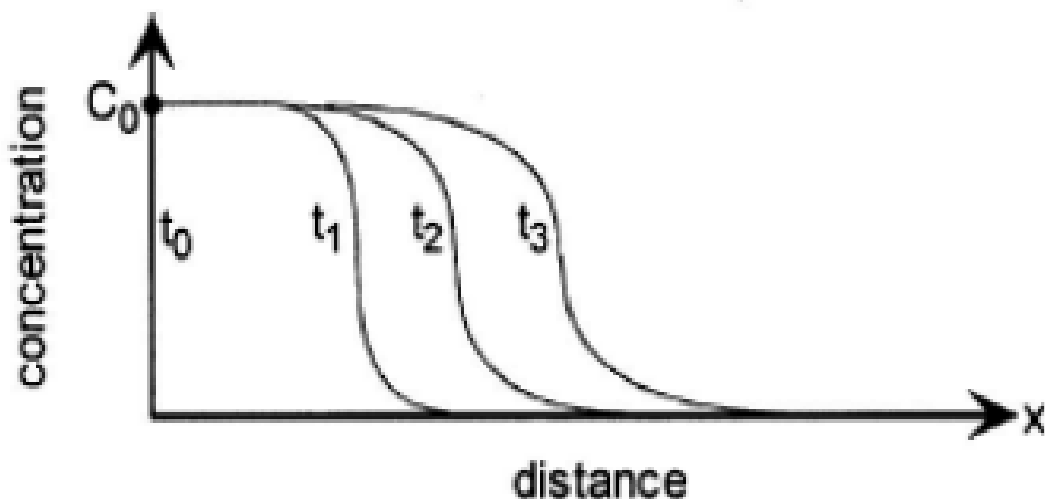
به‌طور کلی پخش ماده محلول در آبخوان به دو شکل مکانیکی و مولکولی رخ می‌دهد. این پدیده باعث گسترش آلودگی در جهات طولی و عرضی می‌شود. با گذر زمان آلودگی از سمت منبع آلودگی که در این تحقیق دریا می‌باشد به سمت آب شیرین پخش می‌گردد.

که  $V_i = \frac{1}{A} \cdot V_{Li}$  = گرادیان هد پزومتري،  $\theta$  = تخلخل می‌باشد.

$D_{ij}$  = ضریب پخش ( $L^2 T^{-1}$ )،  $v_i$  = مولفه سرعت نفوذی ( $L T^{-1}$ )،  $C$  = غلظت آلاینده ( $ML^{-3}$ )، تغییر متغیرهای داخل بخش معادله جریان به‌طور مشابه صورت

$D_{ij}$  = تنسور پخش در محیط دوبعدی که ترم‌های آن بدون بعد،  $\alpha_T$  = انتشار عرضی،  $\alpha_L$  = انتشار طولی می‌باشند.

### پخشیدگی



شکل ۲. مدل مفهومی انتقال آلاینده در اثر پدیده پخش.

Fig 2. Conceptual model of pollutant transfer due to diffusion phenomenon.

باعث گسترش آلودگی در جهات طولی و عرضی و عمود می‌شود که غلظت نمک محلول کاهش می‌یابد.

### جابه‌جایی

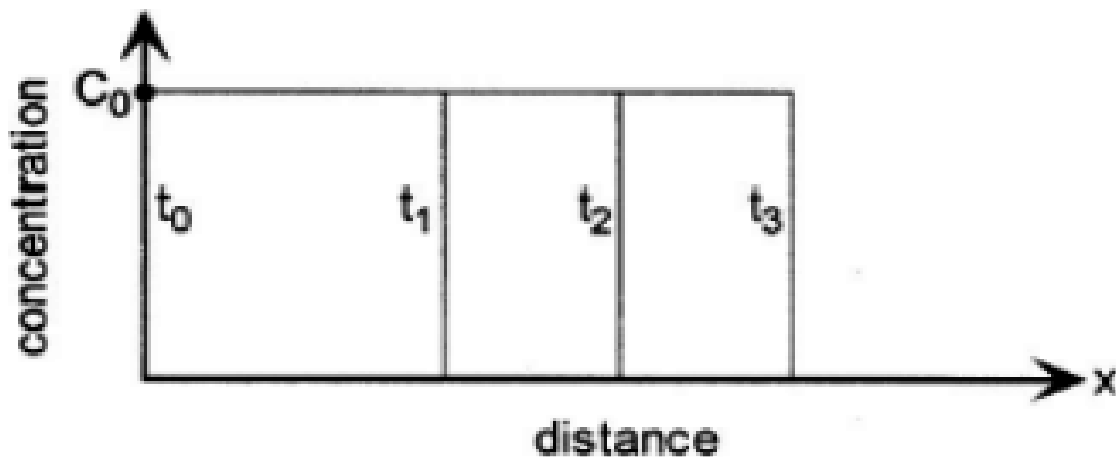
حرکت آلودگی توسط آب زیرزمینی را همرفت یا جابجایی گویند. میزان انتقال وابسته به خواص آبخوان از جمله هدایت هیدرولیکی، تخلخل مؤثر و گرادیان و مستقل از ویژگی ماده آلاینده می‌باشد. مدل مفهومی با فرض این‌که پدیده پخش وجود نداشته و جریان دائمی تحت تأثیر هد باشد، در اثر پدیده همرفت یا جابجایی با گذر زمان آلاینده از منبع آلودگی در مسیر جریان حرکت می‌کند. لازم به ذکر است که طی فرایند انتقال همرفت میزان آلودگی ثابت می‌ماند.

### پخش مولکولی

پخش مولکولی با توزیع یکنواخت غلظت نمک در اثر حرکت براونی مولکول‌ها ایجاد می‌شود. همچنین میزان انتشار و رقیق شدن غلظت ماده آلاینده به خواص آلاینده و گرادیان غلظت آن وابسته است.

### پخش مکانیکی

پخش مکانیکی در اثر حرکت آب زیرزمینی و اختلاط با ماده آلاینده ایجاد می‌شود و میزان اختلاط آن وابسته به خواص آبخوان و مستقل از خواص آلاینده است. سرعت جریان در جهت طولی و عرضی برای محیط همگن ثابت و برای متخلخل متغیر می‌باشد. در واقع پخش مکانیکی



شکل ۳. مدل مفهومی انتقال آلاینده در اثر پدیده جابجایی.

Fig 3. Conceptual model of pollutant transfer due to displacement phenomenon.

معادلات نفوذ آب‌شور شامل معادله جریان و معادله انتقال محلول می‌باشند که در ادامه به روش بدون شبکه پتروو-گالرکین گسسته‌سازی می‌شوند (Rastogi et al., 2004).

گسسته‌سازی معادلات جریان و انتقال با روش بدون

شبکه پتروو-گالرکین

گسسته‌سازی معادله سطح آب زیرزمینی

$$k_{Lxx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{Lyy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \quad (45)$$

$$k_{Lxx} \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} d\Omega + k_{Lyy} \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} d\Omega = -k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dA \quad (46)$$

با انتگرال‌گیری جزء به جزء:

$$k_{Lxx} \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial x} dS - k_{Lxx} \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} dA + k_{Lyy} \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial y} dS - k_{Lyy} \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} dA \quad (47)$$

$$= -k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dA$$

$$h = \sum h_i \cdot \Phi_i \quad (48)$$

$$C = \sum C_i \cdot \Phi_i \quad (49)$$

با جای‌گذاری معادلات (۴۸) و (۴۹) در معادله (۴۷) و مشتق‌گیری از توابع شکل آن‌ها حالت گسسته معادله سطح آب زیرزمینی خواهد شد:

$$k_{Lxx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot h dA + k_{Lyy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot h dA$$

$$= k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot C dA + k_{Lxx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot n_x dS$$

$$+ k_{Lyy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \cdot n_y dS \quad (50)$$

با دستگاه معادله:

$$K_1 \cdot u_1 = F_1 \quad (51)$$

$$K_1 = k_{Lxx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} dA + k_{Lyy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} dA \quad (52)$$

$$u_1 = h \quad (53)$$

$$F_1 = k_{Lyy} \cdot \varepsilon \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot C dA + k_{Lxx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot n_x dS + k_{Lyy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \cdot n_y dS \quad (54)$$

دامنه و همچنین شرط مرزی نیومن در جهت  $x$  و  $y$  تعیین می‌گردند.

ماتریس سختی  $K_1$  طبق توابع شکل و وزن و بردار نیروی گرهی  $F_1$  با معلوم بودن شرط اولیه غلظت در

#### گسسته‌سازی معادله انتقال

$$D_{xx} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{xy} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x \cdot \partial y} + D_{yx} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y \cdot \partial x} - \left( V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) \cdot d_L = 0 \quad (55)$$

$$D_{xx} \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} d\Omega + D_{yy} \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} d\Omega$$

$$+ D_{xy} \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x \cdot \partial y} d\Omega + D_{yx} \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y \cdot \partial x} d\Omega \quad (56)$$

$$- d_L \cdot V_x \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} d\Omega - d_L \cdot V_y \cdot \int_{\Omega} W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} d\Omega = 0$$

با انتگرال‌گیری جزء به جزء:

$$D_{xx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} dS - D_{xx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} dA$$

$$+ D_{yy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dS - D_{yy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dA \quad (57)$$

$$+ D_{xy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dS - D_{xy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dA$$



$$+D_{yx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} dS - D_{yx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} dA \\ -d_L \cdot V_x \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} dA - d_L \cdot V_y \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} dA = 0$$

با جای گذاری رابطه (۳-۷۱) در معادله (۳-۹۶) و مشتق گیری از توابع شکل آن‌ها حالت گسسته معادله انتقال خواهد شد:

$$D_{xx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot CdA + D_{yy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot CdA \\ + D_{xy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot CdA + D_{yx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot CdA \\ + d_L \cdot V_x \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot CdA + d_L \cdot V_y \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot CdA \quad (58) \\ = D_{xx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot n_x dS + D_{yy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \cdot n_y dS \\ + \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \cdot n_y dS + D_{yx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot n_x dS$$

با دستگاه معادله

$$K_4 \cdot u_4 = F_4 \quad (59)$$

$$K_4 = D_{xx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} dA + D_{yy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} dA \\ + D_{xy} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} dA + D_{yx} \cdot \int_A \frac{\partial W_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} dA \quad (60)$$

$$+ d_L \cdot V_x \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} dA + d_L \cdot V_y \cdot \int_A W_i \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} dA \\ u_4 = C \quad (61)$$

$$F_4 = D_{xx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot n_x dS + D_{yy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \cdot n_y dS + D_{xy} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \cdot n_y dS \\ + D_{yx} \cdot \int_S W_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot n_x dS \quad (62)$$

است جریان زیرسطحی و انتقال آلودگی را در شرایط سه بعدی و دو بعدی در برای مقاطع افقی، عمودی و متقارن در حالت اشباع یا غیراشباع، شرایط ماندگار یا غیر ماندگار، انتقال جرم و عناصر واکنشی را در محیط متخلخل مدل سازی کند.

ابزارهای گرافیکی آن نتایج نهایی به شکل سطحی، حجمی، چرخشی و سایه گذاری را به همراه مکان نما سه بعدی و الگوهای بردار جریان و مسیرها نمایش می دهد. این مدل توانایی مدل سازی با سطوح آزاد یا غیر آزاد مسائلی از قبیل جریان آب زیرزمینی دینامیکی وابسته یا مستقل از غلظت، جریان و انتقال اشباع متغیر در دو بعد و

ماتریس سختی معادله انتقال با معلوم بودن پارامترهای پراکندگی، سرعت و توابع شکل و وزن قابل تعیین بوده و بردار نیروی گرهی نیز با مشخص بودن شرط مرزی نیومن برای غلظت در جهت  $x$  معلوم می باشد. لازم به ذکر است که در مسئله نفوذ آب شور شرط مرزی نیومن غلظت در جهت  $y$  موجود نیست پس ترم دوم و سوم انتگرال مرزی قابل حذف می باشد.

### شبیه ساز FEFLOW

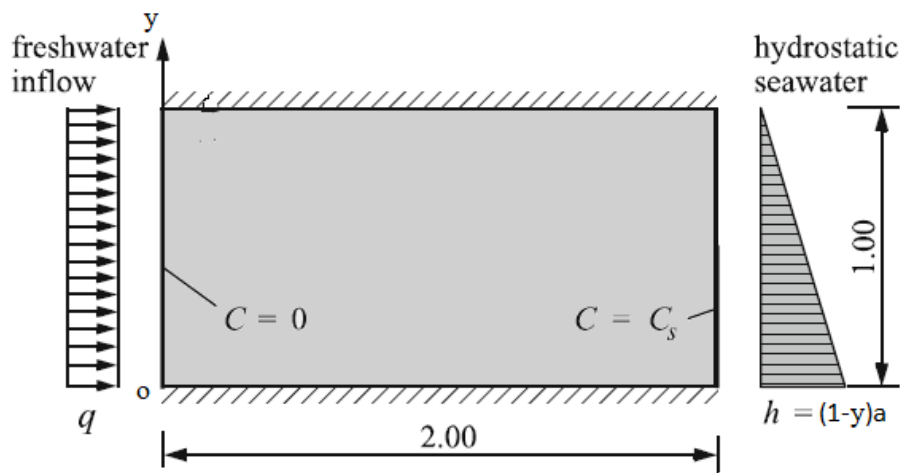
مدل FEFLOW، یک سامانه تعاملی برای مدل سازی آب های زیرزمینی به روش المان محدود می باشد که قادر

### نتایج و بحث

#### مسئله هنری

در این مسئله یک برش عمودی از آبخوان همگن و همسان که شار آب شیرین با  $C=0$  از یک مرز و آب شور دریا با  $C>0$  از مرز دیگر وارد می‌شود و تداخل آب شور و شیرین در داخل مقطع اتفاق می‌افتد در نظر گرفته شد. مرزهای بالا و پایین آبخوان نفوذناپذیر می‌باشند. سفره دارای ضریب ذخیره ویژه صفر، انتشار طولی و عرضی صفر، تخلخل  $0/35$  و ضریب انتشار مولکولی  $6.6 * 10^{-6}$  در سیستم واحد SI می‌باشد (Diersch, 2014).

سه‌بعد، جریان ناپایدار، انتقال آلودگی همرفت و پراکنده با گونه‌های شیمیایی جذب و پخش هیدرو دینامیکی و همچنین فرایندهای انتقال گرما زیرسطحی که تأثیرات غلظت سیال باعث آلودگی محلول و ایجاد میدان حرارتی می‌شود را دارد. از ویژگی‌های مدل می‌توان به مواردی چون بررسی توزیع مکانی و زمانی هدها و آلودگی‌های آب زیرزمینی، تحلیل دینامیکی نفوذ، مدل‌سازی فرآیندهای ژئوترمال، تحلیل مدت زمان آلودگی در آبخوان، طراحی و برنامه‌ریزی استراتژی‌های اصلاحی و ایجاد طرح‌های نظارتی مؤثر و جایگزین اشاره نمود (Diersch, 1992).



شکل ۴. تعریف مسئله هنری.

Fig 4. Definition of The Henry problem.

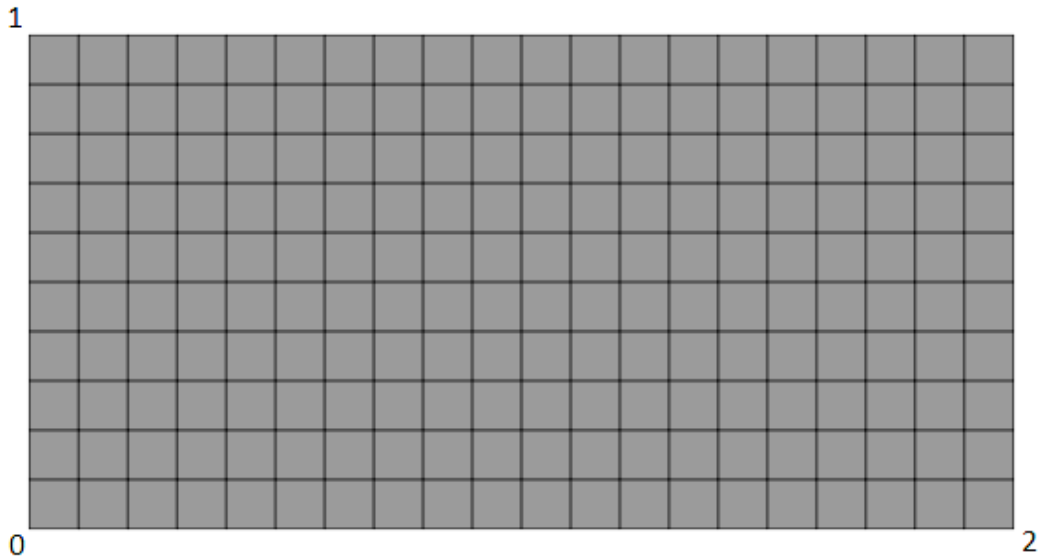
#### شبکه‌بندی

مختصات دامنه مسئله به شرح زیر است:

$$0 \leq X \leq 2$$

$$0 \leq Y \leq 1$$

شبکه‌بندی با فواصل  $0/1$  در دو جهت طولی و عرضی انجام گرفت و شبکه شامل ۲۰۰ سلول و ۲۳۱ گره می‌باشد.



شکل ۵. شبکه‌بندی آبخوان هنری با فاصله‌گذاری ۰/۱.

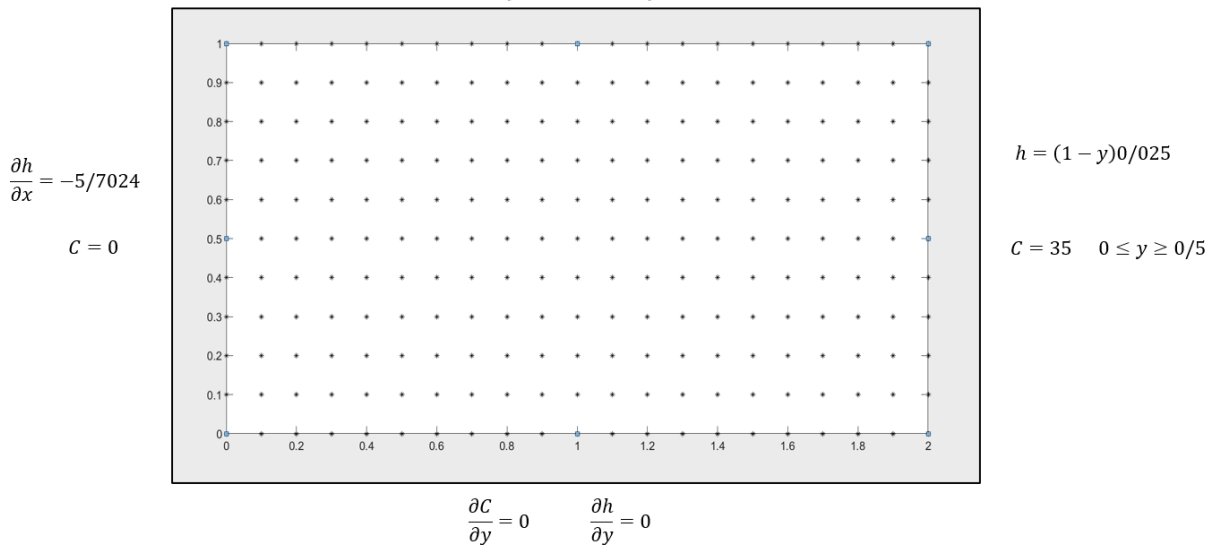
Fig 5. Networking of Henry aquifer with spacing of 0.1.

اولیه نیز تعریف شده و برای گره‌های داخلی صفر فرض شده‌اند. در شکل (۴) و جدول (۱) شرایط صورت مسئله هنری به‌طور کامل تعریف شده است (Rastogi, 2004).

**شرایط مرزی و اولیه**

در مسئله هنری شرایط مرزی نیومان برای هد و دیریشله برای هد و غلظت برقرار است. برای پارامتر غلظت شرط

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$



شکل ۶. نحوه پخش گره‌ی و شرایط مرزی آبخوان دوبعدی مسئله هنری.

Fig 6. Nodal distribution and boundary conditions of the two-dimensional aquifer of the Henry problem.

جدول ۱. شرایط مرزی و اولیه مسئله هنری.

Table 1. Boundary and initial conditions of the Henry problem.

غلظت Concentration	هد Head	شرایط مرزی Boundary Conditions
-----------------------	------------	--------------------------------------

$C(0, y) = 0$	$\frac{\partial h}{\partial x}(0, y) = -5/7024$	مرز چپ $(0, y)$ Left border $(0, y)$
$C(2, y) = 35, 0 \leq y \leq 0/5$	$h(2, y) = (1 - y)0/025$	مرز راست $(2, y)$ Right border $(2, y)$
$\frac{\partial C}{\partial y}(x, 1) = 0$	بدون جریان No flow	مرز بالا $(x, 1)$ Top border $(x, 1)$
$\frac{\partial C}{\partial y}(x, 0) = 0$	بدون جریان No flow	مرز پایین $(x, 0)$ Bottom border $(x, 0)$

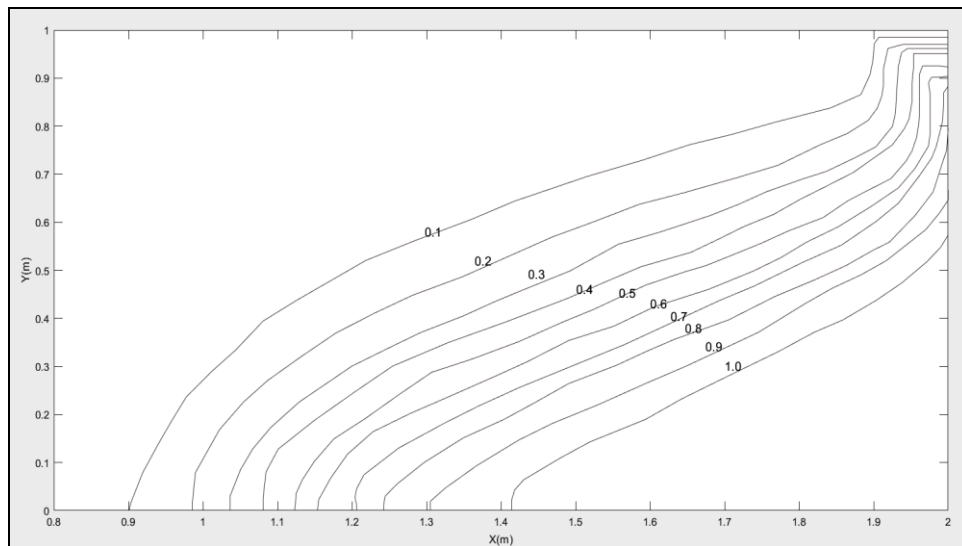
محدود FEFLOW نیز برای مدل‌سازی استفاده شود تا نتایج دو روش با هم مقایسه گردند و صحت کار سنجیده شود.

### روش عددی

خروجی حاصل از مدل‌سازی به این روش مطابق شکل (۵) و شکل (۶) می‌باشد. منحنی‌های داخل شکل (۵) خطوط کانتوری هستند که نقاط هم‌غلظت آبخوان را تعیین می‌کنند. در ادامه جدول (۲) به‌عنوان نمونه منحنی‌ها را در نقاط با مختصات افقی ثابت و مختصات عمودی متغیر بررسی می‌نماید. بردارهای سرعت در محیط آبخوان نیز مطابق شکل (۶) می‌باشد.

### مدل‌سازی مسئله هنری

مسئله استاندارد هنری حالت خاصی از پدیده نفوذ آب شور یا همان تداخل آب شیرین و آب شور می‌باشد. به این علت که پدیده مذکور نوعی از آلودگی به حساب می‌آید و در حالت دوبعدی مدل‌سازی شده معادله آلودگی برای حل دقیق کاربرد چندانی نداشته و با حل همزمان معادلات انتقال و جریان به روش عددی مسئله قابل حل است؛ بنابراین، حل عددی یا تحلیلی برای آن موجود نیست. از طرفی چون برای این مسئله داده آزمایشگاهی نیز موجود نمی‌باشد به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل روش‌های خطاگیری کاربردی نداشته و سعی بر این شد تا علاوه بر روش بدون شبکه پتروو-گالرکین محلی از مدل اجزا



شکل ۷. منحنی‌های هم‌غلظت مسئله هنری به روش MLPG برای فواصل ۰/۱.

Fig 7. Co-concentration curves of Henry problem by MLPG method for intervals of 0.1.

جدول ۲. موقعیت و مقدار منحنی‌های هم‌غلظت در  $x=1.5m$ .

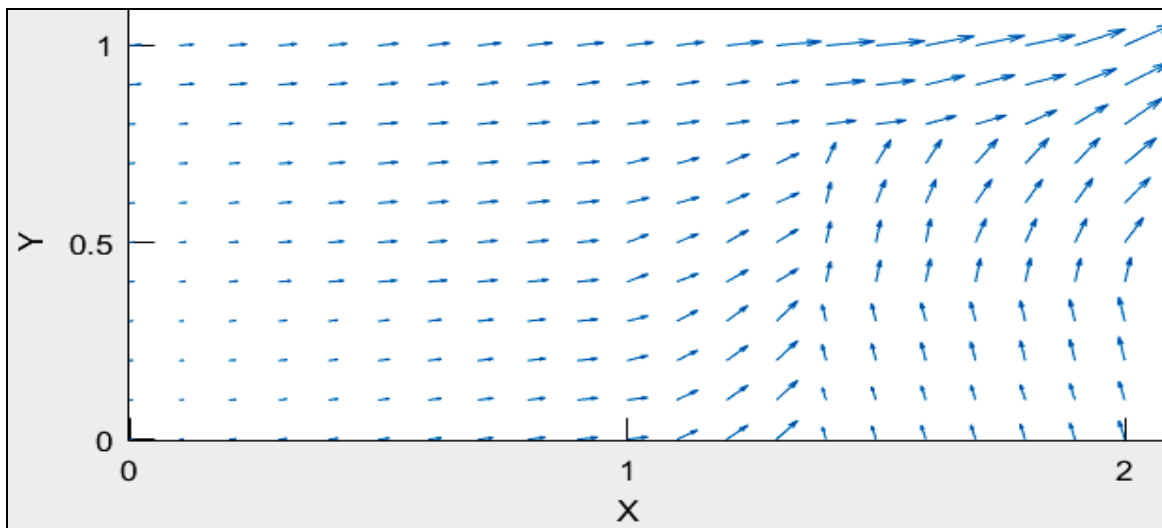
Table 2. Position and value of isoconcentration curves at  $x=1.5m$ .

0.68	0.58	0.51	0.44	0.4	0.36	0.31	0.26	0.21	0.12	Y (m)
------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	-------

غلظت نسبی									
Relative concentration									
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

تغییرات غلظت در هر دو جهت به یک اندازه می‌باشد. شکل ایزوکلرها گردش آب دریا در پایین آبخوان و کاهش نفوذ آب دریا را در محدوده خشکی نشان می‌دهد. هم‌چنین میزان نفوذ در منطقه بالای آبخوان کمتر از پایین آن می‌باشد.

مطابق شکل (۵) و جدول (۲) با نفوذ آب شور دریا به آبخوان از سمت راست تأثیرات شوری تا نیمی از آبخوان ادامه داشته و با افزایش فاصله از مدخل آلاینده مقدار غلظت نسبی کاهش می‌یابد. از نظم منحنی‌ها و توازی آن‌ها نیز می‌توان تفسیر نمود که میزان پخش آلودگی و



شکل ۸. بردارهای سرعت مسئله هنری به روش MLPG برای فواصل ۰/۱.

Fig 8. Velocity vectors of Henry problem by MLPG method for 0.1 intervals.

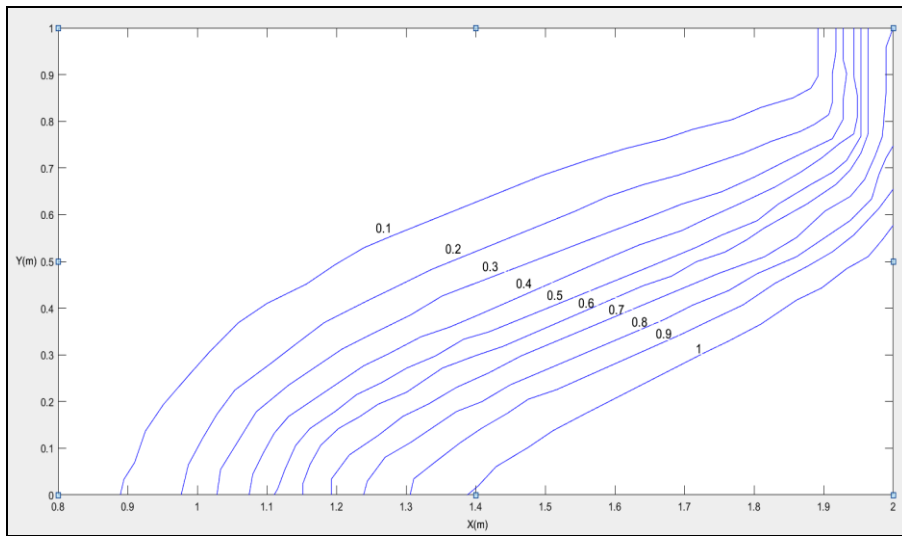
زیرزمینی به روش اجزا محدود می‌باشد و معادلات جریان و انتقال را در محیط متخلخل برای مسائل پارامتری با هندسه پیچیده از قبیل سیال با غلظت متغیر، اشباع متغیر، سطوح آزاد، واکنش‌های سینتیک چندگانه و جریان غیر هم‌دما حل می‌کند. این مدل نیز توانایی کنترل طیف عظیمی از مسائل را در محدوده تئوری و عملی داشته و به مقایسه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسئله می‌پردازد (Wang & Anderson., 1982).

برای مسئله استاندارد هنری نتایج مدل مطابق شکل‌های (۷) و جدول (۳) است.

مطابق شکل (۶) بردارهای سرعت که مماس بر خط جریان می‌باشند مسیر جریان را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود گرادیان هد هیدرولیکی در طرف دریا به‌طور عمودی به سمت بالا مخالف جاذبه زمین جهت می‌گیرد و در بخشی که تأثیر آلودگی ناچیز می‌باشد شار ورودی تقریباً به‌شکل افقی در جریان است.

### روش FEFLOW

به‌منظور درک برخی از مسائل، پیش‌بینی و کنترل آن‌ها می‌توان از مدل‌هایی از قبیل FEFLOW که اساس کار آن‌ها روش اجزا محدود و شبکه‌بندی دامنه است استفاده نمود. مدل FEFLOW سیستم شبیه‌سازی جریان



شکل ۹. منحنی‌های هم‌غلظت مسئله هنری به روش اجزا محدود FEFLOW.

Fig 9. Co-concentration curves of the Henry problem by FEFLOW finite element method

جدول ۳. موقعیت و مقدار منحنی‌های هم غلظت در  $x=1.5m$ .

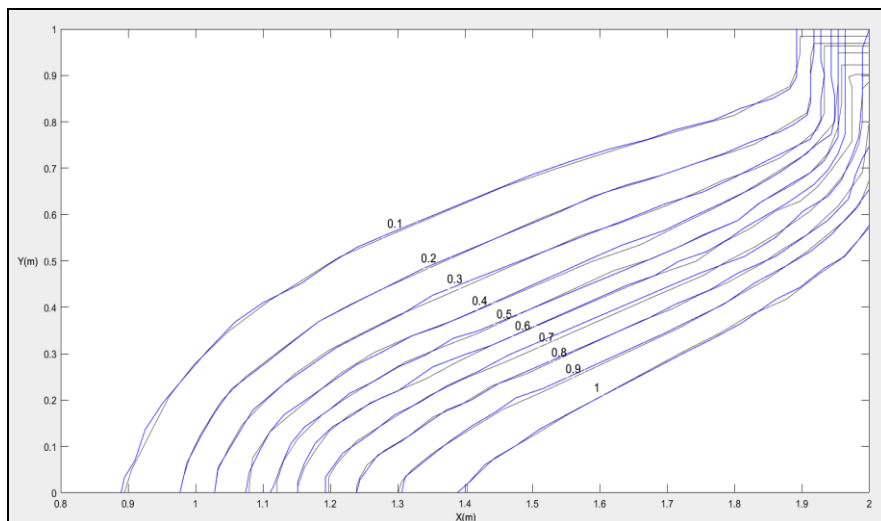
Table 3. Position and value of isoconcentration curves at  $x=1.5m$ .

0.69	0.59	0.51	0.44	0.4	0.37	0.31	0.28	0.21	0.12	Y (m)
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	غلظت نسبی
										Relative concentration

آبخوان در سمت دریا نتایج روش بدون شبکه و شکل گراف آن به این علت که مرز بالای آبخوان نفوذناپذیر می‌باشد از دقت بالاتری برخوردار بوده است. در ادامه مقایسه به صورت گراف در شکل (۸) و جدول (۴) ارائه می‌گردد.

#### ارزیابی مدل‌سازی

پس از مدل‌سازی صورت گرفته به روش پتروو-گالرکین و اجزا محدود نتایج حاکی بر صحت مدل‌سازی گردید چرا که با مقایساتی که از جداول و نمودارها در دو روش صورت گرفت خروجی‌های غلظت در گره‌ها به‌طور قابل قبولی به هم نزدیک می‌باشند. حتی در ناحیه بالای



شکل ۱۰. مقایسه کانتورهای غلظت نسبی به دو روش MLPG و FEFLOW.

Fig 10. Comparison of relative concentration contours by MLPG and FEFLOW methods.

جدول ۴. مقایسه مقادیر غلظت نسبی در مختصات افقی  $x=1.5m$  به دو روش FEFLOW و MLPG.

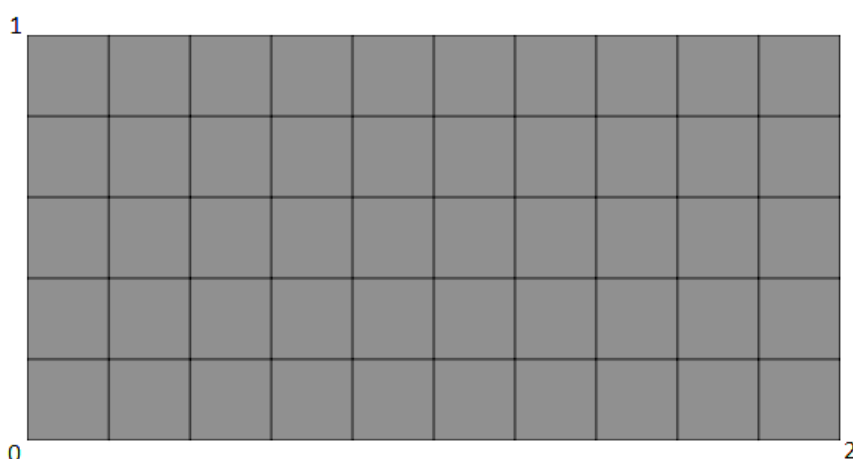
Table 4. Comparison of relative concentration values in horizontal coordinates  $x=1.5m$  by MLPG and FEFLOW methods

FEFLOW		MLPG	
غلظت نسبی Relative concentration	مختصات عمودی Vertical coordinates	غلظت نسبی Relative concentration	مختصات عمودی Vertical coordinates
---	m	---	m
1	0.12	1	0.12
0.9	0.21	0.9	0.21
0.8	0.28	0.8	0.26
0.7	0.31	0.7	0.31
0.6	0.37	0.6	0.36
0.5	0.4	0.5	0.4
0.4	0.44	0.4	0.44
0.3	0.51	0.3	0.51
0.2	0.59	0.2	0.59
0.1	0.69	0.1	0.69

تحقیق به دلیل اینکه آبخوان یک مسئله استاندارد با خواص مشخص مورد بررسی قرار گرفته و با تغییر در مقدار آن‌ها شکل معادلات جریان و انتقال به کار رفته در کد تغییر می‌کند بنابراین تغییراتی در نحوه پخش گره‌ی صورت گرفت تا اختلاف نتایج مورد آنالیز قرار گیرد. مطابق شکل (۹) فاصله‌بندی منظم در هر دو جهت از ۰/۱ به ۰/۲ تغییر یافت و شبکه با ۶۶ گره و ۵۰ سلول تشکیل شد.

#### آنالیز حساسیت

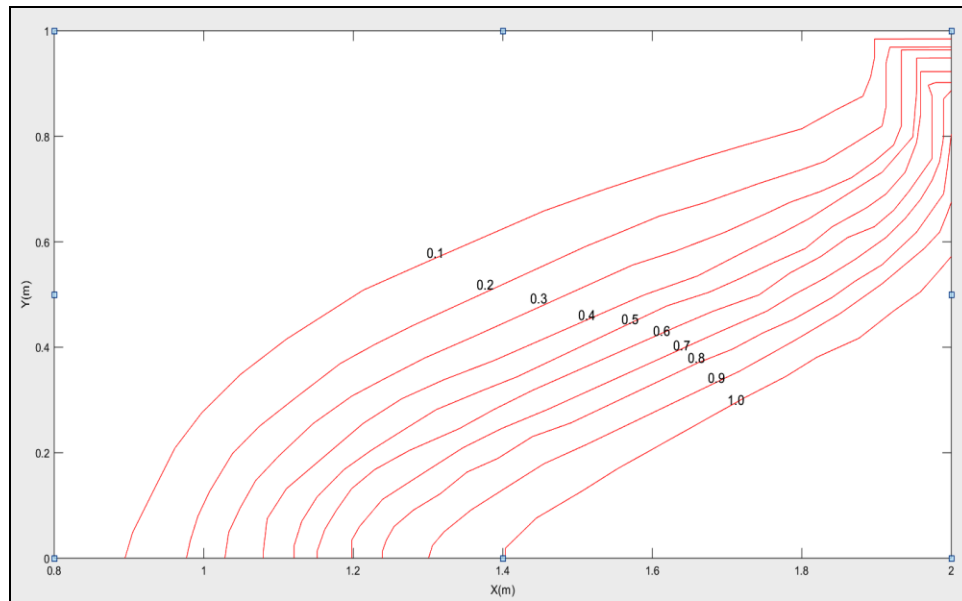
آنالیز حساسیت روشی است که عدم قطعیت‌های موجود در مدل کالیبره را به صورت کمی تعیین می‌کند. به پارامتری که با حداقل تغییرات بیشترین نوسان را در نتایج واسنجی ایجاد نماید حساس‌ترین پارامتر گویند (Jamshidzadeh, 2012). برای تحلیل حساسیت می‌توان از تغییرات خواص آبخوان چون هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، تخلخل و یا نحوه شبکه‌بندی استفاده نمود. در این



شکل ۱۱. شبکه‌بندی آبخوان هنری با فاصله‌گذاری ۰/۲.

Fig 11. Networking of Henry aquifer with spacing of 0.2.

و گراف حاصل از روش بدون شبکه برای فواصل ۰/۲ مطابق شکل (۱۰) می‌باشد.



شکل ۱۲. منحنی‌های هم‌غلظت مسئله هنری به روش MLPG برای فواصل ۰/۲.

Fig 12. Co-concentration curves of Henry problem by MLPG method for intervals of 0.2.

در ادامه جداول (۵)، (۶) و (۷) حساسیت مدل‌سازی با تغییرات خروجی غلظت تعیین می‌کنند. روش بدون شبکه را نسبت به نحوه شبکه‌بندی و همچنین

جدول ۵. مقایسه مقادیر غلظت در مختصات افقی  $x=1.4\text{ m}$ .

Table 5. Comparison of concentration values in horizontal coordinates  $x=1.4\text{m}$

شبکه‌بندی با فواصل 0.2		شبکه‌بندی با فواصل 0.1		مختصات عمودی Vertical coordinates
غلظت concentration	شماره گره node number	غلظت concentration	شماره گره node number	
	---		---	m
32.4089	8	32.4249	15	0
32.2558	15	32.4221	57	0.2
31.9007	30	32.4153	99	0.4
31.7999	37	32.4243	141	0.6
32.7857	52	32.4738	183	0.8
34.7868	59	32.5629	225	1

جدول ۶. مقایسه مقادیر غلظت در مختصات افقی  $x=1.6\text{ m}$ .

Table 6. Comparison of concentration values in horizontal coordinates  $x=1.6\text{m}$

شبکه‌بندی با فواصل 0.2		شبکه‌بندی با فواصل 0.1		مختصات عمودی Vertical coordinates
غلظت concentration	شماره گره node number	غلظت concentration	شماره گره node number	
	---		---	m
32.4749	9	32.4107	17	0
32.1041	14	32.3999	59	0.2
30.9574	31	32.3579	101	0.4



31.5836	36	32.3192	143	0.6
30.9114	53	32.3866	185	0.8
33.7426	58	32.5552	227	1

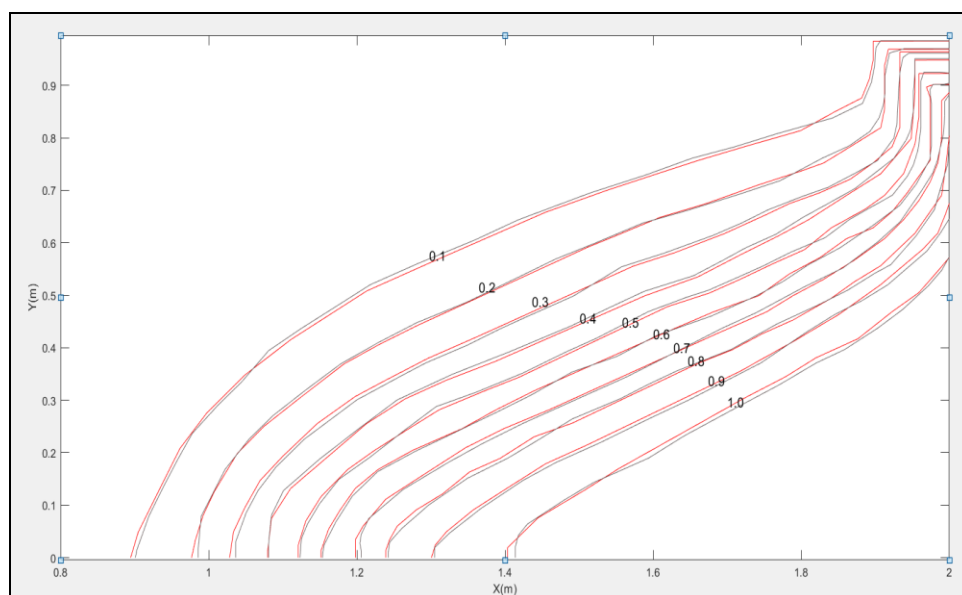
جدول ۷. مقایسه مقادیر غلظت در مختصات افقی  $x=1.8\text{ m}$ .

Table 7. Comparison of concentration values in horizontal coordinates  $x=1.8\text{m}$

شبکه‌بندی با فواصل 0.2		شبکه‌بندی با فواصل 0.1		مختصات عمودی Vertical coordinates
غلظت concentration	شماره گره node number	غلظت concentration	شماره گره node number	
	---		---	m
33.2719	10	32.4444	19	0
32.7595	13	32.4264	61	0.2
30.4609	32	32.3354	103	0.4
31.3996	35	32.0055	145	0.6
32.3553	54	32.1299	187	0.8
32.7825	57	32.5743	229	1

ذکر شده تغییراتی داشته اما همان‌طور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود در گراف‌های نهایی که کانتورهای غلظت نسبی هستند اختلاف چندانی مشاهده نگردید. بنابراین، میزان حساسیت مدل‌سازی نسبت به کاهش سلول‌ها اندک بوده و حتی خروجی‌های کار عددی با فاصله‌بندی ۰/۱ نیز کاملاً قابل قبول می‌باشد.

به‌طور کلی در اکثر گره‌ها برای هر دو شبکه‌بندی روند تغییرات غلظت در تمام فواصل افقی مشابه می‌باشد اما با کاهش تعداد سلول‌های شبکه میزان غلظت در گره‌ها کاهش یافته و اختلاف آن‌ها در گره‌های بالاتر با مختصات عمودی بیشتر افزایش می‌یابد. در حالت کلی با اینکه مقدار غلظت‌ها برای هر گره مشخص در دو فاصله‌بندی



شکل ۱۳. مقایسه کانتورهای هم‌غلظت برای فاصله‌بندی ۰/۱ و ۰/۲.

Fig 13. Comparison of homo-concentration contours for 0.1 and 0.2 spacing.

modeling. authored book, Fekr Beker Publishing House, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Akbarpour, A., Mohtashmi, A & Majidi, N. (2018). *Spatio-temporal simulation of pollution movement in a confined aquifer using the numerical method without local Petrov-Galerkin grid*, Proceedings of the 18th Iranian Hydraulics Conference, University of Tehran, Iran. [In Persian].

Akbarpour, A., Molazadeh, M & Asif, M. (2018). *One-dimensional solution of surface water pollution transfer equations with Petrov-Galerkin method without local grid*, Balde Ferdous Aqueduct National Symposium, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Akbarpour, A., Molazadeh, M., Dimevar, S & Asif, M. (2017). *Petrov-Galerkin gridless method for solving the displacement-diffusion equation in unsteady state*, National Conference on Modeling and New Technologies in Water Management, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Akbarpour, A., Zoghi, M & Bazari, S. (2017). *One-dimensional modeling of groundwater pollution transfer using gridless method*, National Conference on Modeling and New Technologies in Water Management, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Arzani, H. (2016). Solving shallow water equations with gridless method", PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran. [In Persian].

Asif, M. (2018). *Numerical solution of pollution transfer equations using local gridless Petrov-Galerkin method in the river*, MSc dissertation, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Atluri, S.N. & Zhu, T. (1998). *A new meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics*. Computational Mechanics, doi:10.1007 / s004660050346, 22, 117-127.

Barrenechea, G.R., Poza, A.H & Yorston, H. (2018). A established finite element method for the convection-diffusion-reaction in mixed form, *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 339, 389-415.

Bazari, S. (2017). Solving the pollution transfer equations in saturated porous media with the Petrov-Galerkin method without local mesh", MSc dissertation, Faculty of Civil Engineering, University of Birjand, Iran. [In Persian].

Belytschko, T., Lu, Y. Y., Gu, L. (1994). Elements free Galerkin methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 30(2): 229-256.

Bixio, A., Putti, M., Carbognin, L & Gambolati, G. (1998). Finite element modeling of seawater in the venice aquifer system, *Transactions on Ecology and the Environment*, 17, 193-200.

## نتیجه‌گیری

آبخوان‌های ساحلی یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین به حساب می‌آیند بنابراین، مدیریت و نگهداری از آن‌ها بسیار ضرورت دارد. یکی از خطراتی که این نوع از آبخوان‌ها با آن مواجه هستند نفوذ آب دریا می‌باشد. با نفوذ آب شور به آبخوان در مقطعی از آبخوان که ضخامت آن نسبت به سفره قابل توجه هست تداخل آب شور و شیرین اتفاق افتاده و این امر سبب شده تا از فرضیه جرم مخصوص متغیر که در آن معادلات جریان و انتقال نمک باید به‌طور همزمان حل شوند استفاده گردد. برای حل معادلات از روش بدون شبکه پتروو-گالرکین محلی با تابع شکل حداقل مربعات متحرک و تابع وزن کیوبیک اسپیلیان استفاده می‌شود. این روش به‌علت عدم استفاده از المان‌بندی در مسائلی حتی با دامنه هندسی نامنظم و شرایط مرزی پیچیده به‌کار می‌رود و معادلات با انتگرال‌گیری گوسی قابل حل هستند. علاوه بر این تابع شکل آن موجب پیوستگی در دامنه کلی برای درون‌یابی و تقریب در مرتبه دلخواه می‌گردد. در زمینه تداخل آب شور و شیرین در این مطالعه مسئله استاندارد هنری با شرایط مرزی دیرپچله و نیومان برای دامنه به‌کار گرفته می‌شود. به‌منظور نمایش دقت مدل‌سازی برای این مسئله از مدل FEFLOW که بر پایه روش اجزا محدود است استفاده می‌گردد. نتایج نهایی به‌صورت کانتورهای هم‌غلظت نمایش داده شد و طبق مقایساتی که صورت گرفت منحنی‌ها بر هم منطبق بودند و این امر بیانگر کارایی و دقت مناسب روش بدون شبکه است. نتایج بر این قرار شد که در محیط آبخوان با خواص هیدرولیکی مشخص پیشروی اثرات شوری چشمگیر بوده و از لحاظ مقداری میزان آن کاهش یافته تا به صفر برسد. لازم به ذکر است که دامنه پخشیدگی آلودگی با تغییر ویژگی‌های آبخوان می‌تواند کاهش یا افزایش یابد.

## منابع

Akbarpour, A., Mohtashmi, A & Majidi Khalilabad, N. (2020). *Determination of Well's Capture Zones Using Random Walk Algorithm and FeFlow Simulation Model*, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14, 1984-2002. [In Persian].

Akbarpour, A., Mohtashmi, A & Kalantari, M. (2018). *An introduction to underground water flow*

- Nick, H.M., Raouf, A., Centler, F., Thulner, M and Regnier, P. (2013). Reactive dispersive contaminant in coastal aquifers, *Journal of Contaminant Hydrology*, 145, 90-104.
- Rastogi, A.K., Choi, G.W & Ukarande, D.K. (2004). Diffused interface model to prevent ingress of seawater in multi-layer coastal aquifers, *Journal of Special Hydrology*, 4, 1-31.
- Sakr, S.A. (1999). *Validity of a sharp interface model in a confined coastal aquifer*, Hydrology Journal, doi: 10.1007/s100400050187.
- Samsami, H & Saeed Panah, A. (2013). *Numerical solution of solute transport in groundwater using the Petrov-Galerkin meshless method*, Proceedings of the 13th Iranian Hydraulics Conference, University of Tabriz, Iran. [In Persian].
- Sbai, A., Larabi, A & Smedt, F. (1998). Modeling saltwater intrusion by a three-dimensional sharp interface finite element model, *Conference of Computational Methods in Water Resources*, 24, 201-208.
- Segol, G., Pinder, G.F & Gray, W.G. (1975). A galerkin finite element technique for calculating the transition position of the saltwater front, *Water Resources Research*, 3, 343-347.
- Sherif, M., Singth, V. P & Amer, A.M. (1988). A two-dimensional finite element model for dispersion (2D-FED) in coastal aquifers, *Journal of Hydrology*, 103,11-36.
- Singth, A. (2014). Groundwater resources management through the applications of simulation modeling, *Journal of Scientific of the Total Environment*, 499, 414-423.
- Singth, L.G., Eldho, T.I & Kumar, A.V. (2016). Coupled groundwater flow and contaminant transport simulation in a confined aquifer using meshfree radial point collocation method (RPCM). *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 66, 20-33.
- Swathi, B & Eldho, T.I. (2013). Groundwater flow simulation in confined aquifers using (MLPG), *Journal of Hydrolic Engineering*, 134, 335-348.
- Thomas, A., Eldho, T.I & Rastogi, A.K. (2016). Simulation of seawater intrusion in coastal confined aquifer using a point collocation method based meshfree model, *Journal of Water Resource and Protection*, 8, 534-549.
- Walther, M., Delfs, J.O., Carundmann, J., Kolditz, O & Liedl, R. (2012). Saltwater intrusion modeling, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 236,4798-4809.
- Wang, H.F & Anderson, M.P. (1982). *Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods*, Academic Press, doi: 10.1029/EO063i037p00778-02.
- Yasi, M., Gholami, Z., NaziGhameshlou, A & Mazaheri, M. (2022). *Two-Dimensional Modeling of Fractional AdvectionDispersion Equation using Meshfree Local Petrov-Galerkin Numerical*
- Croucher, A.E & Osullivan, M.J. (1995). *The Henry Problem for Saltwater Intrusion*, Water Resources Research, doi: 10.1029/95WR00431.
- Diersch, H.G. (1992). Interactive, Graphics-based Finite-Element Simulation of Groundwater Contamination Processes, *Advances in Engineering Software*, 15, 1-13.
- Diersch, H.G. (2014). *Finite element modeling of flow mass and heat transport in porous and fractured media*, springer, doi: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Dimevar, S. (2016). *Numerical solution of shallow water equations using Petrov Galerkin meshless method*, MSc dissertation, University of Birjand, Iran. [In Persian].
- Frind, E.O. (1982). Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater, *Advances in Water Resources*, 5, 73-88.
- Gotovac, H., Andricevic, R., Gotovac, B., Kozulic, V & Vranjes, M. (2003). An improved collocation method for solving the henry problem, *Journal of Contaminant Hydrology*, 64, 129-149.
- Hubbert, M.K. (1940). The theory of groundwater motion, *Journal of Geology*, 48,785-944.
- Jamshidzadeh, Z. (2012). Quantitative and qualitative modeling of underground water to investigate the phenomenon of saltwater intrusion, PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering, Khajeh Nasiruddin Tosi University, Iran. [In Persian].
- Lee, C.H & Cheng, R.T. (1974). *On seawater encroachment in coastal aquifer*, Water Resources Research, 10, 1039-1043.
- Liu, G.R. (2002). *Mesh free methods: moving beyond the finite element method*, CRC press. New York Washington, D.C, doi: 10.1201/9781420040586.
- Liu, G.R. (2009). *Meshfree Methods: Moving Beyond the Finite Element Method*, CRC Press, doi: 10.1201/9781420082104.
- Liu, G.R & Gu, Y.T. (2005). *An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming*, springer, doi:10.1007/1-4020-3468-7
- Liu, F., Turner, I & Anh, V. (2001). A finite volume unstructured mesh method for modeling saltwater intrusion into aquifer system, *The First International Conference and Workshop on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers, Monitoring, Modeling, and Management, Morocco*, 9, 391-407.
- Meenal, M & Eldho, T.I. (2012). Two-dimensional contaminant transport modeling using meshfree point collocation method (PCM), *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 36, 551-561.
- Mohtashmi, A. (2015). Use of gridless method in modeling groundwater flow in open aquifer. MSc dissertation, Faculty of Civil Engineering, University of Birjand, Iran. [In Persian].

*River*), Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE), 6 (3), 47-57.  
Yuqun, X., Jichun, W., Chunhong, X & Yongxiang, Z. (1998). *Sea water intrusion and salt water intrusion in the coastal area of Laizhou Bay*, Publications Office of Wiley, doi:10.1111/j.1745-6584.1993.tb00584.x.

*Method (Case Study: Athabasca River)*, Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics, 17 (4), doi: 10.30482/jhyd.2022.349707.1611. [In Persian].  
Yasi, M., Gholami, Z., NaziGhameshlou, A & Mazaheri, M. (2021). *Numerical Solution of Advection-Dispersion Equation using Mesh-free Petrov-Galerkin Method (Case Study: Murray Burn*



## Evaluation of The Accuracy of Fuzzy Neural Network in Estimating The Discharge of Qanats in Birjand City

Amir Khayat<sup>1</sup> | Zahra Akhondi<sup>2</sup> | Hossein Khozaymehnezhad<sup>3</sup>

1. PhD student of Irrigation and Drainage, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Master of Science in Hydraulic Structures, University of Zabol, Zabol, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: [Amir.khayat@birjand.ac.ir](mailto:Amir.khayat@birjand.ac.ir)

Received:  
18 November 2024

Accepted:  
07 December 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Qanats,  
Water Resources  
Management,  
Fuzzy Neural Network,  
Birjand City.*

### Extended abstract

#### Introduction

This paper examines the application of the Adaptive Neural Fuzzy Networks (ANFIS) model in predicting the flow of Qanats in Birjand County, one of the arid and semi-arid regions of Iran. Qanats, as a traditional and vital source of water supply in these areas, are affected by several factors, including climate change, excessive groundwater extraction, and reduced rainfall. This has increased the need for accurate and efficient methods to predict their flow. Introduction:

#### Research Objectives

The main objective of this research is to evaluate the accuracy of the ANFIS model in estimating the monthly flow of Qanats in Brijand County and to determine its ability to predict flow fluctuations based on climatic and hydrological data. Based on the results obtained, the aim is to provide solutions for sustainable management of water resources.

#### Materials and Methods

Study Area: Birjand County, located in South Khorasan Province, focuses on the Birjand watershed, which has 1875 qanat streams.

**Cite this article:** Khayat, A., Akhondi, Z. & Khozaymehnezhad, H. (2024). Evaluation of the accuracy of fuzzy neural network in estimating the discharge of qanats in Birjand city, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 45-58. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8597.1086>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Data

Monthly data on precipitation, evaporation, temperature (maximum, minimum, and average), humidity (minimum), and qanat discharge were collected from 2011 to 2021 (120 months of data). Data Preprocessing: The gamma test was used to select input variables with the greatest impact on qanat discharge and to remove outliers.

ANFIS Model: This model was selected due to its ability to model nonlinear and complex systems. The model was optimized using 70% data for training and 30% for evaluation, with the Fuzzy C-Means algorithm and trial and error method.

Evaluation criteria: Correlation coefficient ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) were used to measure the accuracy of the model.

### Results

The results of the study show that the ANFIS model can predict the discharge of Qanats with high accuracy. The results obtained are:

**Table 1- Performance of the adaptive Fuzzy Neural Network in Predicting the Discharge of Qanats**

RMSE	$R^2$	NS	Modeling stage
0.43	0.93	0.92	Training
0.049	0.98	0.97	Test

These results indicate that the model performs very well in predicting the discharge of Qanats according to the evaluation criteria. Also, the graphs show that the model can accurately predict the changes in discharge during different months of the year.

### Discussion

Comparison of the results with similar studies shows that the ANFIS model performs better in predicting the discharge of Qanats compared to other models. This high accuracy is due to the model's ability to learn complex and nonlinear patterns in the data and the use of an appropriate optimization method. The results show that the decrease in qanat flow is significant in the dry months of the year, which indicates the need for greater attention to water resources management during this period.

### Suggestions

Based on the results of this study, the following are suggested:

Further studies: Conduct further studies using long-term and diverse data to increase the accuracy of the model and examine the impact of various factors on qanat flow.

Sustainable water resources management: Implementing management plans to reduce excessive abstraction and optimize water consumption, especially in the dry months.

Qanat restoration and repair: Investing in the restoration and repair of worn-out qanats and using modern technologies to improve their performance.

Use of monitoring systems: Use of accurate monitoring and measurement systems of qanat discharge to collect more accurate and up-to-date data for better modeling.

### Conclusion

This study showed that the ANFIS model is a powerful tool for predicting qanat discharge in arid and semi-arid regions and can help water resource managers in planning and decision-making related to sustainable water resource management. Considering the importance of qanats in providing agricultural water and people's livelihoods, the use of these methods can play an important role in preserving and restoring these water resources.



## ارزیابی دقت شبکه عصبی فازی در تخمین دبی قنات‌های شهرستان بیرجند

امیر خیاط<sup>۱</sup> | زهرا آخوندی<sup>۲</sup> | حسین خزیمه‌نژاد<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [Amir.khayat@birjand.ac.ir](mailto:Amir.khayat@birjand.ac.ir)

### چکیده

کاهش نزولات جوی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی، منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی و کاهش دبی قنات‌ها شده است. با توجه به اینکه شهرستان بیرجند با داشتن بیش از ۱۸۷۵ رشته قنات و تخلیه ۲۳ میلیون مترمکعب در سال، بیشترین تعداد قنات‌ها را در سطح استان دارد و بیش از ۹۰ درصد آب مصرفی در این شهرستان از طریق قنات‌ها تأمین می‌شود، پیش‌بینی دقیق دبی آن‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است. در این پژوهش، از شبکه عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی استفاده شده است. این مدل قادر است روابط پیچیده بین متغیرهای ورودی (مانند بارندگی، تبخیر، سطح آب زیرزمینی) و خروجی (دبی قنات) را شناسایی کرده و پیش‌بینی دقیقی از دبی آینده ارائه دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مدل ANFIS با ضریب همبستگی ۰/۹۸، ضریب نش - ساتکلیف ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۹، در مقایسه با سایر مدل‌ها با دقت بسیار بالایی قادر به پیش‌بینی دبی قنات‌ها است و می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

قنات،  
مدیریت منابع آب،  
شبکه عصبی فازی،  
شهرستان بیرجند.

## مقدمه

تأمین آب یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های امروزه در بسیاری از کشورهای جهان به‌خصوص کشورهای خاورمیانه در راستای تداوم توسعه پایدار می‌باشد و به عنوان یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی و مهم‌ترین مسئله و چالش در قرن حاضر می‌باشد. آب‌های زیرزمینی یکی از منابع عمده آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند، که نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی دارند (Emamgholizadeh et al., 2014). محدودیت منابع آب‌های سطحی، افزایش تقاضای مصرف آب همزمان با توسعه صنعتی و اقتصادی جوامع و افزایش کشاورزی، آب‌های زیرزمینی را به یک منبع طبیعی ارزشمند در جهت تأمین نیازهای مربوطه تبدیل کرده است. از طرفی استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی به یک مسئله جدی جهانی خصوصاً در کشورهای در حال توسعه تبدیل گردیده است (Konikow & Kendy, 2005).

باتوجه به شرایط بارندگی در کشور، وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین شرایط و انرژی مصرفی لازم برای برداشت آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها، ترجیح داده می‌شود تا برای این منظور از قنات و تنها از طریق نیروی ثقل استفاده شود. قنات یا کاریز یکی از پیچیده‌ترین و شگفت‌انگیزترین ابتکارات ایرانیان جهت مبارزه با کمبود آب و تأمین آب کشاورزی خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. قنات‌ها به‌عنوان سرمایه‌های ملی، نقش و اهمیت به‌سزایی در توسعه بخش کشاورزی می‌توانند ایفا کنند. احداث قنات و بهره‌برداری از آن‌ها یکی از روش‌های باستانی تأمین آب در ایران است. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از طریق بهره‌برداری بی‌رویه از چاه‌ها همراه با افزایش تعداد چاه‌ها و عدم تغذیه طبیعی به‌دلایل مختلف به‌خصوص تغییر کاربری اراضی، نحوه بهره‌برداری از اراضی و آب و هوا، منجر به کاهش آبدهی و یا خشک‌شدن قنات‌ها شده است.

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و به‌خصوص قنات‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مطالعات این منابع آبی می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌سازی در برداشت بهینه و پایدار از این منابع آبی در درازمدت داشته باشد (Mohtasham et al., 2017). یکی از ملزومات دستیابی به یک برنامه پایدار در زمینه مدیریت منابع آب،

مدل‌سازی و آگاهی از طرز رفتار سطح ایستابی آب زیرزمینی خصوصاً برای فصول خشک، است. امروزه کنترل و مدیریت در سفره‌های آب زیرزمینی به ابزاری مدیریتی برای بهره‌وری آب تبدیل شده است. تخمین تراز سطح ایستابی از مسائل مهم و اساسی است که در برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان به‌ویژه در مواردی که از راهکارهای کم‌آبیاری بهره برده می‌شود، دارای اهمیت فراوانی است (Rakhshandehroo et al., 2018). بدین‌منظور برای آگاهی از وضعیت منابع آب زیرزمینی، لازم است پیش‌بینی دقیقی از نوسانات سطح آب زیرزمینی انجام شود. با پیش‌بینی دقیق نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌توان از آن در برنامه‌ریزی تأمین آب قابل اعتماد و نیز در مدیریت منابع آب استفاده نمود.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از نقطه نظرهای مختلف، یافتن روشی مناسب برای انجام آن حائز اهمیت می‌باشد. ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی و پیش‌بینی آن با توجه به وجود پارامترهای متنوع، یک مسئله غیرخطی و پیچیده است (Daliakopoulos et al., 2005). در این میان مدل‌های هوشمند، نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی بدون در نظر گرفتن فیزیک مسئله و تنها براساس آموزش، قادر به مدل‌سازی رفتار دینامیک یک فرآیند غیرخطی بوده و قادر هستند روابط پیچیده حاکم بر چنین فرآیندهایی را مدل‌سازی نمایند (Khashei et al., 2013; Nikmanesh, 2011).

با معرفی مجموعه‌های فازی و منطق فازی، موضوع استفاده از شبکه‌های عصبی فازی مطرح گردید. شبکه‌های عصبی فازی از ترکیب سیستم‌های فازی که مبتنی بر قواعد منطقی‌اند و شبکه‌های عصبی مصنوعی که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند؛ ایجاد می‌گردد و قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی داده‌ها داشته و در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی از سرعت پردازش و توانایی بالایی در یادگیری برخوردار می‌باشند. در مسائل مربوط به مهندسی آب، نظیر جریان آب‌های زیرزمینی به‌طور گسترده‌ای عدم قطعیت پارامترها مطرح است (Koorehpazan Dezfouli, 2015) و بنابراین، بسط مدلی مبتنی بر شبکه‌های عصبی فازی به عنوان ابزاری کارآمد در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار منابع آب زیرزمینی محسوب می‌گردد. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی



زیرزمینی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌نماید ( Tarahi & Darafshan, 2018).

در مورد توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در سازند سخت در منطقه اوریسا<sup>۳</sup> در هندوستان تحقیقی انجام شد. آن‌ها انواع شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی را مورد آزمون قراردادند. نتایج حاصله حاکی از دقت بالای شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا در تراز آب زیرزمینی در این سازندها بود (Sethi et al., 2010). در تحقیقی دیگر از روش نرو فازی برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه رودخانه آماراواتی<sup>۴</sup> در جنوب هند استفاده کردند. مدل به کار رفته توانست سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Umamaheswari & Kalamani, 2014). نورانی و همکاران، به ارزیابی توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سطح ایستابی آب زیرزمینی آبخوان چند لایه تبریز پرداختند. در آن مطالعه از ساختارهای مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان استفاده شد. آنها یک مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند که می‌توانست تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی ماهیانه در چاه مشاهده‌ای را با دقت قابل قبول پیش‌بینی نماید (Nourani et al., 2006).

در مطالعه‌ای با هدف پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، ۷ ساختار مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از داده‌های ماهانه باران، دما، جریانات سطحی و سطح سفره آب زیرزمینی به مدت ۱۵ سال برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. آنها توانستند با استفاده از مدل تهیه شده سطح ایستابی این آبخوان آبرفتی که بین ۵ تا ۴۵ متر بوده است را پیش‌بینی نمایند (Daliakopoulos et al., 2005). کورتولوس و رازاک با استفاده از مدل‌های فازی و عصبی به بررسی ارتباط بین بارندگی، سطح آب و میزان دبی استحصالی در روزهای قبل با میزان دبی خروجی از آبخوان‌های کارستی در فرانسه پرداختند (Kurtulus & Razack, 2010).

با استفاده از روش‌های هوشمند توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است.

میرعربی و نخعی به بررسی دقت سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات پیزومتری در دشت بیرجند پرداختند و نتیجه گرفتند که با وارد کردن میزان بارندگی و برداشت با تأخیر زمانی دو ماهه دقت شبکه افزایش می‌یابد. آنها از برداشت و بارندگی کل دشت، به‌عنوان ورودی مدل استفاده کردند درحالی‌که میزان بارندگی و تخلیه در قسمت‌های مختلف دشت با هم متفاوت است و تأثیر به‌سزایی بر نوسانات سطح آب دارد (Mirarabi & Nakhaei, 2009). در ارزیابی توانایی شبکه‌های مختلف عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان محدوده سعادت‌شهر فارس، نتایج نشان داد که از نظر توانایی شبکه‌های مختلف مورد استفاده، شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشرو با الگوریتم لونبرگ-مارکوارت<sup>۱</sup> بهترین نتایج را ارائه می‌دهند (Nikmanesh & Rakhshandehroo, 2010).

سلامتیان و همکاران، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت قم را با استفاده از مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی انجام دادند. تعداد ۹ چاه مشاهده‌ای در محدوده دشت قم انتخاب کردند. در این مدل‌سازی، الگوها و ترکیبات متفاوتی از داده‌های ورودی، شامل سطح آب‌های زیرزمینی، تخلیه از چاه‌ها و بارندگی در ۱۲ ماه قبل استفاده شدند و خروجی مدل، سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی انتخاب شد. نتایج نشان داد این مدل، با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۲۶ از دقت مناسبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه برخوردار می‌باشد (Salamatian et al., 2023). تراهی و درافشان، پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای دشت جهرم انجام داده و نتیجه گرفتند که شبکه پرسپترون چند لایه<sup>۲</sup> (MLP) با تعداد ۵ نرون در لایه اول و ۵ نرون در لایه میانی، سطح آب

<sup>3</sup> Orissa

<sup>4</sup> Amaravati River

<sup>1</sup>Levenberg Marquardt algorithm

<sup>2</sup> Multi Layer Perceptron

در این پژوهش، مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی به عنوان یک روش نوین برای پیش‌بینی دبی ماهیانه قنات‌های شهرستان بیرجند مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب این مدل به دلیل مزایایی همچون نیاز به داده‌های ورودی اندک، سرعت بالای پردازش و توانایی بالا در یادگیری و طبقه‌بندی داده‌ها بوده است. انتظار می‌رود که استفاده از این مدل بتواند گامی مؤثر در جهت مدیریت بهینه و پایدار منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه قنات‌ها، بردارد.

## مواد و روش

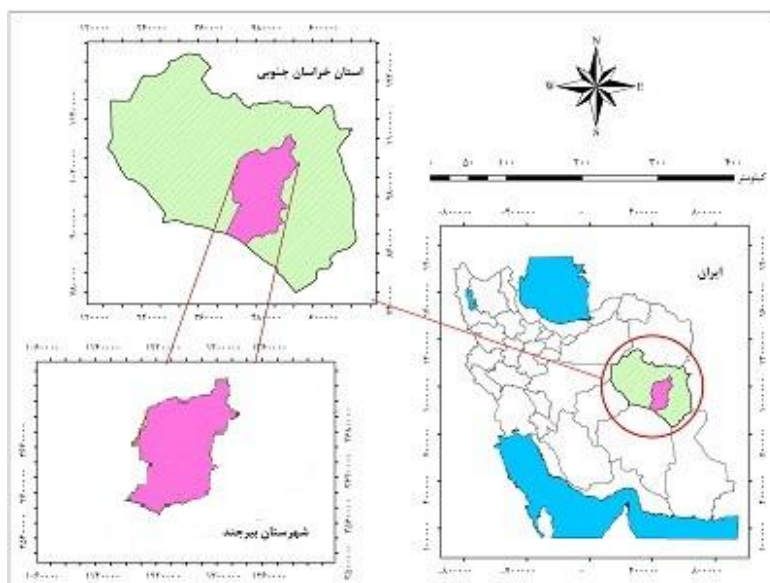
### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیرجند دارای وسعت ۳۱۵۵ کیلومتر مربع بوده، که ۱۸۴۵ کیلومتر مربع دشت و بقیه مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. این دشت از شرق به ارتفاعات مؤمن‌آباد و سیستان، از جنوب به کوه‌های باقران و کوه رچ، از شمال به ارتفاعات شاه ناصر و اسفدن و از غرب به ارتفاعات چنگ‌در و گرونک محدود می‌گردد. دشت بیرجند، طبق طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی مرتفع‌ترین نقطه آن مربوط به ارتفاعات شمالی منطقه بند دره با ارتفاع ۲۷۸۷ متر و پست‌ترین نقطه آن در خروجی دشت در روستای فدشک با ارتفاع ۱۱۸۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد، که موقعیت مکانی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

تحقیقات مشابه زیادی جهت پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام پذیرفته است. در این زمینه، می‌توان به تحقیقات (Adhikary et al., 2012; Habibi et al., 2016; Mohtasham et al., 2017; Chitsazan et al., 2015; Yang et al., 1997; Adamowski & Chan, 2011; Hamed et al., 2015) نمود که همگی آن‌ها در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفتند.

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی تراز آب به کار گرفته شده‌اند. در مقابل، مدل‌های عصبی فازی که ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی هستند، علی‌رغم پتانسیل بالای خود در سیستم‌های خبره، کمتر در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه قنات‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

با توجه به اینکه استان خراسان جنوبی با دارا بودن حدود ۶۹۸۳ رشته از قنات‌های ایران، یکی از غنی‌ترین استان‌ها در این زمینه است و همچنین با توجه به نقش حیاتی این منابع آبی در تأمین آب کشاورزی و سهم قابل توجه آن‌ها در تولید، کمبود مطالعات جامع در خصوص مدل‌سازی دبی قنات‌ها به چشم می‌خورد و ضرورت توسعه ابزارهای پیش‌بینی دقیق دبی قنات‌ها بیش از پیش احساس می‌شود.



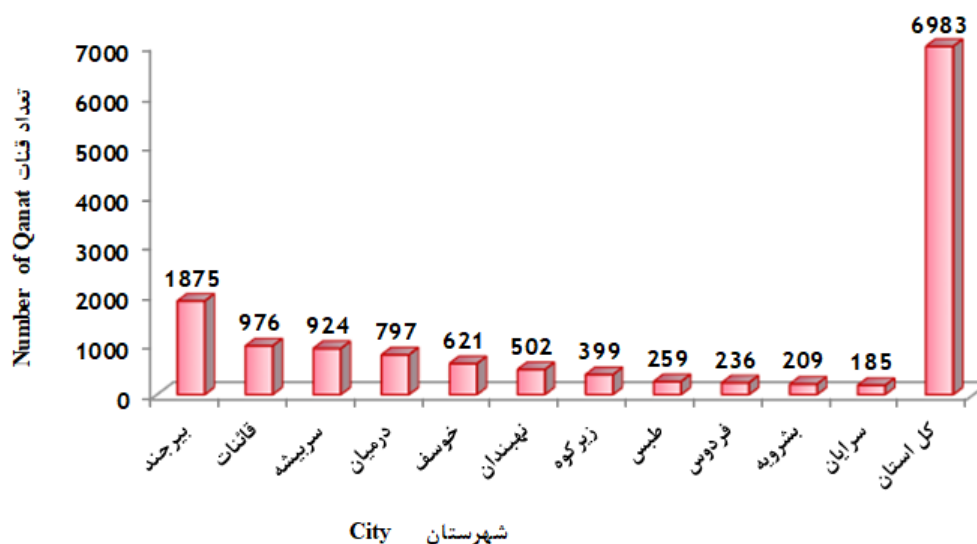
شکل ۱- موقعیت مکانی استان خراسان جنوبی و شهرستان بیرجند

Fig 1- Location of South Khorasan province and Birjand City

## منابع آبی شهرستان بیرجند

استان خراسان جنوبی با داشتن بیش از ۶۹۸۳ رشته قنات، اولین استان در سطح کشور از لحاظ تعداد قنات‌ها می‌باشد و در این میان شهرستان بیرجند دارای بیشترین

تعداد قنات در سطح شهرستان‌های استان است. شکل (۲) تعداد قنات‌های شهرستان‌های استان خراسان جنوبی را نشان می‌دهد.

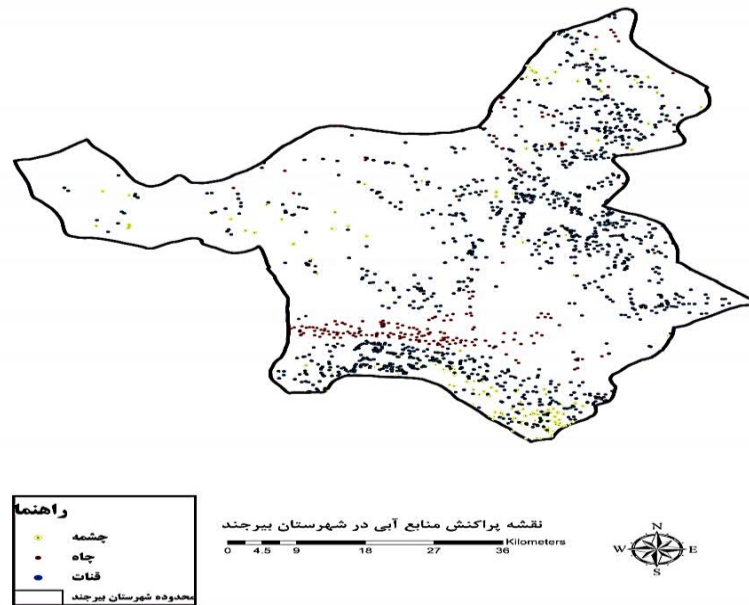


شکل ۲- تعداد قنات‌های استان خراسان جنوبی به تفکیک شهرستان (گزارش سیمای منابع آب استان، ۱۴۰۳)

Fig 2- Number of Qanats in South Khorasan Province by County (Report on the State of Water Resources in South Khorasan Province, 2024)

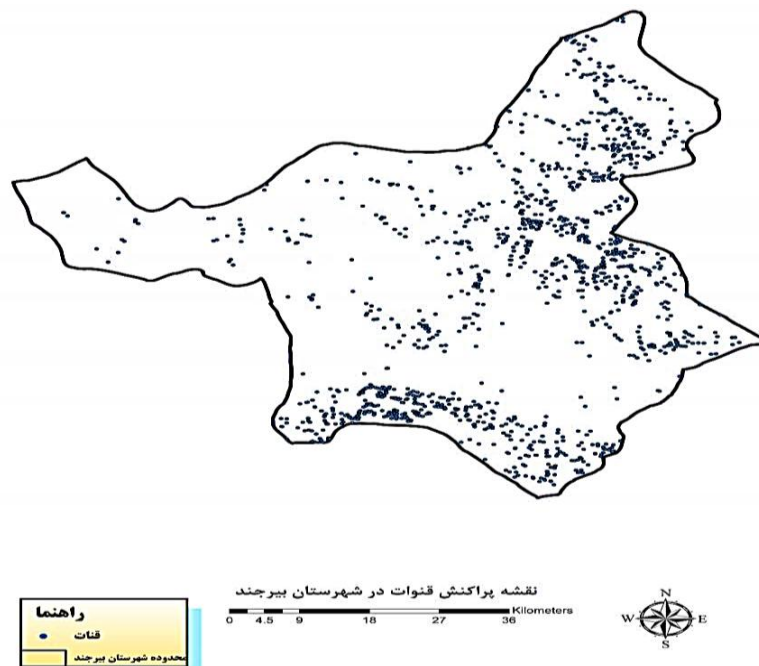
عمده آب زیرزمینی استحصال شده توسط قنات‌ها جهت مصارف کشاورزی بوده که در مجموع تعداد ۱۸۷۵ رشته قنات با مجموع تخلیه سالیانه ۲۳/۳۹ میلیون مترمکعب در سال در شهرستان بیرجند وجود دارد که قسمت اعظم آن در آبرفت‌های میان ارتفاعات قرار دارد. از نظر آبدهی تنها ۱۹ رشته قنات که حدود ۱ درصد از مجموع قنات‌ها را شامل می‌شود آبدهی بالای ۱۰ لیتر بر ثانیه داشته و بیش از ۸۵ درصد مابقی قنات‌ها آبدهی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه دارند. شکل (۴) پراکنش قنات‌ها را در سطح شهرستان بیرجند نشان می‌دهد.

طبق گزارش سیمای منابع آب استان خراسان جنوبی در سال ۱۴۰۳ از نظر منابع آبی، شهرستان بیرجند دارای ۱۸۷۵ رشته قنات، ۲۸۳ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق و ۹۲۲ رشته چشمه با تخلیه‌ای بالغ بر ۷۰/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (Regional Water Company, 2024). شکل (۳) پراکنش منابع آبی شهرستان بیرجند را نشان می‌دهد. استحصال آب زیرزمینی در استان خراسان جنوبی عمدتاً از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و سپس قنات‌ها و چشمه‌ها صورت می‌گیرد، به طوری که، از مجموع تخلیه سالیانه کل این محدوده، حدود ۷۵ درصد متعلق به چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و ۲۵ درصد مربوط به قنات‌ها بوده است.



شکل ۳- نقشه پراکنش منابع آبی در شهرستان بیرجند

Fig 3- Distribution map of water resources in Birjand city

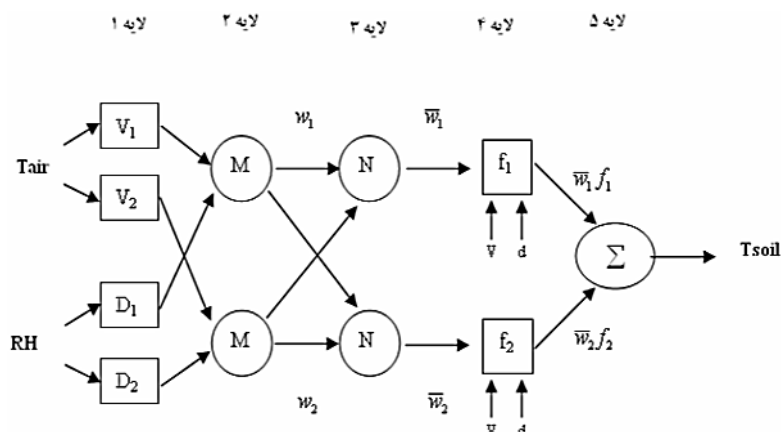


شکل ۴- نقشه پراکنش قنات‌ها در شهرستان بیرجند

Fig 4- Distribution map of Qanats in Birjand city

سیستم استنتاج فازی ایجاد می‌کند ( Mokarram et al., 2017). شکل (۵) ساختار معادل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی فازی را نشان می‌دهد.

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (ANFIS) برای اولین بار سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی توسط ژانگ (Jang et al., 1997) معرفی شد. این مدل، به کمک مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی، یک



شکل ۵- ساختار سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی

Fig 5- Structure of the Neuro-Fuzzy Adaptive Inference System

کیفی مدل فازی عصبی تطبیقی این مدل برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. جهت اطلاعات بیشتر از مدل‌های استنتاج تطبیقی عصبی فازی می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط ( Koorehpazan, Dezfouli, 2015; Emamgholizadeh et al., 2014; Vahedi et al., 2015) مراجعه کرد.

### معیارهای ارزیابی مدل

در پژوهش حاضر، از میان شاخص‌های آماری متعدد در دسترس، شاخص‌هایی برای ارزیابی درستی عملکرد مدل انتخاب شده است که با استفاده از آنها میزان خطای موجود در نتایج به دست آمده، میزان همبستگی داده‌ها، پراکندگی آنها و همچنین بالادست یا پایین دست بودن نتایج حاصل نسبت به مقادیر واقعی نشان داده شده و ارزیابی شده است. به منظور ارزیابی صحت و کارایی مدل از معیارهای ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد. مقدار ضریب همبستگی در محدوده بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند و درصدی از داده‌هایی که نزدیک خط بهترین برازش قرار گرفته‌اند را بیان می‌کند. ریشه میانگین مربعات خطا، تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل خطای کمتری دارد و ضریب نش- ساتکلیف نیز از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. هر چه مقدار این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، مدل از عملکرد بهتری برخوردار است ( Zandi Dareh Gharibi et al.,

مدل سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی دربرگیرنده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار است. بخش فازی رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌گردد. در فرآیند استنباط فازی، ۵ مرحله باید صورت گیرد:

- (۱) فازی‌سازی متغیرهای ورودی؛
- (۲) به کار بردن عملگرهای (و، یا) در بخش مقدمه؛
- (۳) استنتاج از مقدمه به نتیجه در ساختار؛
- (۴) ترکیب نتایج قوانین؛
- (۵) غیر فازی کردن.

روش مدل‌سازی به وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی مشابه بسیاری از روش‌های متداول می‌باشد. ابتدا ساختار یک مدل با پارامترهای مشخص (تابع و درجه عضویت) فرض می‌شود. سپس یک سری داده ورودی / خروجی به شکلی که قابل استفاده برای آموزش سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی باشد، جمع‌آوری می‌گردد. در ادامه به وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی، مدل سیستم استنباط فازی را با داده‌های موجود آموزش داده، تا با اصلاح پارامترهای تابع درجه عضویت مطابق با حد خطای انتخاب شده، داده‌های حاصل از مدل به مقدار واقعی نزدیک شوند. با توجه به پیچیده بودن شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی، بخش بیشتری از داده‌های مشاهداتی با لحاظ بیش‌برازشی به مرحله واسنجی اختصاص یافت. لذا داده‌های ورودی به مدل شبکه فازی عصبی تطبیقی ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و ۳۰ درصد برای صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شدند. پس از بررسی

ذیل به دست می‌آیند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2} \quad (۲)$$

$$NS = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}\right) \quad (۳)$$

شبکه و بررسی دقت پیش‌بینی مدل پیشنهادی استفاده شد.

### نتایج ارزیابی مدل در پیش‌بینی دبی قنات‌ها

پس از بررسی روش‌های مختلف، برای انتخاب بهترین ترکیب از آزمون GAMMA استفاده شد. با استفاده از این روش، به روش آماری، هر یک از داده‌ها به ترتیب تأثیرشان بر داده هدف (خروجی) مرتب شدند. در این پژوهش با پیش‌پردازش داده‌های ورودی توسط روش گاما تست، مدل انتخاب بهترین ترکیب از میان پارامترهای ورودی، تعیین شد.

داده‌هایی که به کمک آزمون گاما پیش‌پردازش شده و انتخاب گردیده بودند در جعبه ابزار منطق فازی و در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> بارگذاری شدند و مدل مورد آزمایش و آزمون قرار گرفت. در مدل ارائه شده، داده‌ها با الگوریتم Fuzzy C-Means دسته‌بندی شده و مدل جهت آموزش بهینه شده است. این الگوریتم محبوب‌ترین روش خوشه‌بندی فازی است که با به حداقل رساندن تابع هدف، خوشه‌ها را پیدا می‌کند. نتایج اجرای مدل برای قنات‌های شهرستان بیرجند در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همچنین شکل (۶) و (۷) نتایج اجرای مدل برای دبی ماهیانه قنات‌های شهرستان بیرجند را در مرحله آزمایش و آزمون مدل نشان می‌دهد و همان‌گونه که مشخص است در برخی از ماه‌ها مقادیر پیش‌بینی بیشتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده است. با توجه به نتایج جدول (۱) ملاحظه می‌گردد دبی قنات‌های شهرستان بیرجند با دقت مناسبی، توسط مدل شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردیده است و مقادیر شاخص‌های آماری در محدوده قابل قبولی قرار گرفته‌اند.

(2017). شاخص‌های آماری فوق به ترتیب از رابطه‌های

که در رابطه‌های فوق: " $Q_{oi}$ " دبی آب مشاهداتی، " $Q_{si}$ " دبی آب شبیه‌سازی شده در زمان  $n.i$  "تعداد داده‌های مشاهداتی و " $\bar{Q}_{oi}$ " میانگین دبی آب مشاهداتی می‌باشد. طریقه انتخاب بهترین مدل به این صورت است که مدلی که در آن معیارهای  $R^2$  و NS به عدد یک و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، به عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود.

### نتایج و بحث

در این پژوهش، کاربرد مدل موسوم به شبکه عصبی فازی تطبیقی در پیش‌بینی دبی قنات‌ها شهرستان بیرجند مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از ۱۴ سری داده به عنوان متغیر ورودی به صورت ماهیانه استفاده گردید. در ابتدا داده‌های ورودی به کمک آزمون گاما پیش‌پردازش شدند و داده‌هایی که بیشترین ضریب همبستگی را با دبی قنات‌ها داشتند؛ انتخاب و داده‌های پرت حذف گردیدند. از میان این ۱۴ سری داده، متغیرهای تبخیر، بارندگی ماه قبل، حداقل رطوبت، حداکثر دما و متوسط دما به عنوان ورودی و دبی قنات به عنوان متغیر خروجی به صورت ماهیانه برای شبکه عصبی فازی در نظر گرفته شدند. اطلاعات از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۴۰۰ یعنی به میزان ۱۲۰ ماه مورد استفاده قرار گرفت. که ۸۴ ماه آن برای آموزش و ۳۶ ماه برای آزمون مدل به کار گرفته شد. اساس آموزش شبکه‌های عصبی بر مبنای آزمون و خطا می‌باشد تا بهترین آرایش شبکه با تغییر تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های آنها، تابع فعالیت، الگوریتم آموزش و تعداد تکرار در مرحله آموزش جهت برآورد پارامتر خروجی مورد نظر ارائه شود (Izadi et al., 2007). به منظور شناسایی ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل به کمک شبکه عصبی فازی ۷۰ درصد کل داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون جهت ارزیابی عملکرد

<sup>۱</sup> Matlab

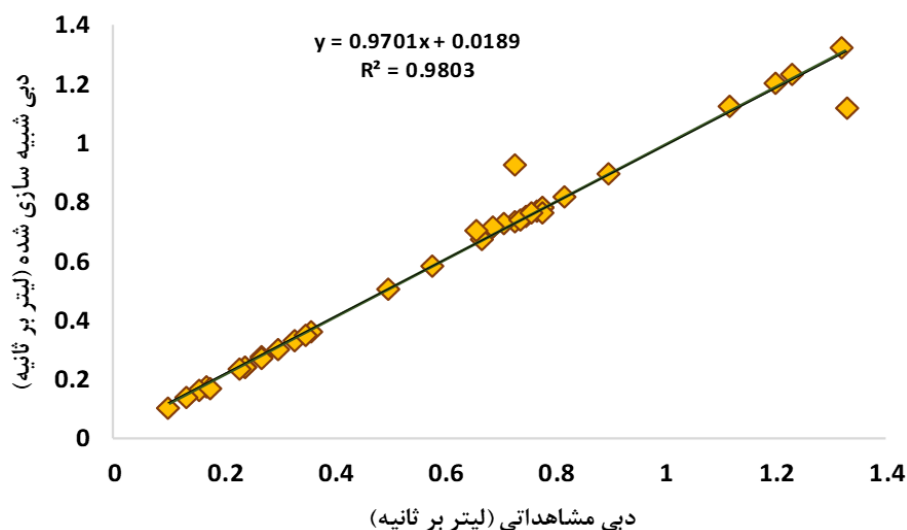
جدول ۱- عملکرد شبکه عصبی فازی تطبیقی در پیش بینی دبی قنات‌ها

Table 1- Performance of the adaptive Fuzzy Neural Network in Predicting the Discharge of Qanats

مجدور میانگین مربعات خطا RMSE	ضریب همبستگی R <sup>2</sup>	ضریب نش- ساتکلیف NS	مرحله مدل‌سازی Modeling stage
۰/۴۳	۰/۹۳	۰/۹۲	آموزش training
۰/۰۴۹	۰/۹۸	۰/۹۷	اعتبارسنجی Test

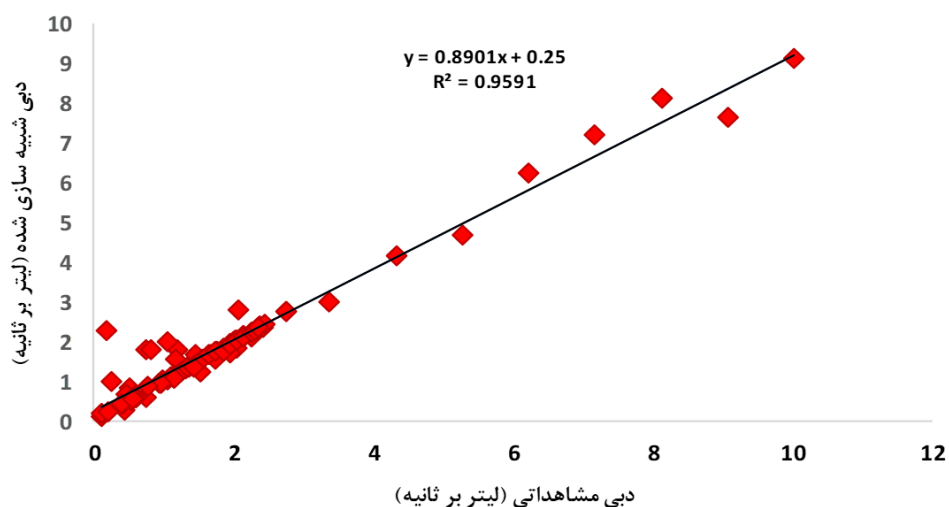
مرحله آموزش نشان‌دهنده تعمیم‌پذیری خوب مدل و توانایی آن در پیش‌بینی دبی قنات‌ها در شرایط مختلف است.

باتوجه به نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه عصبی فازی ANFIS توانسته است با دقت بسیار خوبی دبی قنات‌های شهرستان بیرجند را شبیه‌سازی کند. کاهش قابل توجه خطا در مرحله اعتبارسنجی نسبت به



شکل ۶- مقایسه دبی مشاهده‌ای و نتایج شبکه عصبی فازی تطبیقی در مرحله آزمایش

Fig 6- Comparison of the observed flow rate and the results of the adaptive fuzzy neural network in the test phase

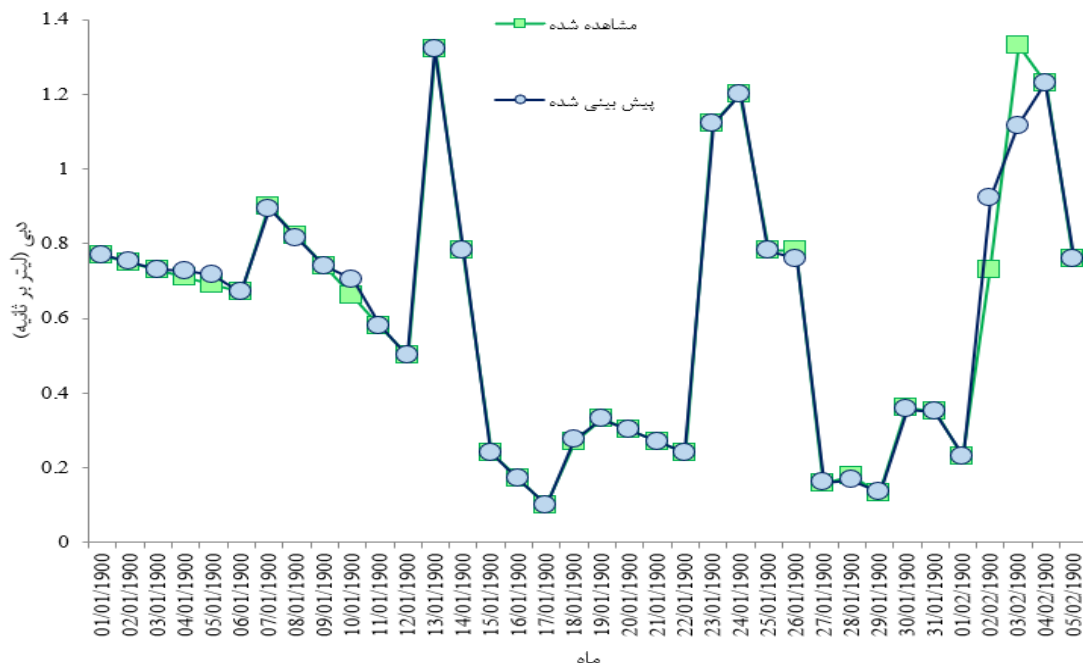


شکل ۷- مقایسه دبی مشاهده‌ای و نتایج شبکه عصبی فازی تطبیقی در مرحله آموزش

Fig 6- Comparison of the observed flow rate and the results of the adaptive fuzzy neural network in the training phase

نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی در شهرستان بیرجند بسیار مفید باشد. با استفاده از این مدل، می‌توان تغییرات آینده دبی قنات‌ها را پیش‌بینی کرده و اقدامات لازم برای مقابله با کاهش دبی و جلوگیری از خشک شدن قنات‌ها و حفظ این میراث ارزشمند، را مانند: احیا و مرمت قنات‌های قدیمی، تعیین الگوی بهینه بهره‌برداری از آب قنات‌ها، تعیین اولویت‌بندی قنات‌ها، افزایش آگاهی بهره‌برداران، توسعه روش‌های آبیاری کم‌مصرف و مدیریت و کنترل میزان برداشت از آبخوان را اتخاذ نمود. مدل ارائه شده تنها به تغییرات دبی قنات‌ها در پاسخ به تغییرات عوامل اقلیمی پرداخته است و تأثیر سایر عوامل مانند عوامل هیدرولوژیکی، تغییرات کاربری اراضی و توسعه شهری بر دبی قنات‌ها در این مدل لحاظ نشده است. لذا برای بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی، نیاز به انجام مطالعات بیشتر و جامع‌تر در این زمینه وجود دارد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی است. ضریب همبستگی ۰/۹۸، ضریب نش-ساتکلیف ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۹، نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی دبی قنات‌ها داشته که با نتایج (Emamgholizadeh et al., 2014) و (Nazari et al., 2022) مطابقت دارد. نمودار تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در طول زمان، روند کاهشی قابل توجهی را در دبی قنات‌ها نشان می‌دهد که به‌ویژه در ماه‌های خشک سال تشدید می‌شود. کاهش دبی قنات‌های شهرستان بیرجند را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله هیدرولوژی قنات‌ها، شرایط اقلیمی منطقه، افزایش برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تغییر الگوی بارندگی و افزایش دما نسبت داد و همانگونه که مشاهده می‌گردد در ماه‌های که میزان بارندگی نسبت به ماه‌های خشک سال بیشتر بوده، دبی قنات‌ها افزایش یافته است که این موضوع با توجه به هوابین بودن اکثر قنات‌های منطقه که دبی آن‌ها تابع شرایط اقلیمی منطقه بوده صدق می‌کند.



شکل ۸- مقایسه دبی مشاهده شده و محاسبه شده

Fig 8 - Comparison of observed and calculated flow rate

بیرجند در استان خراسان جنوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی با الگوریتم Fuzzy C-Means نشان داد مدل استنتاج عصبی فازی تطبیقی از دقت مناسبی در

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل ترکیبی عصبی فازی به عنوان یکی از روش‌های نوین در پیش‌بینی دبی قنات‌های شهرستان



Adhikary, S. K., Rahman, M., & Gupta, A. D. (2012). A stochastic modeling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series analysis. *International journal of applied science and engineering research*, 1(2), 238-249. <https://doi.org/10.6088/ijaser.0020101024>.

Chitsazan, M., Rahmani, G., & Neyamadpour, A. (2015). Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India*, 85, 98-106. <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0197-4>

Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., & Tsanis, I. K. (2005). Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* (4-1)309, 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.001>

Emamgholizadeh, S., Moslemi, K., & Karami, G. (2014). Prediction of the groundwater level of Bastam Plain (Iran) by artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Water resources management*, 28, 5433-5446. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0810-0>

Habibi, M. H., Nadiri, A. A., & Asghari Moghaddam, A. (2016). Spatio-temporal groundwater level prediction using hybrid genetic-Kriging model (Case study: Hadishahr Plain). *Iran-Water Resources Research*, 11(3), 85-99. [https://www.iwrr.ir/article\\_1401\\_9eaba82f2055b7ee746423ed1be21e3c.pdf](https://www.iwrr.ir/article_1401_9eaba82f2055b7ee746423ed1be21e3c.pdf)

Hamed, Y., Elkiki, M., & Al Gahtani, O. S. (2015). Prediction of future groundwater level using artificial Neural Network, southern Riyadh, KSA (CASE STUDY). *International Water Technology Journal*, 5(2), 149-162. <https://www.researchgate.net/publication/327834035>

Izadi, A., Davari, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., & Haghayeghi, M. S. G. (2007). Water Table Forecasting Using Artificial Neural Networks. *Iranian Journal Of Irrigation And Drainage*, 1(2), 59-71. <https://Sid.Ir/Paper/131658/En>

Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., & Mizutani, E. (1997). Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence [Book Review]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(10), 1482-1484. <http://dx.doi.org/10.1109/TAC.1997.633847>

Khashei, A., Siuki, Ghahrama, B., & Kouchakzadeh, M. (2013). Comparison of ANN, ANFIS, and Regression Models to Estimate Groundwater Level of Neyshaboer Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 7(1), 10-. <https://www.magiran.com/paper/1135006>

Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13, 317-320. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>

Koorehpazan Dezfouli, A. (2015). *Principles of Fuzzy Set Theory and its Applications in Modeling Water Engineering Problems*.

پیش‌بینی دبی قنات‌ها برخوردار بوده. با این حال، لازم به ذکر است که این مدل به کیفیت و کمیت داده‌های ورودی بسیار حساس بوده و ممکن است در شرایطی که تغییرات محیطی و هیدرولوژیکی قابل توجه باشد، دقت پیش‌بینی کاهش یابد. همچنین، مقایسه نتایج این مدل با سایر مدل‌های رایج در این زمینه، نشان‌دهنده برتری آن در شرایط خاص مطالعه حاضر است. با این وجود، برای بهبود قابلیت اطمینان مدل و گسترش کاربرد آن در سایر مناطق، نیاز به تحقیقات بیشتر در جهت کاهش حساسیت مدل و توسعه آن برای پیش‌بینی‌های بلندمدت احساس می‌شود.

از آنجایی که قنات‌ها از مهم‌ترین منابع آبی و به عنوان شاهرگ حیاتی استان خراسان جنوبی محسوب شده و حیات بسیاری از روستاها و آبادی‌ها به آنها وابسته است، مدیریت بهینه منابع آب، احیا و مرمت قنات‌ها و اصلاح الگوی مصرف ضرورت دارد. پیشنهاد می‌گردد بررسی اثرات تغییر اقلیم و اثرات برداشت از چاه‌ها بر دبی قنات‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد و اگرچه مدل ارائه شده در این پژوهش یک مدل شبیه‌سازی است، اما می‌توان با تلفیق آن با مدل‌های بهینه‌سازی از آن در مدیریت یکپارچه منابع آب شهرستان بیرجند استفاده کرد. جهت آگاهی دقیق از میزان آبدهی قنات‌های شهرستان بیرجند توصیه می‌گردد آمار برداری از دبی قنات‌ها با توجه به اهمیت این منابع در منطقه مورد مطالعه با نظم و دقت بیشتر انجام پذیرد. همچنین با توجه به روند کاهشی دبی قنات‌ها، اجرای طرح‌های احیا و مرمت قنات‌ها، لایروبی منظم، اصلاح سیستم‌های سنتی آبرسانی و مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی، از جمله اقدامات ضروری برای حفظ و پایداری این منابع آبی است. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند در پیش وضعیت قنات‌ها و برنامه‌ریزی برای مدیریت بهینه آن‌ها بسیار مفید باشد. با این حال، موفقیت این طرح‌ها مستلزم مشارکت فعال جوامع محلی و آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت پایدار منابع آب است.

#### منابع

Adamowski, J., & Chan, H. F. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.013>

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001591](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001591)  
Regional Water Company, S. K. (2024). *Report on the State of Water Resources in South Khorasan Province*. [https://skhrw.ir/uploaded\\_files/DCMS/wysiwyg/files/Gozaresh](https://skhrw.ir/uploaded_files/DCMS/wysiwyg/files/Gozaresh)
- Salamatian, S. A., Abrari, H., & Nazari, A. (2023). Predicting the Groundwater Level by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Case Study: Qom plain). *Irrigation and Water Engineering*, *13*(3), 285-304. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.169890>
- Sethi, R. R., Kumar, A., Sharma, S., & Verma, H. (2010). Prediction of water table depth in a hard rock basin by using an artificial neural network. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, *2*(4), 95-102. [https://www.researchgate.net/publication/266472104\\_Prediction\\_of\\_water\\_table\\_depth\\_in\\_a\\_hard\\_rock\\_basin\\_by\\_using\\_artificial\\_neural\\_network](https://www.researchgate.net/publication/266472104_Prediction_of_water_table_depth_in_a_hard_rock_basin_by_using_artificial_neural_network)
- Tarahi, M., & Darafshan, A. (2018). *Prediction of Groundwater Level Using Artificial Neural Network Model (ANN): Case Study of Jahrom Plain* <https://civilica.com/doc/748670>  
Second National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, <https://civilica.com/doc/748670>
- Umamaheswari, G., & Kalamani, D. (2014). Fuzzy logic model for the prediction of groundwater level in Amravathi River Minor Basin. *International Journal of Mathematics Trends and Technology-IJMTT*, *11*. <https://doi.org/10.14445/22315373/IJMTT-V11P505>
- Vahedi, F., Nadiri, A., & AsghariMoghaddam, A. (2015). *Evaluation of Artificial Neural Network and Fuzzy Logic Models Efficiency in Groundwater Level Prediction* he 1st International Congress on Earth, Space and Clean Energy, <https://civilica.com/doc/456421>
- Yang, C.-C., Prasher, S. O., Lacroix, R., Sreekanth, S., Patni, N. K., & Masse, L. (1997). Artificial neural network model for subsurface-drained farmlands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *123*(4), 285-292 . [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:4\(285\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:4(285))
- Zandi Dareh Gharibi, F., Khorsandi Kouhanestani, Z., Mozayan, M., & Arman, N. (2017). Technical Note: Evaluating the proficiency of GR2M and GR4J rainfall-runoff models in Darehtakht Basin runoff simulation. *Watershed Engineering and Management*, *9*(3), 360-370. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.112377>
- Kurtulus, B., & Razack, M. (2010). Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy. *Journal of Hydrology*, *381*(1-2), 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.029>
- Mirarabi, A., & Nakhaei, M. (2009). Groundwater Level Fluctuation Forecasting in Birjand Aquifer Using Artificial Neural Network . <https://civilica.com/doc/1776123>
- Mohtasham, M., Dehghani, A. A., Akbarpour, A., & Meftah, M. (2017). Evaluation of Artificial Neural Networks and MODFLOW Numerical Model in Forecasting Groundwater Table (Case Study: Birjand Aquifer, Southern Khorasan). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *11*(1), 1-10. [https://idj.iaid.ir/article\\_79421\\_d72337fd05734ec488f46d80ff92a9ad.pdf](https://idj.iaid.ir/article_79421_d72337fd05734ec488f46d80ff92a9ad.pdf)
- Mokarram, M., Mokarram, M. J., Zarei, A. R., & Safarianejadian, B. (2017). Using of adaptive Neuro-Fuzzy network (ANFIS) to predict underground water quality in the west of Fars province from 2003 to 2013 period. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, *4*(2), 547-559. <https://www.magiran.com/paper/1686874>
- Nazari, H., Dehghani, M., Pirkharrati, H., Asadzadeh, F., & Hajizadeh, F. (2022). Monitoring of groundwater quality parameters using adaptive neural-fuzzy inference system (ANFIS) method (Case study: Ardabil plain). *Journal of New Findings in Applied Geology*, *16*(31), 1-12. <https://www.magiran.com/paper/2454855>
- Nikmanesh, M. R. (2011). *Application of Hybrid Artificial Intelligence Methods in Predicting Daily Average Discharge of the Kor River at Chamriz Station* The 4th Iranian Water Resources Management Conference <https://civilica.com/doc/117158>
- Nikmanesh, M. R., & Rakhshandehroo, G. R. (2010). Forecasting Groundwater Level In Saadat-Shahr Plain, Iran, Using Artificial Neural Networks. *Iran-Water Resources Research*, *7*(1), 82-87. [https://www.iwrr.ir/article\\_16061\\_808dea423d0803fb34108f631404c74d.pdf](https://www.iwrr.ir/article_16061_808dea423d0803fb34108f631404c74d.pdf)
- nourani, V., AsghariMoghaddam, A., & Nadiri, A. (2006). *Evaluation of groundwater levels in the aquifer of Tabriz city using artificial neural networks* 3rd National Congress on Civil Engineering. <https://civilica.com/doc/16415>
- Rakhshandehroo, G., Akbari, H., Afshari Igder, M., & Ostadzadeh, E. (2018). Long-term groundwater-level forecasting in shallow and deep wells using wavelet neural networks trained by an improved harmony search algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, *23*(2), 04017058 .



## Investigating the Effect of Transfer Channels and Seasonal Streams on Leachate Pollution Plumes from Landfill Leachate Ponds Using Electrical Resistivity Tomography: A Case Study of the Hamadan Landfill

Yavar Karimi<sup>1</sup> | Nasrollah Kalantari<sup>1</sup> | Amir Saberinasr<sup>1</sup> | Jalil Helali<sup>2</sup>

1. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

✉Corresponding Author: [A.saberinasr@scu.ac.ir](mailto:A.saberinasr@scu.ac.ir)

Received:  
30 October 2024

Accepted:  
26 November 2026

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

Waste,  
Landfill,  
Leachate,  
Electrical Resistivity  
Tomography (ERT).

### Extended abstract

#### Introduction

Waste management resulting from human activities, particularly in urban areas, is one of the most sensitive and critical responsibilities of municipalities. The selection of waste disposal sites involves considering various factors, among which environmental aspects and the prevention of leachate infiltration into aquifers and groundwater are paramount. In this context, municipal waste management systems are required to utilize landfills, a standard and conventional approach to waste disposal (ANZECC, 1994; Tchobanoglous and Kreith, 2002). These structures play a vital role in optimizing waste management and mitigating the environmental impacts of municipal waste. During the transfer of leachate from old ponds to new ones, the transfer method significantly influences the outcome. To prevent leachate leakage, the use of pipes, geomembrane layers, and landfill insulation is recommended (Anouzla & Souabi, 2024). However, the use of open structures or channels that are not properly isolated can contribute to the vertical and lateral spread of leachate in the subsurface. Research indicates that the depth of the pollution plume in a landfill is primarily determined by soil texture and the presence of permeable strata (Karimi et al., 2021). Additionally, investigating seasonal streams is critical due to their high potential for leachate infiltration.

**Cite this article:** Karimi, Y., Kalantari, N., Saberinasr., A. & Helali, J. (2024). Investigating the effect of transfer channels and seasonal streams on leachate pollution plumes from landfill leachate ponds using electrical resistivity tomography: a case study of the Hamadan landfill, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 59-78. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8660.1090>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

To evaluate the potential for leachate infiltration and determine the shape of the pollution plume, cost-effective and efficient approaches, such as geophysical techniques, are necessary. Two-dimensional non-destructive electrical resistivity tomography surveys are particularly effective. Geological and subsurface evaluations of waste sites using geophysical methods have been extensively studied due to their accuracy and cost-effectiveness (Yannah et al., 2019; Ayolabi et al., 2015; Karsli et al., 2024; De Carlo et al., 2023; Karimi et al., 2021; Anouzla & Souabi, 2024; Nguyen et al., 2018).

In these methods, leachate infiltration is identified by the significant electrical resistivity differences between the leachate and the surrounding environment (Gazoty et al., 2012; Ugbor et al., 2021; Belghazal et al., 2013; Bellezoni et al., 2014; Abdulrahman et al., 2016; Helene et al., 2020; Juarez et al., 2023). Based on this understanding, the current study aims to investigate the vertical and lateral spread of leachate at the leachate transfer channel and seasonal streams within the landfill site of Hamadan City.

## Material and Methods

### Study Area

The studied area is located in the northern part of Hamedan city, between coordinates 34.959240° to 34.972384° N latitude and 48.611835° to 48.630663° E longitude, covering an approximate area of 238 hectares. Geologically, the area lies within the Sanandaj-Sirjan zone and comprises marly limestone formations, weathered sandstones, and clay. Geotechnical investigations conducted in the area reveal that the lithological composition includes sandy silt layers with gravel extending to a depth of 20 meters (Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, 2017).

Vertical electrical sounding in the studied area has identified clay layers (up to a depth of approximately 2.6 meters), clayey marl (reaching depths of around 15 meters), mudstone and marly limestone (up to about 60 meters), as well as mudstone and silt with limestone (extending to a depth of about 160 meters). These findings indicate low permeability, limiting the infiltration and expansion of leachate (Karimi et al., 2021; Helali et al., 2020).

### Methods

Electrical resistivity tomography (ERT) data were collected using an RMT5 device with a transmitter length of 120 m and an electrode spacing of 2 m for three profiles. The distance of profile 1 from the location of the old leachate evaporation pond is 240 m, while the distance of the other two profiles from this pond is approximately 540 m.

Electrical resistivity surveying is based on the distribution of potentials in a homogeneous medium. One pair of electrodes (A and B) is used to introduce the current into the ground, while another pair (M and N) is employed to measure the potential difference of hemispheric equipotential surfaces where the ground surface intersects them. The apparent resistivity value is then calculated using the following equation (1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

In Equation (1),  $\Delta V$  is expressed in millivolts (mV),  $I$  in milliamperes (mA), and  $K$  in meters (m). Accordingly, the apparent resistivity ( $\rho_a$ ) is expressed in ohm-meters ( $\Omega\text{m}$ ).

In this study, a Wenner electrode array was used for two-dimensional electrical resistivity tomography (ERT) to determine the distribution of apparent resistivity values. More theoretical details are provided in the works of Karimi et al. (2021) and Loke (2006).

After data collection and the removal of outliers, the raw apparent resistivity data were entered into the Res2Dinv software to generate the initial pseudo-sections of resistivity. During the modeling of the collected profiles, the inverse solution was implemented using the Quasi-Newton technique with identical horizontal and vertical filters.

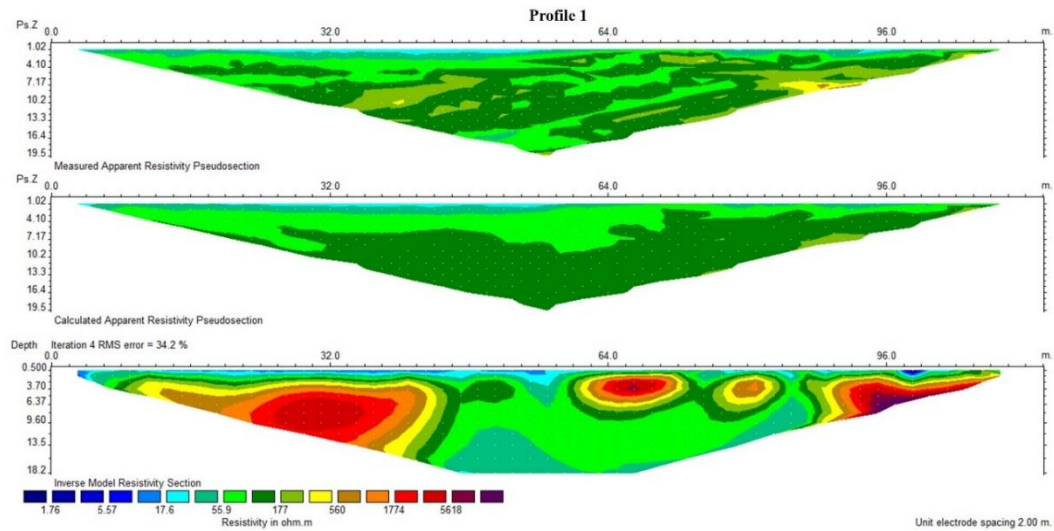
### 3. Result and Discussion

In this study, three ERT profiles were analyzed to investigate leachate contamination and resistivity variations. The findings are summarized as follows:

#### Profile 1

This profile was oriented in the north-south direction, perpendicular to the leachate flow (Fig. 1). High-resistivity layers (177–5600  $\Omega\text{-m}$ ) identified at the start of the profile (up to 42 meters) have inhibited leachate infiltration. However, between 42 and 90 meters, low-resistivity layers (17–177  $\Omega\text{-m}$ ) indicate significant leachate contamination extending to a depth of 18 meters. This contamination

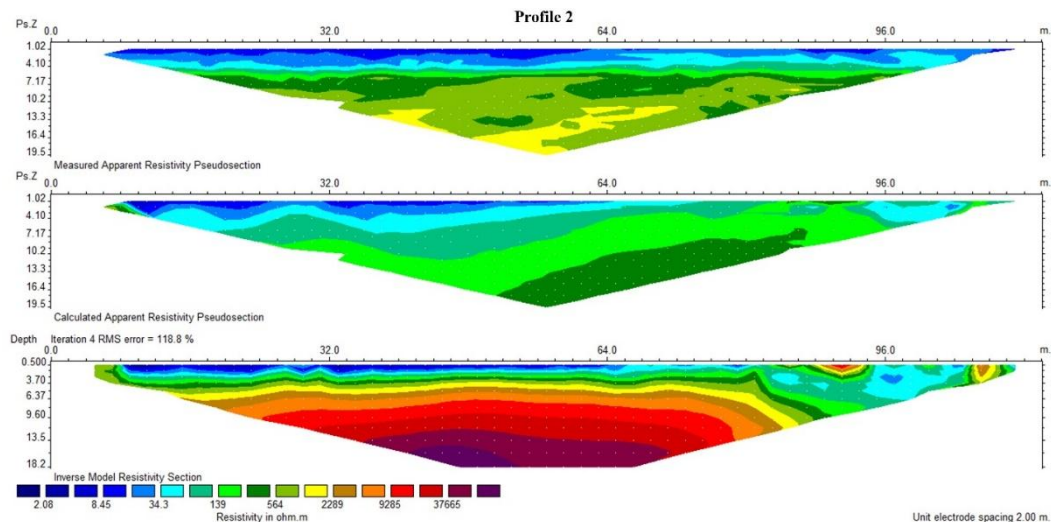
is likely attributed to the leachate transfer channel, which has created an extensive contamination plume. Toward the end of the profile, high-resistivity layers ( $\geq 560 \Omega\text{-m}$ ) are observed, corresponding to impermeable carbonate and metamorphic (especially schist) rocks. Overall, the leachate infiltration pattern in this profile is heterogeneous due to the coexistence of old and new landfill deposits. It is recommended that concrete or pipe channels be utilized to mitigate further contamination.



**Fig 1. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 1 (black lines specifying the plume of pollution caused by leachate)**

### Profile 2

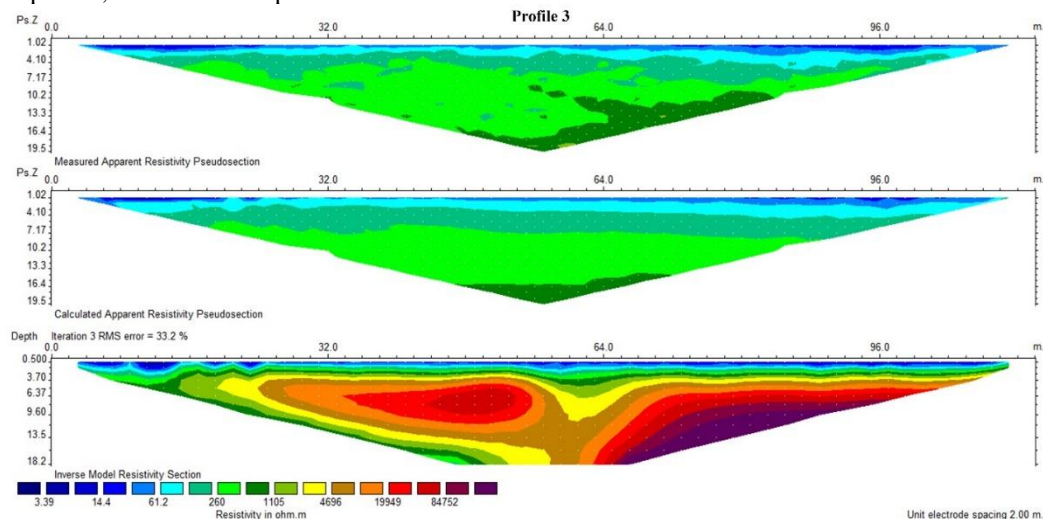
This profile, also aligned in the north-south direction, terminates at a seasonal stream (Fig. 2). From the start of the profile to 78 meters, topsoil and clay layers with low resistivity ( $< 34 \Omega\text{-m}$ ) are dominant. Beyond this point, resistivity values further decrease ( $< 139 \Omega\text{-m}$ ) due to leachate infiltration from the stream. The leachate penetration depth is estimated at up to 11 meters, with a contamination plume width of approximately 30 meters. The presence of clay and mudstone bedrock in this area restricts deeper infiltration. However, the seasonal stream has facilitated lateral contamination spread. A comparative analysis of Profiles 1 and 2 suggests that the leachate transfer channel has a more pronounced impact on contamination than the seasonal stream, owing to its proximity to the leachate pond and the underlying structural differences.



**Fig. 2. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 2**

### Profile 3

Situated south of the seasonal stream and directly connected to Profile 2, this profile also follows a north-south orientation (Fig. 3). From 0 to 20 meters, a low-resistivity zone ( $<260 \Omega\text{-m}$ ) indicates leachate infiltration, with the leachate-saturated zone extending to a depth of approximately 1.5 meters (resistivity  $<14.4 \Omega\text{-m}$ ). Underlying layers with resistivity values exceeding  $1105 \Omega\text{-m}$  effectively prevent further infiltration. Although leachate infiltration is observed at the beginning of this profile, the infiltration pattern is uniform and similar to that of Profile 2.



**Fig. 3. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 3**

### Conclusion

The findings from this research on the Hamadan Landfill indicate that the leachate transfer channel and the presence of seasonal streams have significantly influenced the vertical and lateral expansion patterns of leachate. Based on the profiles presented, leachate infiltration and the spread of the pollution plume ranged from 13 to 18 meters vertically and from 30 to 50 meters laterally, which aligns with the findings of research conducted by Helali et al. (2020) and Karimi et al. (2021).

To prevent further infiltration of the pollution plume at this landfill, it is recommended to use solid concrete channels or pipes to transfer leachate from the old pond to the new one. Additionally, to manage leachate transfer in seasonal streams, it is necessary to first prevent the entry of leachate into these pathways, and subsequently, to inhibit the seepage of leachate from these pathways downstream of the landfill by creating obstructions.

Furthermore, this study demonstrated the effectiveness of the electrical resistivity tomography technique in tracking and modeling the expansion of leachate infiltration from both artificial channels and natural streams at the landfill site. Given the importance of leachate and its environmental impact, it is proposed that municipal waste management organizations throughout the country incorporate the aforementioned technique into their control and management strategies for leachate in landfills, reducing costs associated with geomembranes in their research agendas.



## بررسی تأثیر کانال انتقال و آبراهه‌های فصلی بر الگوی هاله آلودگی شیرابه حاصل از پسماند حوضچه شیرابه با استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

(مطالعه موردی: لندفیل همدان)

یاور کریمی<sup>۱</sup> | نصرالله کلانتری<sup>۱</sup> | امیرصابری نصر<sup>۱</sup> | جلیل هالالی<sup>۲</sup>

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [A.saberinasr@scu.ac.ir](mailto:A.saberinasr@scu.ac.ir)

### چکیده

محل دفن پسماند (لندفیل) به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریت مهندسی پسماند و زباله می‌باشد. شیرابه حاصل از پسماند به‌عنوان عامل تهدیدکننده کیفیت آب‌های زیرزمینی در محل لندفیل و پایین‌دست به‌شمار می‌رود. بررسی عمق و توسعه‌یافتگی جانبی شیرابه در آبخوان یا هاله آلودگی با استفاده از برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه راهکاری کم‌هزینه و بهینه در پایش و مدل‌سازی انتشار آلودگی می‌باشد. در این مطالعه تلاش گردید هاله آلودگی ناشی از کانال انتقال شیرابه در دو حالت بدون آلودگی و آلوده مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور ۳ پروفیل توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به طول ۱۲۰ متر با فواصل الکترودی ۲ متری در لندفیل همدان برداشت شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد توزیع هاله آلودگی در مسیر انتقال شیرابه تا عمق حدود ۱۸ متری توسعه یافته و توزیع جانبی آن به طول ۵۰ متر نیز رسیده است در حالی که در آبراهه فصلی این توسعه یافتگی عمقی و جانبی کمتر می‌باشد. این مطالعه نشان داد تأثیر کانال انتقال و آبراهه فصلی بر عمق و توسعه یافتگی جانبی شیرابه تأثیرگذار است. بنابراین جهت جلوگیری از ادامه این روند لازم است بحث انتقال شیرابه با لحاظ نمودن راهکاری مدیریتی و از طریق لوله‌های عایق و ایزوله شده انجام گرفته و از خروج شیرابه از محل لندفیل جلوگیری شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

پسماند،

لندفیل،

شیرابه،

توموگرافی مقاومت ویژه.

## مقدمه

آن بالغ بر ۴۰۰ الی ۴۵۰ تن در روز می‌باشد. با توجه به حجم بالای پسماند، حجم شیرابه تولیدی به‌خصوص در فصول مرطوب سال احتمال آلودگی آبخوان وجود خواهد داشت (Vahabian et al., 2019). بنابراین ایجاد حوضچه‌های جدید و انتقال شیرابه به آن می‌تواند در کاهش این خطرات مثرتر باشد. انتقال این شیرابه باید از طریق کانال‌های ایزوله شده بتنی یا فلزی باشد ولی در مواردی مشاهده شده است در هنگام انتقال شیرابه از حوضچه‌های قدیمی به حوضچه‌های جدید از کانال‌های خاکی استفاده شده است که احتمال نفوذ عمقی و جانبی شیرابه را بیشتر خواهد کرد. مشابه کانال‌های خاکی ایجاد شده با توجه به توپوگرافی وجود آبراهه‌های فصلی نیز می‌تواند این امر را تشدید کند. بنابراین انتقال شیرابه در محل لندفیل از محلی به محل دیگر مستلزم استفاده از سازه‌های ایزوله شده یا از طریق لوله‌ها خواهد بود. بررسی‌های نشان داده است عمق توسعه هاله آلودگی در لندفیل عمدتاً با نوع بافت خاک زیرسطحی و وجود لایه‌های نفوذپذیر هم‌بستگی دارد (Karimi et al., 2021; Anouzla & Souabi, 2024). به‌منظور عدم انتشار عمقی و جانبی شیرابه در آبخوان استفاده از سازه‌های ژئوممبران و عایق‌سازی لندفیل پیشنهاد شده است (Anouzla & Souabi, 2024). در مطالعات مکان‌یابی محل دفن پسماند ملاحظات زیست‌محیطی و زمین‌شناختی شامل آلودگی محدوده لندفیل و همچنین آبخوان پایین‌دست در نظر گرفته می‌شود. هر نوع انتقال یا ماندگاری شیرابه در محل پسماند بدون استفاده از سازه‌های ایزوله (استفاده از ژئوممبران) می‌تواند در عمق نفوذ شیرابه مؤثر بوده و آن را تشدید نماید. تشدید این پدیده به لیتولوژی زیرسطحی (Khoshraresh et al., 2022; Anouzla & Souabi, 2024)، غلظت و تنوع املاح موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و ماندگاری آن بستگی خواهد داشت. در مناطقی از لندفیل که محل زباله‌های قدیمی بوده انتقال شیرابه به حوضچه‌های تغذیه جدید باید با رعایت اصول مهندسی همراه باشد. به‌طوری که باید از طریق کانال‌های روباز بتنی یا کانال‌های روبسته انجام شده و امکان از توسعه یافتگی شیرابه در مسیر انتقال جلوگیری شود. ارزیابی این گزینه تنها از طریق برداشت‌های دوبعدی غیر تخریبی و کم‌هزینه به‌خصوص روش‌های ژئوفیزیکی

مدیریت زباله حاصل از فعالیت‌های انسان به‌خصوص در مناطق شهری یکی از حساس‌ترین امور اجرایی شهرداری‌ها می‌باشد. مدیریت مقادیر حجیمی از این زباله‌ها باید در مناطق خاصی که اصطلاحاً محل دفن پسماند یا لندفیل نامیده می‌شود انجام شود (Tchobanoglous and Kreith, 2002). لندفیل‌ها به‌عنوان پرکاربردترین روش دفن زباله‌های شهری در نظر گرفته می‌شوند به‌طوری که ۹۵ درصد زبال‌های شهری جمع‌آوری شده در سرتاسر جهان را شامل می‌شوند (Gupta & Paulraj, 2017). با ایجاد این سازه‌ها و بهره‌برداری مناسب از آن‌ها می‌توان جلوی مشکلات ناشی از آلودگی‌ها را گرفت. در این روش دفع پسماندها با کمترین مخاطرات بهداشتی و زیست‌محیطی انجام می‌پذیرد. انتخاب محل لندفیل با در نظر گرفتن گزینه‌های متعددی صورت می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها لحاظ نمودن ملاحظات زیست‌محیطی و عدم انتشار شیرابه حاصل از لندفیل در آب‌های زیرزمینی است (Maurya et al., 2017). این مورد در مناطق صنعتی که شیرابه‌های صنعتی تولید می‌کنند نیز صدق می‌کند. با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی شیرابه‌های حاصل از پسماند احتمال انحلال و تغییر آبخوان در نتیجه این فرایندهای شیمیایی وجود دارد (Vahabian et al., 2019). از دهه‌های گذشته تلاش شده است زباله‌های شهری به‌صورت منسجم و منظم مدیریت شوند. در این راستا بخش پسماند شهرداری‌ها مکلف به استفاده از سازه‌های مدفن زباله شده‌اند که یکی از روش‌های دفع استاندارد زباله محسوب می‌شود (ANZECC, 1994; Tchobanoglous and Kreith, 2002). وجود این سازه‌ها در مدیریت بهینه و کاهش آثار زیست‌محیطی زباله‌های شهری بسیار مهم است. با توجه به تنوع و گوناگونی زباله‌های دفن شده در مدفن زباله و فسادپذیری بالای آن‌ها، در صورت اجرا و طراحی نامناسب، این سازه سودمند مدیریتی، تبدیل به خطری زیست‌محیطی خواهد شد (United Kingdom Department of Environment, Helene et al., 2020; Anouzla & Souabi, 2024). لندفیل شهرداری همدان یکی از مهندسی‌ترین لندفیل‌ها کشور می‌باشد که حجم زباله‌های منتقل شده به



شود به طوری که با فاصله گرفتن از محل دفن پسماند غلظت آن‌ها کاهش خواهد یافت. در محل مورد مطالعه، انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به حوضچه‌های جدید با کانال خاکی انجام شده است که احتمال توسعه عمقی و جانبی آلودگی شیرابه در زیر و اطراف کانال انتقال را افزایش می‌دهد. بررسی هلالی و همکاران (Helali et al., 2020) نشان می‌دهد وجود آبراهه‌های فصلی از طریق جریان‌ات زیرسطحی موجب انتقال شیرابه به پایین دست لندفیل خواهد شد. بنابراین در این مطالعه تلاش شد تا با استفاده از روش توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به صورت دوبعدی اثر کانال‌های طبیعی (مسیل‌ها) و مصنوعی (کانال انتقال شیرابه) بر نفوذ عمقی و جانبی شیرابه مورد تحلیل قرار گیرد. عدم بررسی چنین مواردی احتمال آلودگی آبخوان‌های پایین دست را افزایش خواهد داد. از طرفی استفاده از این روش می‌توان هزینه‌های ایمن‌سازی لندفیل را از دیدگاه زیست‌محیطی کاهش دهد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده لندفیل همدان در دشت همدان-بهار به فاصله ۲۰ کیلومتری شمال همدان قرار دارد. محل لندفیل طوری انتخاب شده است که از شهرهای مجاور شامل لالچین، بهار، جورقان و همدان حداقل ۱۰ کیلومتر فاصله داشته باشد (شکل ۱). محدوده لندفیل در وسعتی بالغ بر ۲.۳ کیلومترمربع در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه، ۵۸ دقیقه و ۱۷ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه شرقی در ارتفاع ۱۷۹۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. از نظر هواشناسی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه از اقلیم نیمه‌خشک با دمای متوسط بین ۱.۹- تا ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد با بارش سالانه ۳۳۰ میلی‌متری برخوردار بوده و عمدتاً در محدوده آبان تا اردیبهشت رخ می‌دهد. رخداد پدیده تغییر اقلیم موجب کاهش بارش‌های این استان و منطقه شده است (Moazzezi et al., 2020; Maryanji et al., 2023) به طوری که بارش عمده این منطقه تحت تأثیر پدیده‌های بزرگ‌مقیاس از جمله ENSO بوده است (Helali et al., 2020; 2021, 2023). کاربری این منطقه نیز عمدتاً متعلق

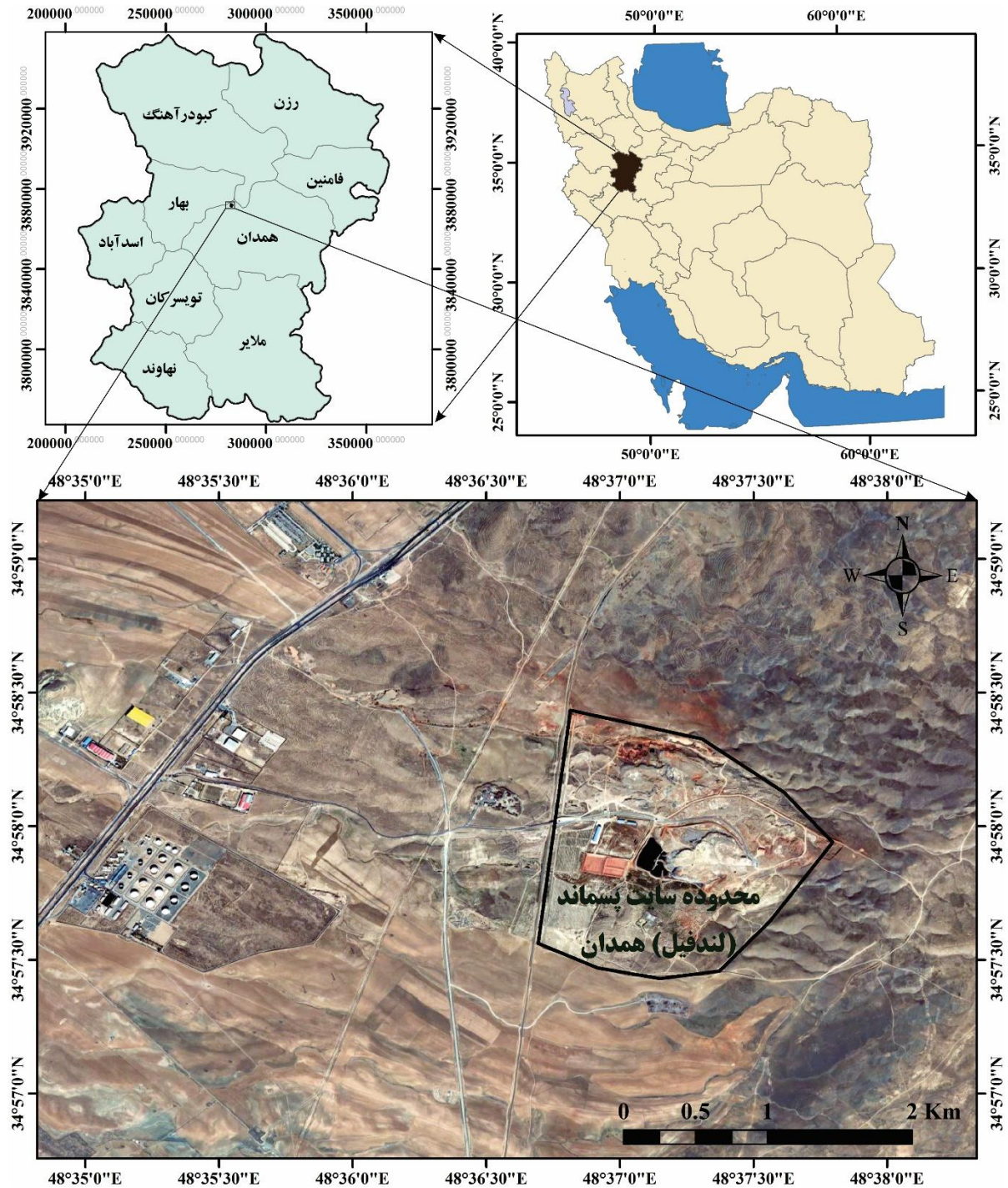
به همراه نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود (Karimi et al., 2021).

ارزیابی زمین‌شناسی و زیرسطحی محل پسماند با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل دقت و کم‌هزینه بودن موضوع مطالعات متعدد بوده است (Di Maio et al., 2018; Juarez et al., 2023; Karsli et al., 2024; Anouzla & Souabi, 2024). در این روش‌ها نفوذ شیرابه از طریق اختلاف مقاومت الکتریکی بین محدوده آلودگی و محیط پیرامون مشخص می‌شود (Gazoty et al., 2012; Ughor et al., 2021; Juarez et al., 2023). همچنین، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به خصوص روش مقاومت ویژه در مطالعات متعدد از جمله زمین‌لغزش‌ها (Hafizi et al., 2020)، طرح‌های تغذیه مصنوعی (Sharifi et al., 2018)، و مطالعات محل پسماند و شیرابه حاصل از لندفیل در مناطق مختلف جهان انجام شده است (Gazoty et al., 2012; De Donno and Cardarelli, 2017; Isunza Manrique et al., 2023; Lu et al., 2023). بر اساس مطالعات انجام شده در لندفیل‌ها منطقه اشباع از شیرابه دارای مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم‌متر می‌باشند (Park et al., 2016; Moretto et al., 2021; Ansari et al., 2017). هر چند این مقدار می‌تواند با توجه به لیتولوژی و رطوبت خاک نوسانات بیشتری داشته باشد (Helali et al., 2020).

برخلاف دیگر مناطق جهان مطالعات داخلی انجام شده در مورد کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در لندفیل محدود به چندین مطالعه موردی می‌باشد که عمدتاً با تأکید بر معرفی روش ژئو الکتریک در مطالعات لندفیل (Helali et al., 2022; Khoshravesh et al., 2020; al., 2022) و هاله آلودگی حاصل نفوذ شیرابه در آبخوان و محل لندفیل (Karimi et al., 2021) بوده است. به عقیده کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و خوش‌روش و همکاران (Khoshravesh et al., 2021) محل لندفیل همدان به تغییرات نفوذ شیرابه حاصل از حوضچه شیرابه همگن نبوده و ضرورت استفاده از این روش در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل لندفیل تأکید شده است. همچنین وهابیان و همکاران (Vahabian et al., 2019) تأکید کرده‌اند که غلظت بالای املاح در شیرابه حاصل از لندفیل می‌تواند به صورت عمقی و به پایین دست منتشر

۱۳۷۹ انجام شده است. در حال حاضر محدوده مورد استفاده ۲/۳ کیلومتر مربع بوده و در آینده به ۴ کیلومتر مربع توسعه داده خواهد شد.

به منابع طبیعی با پوشش گیاهی چندساله از جمله گون می‌باشد که در محدوده لندفیل تغییر کاربری داده شده است. تأسیس لندفیل با مساحت ۱۰ هکتاری در سال



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه و موقعیت آن در محدوده استان همدان  
Fig. 1. The study area and its location in Hamadan province

## زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

آلودگی منتقل شده به عمق و پایین‌دست بوده است (Helali et al., 2020).

### وضعیت شیمیایی و فیزیکی لندفیل

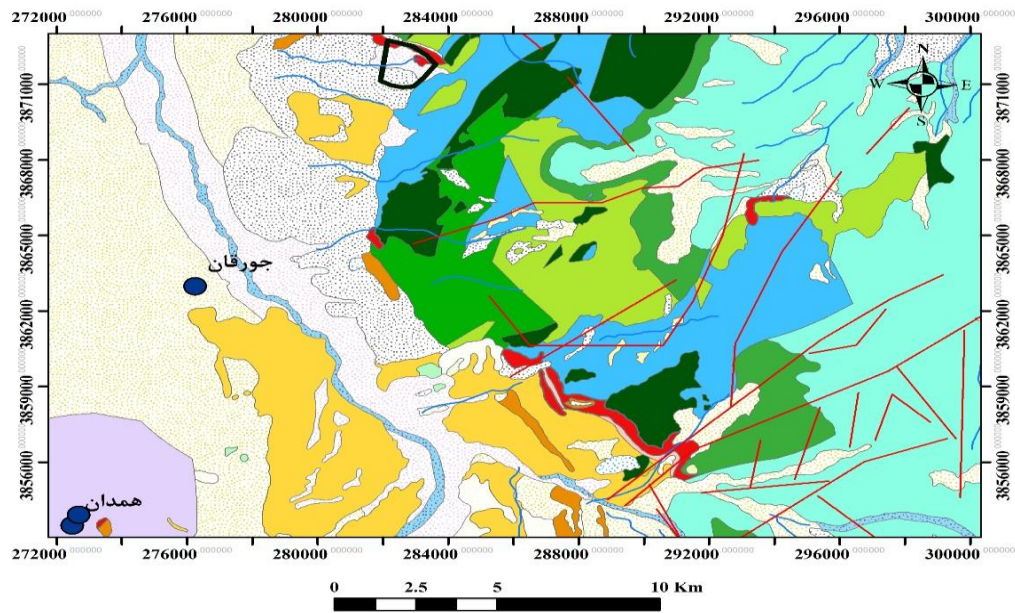
بررسی مطالعات پیشین نشان داده است اسیدپتته این منطقه بین ۷.۳ تا ۷.۸۹، هدایت الکتریکی ۲۶۵۲۰ تا ۴۲۰۴۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، کل مواد جامد محلول (TDS)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD5)، کلر، نیترات، پتاسیم و کربن آلی کل (TOC) به ترتیب بین ۱۷۵۰۰ تا ۲۸۱۰۰، ۶۲۴۰ تا ۱۷۹۴۰، ۴۷۴۲ تا ۱۲۱۱۰، ۱۶۴۰ تا ۴۲۰۰، ۵۹.۲ تا ۵۲۵، ۴۵۰۰ تا ۶۰۰۰ و ۱۳۰۰ تا ۲۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است (Vahabian et al., 2019). این مطالعه نشان داده است غلظت شیرابه با فاصله گرفتن از لندفیل کاهش یافته و همچنین احتمال آلودگی آبخوان را توسط شیرابه حاصل از لندفیل تایید کرده است.

### برداشت داده

برداشت‌های داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) با استفاده از دستگاه RMT5 (شکل ۴) با طول فرستنده ۱۲۰ متر با فواصل الکترودی ۲ متری در سه پروفیل انجام شد که موقعیت آن‌ها در شکل ۳ و همچنین جدول ۱ ارائه شده است. در این مطالعه از آرایه ونر استفاده شد که دلیل آن تفکیک عمقی و جانبی بهتر و همچنین سهولت و سرعت برداشت بالاتر داده‌ها نسبت به سایر آرایه‌ها بوده است. این دستگاه ساخت ایران (شرکت زمین سولار سیستم) و کاملاً بومی شده می‌باشد که علاوه بر داشتن قابلیت برداشت توموگرافی، دارای دقت اندازه‌گیری ولتاژ تا ۱ میکروولت، شدت جریان تا ۱ میکرو آمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه‌ها به‌طور اتوماتیک می‌باشد. لازم به یادآوری است اختلاف پتانسیل ایجاد شده به توان و قدرت دستگاه، وضعیت خشکی یا مرطوب بودن زمین و آرایه‌های مورد استفاده بستگی خواهد داشت با این حال در برداشت‌های ژئوالکتریک اختلاف پتانسیل ایجاد شده نباید کمتر از ۱ میلی ولت باشد. در این دستگاه نوفه‌ها یا پارازیت‌ها به‌صورت خودکار از طریق فیلترهای دیجیتال حذف می‌شوند.

از نظر زمین‌شناسی محل مورد مطالعه در زون سندج-سیرجان قرار گرفته است که متعلق به دوران‌های سنوزوئیک و مزوزوئیک و دوره‌های ژوراسیک، کرتاسه، ترشیاری و کواترنری می‌باشد. از نظر لیتولوژیکی این منطقه از سازندهای آهکی مارنی، ماسه‌سنگ‌های هوازده و رُس بوده که به‌طور کلی ترکیبات رُسی نیز در آن دیده می‌شود (شکل ۲). همچنین در اطراف محل مورد مطالعه بیرون‌زدگی‌های مربوط به ژوراسیک شامل شیست و اسلیت به همراه آهک‌های دگرگون شده نیز قابل مشاهده می‌باشد (Vahabian et al., 2019). بررسی مطالعات انجام شده نشان دهنده عمق آبرفتی حدود ۵ متری گراولی ماسه‌ای همراه با رُس و سیلت می‌باشد که به طرف شمال تا عمق حدود ۳۰ متر می‌رسد. نوع رُس این منطقه از نوع کائولینیت (۸۵ درصد)، ایلیت (۱۰ درصد) و مونت موریلونیت (۵ درصد) می‌باشد (Vahabian et al., 2019). مطالعات انجام شده ژئوتکنیک در این منطقه نشان می‌دهد لیتولوژی محل تا عمق ۲۰ متری از نوع لایه‌های لای ماسه‌دار همراه با شن می‌باشد (Ghaem Sazeh, 2017). برداشت سونداژ الکتریکی قائم در محل مورد مطالعه وجود لایه‌های رُسی (تا عمق حدود ۲/۶ متری)، مارنی رُسی (تا عمق حدود ۱۵ متری)، آهک مارنی و مادستونی (تا عمق حدود ۶۰ متری) و مادستون و سیلت به همراه آهک (تا عمق حدود ۱۶۰ متری) را نشان داده است که نشان‌دهنده عمق نفوذ پایین به شیرابه هستند (Karimi et al., 2021; Vahabian et al., 2019). با توجه به نزدیکی این منطقه به سازندهای باتولیت الوند مشخص شده است که این سازند فرایند کارست‌شدگی را کاهش داده است.

در شکل ۳ نمایی از منطقه مورد مطالعه شامل نوع پوشش گیاهی (عمدتاً رُز، سنجد و بادام)، محدوده لندفیل (خطوط سیاه‌رنگ)، موقعیت سونداژهای توموگرافی مقاومت ویژه (خطوط قرمز)، کانال انتقال شیرابه (خط زردرنگ) و آبراهه فصلی (خط سبز) مشخص شده است. پوشش گیاهی عمدتاً به‌صورت کشت شده به‌منظور جذب شیرابه ناشی از حوضچه‌ها بوده است. هدف از کشت این‌گونه‌ها جذب املاح موجود در شیرابه با هدف کاهش



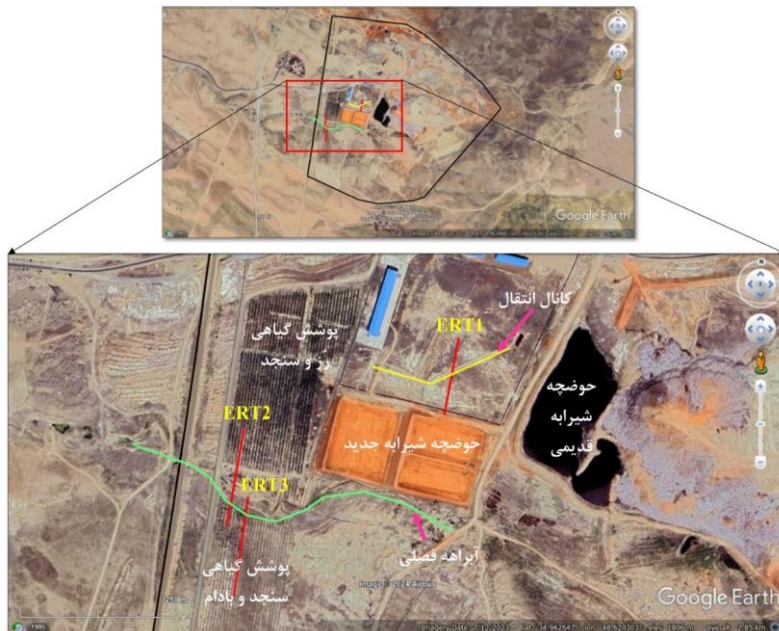
**Legend**

**Geology**

- |   |   |            |
|---|---|------------|
| Q1: Old alluvial fans and terraces                                  | Oc: Red Conglomerate                      | Fault      |
| Q2: Young alluvial fans and terraces                                | JKs: Sandstone                            | River      |
| Q3: Low level alluvial Deposits                                     | K11: Thick Limestone                      | City       |
| Qal: Recent alluvium  | K1m.l: Marly Limestone                    | study area |
| Qtr: Fresh water limestone and travertine                           | K1s,c: Quartzitic Sandstone, Conglomerate |            |
| K: Marly Limestone, Massive Limestone, Sandy Limestone and Dolomite | Jsh.s: Shale, Slate, Metasandstone        |            |
| OMqm: Alternation of Marl, Shally marl, Siltstone, Sandstone        | OMql1: Sandy Limestone with Marl          |            |

شکل ۲. مشخصات منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی)

Fig. 2. Schematic diagram of the study stages for prone areas of underground dam construction



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت سونداژهای توموگرافی مقاومت ویژه، حوضچه‌های شیرابه، کانال انتقال شیرابه و آبراهه

فصلی (ERT1, ERT2 , ERT3 به ترتیب پروفیل‌های شماره ۱، ۲ و ۳)

Figure 3. The studied area along with the location of special resistance tomography soundings, leachate ponds, leachate transfer channel, and seasonal waterway. (ERT 1, ERT2, and ERT3 define profiles 1, 2, and 3, respectively)

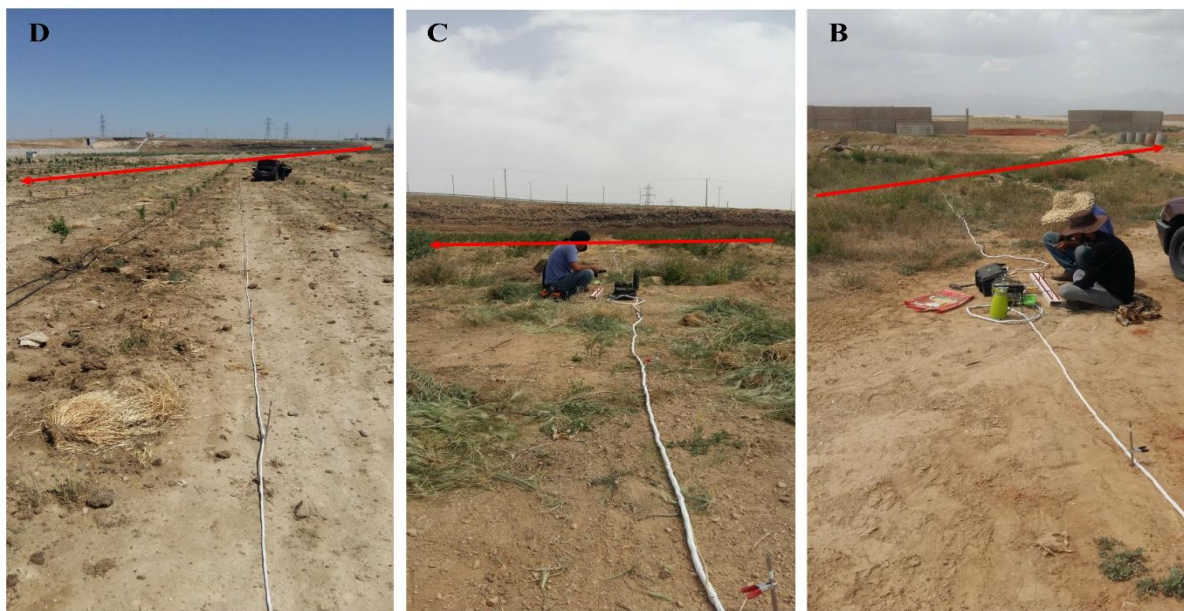
برداشت شده شماره ۱ (B)، ۲ (C) و ۳ (D) ارائه شده است. فاصله پروفیل ۱ نسبت به محل حوضچه شیرابه قدیمی، ۲۴۰ متر و فاصله دو پروفیل دیگر از محل این حوضچه حدود ۵۴۰ متر بوده است.

نوفه‌ها در واقع سیگنال‌هایی به جز هدف مورد مطالعه هستند. الگوریتم مورد استفاده در حذف نوفه‌ها استفاده از میانگین داده‌های با فراوانی بیشتر است به صورتی که اثر تک داده‌های پرت در میانگین ناچیز می‌گردد. در شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده (A)، نمایی از پروفیل‌های

جدول ۱- موقعیت ابتدایی و انتهایی پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده

Table 1- ERT Profile Start and End Locations

شماره پروفیل	انتهای پروفیل			ابتدای پروفیل			جهت برداشت پروفیل
	Z	Y	X	Z	Y	X	
شماره ۱	۱۷۹۵	۳۸۷۱۷۷۱	۲۸۲۲۸۸	۱۷۹۵	۳۸۷۱۸۹۰	۲۸۲۳۲۱	شمالی-جنوبی
شماره ۲	۱۷۹۰	۳۸۷۱۶۱۷	۲۸۲۱۰۲	۱۷۹۱	۳۸۷۱۷۳۹	۲۸۲۱۱۹	شمالی-جنوبی
شماره ۳	۱۷۹۱	۳۸۷۱۴۳۷	۲۸۲۰۷۸	۱۷۸۹	۳۸۷۱۵۵۷	۲۸۲۰۹۳	شمالی-جنوبی



شکل ۴. نمایی از تجهیزات مورد استفاده (A) و پروفیل‌های توموگرافی برداشت شده (پروفیل‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب B، C و D) (فلش‌های قرمز موقعیت کانال و آبراهه‌های فصلی)

Fig. 4. A view of the employed equipment (A) and the taken tomographic profiles (profiles No. 1, 2, and 3 correspondingly labeled B, C, and D) (red arrows indicate the locations of the channel and seasonal stream)

### مبانی روش مقاومت ویژه الکتریکی

اساس اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در زمین بر پایه توزیع پتانسیل‌ها در یک محیط همگن است. در کاوش‌های الکتریکی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی معمولاً از یک ترکیب چهار قطبی یا چهار الکترودی AMNB استفاده می‌شود. بدین ترتیب که جریانی توسط دو الکتروود A و B به زمین فرستاده‌شده، سپس اختلاف پتانسیلی که در اثر عبور این جریان بین دو الکتروود M و N حاصل می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. آنگاه با استفاده از رابطه زیر مقدار مقاومت ویژه به دست می‌آید:

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (1)$$

مقاومت ویژه الکتریکی که بدین طریق به دست می‌آید را مقاومت ویژه ظاهری می‌گویند. در رابطه (1)  $\Delta V$  برحسب میلی‌ولت، I برحسب میلی‌آمپر و K برحسب متر یا واحد طول بیان می‌گردد و بدین ترتیب مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $\rho_a$ ) نیز برحسب اهم‌متر بیان می‌شود. با توجه به جنبه‌های نظری مسئله، ممکن است وضعیت الکتروودهای پتانسیل M و N نسبت به الکتروودهای جریان A و B غیر مشخص باشد، ولی نظر به سهولت انجام کارهای صحرائی و همچنین محاسبات مربوط همیشه MN را در امتداد AB، بین دو الکتروود A و B اختیار می‌نمایند و بر حسب وضع قرار گرفتن چهار الکتروود نسبت به یکدیگر آرایش‌ها یا آرایه‌های گوناگونی حاصل می‌شود. سونداژهای الکتریکی در واقع بیان نموداری تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $\rho_a$ ) بر حسب عمق می‌باشند که با استفاده از سیستم چهار قطبی یا چهار الکتروودی در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. عمق مورد بررسی، یا به عبارت دیگر عمق نفوذ جریان، با تغییر فاصله الکتروودها تنظیم می‌گردد. هر قدر این فاصله بیشتر شود عمق نفوذ جریان، و بالطبع عمق کاوش، نیز بیشتر می‌گردد. مقاومت ویژه ظاهری یک مفهوم کاملاً صوری است و نباید به صورت مقاومت‌های متوسط در سازه‌ای زیرسطحی غیر همگن تلقی شود. برای تفسیر کمیّت مقاومت ویژه ظاهری باید آرایش نقاط چشمه جریان و پتانسیل مورد توجه باشد، زیرا مقدار این کمیّت تابع فاکتور هندسی نقاط چشمه و پتانسیل (K) است. به طور کلی هدف از پیمایش‌های مقاومت ویژه تعیین تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر حسب عمق یا به طور جانبی است. در این

مطالعات از آرایه ونر برای برداشت‌های دوبعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) توزیع مقادیر مقاومت ویژه ظاهری استفاده شده است. جزئیات بیشتر در مطالعات کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و لوک (Loke, 2006) ارائه شده است.

### پردازش داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

به منظور تفسیر داده‌های توموگرافی بعد از برداشت داده‌ها و حذف داده‌های پرت، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت‌شده به منظور ترسیم اولیه شبه‌مقاطع مقاومت ویژه وارد نرم‌افزار Res2Dinv شدند. قبل از مدل‌سازی، داده‌های پرت از محاسبات حذف شدند. مدل‌سازی عمدتاً به دو صورت مستقیم و معکوس انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دوبعدی با استفاده از روش اجزای محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد که مدل اولیه آن بسته به تجارب کارشناس بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی بر خلاف روش مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین برآورد می‌شود. در این روش ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است (Loke, 1997, 2006). برای بهبود مدل اولیه عمدتاً از دو روش کمترین مربعات گوس-نیوتن و روش شبه‌نیوتن استفاده می‌شود. در روش گوس-نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود (۲).

$$(J^T J + uF) d = J^T g \quad (2)$$

که در آن d بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسباتی، u عامل کنترلی، F تابع فیلترهای افقی و عمودی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی و  $J^T$  ترانزپوز ماتریس مشتقات جزئی است. در این روش ماتریس ژاکوبین در هر تکرار محاسبه می‌شود که این امر باعث افزایش میزان محاسبات و وقت‌گیر بودن مدل‌سازی می‌گردد. در روش‌های شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به روزرسانی شده اجتناب می‌شود به طوری که برای تکرارهای بعدی ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین  $J_0$  برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد مشتقات جزئی می‌تواند به تحلیلی با استفاده از مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه

می‌شود. در مدل‌سازی پروفیل‌های برداشت‌شده از روش شبه‌نیوتن با فیلترهای افقی و عمودی یکسان استفاده شد. به‌طور کلی، برای هر پروفیل برداشت‌شده، ابتدا شبه‌مقطع هم‌مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده خام، بدون هیچ‌گونه دخل و تصرفی تهیه شد (مقاطع بالایی). سپس نطفه‌ها با استفاده از فیلترهای خاص نرم‌افزاری از سایر داده‌ها حذف شده (مقاطع میانی) و شبه مقطع حل وارون که موقعیت و محل واقعی زون‌های با مقاومت الکتریکی بالا و پایین را بهتر و واقعی‌تر نشان می‌دهد (مقاطع پایینی) ارائه شد. قبل از مدل‌سازی، داده‌های پرت از محاسبات حذف می‌شوند (شکل ۵). طریقه حذف این داده‌های با توجه به میانگین مقدار مقاومت ویژه هر لاین انجام می‌شود (Karimi et al., 2021). جزئیات بیشتر در مطالعات لوک (Loke, 1997; 2006) و کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) ارائه شده است.

محاسبه شود. در روش شبه‌نیوتن از معادله به‌روزرسانی به فرم زیر استفاده می‌شود:

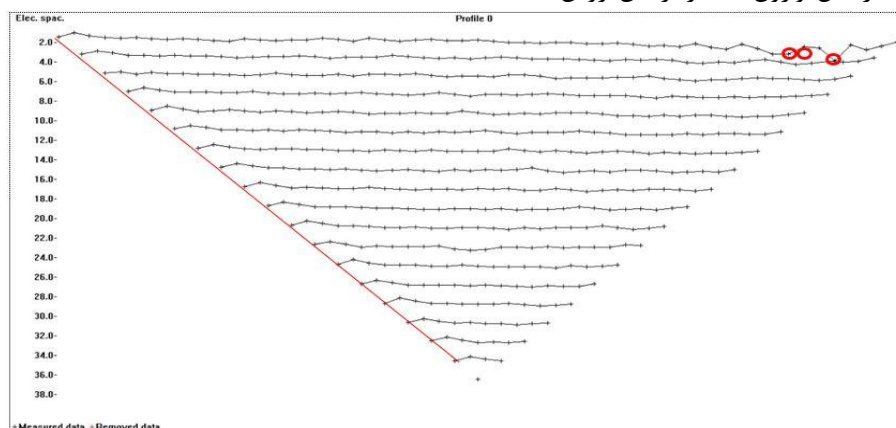
$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (3)$$

که در آن

$$u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i^T P_i} \quad (4)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (5)$$

که در آن‌ها،  $y_i$  پاسخ مدل برای  $i$  امین تکرار،  $B_{i+1}$  تقریب ماتریس ژاکوبین برای  $(i+1)$  امین تکرار، با استفاده از ماتریس ژاکوبین  $B_i$  و بردار انحراف  $P_i$  (Loke, 2006). با توجه به معادلات فوق به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه‌نیوتن در مقایسه با روش گوس-نیوتن روش سریع‌تری است و در حل وارون بیشتر از این روش استفاده



شکل ۵. نمونه داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده قبل از تفسیر (نقاط قرمز رنگ داده‌های پرت)

Fig. 5. A sample of raw data (electrical resistivity data) before the processes (red points of outlier data)

اشباع و آلودگی ناشی از شیرابه و منطقه اشباع از شیرابه می‌باشد که تا عمق ۱۸ متری و پایین‌تر ادامه دارد (Meju, 2006; Chambers et al., 2006; Vahabian et al., 2019). بررسی‌ها نشان می‌دهد عامل این نفوذ و پخش هاله آلودگی کانال انتقال شیرابه است که از قسمت میانی پروفیل می‌گذرد بنابراین تداوم انتقال شیرابه از طریق این کانال ناحیه‌ای با مقاومت پایین یا رسانش بالا ایجاد کرده است. بررسی‌های نشان می‌دهد وجود املاح با غلظت بالا و همچنین تداوم انتقال شیرابه در کانال خاکی مسبب این امر بوده است. از طرفی، وجود شیب رو به پایین بر تشدید این آلودگی در پایین‌دست افزوده است (Vahabian et al., 2019). همچنین

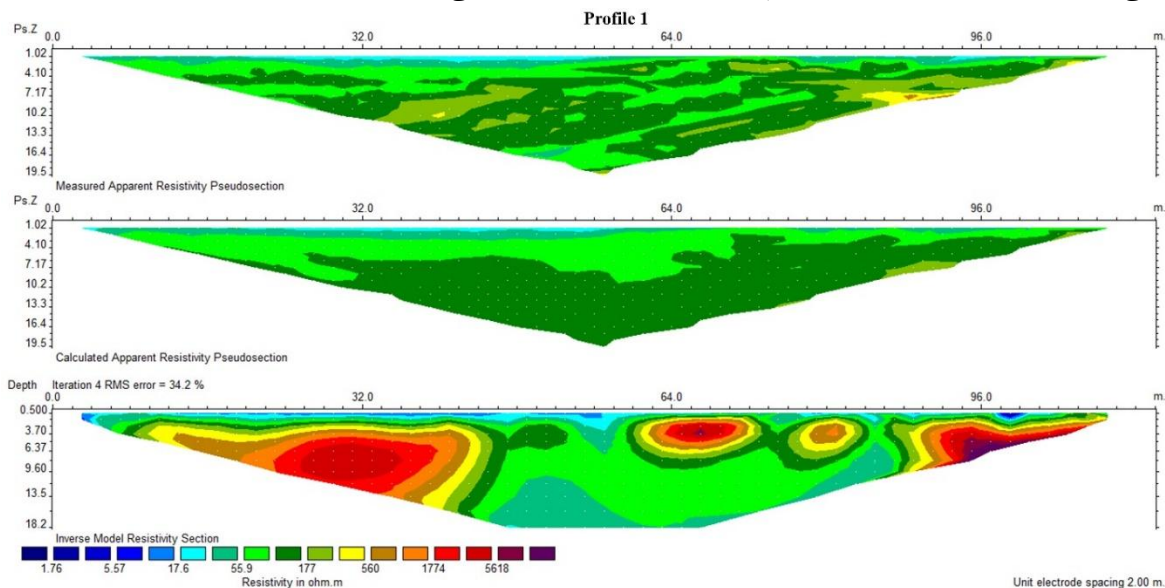
## نتایج و بحث

### تحلیل شبه‌مقطع هم‌مقاومت پروفیل شماره ۱

این پروفیل در جهت شمالی جنوبی لندفیل و عمود بر جهت جریان و کانال انتقال برداشت شده است. نتایج نشان می‌دهد ابتدای این پروفیل نسبت به نفوذ عمقی مقاوم می‌باشد به‌طوری که در فاصله ۴۲ متری از ابتدای پروفیل لایه‌ای با مقاومت بالای بین ۱۷۷ تا ۵۶۰۰ اهم‌متر از عمق حدود ۳ متری به پایین دیده می‌شود که مانع نفوذ شیرابه شده است. از فاصله ۴۲ تا ۹۰ متری از ابتدای پروفیل لایه‌هایی با مقاومت الکتریکی پایین (رسانش بالا) بین ۱۷ الی ۱۷۷ اهم‌متر نسبت به پیرامون دیده می‌شود که نشان دهنده رس

پروفیل ناهمگنی در انتشار هاله آلوده دیده می‌شود (شکل ۶). این ناهمگنی ناشی از ترکیبات مختلف در راستای پروفیل (Helali et al., 2020) و تغییرات شدت یون شیرابه (Maurya et al., 2017; Vahabian et al., 2019) می‌باشد. به‌طور کلی در این پروفیل سلول‌هایی با مقاومت بالاتر از ۵۶۰ اهم‌متر دیده می‌شود (۱ تا ۴۴ متری، ۶۰ تا ۷۲ متری، ۸۲ تا ۸۸ متری و ۹۲ تا ۱۰۸ متری) که ناحیه جداکننده زون آلوده با زون غیر آلوده می‌باشد. این امر نشان می‌دهد در راستای پروفیل برداشت شده الگوی نفوذ شیرابه همگن نیست که با مطالعات انجام شده خوش‌روش و همکاران (Khoshravesh et al., 2021)، کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و بیجت و همکاران (Bichet et al., 2016) تطابق نشان می‌دهد. این محققین بر این باور هستند که ناهمگنی در الگوی پراکنش شیرابه در لندفیل می‌تواند ناشی از عمر لندفیل (قدیم یا جدید بودن لندفیل)، غلظت املاح موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و یا ناهمگنی سازه‌های زمین‌شناسی باشد.

بخش انتهایی پروفیل از فاصله ۹۰ متری به بعد با مقاومت الکتریکی بالا (۵۶۰ اهم‌متر و بالاتر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده لایه‌هایی با نفوذپذیری کم که عمدتاً به دلیل وجود سازنده‌ای آهکی و شیستی می‌باشد. بررسی محققان نشان می‌دهد مقاومت‌های کمتر از ۱۰ اهم‌متر نشان‌دهنده مناطق اشباع از شیرابه است (Park et al., 2016; Moretto et al., 2021; Ansari et al., 2021) در حالی که در این پروفیل دامنه منطقه اشباع از شیرابه بین ۱/۷۶ تا ۱۷۷ اهم‌متر بوده است. دلیل این تغییرات زیاد ناحیه اشباع از شیرابه با غلظت بالای عناصر تشکیل دهنده موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و ترکیب از لندفیل قدیمی و جدید می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد با توجه به عرض ۱ متری کانال انتقال شیرابه هاله آلودگی شیرابه بسیار گسترده‌تر بوده است. با توجه به وجود ترکیبات رسی و بالا بودن غلظت بالای املاح در زیرسطح توسعه شیرابه این امر نشان داد ایجاد کانال انتقال شیرابه از نوع بتنی یا لوله‌ای می‌توانست از انتشار هاله آلودگی در این مقیاس جلوگیری کند. همچنین در راستای



شکل ۶. شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل به‌دست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۱ (خطوط سیاه مشخص کننده هاله آلودگی ناشی از شیرابه)

**Fig. 6. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 1 (black lines specifying the plume of pollution caused by leachate)**

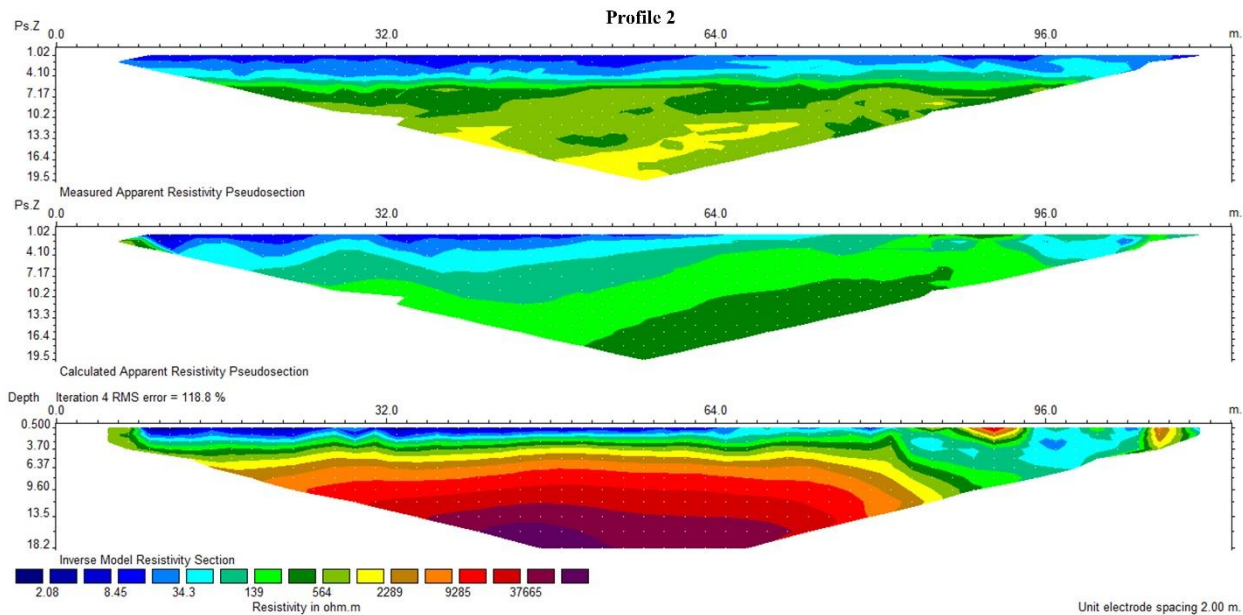
بررسی پروفیل نشان می‌دهد از نقطه شروع تا فاصله ۷۸ متری ابتدای پروفیل تا عمق ۳/۵ متری از خاک سطحی و رس تشکیل شده (با رسانش بالا یا مقاومت الکتریکی کمتر از ۳۴ اهم‌متر) ولی در اعماق پایین‌تر لایه‌ها و منطقه‌ای با

**تحلیل شبه مقطع هم مقاومت پروفیل شماره ۲**  
راستای برداشت این پروفیل شمالی-جنوبی بوده و در انتهای آن کانال آبراهه فصلی یا مسیل قرار گرفته است (شکل ۷).



شیرابه (پروفیل ۱ کانال مصنوعی و پروفیل شماره ۲ طبیعی) دانست. همچنین در انتهای این پروفیل ناحیه‌ای با مقاومت ۱۳۹ تا ۵۶۴ اهم‌متر دیده می‌شود (سبز پررنگ) که ناحیه آلوده ولی غیراشباع از شیرابه می‌باشد چرا که مقاومت الکتریکی آن نسبت به ناحیه فوقانی (کمتر از ۱۳۹ اهم‌متر) بالاتر است. این منطقه در واقع ناحیه بین زون اشباع و غیراشباع از آلودگی ناشی از شیرابه و رواناب فصلی است. نتایج نشان می‌دهد تأثیر کانال انتقال شیرابه بر توسعه هاله آلودگی شدیدتر از آبراهه فصلی است. دلیل این امر را می‌توان در دو عامل ناحیه زیرین متفاوت در دو پروفیل ۱ و ۲ (پروفیل شماره ۱ عمدتاً آبرفتی رُسی، پروفیل شماره ۲ عمدتاً رُسی و مادستونی)، شدت یا تداوم جریان شیرابه (پروفیل ۱ متداوم‌تر از پروفیل ۲)، و دوری یا نزدیکی به حوضچه شیرابه (پروفیل ۱ نزدیک‌تر از پروفیل ۲) دانست (Grellier et al., 2007; Vahabian et al., 2019; Karimi et al., 2021). عامل دیگر این موضوع را می‌توان به دلیل خودپالایی بیشتر شیرابه توسط ترکیبات آبرفتی و رُسی موجود در آبخوان که در مسیر انتقال قرار دارند دانست (Helali et al., 2020). در این پروفیل تا حدودی در سرتاسر راستای برداشت همگنی از نظر نفوذ به شیرابه دیده می‌شود (به‌استثنای بخش انتهایی پروفیل). نتیجه نهایی این پروفیل نشان دهنده نفوذ عمقی و جانبی شیرابه در انتهای پروفیل است که به دلیل جریان‌ات رواناب فصلی و ادغام آن با شیرابه است. شیرابه موجود در این پروفیل عمدتاً ناشی از زباله‌های بخش قدیمی لندفیل می‌باشد. بنابراین احتمال آلودگی پایین‌دست آبخوان این پروفیل به دلیل نفوذ عمقی وجود خواهد داشت که در مطالعات متعدد در سایر مناطق جهان این عامل اثبات و بررسی شده است (Casado et al., Matsui et al., 2000). (2015).

مقاومت الکتریکی بالا (مقاومت الکتریکی بیشتر از ۲۲۸۹ اهم‌متر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده لایه‌های متراکم سنگی و نفوذناپذیر از نوع رُسی و مادستونی می‌باشد. از فاصله ۷۸ متری به بعد تا بخش انتهایی پروفیل منطقه‌ای با آفت مقاومت الکتریکی قابل مشاهده است (مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۳۹ اهم‌متر) که نشان‌دهنده نفوذ نسبی شیرابه به دلیل وجود آبراهه و کانال زهکش‌کننده عبوری شیرابه از بخش انتهایی پروفیل است (شکل ۷). عرض کانال یا آبراهه فصلی ۲/۵ متر بوده است در حالی که عمق نفوذ شیرابه ۱۱ متر به عرض ۳۰ متر (از فاصله ۸۰-۱۱۰ متری ابتدای پروفیل) ایجاد شده است. بررسی مطالعات انجام شده از طریق سونداژهای الکتریکی قائم (Helali et al., 2020) و برداشت نمونه‌های مغزه‌گیری (Ghaem Sazeh Sanjesh, Ekbatan Consultant Engineering, 2017; Vahabian et al., 2019) وجود سازنده‌ای نفوذناپذیر شامل رُس، مارن، آهک مارنی و مادستون را در این پروفیل نشان می‌دهد که مانع نفوذ عمقی شیرابه می‌گردد. ولی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد وجود آبراهه فصلی که رواناب فصلی و شیرابه به صورت دائمی در آن جریان داشته است بستر لازم برای نفوذ را مهیا نموده است. این نتایج نشان می‌دهد هرچند سنگ بستر این پروفیل از نوع رُسی و مادستونی است ولی تداوم جریان رواناب فصلی و ادغام آن با شیرابه باعث نفوذپذیر شدن سنگ بستر به شیرابه شده و در نتیجه به صورت جانبی نیز توسعه هاله را شدت بخشید است. بنابراین وجود این آبراهه مشابه با کانال انتقال شیرابه که در پروفیل شماره ۱ برداشت شده است موجب توسعه عمقی و جانبی شیرابه شده است. نکته قابل توجه وسعت کمتر این هاله نسبت به پروفیل شماره ۱ است. دلیل این امر را می‌توان به لایه زیرین یا سنگ بستر متفاوت دو پروفیل، فاصله متفاوت از حوضچه شیرابه (پروفیل ۱ حدود ۲۴۰ متر و پروفیل ۲ حدود ۵۴۰ متر) و همچنین نوع مسیر انتقال



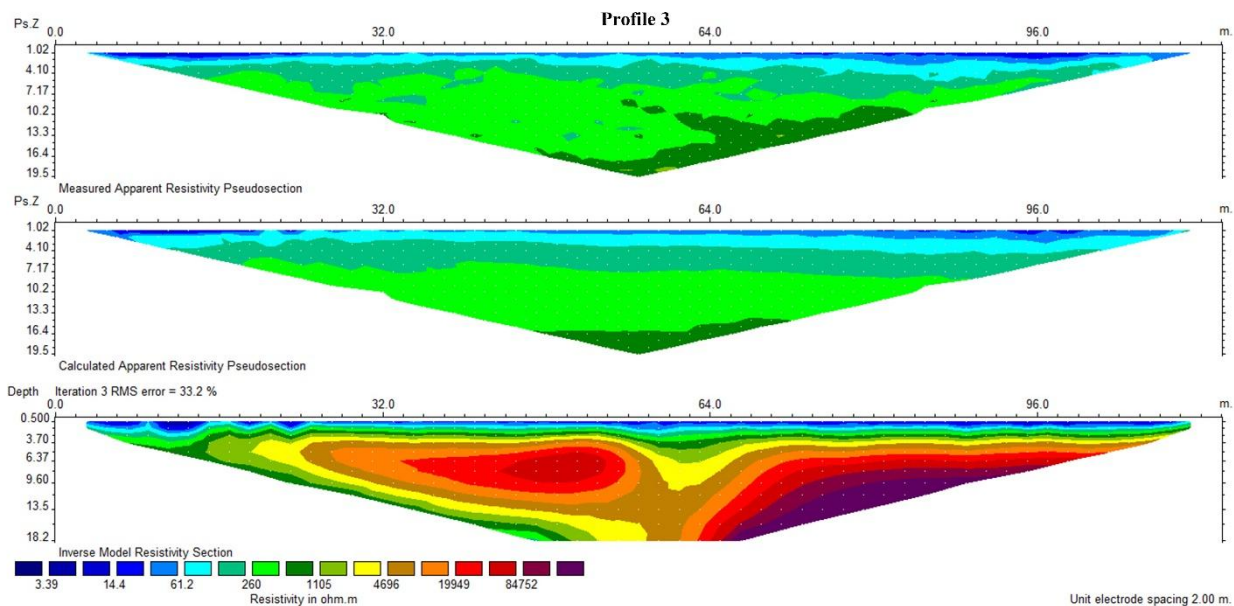
شکل ۷. شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل به دست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۲

**Fig. 7. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 2**

از ۱۱۰۵ اهم‌متر) که از نظر لیتولوژیکی از مادستون و سیلت‌استون بوده و نفوذ شیرابه در آن دیده نمی‌شود (شکل ۸). بنا به این نتایج الگوی توسعه هاله آلودگی ناشی از شیرابه توسط آبراهه فصلی تنها بر بخش ابتدایی پروفیل تأثیرگذار بوده، باقیمانده پروفیل نفوذ عمقی شیرابه را تجربه نکرده و الگوی لیتولوژیکی و نفوذ شیرابه در سرتاسر پروفیل (به استثنای ابتدای پروفیل) همگن می‌باشد. نتایج این پروفیل شباهت بسیاری به پروفیل شماره ۲ (شکل ۷) داشته است. بنابراین با هم‌پوشانی انتهای پروفیل شماره ۲ و ابتدای پروفیل شماره ۳ تا حدودی مشخص می‌شود آبراهه فصلی توانسته است موجب نفوذ بیشتری و توسعه جانبی هاله آلودگی شود.

### تحلیل شبه مقطع هم مقاومت پروفیل شماره ۳

راستای این پروفیل شمالی-جنوبی بوده و در سمت جنوبی آبراهه فصلی قرار دارد به طوری که ابتدای پروفیل نزدیک آبراهه فصلی و امتداد پروفیل ۲ بوده است (شکل ۸). برداشت‌های توموگرافی دوبعدی نشان می‌دهند از نقطه شروع پروفیل تا فاصله ۲۰ متری منطقه‌ای با مقاومت الکتریکی پایین (مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۲۶۰ اهم‌متر) قابل مشاهده است که ناشی از نشت و نفوذ شیرابه حاصل از آبراهه و کانال زهکشی است. در این بخش ناحیه اشباع از شیرابه محدود به عمق ۱/۵ متری است (مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۴/۴ اهم‌متر) در حالی که تا عمق ۶ متری از شدت اشباع شدگی کاسته شده است (مقاومت الکتریکی ۱۴/۴ تا ۲۶۰ اهم‌متر). بر اساس مطالعات انجام شده نواحی با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم‌متر ناحیه اشباع از شیرابه است (Park et al., 2016; Maurya et al., 2017; Moretto et al., 2021; Chu et al., 2017; Ansari et al., 2021) در حالی که در این مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی در مناطق اشباع بین ۳/۳۹ تا ۲۶۰ اهم‌متر نوسان می‌کند که ناشی از خشک بودن این منطقه می‌باشد. از فاصله ۲۰ متری ابتدای پروفیل تا انتهای پروفیل از عمق حدود ۳/۵ متری به بعد لایه‌ای با مقاومت الکتریکی بالا دیده می‌شود (مقاومت الکتریکی بالاتر



شکل ۸. شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل به دست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۳

**Fig. 8. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 3**

### نتیجه‌گیری

جریانات زیرسطحی موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی پایین‌دست می‌شود. مطالعه کنونی نشان داد کانال انتقال شیرابه موجب انتشار گسترده عمقی هاله آلودگی حدود ۳۰ الی ۵۰ متر و جانبی ۱۳ الی ۱۸ متری شده است که لزوم استفاده از کانال‌های بتنی یا لوله‌ای را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد تغییرات مقاومت الکتریکی ناحیه اشباع از شیرابه بر خلاف مطالعات صورت گرفته قبلی که کمتر از ۱۰ اهم‌متر بوده است در این مطالعه بین ۲/۳ الی ۲۶۰ اهم‌متر نوسان می‌کند که دلیل آن را می‌توان به خشک بودن منطقه مورد مطالعه و همچنین غلظت بالای املاح موجود در شیرابه مرتبط نمود که نیازمند مطالعات بیشتر از نظر آنالیزهای شیمیایی است. بررسی‌های متعدد همچنین نشان داده است تغییرات جانبی زیاد بافت خاک در لندفیل که به خصوصیت ذاتی خود ساختار لایه‌ها مرتبط است موجب ایجاد الگوی ناهمگن نفوذ شیرابه در آبخوان و هاله آلودگی ناهمگن نیز می‌گردد (Karimi et al., 2021). این مطالعه نیز نشان داد تغییرات جانبی بافت خاک در راستای پروفیل‌ها موجب الگوی ناهمگن نفوذ شیرابه شده است که وجود کانال انتقال شیرابه این امر را تشدید کرده است. جود آبراهه‌های فصلی یا مسیل‌ها که جهت خروج رواناب ناشی از بارندگی‌ها ضروری است از طریق نفوذ زیرسطحی

لندفیل به‌عنوان سازه‌ای مهم و مهندسی شده در مدیریت پسماند و عوارض ناشی از آن نقش مهمی ایفا می‌کند. ایجاد این سازه در مناطقی که احتمال نفوذ شیرابه به آبخوان وجود دارد از ریسک بالایی برخوردار است. بنابراین تلاش می‌شود در احداث لندفیل این مهم در نظر گرفته شود (Khoshravesht et al., 2021). یکی از عوامل مهم در شدت نفوذ شیرابه در آبخوان خصوصیات ترکیبات شیمیایی و همچنین نوع سازنده‌های زمین‌شناسی تشکیل دهنده آن است (Karimi et al., 2021; Vahabian et al., 2019). وجود ترکیبات شیمیایی متنوع در شیرابه حاصل از لندفیل به دلیل خاصیت تغییر اسیدیته، نفوذپذیری آن را در آبخوان تشدید می‌کند. بنابراین لزوم توجه به این امر در مدیریت لندفیل و شیرابه بسیار اهمیت دارد. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از کانال‌های خاکی و ایزوله نشده انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به حوضچه‌های جدید موجب انتشار عمقی و جانبی هاله آلودگی شده است که از نظر عمقی و جانبی متغیر است که دلیل آن نوع سازنده‌ای آبرفتی ماسه‌ای و رس و همچنین بالا بودن غلظت املاح شیرابه است (Helali et al., 2020; Vahabian et al., 2019). از سوی دیگر، وجود مسیل‌ها یا آبراهه‌های فصلی طبیعی نیز در انتقال شیرابه از طریق

ضرایب هیدرو دینامیکی و در نتیجه سرعت نفوذ شیرابه در آبخوان پیشنهاد می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این مطالعه بر اساس طرح پژوهشی شماره ۲۱۲۱۴۰۰۲۵ انجام شده است که به این وسیله از مدیریت پسماند شهرداری همدان تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- Ansari, S., Norooz, R., Zeynolabedin, A., Foadi, H., & Ghiassi, R. (2021). Experimental investigation of correlations between electrical resistivity, moisture content, and voltage values for leachate-contaminated clayey sand. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104391. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104391
- ANZECC. (1994). *National Hazardous Waste Classification System*, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Canberra.
- Bichet, V., Grisey, E., & Aleya, L. (2016). Spatial characterization of leachate plume using electrical resistivity tomography in a landfill composed of old and new cells (Belfort, France). *Engineering Geology*, 211, 61-73. doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.026
- Casado, I., Mahjoub, H., Lovera, R., Fernández, J., & Casas, A. (2015). Use of electrical tomography methods to determine the extension and main migration routes of uncontrolled landfill leachates in fractured areas. *Science of the Total Environment*, 506, 546-553. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.068
- Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., & Hollands, J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71(6), B231-B239. doi.org/10.1190/1.2360184
- De Donno, G., & Cardarelli, E. (2017). VEMI: a flexible interface for 3D tomographic inversion of time-and frequency-domain electrical data in EIDORS. *Near Surface Geophysics*, 15(1), 43-58. doi.org/10.3997/1873-0604.2016037
- De Donno, G., Melegari, D., Paoletti, V., Piegari, E. (2024). *Electrical and Electromagnetic Prospecting for the Characterization of Municipal Waste Landfills: A Review*. In: Anouzla, A., Souabi, S. (eds) *Technical Landfills and Waste Management*. Springer Water. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-52633-6-1
- Di Maio, R., Fais, S., Ligas, P., Piegari, E., Raga, R., & Cossu, R. (2018). 3D geophysical imaging for site-specific characterization plan of an old landfill. *Waste Management*, 76, 629-642. doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.004
- Dumont, G., Robert, T., Marck, N., & Nguyen, F. (2017). Assessment of multiple geophysical techniques for the characterization of municipal waste deposit

شیرابه موجب آلودگی آبخوان پایین دست خواهد شد. بنابراین مسدود کردن مسیر خروجی لندفیل از طریق آبراهه‌ها می‌تواند پتانسیل آلودگی پایین دست را کاهش دهد که این امر نیازمند مطالعات بیشتر است. این بررسی نشان می‌دهد در موارد مشابه در سایر لندفیل‌ها بحث مدیریت انتقال شیرابه باید با لحاظ نمودن امکان آلودگی عمقی و جانبی مد نظر قرار گیرد به طوری که از انتقال رواناب بارش‌های رگباری از طریق مسیل‌ها یا آبراهه‌های فصلی داخل لندفیل به پایین دست ممانعت به عمل آید. بنابراین جهت جلوگیری از توسعه بیشتر هاله آلودگی استفاده از کانال‌های بتنی یا لوله‌ها جهت انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به جدید پیشنهاد می‌گردد. از طرفی دیگر، برای مدیریت انتقال شیرابه در آبراهه‌های فصلی لازم است در وهله اول از ورود شیرابه به این مسیرها ممانعت به عمل آمده و در وهله دوم اجازه زهکشی شیرابه از مسیرها به پایین دست لندفیل از طریق مسدودسازی آن‌ها داده نشود.

نتایج به دست آمده کارایی روش غیر تخریبی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در ردیابی و مدل‌سازی توسعه هاله آلودگی شیرابه حاصل از کانال‌های مصنوعی و آبراهه‌های طبیعی را نشان داد. با توجه به ساختار آبرفتی و آهکی در منطقه مورد مطالعه استفاده از سونداژ توموگرافی عمیق پیشنهاد می‌شود. همچنین به دلیل اهمیت شیرابه و تأثیر آن بر محیط زیست لازم است پروتوکول‌های استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به عنوان روش‌های نوین در مطالعات امکان‌سنجی محل لندفیل تدوین و از طریق سازمان محافظت از محیط زیست الزامی گردد. در نتیجه این امر، می‌توان هزینه‌های ناشی از ایجاد سازه‌های ایزوله (استفاده از ژئوممبران) در لندفیل‌های در حال احداث یا احداث شده را مدیریت نموده و کاهش داد.

استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در این مطالعه با هدف بررسی تأثیر کانال‌های انتقال طبیعی و مصنوعی بر انتشار هاله آلودگی بود بنابراین تأکید می‌شود در مطالعات آتی برداشت‌های توموگرافی در امتداد شیب منطقه انجام شده و روند تغییرات هاله آلودگی و همچنین ارتباط آن با نوع آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اهمیت ضریب نفوذ شیرابه در آبخوان، استفاده از مطالعات تغییرات زمانی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT Time Lapse) به صورت سه‌بعدی در جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی

- approach. *Geophysics*, 88(3), B151-B165. doi.org/10.1190/geo2022-0133.1
- Juarez, M. B., Mondelli, G., & Giacheti, H. L. (2023). An overview of in situ testing and geophysical methods to investigate municipal solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24779-24789. doi.org/10.1007/s11356-023-25203-5
- Karimi, Y., Helali, J., MahdiAzad, B., Khodakarami, A., Mirzaei, M., & Mohammadi, S. M. (2021). Investigation and Detection of Leachate Pool Plume from Landfill Pond in Hamedan Landfill Using Electrical Resistivity Tomography and Vertical Electrical Sounding. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), 2471-2483. (In Persian). doi.org/10.22059/IJSWR.2021.326050.669003
- Karsli, H., Babacan, A. E., Sayil, N., Çoban, K. H., & Akin, Ö. (2024). An assessment of seismicity and near-surface geophysical characteristics of potential solid waste landfill sites in the Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 14156-14177. doi.org/10.1007/s11356-024-31964-4
- Khoshravesh, M., Norooz Valashedi, R., Helali, J., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Tracing and Simulation of Leachate Penetration Transfer at Downstream of Landfill Using Special Electrical Resistivity Tomography Method. *Irrigation and Water Engineering*, 12(2), 449-463. (In Persian). doi.org/10.22125/IWE.2021.142425
- Loke, M. H. (1997). Rapid 2D resistivity inversion using the least-squares method RES2DINV. *Program Manual*.
- Loke, M. H. (2006). RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Software manual*, 139.
- Lu, Y., Tao, J., Cao, C., Liu, H., Liu, Y., & Ge, Z. (2023). Detection of Landfill leakage based on ERT and OCTEM. *Water*, 15(9), 1778. doi.org/10.3390/w15091778
- Maryanji, Z., toulabi nejad, M. and dolatshahi, Z. (2023). The effect of climate change on snowfall and its prediction in Hamadan County. *Physical Geography Research*, 55(1), 113-129. doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358026.1007765
- Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K., & Matsuura, S. (2000, November). Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks. In *ISRM International Symposium* (pp. ISRM-IS). ISRM.
- Maurya, P. K., Rønne, V. K., Fiandaca, G., Balbarini, N., Auken, E., Bjerg, P. L., & Christiansen, A. V. (2017). Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography with correlation to ionic strength measured in screens. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 1-8. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.019
- Meju, M. (2006). Geoelectrical characterization of covered landfill sites: a process-oriented model and investigative approach. In *Applied hydrogeophysics* (pp. sites. *Journal of Applied Geophysics*, 145, 74-83. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.013
- Frid, V., Doudkinski, D., Liskevich, G., Shafran, E., Averbakh, A., Korostishevsky, N., & Prihodko, L. (2010). Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills. *Environmental Earth Sciences*, 60, 787-798. doi.org/10.1007/s12665-009-0216-0
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2012). Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 575-586. doi.org/10.3997/1873-0604.2012046
- Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, (2017). *Geotechnical Investigation of Hamedan Landfill*, Hamedan Municipality, 55 pp (In Persian)
- Gupta, A., & Paulraj, R. (2017). Leachate composition and toxicity assessment: an integrated approach correlating physicochemical parameters and toxicity of leachates from MSW landfill in Delhi. *Environmental technology*, 38(13-14), 1599-1605. doi.org/10.1080/09593330.2016.1238515
- Hafizi, M. K., Abbassi, B., & Ashtari Talkhestani, A. (2010). Safety assessment of landslides by electrical tomography: A case study from Ardabil, Northwestern Iran. *Journal of Earth and Space Physics*, 36(1), 17-28. (In Persian)
- Helali, J., Karimi, Y. & Mirzaei, M. (2020). *Geophysical (Goelectrical) investigations of Hamedan City Landfill*, Hamedan Municipality, 71 pp (In Persian)
- Helali, J., Momenzadeh, H., Salimi, S., Hosseini, S. A., Lotfi, M., Mohamadi, S. M., Maghami Moghim, G., Pazhoh, F. & Ahmadi, M. (2021). Synoptic-dynamic analysis of precipitation anomalies over Iran in different phases of ENSO. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), 2322. doi.org/10.1007/s12517-021-08644-5
- Helali, J., Nouri, M., Mohammadi Ghaleni, M., Hosseni, S. A., Safarpour, F., Shirdeli, A., Paymard, P. & Kalantari, Z. (2023). Forecasting precipitation based on teleconnections using machine learning approaches across different precipitation regimes. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 495. doi.org/10.1007/s12665-023-11191-9
- Helali, J., Salimi, S., Lotfi, M., Hosseini, S. A., Bayat, A., Ahmadi, M., & Naderizarneh, S. (2020). Investigation of the effect of large-scale atmospheric signals at different time lags on the autumn precipitation of Iran's watersheds. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-24. doi.org/10.1007/s12517-020-05840-7
- Helene, L. P. I., Moreira, C. A., & Bovi, R. C. (2020). Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill using electrical resistivity tomography (ERT). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-10. doi.org/10.1007/s10661-020-8206-5
- Isunza Manrique, I., Caterina, D., Nguyen, F., & Hermans, T. (2023). Quantitative interpretation of geoelectric inverted data with a robust probabilistic

- 319-339). Dordrecht: Springer Netherlands. doi.org/10.1007/978-1-4020-4912-5\_11
- Moazzezi, F., Yavari, G., Mosavi, S. and Bagheri, M. (2020). Assessing the Impact of Climate Change on Agriculture in Hamedan-Bahar Plain with Emphasis on Water Productivity and Food Security. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 34(3), 305-323. doi.org/10.22067/jead.2020.17793.0
- Moretto, R. L., Siqueira Neto, A. C., Elis, V. R., & Miguel, M. G. (2017). Detection of leachate pockets in the experimental cell of municipal solid waste with the aid of geophysics. *Margherita di Pula, Proceedings Sardinia*.
- Park, S., Yi, M. J., Kim, J. H., & Shin, S. W. (2016). Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 1-7. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004
- Sharifi, F., Rahmani Jevinani, M., & Davoodi, H. (2017). Introducing and applying a two-dimensional electrical tomography method in the detection of water movement and evaluating the effects of watershed management measures, case study: Vardij Catchment. *Watershed Engineering and Management*, 9(4), 465-478. (In Persian). doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109286.1263
- Tchobanoglous, G. & Kreith, F., 2002. *Solid Waste Handbook, 2nd ed.* McGraw-Hill, New York
- Ugbor, C. C., Ikwaugwu, I. E., & Ogboke, O. J. (2021). 2D inversion of electrical resistivity investigation of contaminant plume around a dumpsite near Onitsha expressway in southeastern Nigeria. *Scientific Reports*, 11(1), 11854. doi.org/10.1038/s41598-021-91019-3
- United Kingdom Department of the Environment, (1991). *Landfill gas waste management paper No. 27*, London, Crown.
- Vahabian, M., Hassanzadeh, Y., & Marofi, S. (2019). Assessment of landfill leachate in a semi-arid climate and its impact on the groundwater quality case study: Hamedan, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-19. doi.org/10.1007/s10661-019-7215-8.



## Investigating The Water Quality and Hydrogeochemical Characteristics of Springs in The Ilam Dam Watershed

Ehsan Fathi<sup>1</sup> | Mohammadreza Ekhtesasi<sup>2</sup> | Ali Talebi<sup>2</sup> | Jamal Mosaffaie<sup>3</sup>

1. PhD student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University. Yazd. Iran.
- 2- Professor, Rangeland and Watershed Department, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University. Yazd. Iran.
- 3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: [Mr\\_Ekhtesasi@yazd.ac.ir](mailto:Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir)

Received:  
23 October 2024

Accepted:  
27 November 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Schuler,  
Spring,  
Water Quality,  
WQI*

### Extended abstract

#### Introduction

Access to high-quality water resources is essential for human life, economic activities, agriculture, and industry. The increasing demand for water due to population growth, agricultural and industrial development, and climate change has heightened the importance of sustainable water resource management and conservation. Continuous monitoring and evaluation of water resource quality play a pivotal role in identifying changes in water quality, reducing Environmental risks, and ensuring water supply for various uses. This study aims to evaluate the water quality of springs within the Ilam Dam watershed, which serves as one of the vital water resources in the region. For this purpose, the Water Quality Index (WQI), World Health Organization (WHO) standards, and analyses based on Schuler and Piper diagrams were utilized to assess the quality status of the springs and their suitability for drinking, agricultural, and industrial uses.

**Cite this article:** Fathi, E., Ekhtesasi, M.R., Talebi., A. & Mosaffaie, J. (2024). Investigating the water quality and hydrogeochemical characteristics of springs in the Ilam dam watershed, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 79-100. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8619.1089>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The analyzed parameters included sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), chloride (Cl<sup>-</sup>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), pH, total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), potassium (K<sup>+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>), and calcium (Ca<sup>2+</sup>). These parameters were used to calculate the water quality levels of springs in the Ilam watershed using the Water Quality Index (WQI) method. For this purpose, four selected springs within the watershed were chosen to represent the region's hydrogeochemical conditions and water quality (Figure 1). Sampling was conducted monthly over six months, from April 2023 to September 2023. All tests were performed using standard laboratory methods and precise instruments to obtain accurate and reliable data. The collected samples were stored in a refrigerator at 4°C to prevent microbial degradation before water quality analysis. The calculation of the WQI involves several steps. In the first step, each parameter is assigned a weight ranging from 1 to 5 based on its impact on human health, with these weights estimated according to WHO standards. The second step calculates the relative weight using Equation 1 (Chung et al., 2014; Patil et al., 2020; WHO, 2004b, 2011, 2014, 2017).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Where  $W_i$  represents the relative weight,  $w_i$  is the weight of each parameter, and  $n$  is the total number of parameters. In the third step, the quality rating index ( $q_i$ ) is calculated. This index is obtained by dividing the concentration of each parameter in a water sample by its standard value, as described in Equation 2 (WHO, 2004; Patil et al., 2020; WHO, 2017).

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

Where  $C_i$  is the concentration of each parameter in the water sample, and  $S_i$  is the WHO standard value for each parameter in mg/L. Additionally, the SI (sub-index for the  $n$ -th parameter) is calculated for each chemical parameter using Equation 3, and finally, the WQI is determined using Equation 4 (Chung et al., 2014; WHO, 2014, 2017).

$$SI = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$WQI = \sum SI \quad (4)$$

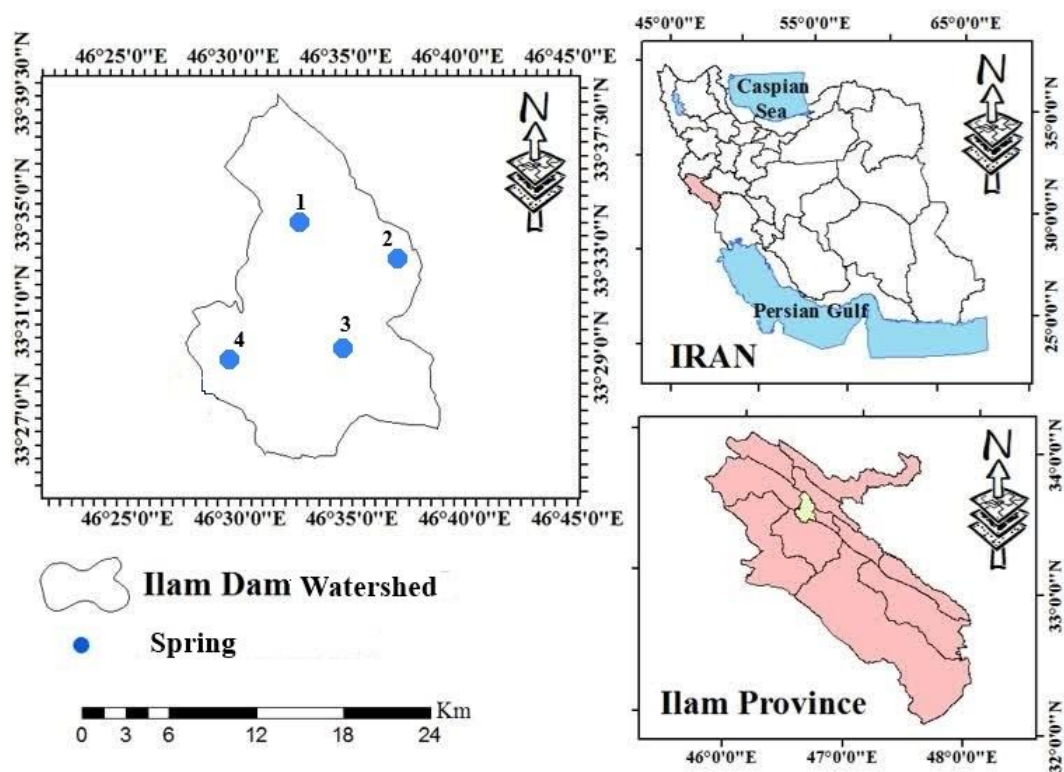


Figure 1 - Map of the locations of sampled stations in the Ilam Dam watershed.

### Results and Discussion

The results of this study indicated that the water quality of the examined springs in the region is highly favorable based on the Water Quality Index (WQI). The WQI values at the sampling stations ranged from 38.07 to 45.45, reflecting excellent water quality in all studied springs throughout the research period.

A comparison of the quality data with World Health Organization (WHO) standards also revealed that all



measured parameters, including sulfate, chloride, bicarbonate, pH, TDS, total hardness, potassium, sodium, magnesium, and calcium, fall within the permissible standard limits. The analysis of the Schuler diagram indicated that the spring water quality is in good condition for drinking purposes. Furthermore, the analysis of the Piper diagram revealed that the water quality falls under the hydrochemical group of calcium bicarbonate, indicating a favorable ionic composition of the water for various uses.

### **Conclusion**

Despite the excellent quality of the region's spring water based on valid quality indices and standards, continuous monitoring and precise management of the area's water resources are essential to maintain the current quality and prevent potential future contamination. In areas where water resources play a key role in meeting drinking, agricultural, and industrial needs, human and natural factors such as agricultural activities, industrial development, environmental degradation, and climate change can pose serious threats to water quality. The findings of this study revealed that analyzing qualitative data using the WQI index and Schuler and Piper diagrams is an effective tool for assessing water quality status. These tools not only enhance the understanding and interpretation of complex data but also enable the comparison of water quality across different regions and the identification of areas vulnerable to pollution. Additionally, these methods can provide a robust scientific foundation for developing protective policies, implementing water quality monitoring programs, and making effective management decisions.

Ultimately, adopting integrated management practices and utilizing these analytical tools can significantly contribute to the long-term protection of water resources and the sustainability of the region's aquatic ecosystems.



## بررسی کیفیت آب و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام

احسان فتحی<sup>۱</sup> | محمدرضا اختصاصی<sup>۲</sup> | علی طالبی<sup>۳</sup> | جمال مصفايي<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲. استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳. دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [Mr\\_Ekhtesasi@yazd.ac.ir](mailto:Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir)

### چکیده

نظارت مستمر و ارزیابی کیفیت منابع آب یک مسئله کلیدی برای حفاظت و مدیریت پایدار آن است. هدف از این مطالعه بررسی کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام واقع در استان ایلام با استفاده از شاخص WQI، استاندارد WHO و بررسی نمودارهای شولر و پایپر می‌باشد. در این مطالعه ده پارامتر کیفی آب شامل سولفات، کلر، بی‌کربنات، pH، TDS، سختی کل، پتاسیم، سدیم، منیزیم و کلسیم در ۴ چشمه انتخابی از فروردین ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۲ با استفاده از روش‌های استاندارد مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که طبق روش WQI، کیفیت آب طی مدت پژوهش در ایستگاه‌های نمونه‌برداری با مقادیر ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ در وضعیت عالی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد که طبق استاندارد WHO، تمامی پارامترها در محدوده استاندارد قرار گرفتند. همچنین کیفیت آب طبق نمودار شولر در وضعیت خوب و طبق نمودار پایپر در گروه بی‌کربنات کلسیمی قرار گرفت. با وجود کیفیت آب عالی، ضروری است که نظارت‌های مستمر و مدیریت دقیق‌تری اعمال شود تا از احتمال وقوع آلودگی‌های آینده جلوگیری شود. تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از شاخص‌های WQI و نمودارهای پایپر و شولر نشان می‌دهد که این ابزارها برای تحلیل و تفسیر مجموعه‌ای از داده‌های پیچیده، ارزیابی کیفیت آب و فهم مکانی کیفیت آب برای مدیریت مؤثر کیفیت آب مفید و سودمند هستند و می‌توانند به‌عنوان مبنای محکمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و اجرای سیاست‌های حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

چشمه،

شولر،

کیفیت آب،

WQI

## مقدمه

طول زمان و مکان مورد استفاده قرار گیرند (Carbajal-Hernández et al., 2013). از این رو، شاخص کیفیت آب (WQI) می‌تواند به‌عنوان یک ابزار محاسباتی مؤثر براساس پارامترهای فیزیکی - شیمیایی و میکروبی برای نمایش کیفیت کلی آب در مکان و زمان معین برای مداخله مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد (Qureshimatva, 2015). مطالعاتی که بر ارزیابی کیفیت آب چشمه‌ها و دیگر منابع آبی تمرکز دارند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. سلگی و همکاران در مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت ملایر از نظر شرب و کشاورزی از شاخص WQI و ویلکوکس استفاده کردند. برای این منظور ۹۳ نمونه آب که شامل ۶۱ چاه، ۹ چشمه، ۱۶ رودخانه و هفت آبگیر مورد نمونه‌برداری قرار دادند. بر اساس نتایج، کیفیت آب چاه در دشت ملایر پایین‌تر از آب چشمه، رودخانه و آبگیر بود و با توجه به بالاتر بودن نیترات در آب چاه نسبت به سایر منابع، برای مصارف شرب توصیه نمی‌شود. همچنین آب چاه طبق شاخص ویلکوکس کیفیت پایین‌تری نسبت به سایر منابع برای کشاورزی داشت (Solgi et al., 2022). Kibetu و همکاران یک تحلیل ژئوشیمیایی از منابع آب زیرزمینی در منطقه نیمه‌خشک ماکونی در کنیا انجام دادند. آن‌ها از شاخص کیفیت برای ارزیابی عناصر اصلی / ثانویه و فلزات سنگین استفاده کردند و نقشه شاخص کیفیت آب را تهیه کردند. با بررسی ۶۱ نمونه آب زیرزمینی جمع‌آوری شده از بخش‌های مختلف منطقه، نشان دادند که غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی بیشتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی بود و شاخص کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر مناطق بالاتر از ۱۸۰ بود که آب زیرزمینی را در بیشتر این مناطق غیر قابل شرب کرد (Kibetu et al., 2017). Pantha و همکاران با استفاده از شاخص WQI به ارزیابی کیفیت آب سه چشمه به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب در منطقه تانهاوا در کشور نپال پرداختند. طبق نتایج، پارامترهای کیفی آب مانند کدورت، pH، آمونیاک، نیترات، سختی کل و قلیابیت تقریباً زیر محدوده استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO)، استاندارد ملی کیفیت آب آشامیدنی نپال (NDWQS) و اداره استانداردهای هند (BIS) قرار داشتند. با این حال، هدایت

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب برای مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند (He and Wu, 2019; de Paul Obade and Moore, 2018); این آب‌ها به‌عنوان بخش مهمی از آب‌های تجدیدشونده جهان محسوب شده که حدود ۶۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر قابل دسترس را به خود اختصاص داده‌اند (Saadatmand et al., 2021). چشمه‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب زیرزمینی، منبع اصلی آب برای استفاده مسکونی (دامداری و کشاورزی) و آشامیدنی (Bhusal and Gyawali, 2015; Shrestha and Gurung et al., 2019; Basnet, 2018) به‌ویژه در منطقه کوهستانی (Tripathi et al., 2015) هستند. چشمه‌ها مناطقی هستند که رها شدن آب زیرزمینی از یک سفره آب باعث ایجاد جریان قابل مشاهده در سطح زمین می‌شود (Kresic and Stevanovic, 2009). در دهه‌های اخیر، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌دلیل رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای کشاورزی آبی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است (Li et al., 2016; O'Dwyer et al., 2018). بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی و روش‌های نادرست دفع زباله منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت آب شده است (Sadat-Noori et al., 2014; Zahedi et al., 2017). آلودگی آب سبب حدود ۸۰ درصد از بیماری‌ها در جهان و یک سوم مرگ و می‌رها در کشورهای در حال توسعه می‌شود (WHO, 2004a). بنابراین آگاهی از کیفیت منابع آب یکی از نیازمندی‌های مهم در مدیریت، برنامه‌ریزی و توسعه منابع آب و حفاظت و کنترل آنها می‌باشد (Kumar et al., 2019). یکی از مؤثرترین روش‌های بررسی کیفیت آب، استفاده از شاخص‌های مناسب است. استفاده از شاخص‌ها در برنامه‌های پایش برای ارزیابی سلامت اکوسیستم بسیار مفید بوده و می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای ارزیابی موفق و مناسب در استراتژی‌های مدیریتی برای بهبود کیفیت آب استفاده شود (Dwivedi and Pathak, 2007). شاخص‌های کیفی، روش‌هایی هستند که مقادیر ویژگی‌های کیفی آب (پارامترهای اندازه‌گیری شده) را به یک عدد تبدیل می‌نمایند تا برای مدیریت و تحلیل کیفیت آب و همچنین پایش تغییرات کیفی آب در

استفاده از آزمون من-کندال نیز نشان داد که پارامترهای EC، TDS، TH، Na، Mg، Ca، SO<sub>4</sub> و Cl در اکثر چاه‌ها به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، خشک‌سالی، حفر چاه‌های بی‌رویه و تغذیه ناکافی آبخوان روند افزایشی دارند. همچنین طبق نمودار شولر و نمودار ویلکوکس کیفیت آب آبخوان به دلیل شوری بالا و محتوای زیاد سدیم، برای مصارف شرب و آبیاری نامناسب است (Sadeghi-Lari et al., 2022). بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و طبقه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی به دلیل نقش حیاتی این منابع در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. بهبود کیفیت منابع آب زیرزمینی آلوده در مدت‌زمان کوتاهی امکان‌پذیر نخواهد بود زیرا مستلزم شناسایی منابع آلودگی و نظارت بر رفتار آن‌ها است. در این مفهوم، پیش‌گیری بهترین روش برای غلبه و مقابله با آلودگی منابع آب زیرزمینی است (Kazakis and Voudouris, 2015). با توجه به اینکه منابع آب زیرزمینی، منابع آب‌محور و ارزشمندی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند لذا شایسته مطالعات بیشتر هستند. داشتن تصویری روشن از تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند منجر به درک بهتر شرایط منابع آب و تسهیل فرایندهای مدیریت این منابع در حال حاضر و آینده شود. بنابراین، نظارت منظم بر کیفیت منابع آب و یافتن راه‌حل‌های عملی برای برآورد و بهبود کیفیت آب امری ضروری است. این مطالعه با توجه به اهمیت کیفیت آب، به ارزیابی وضعیت کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام می‌پردازد. برای این منظور، از شاخص کیفیت آب (WQI) استفاده شده است که یک ابزار مهم برای تعیین مناسب بودن آب برای مصرف شرب و دیگر مصارف است. همچنین، نمودارهای گرافیکی شولر و پایپر ترسیم شده‌اند تا ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های مورد بررسی به‌طور دقیق‌تری تحلیل و طبقه‌بندی شوند. این روش‌ها به شناسایی کیفیت و نوع آب‌ها کمک می‌کنند و اطلاعات مفیدی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های مرتبط فراهم می‌آورند.

الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS) و کلی‌فرم مدفوع (E. coli) طبق استانداردهای WHO و NDWQS برای آب آشامیدنی بیش از حد مجاز بود. طبق شاخص WQI هم کیفیت آب چشمه‌ها در ایستگاه‌های یک، دو و سه به ترتیب در وضعیت نامناسب، عالی و خوب برای شرب قرار گرفتند (Pantha et al., 2022). آتشی یزدی و همکاران برای ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت بهاباد یزد از شاخص کیفیت آب (WQI) و نمودار شولر استفاده کردند. برای این منظور، ۱۷ نمونه آب جمع‌آوری و ده پارامتر را مورد اندازه‌گیری قرار دادند. نتایج نشان داد که طبق شاخص WQI، ۲۳/۵۳ درصد نمونه‌ها هیچ محدودیتی برای نوشیدن نداشتند، ۳۵/۲۹ درصد کیفیت پایینی داشتند، ۱۷/۶۵ درصد کیفیت نامرغوب‌تر و ۲۳/۵۳ درصد غیر قابل مصرف بودند. نمودار شولر نیز نشان داد که ۴۴ درصد از نمونه‌ها در سطح عالی و قابل شرب و ۵۶ درصد در سطح نامناسب و غیرقابل نوشیدن بودند (Atashi yazdi et al., 2022).

Bahrami و همکاران در مطالعه‌ای کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت کازرون را از نظر مصارف شرب و آبیاری مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، در مجموع ۴۰۸ نمونه آب زیرزمینی از ۶۸ چاه برداشت و یازده پارامتر فیزیکی‌وشیمیایی آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بر اساس استانداردهای WHO آب تمامی سفره‌های آب زیرزمینی در این دشت، به‌جز منطقه شمالی برای مصارف شرب در وضعیت ضعیف و بسیار ضعیف قرار دارد. همچنین، طبق نمودار شوری آزمایشگاه ایالات متحده کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری مشکوک است. آنها پیشنهاد دادند که الگوی کشت در این دشت باید به سمت محصولات مقاوم به شوری تغییر کند (Bahrami et al., 2022).

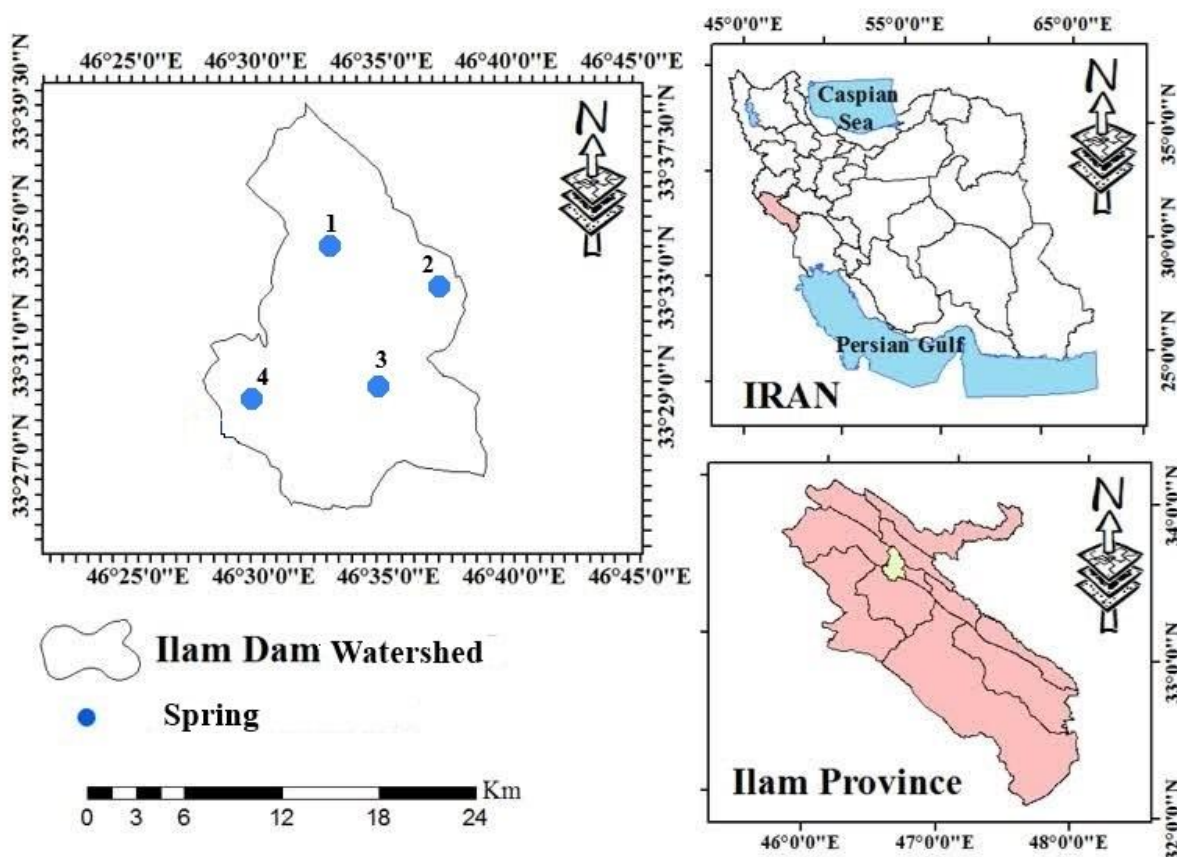
Sadeghi-Lari و همکاران در مطالعه‌ای تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت کهورستان، واقع در شمال غربی خلیج فارس را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که طبق بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی تولید شده توسط GIS نشان‌دهنده یک روند کاهشی در سطح آبخوان و افت ۵/۲۴ متری سطح آب زیرزمینی در مدت ۲۰ سال بود. نمودار پایپر نشان داد که رخساره هیدروژئوشیمیایی غالب در منطقه دشت، از نوع NaCl است. تحلیل تغییرات زمانی با

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد ایلام با مساحت ۲۵۵۳۰ هکتار در استان ایلام قرار گرفته و از نظر موقعیت بین  $46^{\circ} 16' 44''$  تا  $46^{\circ} 18' 24''$  طول شرقی و  $33^{\circ} 19' 4''$  تا  $33^{\circ} 12' 12''$  عرض شمالی قرار دارد. بر این اساس حداکثر ارتفاع این حوضه ۲۶۰۴ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۰۵۲ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاع متوسط این حوضه از سطح دریا ۱۸۲۸ متر و شیب متوسط حوضه نیز ۲۰ درصد می‌باشد. متوسط بارش سالانه در این حوضه در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ حدود ۵۶۰ میلی‌متر و میانگین دمای حداکثر و حداقل نیز به ترتیب  $23/25$  و  $11/06$  درجه سانتیگراد است. حوضه مورد مطالعه در زون زاگرس چین خورده قرار گرفته است. واحدهای سنگی و آبرفتی موجود در حوضه مربوط به ادوار مختلف زمین شناسی می‌باشند. سن واحدهای سنگی مختلف منطقه درجات عمومی از سمت جنوب غرب به سمت شمال شرق و

شمال کاهش می‌یابد. لیتولوژی غالب حوضه نیز شامل آهک دولومیتی و مارنی، آهک رسی - مارن و آهک رسی و شیل-مارن، گچ، آهک رسی و انیدریت و رسوبات آبرفتی کواترنر می‌باشد. به منظور دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در بررسی وضعیت و کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام نمونه‌برداری از فروردین‌ماه ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۲ در ۴ ایستگاه و با سنجش پارامترهای مورد نیاز طبق دستورالعمل‌های موجود در استاندارد متد صورت گرفت (APHA, 2005). برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب چشمه‌ها، نمونه‌ها در بطری‌های پلی‌اتیلنی شسته‌شده، جمع‌آوری و برای جلوگیری از تجزیه میکروبی در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پارامتر pH در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری و سایر پارامترها جهت سنجش به آزمایشگاه منتقل شدند. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در حوضه آبخیز سد ایلام

Figure 1 - Map of the locations of sampled stations in the Ilam Dam watershed

۴ محاسبه می‌شود ( Chung et al., 2014; WHO, 2014, )  
(2017).

$$SI = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$\sum SI = WQI \quad (4)$$

مقدار WQI به‌دست آمده برای تعیین طبقه‌بندی کیفیت آب طبق جدول ۱ می‌باشد (WHO, 2017). جدول ۲ نیز وزن، وزن نسبی، واحدها و مقادیر استاندارد پارامترهای شیمیایی، که توسط WHO ارائه شده را نشان می‌دهد. طبق جدول ۲ حداکثر وزن (۵) مربوط به دو پارامتر  $SO_4^{2-}$  و TDS به دلیل خطر بالقوه سلامت ناشی از غلظت آنها است.

در ادامه نمودارهای گرافیکی شولر و پایپر برای آسان‌نمودن تفسیر و نمایش نتایج بررسی کیفیت آب چشمه‌های مورد مطالعه ترسیم شدند. دیاگرام شولر یک ابزار است که برای طبقه‌بندی کیفیت آب، به‌ویژه آب شرب، استفاده می‌شود. این دیاگرام بر اساس مقادیر مختلف عناصر شیمیایی در آب، از جمله کاتیون‌ها و آنیون‌ها، طراحی شده است. در این نمودار مقادیر یون‌ها بر روی ستون قائم با تقسیمات لگاریتمی و نتایج تجزیه شیمیایی با خطوط شکسته نشان داده شده و برای هر یک از مقادیر کاتیون‌ها، آنیون‌ها و درجه سختی آب (TH) محور جداگانه‌ای در نظر گرفته شده که از اتصال مقادیر اندازه‌گیری شده روی این محورها می‌توان به درجه آب برای شرب پی برد (Lotfinasabasl et al., 2020). جدول ۳ پارامترهای استفاده شده جهت ترسیم دیاگرام شولر به‌همراه طبقه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد. از نمودار پایپر نیز برای دسته‌بندی نمونه‌ها و تعیین تیپ شیمیایی آب استفاده می‌شود. طبق این نمودار مقدار کل آنیون‌ها و کاتیون‌ها ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود و میزان درصد یون‌ها روی مثلث‌های کناری علامت‌گذاری شده، نقاط متناظر روی مثلث‌های کناری بر روی لوزی میانی تصویر می‌شوند. در نهایت قضاوت در مورد تیپ کیفی آب به‌وسیله نمودار پایپر با توجه به منطقه تمرکز نقاط انجام می‌شود. در این طبقه‌بندی، آب‌ها بر اساس کاتیون‌ها به سه رخساره منیزیک، کلسیک و سدیک و نیز بر پایه آنیون‌ها به سه تیپ کربناته، سولفات و کلروره تقسیم‌بندی می‌شوند (Piper, 1994).

## ارزیابی کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام

### شاخص کیفیت آب<sup>۱</sup> (WQI)

شاخص WQI به‌طور گسترده برای ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف آشامیدنی به‌کار گرفته شد. شاخص کیفیت آب زیرزمینی بر اساس استانداردهای آب آشامیدنی به‌دست می‌آید (Chitsazan et al., 2019). این شاخص شامل ده پارامتر سولفات ( $SO_4^{2-}$ )، کلر ( $Cl^-$ )، بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ )، pH، کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، پتاسیم ( $K^+$ )، سدیم ( $Na^+$ )، منیزیم ( $Mg^{2+}$ ) و کلسیم ( $Ca^{2+}$ ) است؛ که برای محاسبه سطح کیفی آب در چشمه‌های حوزه آبخیز ایلام با استفاده از روش WHO مورد استفاده قرار گرفتند. پس از تعیین پارامترهای کیفی مدنظر، محاسبه شاخص WQI شامل چندین مرحله است. در مرحله اول به هر پارامتر بر مبنای تأثیر در سلامتی انسان، وزنی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود، این وزن‌ها بر مبنای استاندارد WHO برآورد می‌گردند. در مرحله دوم، وزن نسبی با استفاده از معادله ۱ به‌دست می‌آید ( Chung et al., 2014; Patil et al., 2020; WHO, 2004b, 2011, 2014, 2017).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

که در آن  $W_i$ : وزن نسبی،  $w_i$ : وزن هر پارامتر و  $n$  تعداد پارامترها است. در مرحله سوم، شاخص نرخ کیفیت ( $q_i$ ) محاسبه می‌شود. این شاخص با تقسیم غلظت هر پارامتر در هر نمونه آب بر مقدار استاندارد آن پارامتر طبق معادله ۲ به دست می‌آید ( WHO, 2004; Patil et al., 2020; ) (WHO, 2017).

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $C_i$ : غلظت هر پارامتر در نمونه آب و  $S_i$ : مقدار استاندارد WHO هر پارامتر براساس mg/L است. علاوه بر این، مقدار SI (زیرشاخص پارامتر n ام) برای هر پارامتر شیمیایی با استفاده از معادله ۳ و در نهایت WQI از معادله

جدول ۱. طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس شاخص WQI

Table 1. Classification of drinking water quality based on the WQI index.

مقدار WQI WQI value	طبقه‌بندی Classification
<50	عالی
50 - 100	خوب
100 - 200	ضعیف
200 - 300	بسیار ضعیف
300<	غیر قابل مصرف

جدول ۲. وزن نرمال و نسبی پارامترهای شیمیایی (WHO, 2011).

Table 2. Normalized and relative weights of chemical parameters (WHO, 2011).

وزن نسبی پارامتر (Wi) Relative parameter weight (Wi)	وزن پارامتر (w) Parameter weight (w)	استاندارد WHO (2011) WHO Standard (2011)	واحد Unit	پارامتر Parameter
0.166	5	250	(mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0.1	3	250	(mg/L)	Cl <sup>-</sup>
0.1	3	120	(mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
0.133	4	6.5 - 8.5	-	pH
0.166	5	1500	(mg/L)	TDS
0.1	3	500	(mg/L)	TH
0.066	2	12	(mg/L)	K <sup>+</sup>
0.066	2	50	(mg/L)	Na <sup>+</sup>
0.034	1	150	(mg/L)	Mg <sup>2+</sup>
0.066	2	200	(mg/L)	Ca <sup>2+</sup>
1	30	-	-	کل

جدول ۳. طبقه‌بندی استانداردهای آب آشامیدنی بر اساس نمودار شولر (Choramin et al., 2015)

Table 3. Classification of drinking water standards based on the Schoeller diagram (Choramin et al., 2015).

TH (mg/L)	TDS (mg/L)	Cl (mg/L)	Na (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	وضعیت Status	کلاس Class
<250	<500	<75	<115	<145	0-70	0-100	خوب	1
250-500	1000-500	175-350	115-230	145-280	70-120	100-200	قابل قبول	2
500-1000	2000-1000	350-700	230-460	280-580	120-200	200-300	متوسط	3
1000-2000	4000-2000	700-1400	460-920	1150-580	200-400	300-600	نامناسب	4
2000-4000	8000-4000	1400-2800	920-1840	2240-1150	400-800	1000-6000	کاملاً نامطلوب	5
4000<	8000<	2800<	1840<	2240<	800<	1000<	غیر قابل شرب	6

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های آماری چند متغیره است که در مواجهه با حجم گسترده‌ای از داده‌ها، با کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه، به درک و تفسیر بهتر اطلاعات کمک می‌کند (Camdevyren et al., 2005). برای اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی، از نرم‌افزار آماری SPSS

تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)<sup>۱</sup><sup>۱</sup> Principal Component Analysis

شهریور (۵۱/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در خرداد (۲۱/۲۶ میلی‌گرم بر لیتر) بود. ایستگاه ۳ بیشترین و ایستگاه ۲ کمترین مقدار میانگین سولفات را داشت. بیشترین مقدار سولفات در ایستگاه ۱ و ماه شهریور (۶۲/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۲ و خرداد (۷/۲ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شد.

### کلر (Cl<sup>-</sup>)

در شکل ۳، مقایسه میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلر در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کلر در ماه شهریور (۱۵/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۰/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. از نظر ایستگاه‌ها، بیشترین مقدار میانگین کلر در ایستگاه ۳ (۱۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۸/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار کلر در ایستگاه ۳ و ماه فروردین (۲۱/۸ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه مرداد (۵/۴ میلی‌گرم بر لیتر) مشاهده گردید.

### بی‌کربنات (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

در شکل ۴، مقایسه میانگین تغییرات بی‌کربنات در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بی‌کربنات در شهریور (۱۹۶/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۶۳/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۱۸۸/۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۱۷۷/۹۸ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار در ایستگاه ۲ و ماه مرداد (۲۰۵/۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه فروردین (۱۳۹/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر) بود.

### pH

در شکل شماره ۵، مقایسه میانگین تغییرات زمانی و مکانی pH در چهار ایستگاه و طی شش ماه مورد مطالعه آورده شده است. طبق نتایج، در ماه‌های مورد مطالعه، بیشترین و کمترین مقدار میانگین pH به ترتیب مربوط به ماه‌های اردیبهشت (۸/۰۶) و تیر (۷/۰۷) و از نظر ایستگاه نیز بیشترین و کمترین مقدار میانگین به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سه (۷/۶) و چهار (۷/۴۸) بوده است. همچنین بیشترین مقدار pH در ایستگاه سه (۸/۳) و در ماه اردیبهشت

نسخه ۲۷ استفاده شد. در گام نخست، داده‌ها برای ورود به PCA در محیط نرم‌افزار SPSS بر اساس فرمول مربوط استاندارد شدند. در گام بعد، تناسب جامعه آماری برای انجام PCA به‌وسیله آزمون KMO<sup>1</sup> سنجیده شد و به‌منظور بهبود روابط بین ورودی‌ها و عامل‌های اولیه و نیز تفکیک بهتر آنها جهت عضویت در عامل‌ها، از دوران Varimax استفاده شد (Noori et al., 2005; Ouyang, 2005).

### نتایج و بحث

جدول ۴، آمار توصیفی عناصر مورد استفاده برای تحلیل WQI را نشان می‌دهد. وضعیت پارامترهای مورد مطالعه به‌منظور بررسی وضعیت منابع آب شرب براساس تطبیق با دی‌گرام شولر در جدول ۵ آورده شده است. نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در محدوده بررسی شده به‌طور کلی مناسب است. کاتیون‌ها شامل پتاسیم (K<sup>+</sup>)، سدیم (Na<sup>+</sup>)، منیزیم (Mg<sup>2+</sup>) و کلسیم (Ca<sup>2+</sup>) مقادیر میانگین قابل قبولی دارند و نوسانات آن‌ها (بر اساس انحراف معیار) نشان‌دهنده پایداری نسبی است. سختی کل (TH) با میانگین ۲۵۵/۲۰ mg/L در محدوده سختی متوسط قرار دارد، در حالی که TDS با میانگین ۲۴۰/۸۳ mg/L کیفیت مناسب آب را برای استفاده‌های مختلف نشان می‌دهد. pH با میانگین ۷/۵۴ در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار دارد که برای شرب و کشاورزی مطلوب است. پارامترهای سولفات (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)، کلر (Cl<sup>-</sup>)، بی‌کربنات (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) نیز در محدوده استاندارد قرار داشته، اگرچه تنوع نسبی در سولفات می‌تواند به عوامل زمین‌شناسی و منابع آلاینده مرتبط باشد. شاخص کیفیت آب (WQI) با میانگین ۴۱/۹۵ نشان‌دهنده وضعیت کلی مطلوب منابع آب زیرزمینی است. با این حال، با توجه به تنوع برخی پارامترها و احتمال تأثیرگذاری عوامل محیطی، پایش مستمر کیفیت آب و مدیریت منابع برای حفظ پایداری آن ضروری به نظر می‌رسد.

### تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای مورد مطالعه

#### سولفات (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

شکل ۲ نشان‌دهنده تغییرات زمانی و مکانی سولفات در چهار ایستگاه طی شش ماه است. بیشترین مقدار سولفات در ماه

<sup>1</sup> . Kaiser-Meyer-Olkin



و کمترین مقدار pH نیز در ایستگاه دو (۶/۸) و ماه شهریور به دست آمد.

### کل مواد جامد محلول (TDS)

در شکل شماره ۶، تغییرات TDS در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین میانگین TDS در شهریور (۲۲۴/۲۵) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین آن در تیر (۲۶۳/۶۶) میلی‌گرم بر لیتر بالاترین و ایستگاه دو با ۲۶۳/۶۶ میلی‌گرم بر لیتر پایین‌ترین مقدار را دارند. بیشترین مقدار TDS (۲۷۶) میلی‌گرم بر لیتر) در اردیبهشت و کمترین مقدار (۱۸۸) میلی‌گرم بر لیتر) در شهریور ثبت شده است.

### سختی کل (TH)

در شکل ۷، مقایسه میانگین تغییرات سختی کل (TH) در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار TH در فروردین (۲۸۰) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در مرداد (۲۱۸/۵) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۲۹۲) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۲۳۳/۱۶) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار TH در ایستگاه ۳ و ماه اردیبهشت (۳۲۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه مرداد (۱۹۳) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

در شکل ۸، مقایسه میانگین تغییرات پتاسیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار پتاسیم در خرداد (۰/۷۵) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در مرداد (۰/۴۳) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۱ (۰/۶۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۰/۳۴) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار پتاسیم در ایستگاه ۱ و ماه خرداد (۰/۹۶) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه تیر (۰/۱۴) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

### سدیم (Na<sup>+</sup>)

در شکل ۹، مقایسه میانگین تغییرات سدیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سدیم در

شهریور (۴/۵۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در فروردین (۲/۲۱) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۴ (۳/۶) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۲/۹۵) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار سدیم در ایستگاه ۱ و ماه شهریور (۴/۸۳) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه فروردین (۱/۹) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

### منیزیم (Mg<sup>2+</sup>)

در شکل ۱۰، مقایسه میانگین تغییرات منیزیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار منیزیم در شهریور (۲۱/۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۳/۴۱) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۱۶/۷۲) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۱۵/۴۳) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار منیزیم در ایستگاه ۳ و ماه شهریور (۲۵/۷۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ و ماه اردیبهشت (۱۱/۲۵) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

### کلسیم (Ca<sup>2+</sup>)

در شکل ۱۱، مقایسه میانگین تغییرات کلسیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کلسیم در تیر (۵۳/۵۱) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۴۶/۱۷) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۴ (۵۲/۱۷) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۴۷/۴۹) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار کلسیم در ایستگاه ۴ و ماه شهریور (۵۶/۱۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ و ماه اردیبهشت (۴۱/۸۸) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

در شکل شماره ۱۲، میانگین WQI در چهار ایستگاه و طی شش ماه مورد مطالعه آورده شده است. با توجه به شکل ۱۲، مقدار شاخص WQI در طی شش ماه مورد مطالعه و در چهار ایستگاه انتخابی در محدوده ۰/۷ تا ۴۵/۴۵ بود که نشان داد که کیفیت آب طبق این شاخص در وضعیت عالی قرار دارد.

جدول ۴. مقدار WQI و مقدار پارامترهای آماری مورد استفاده برای محاسبه WQI در چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام

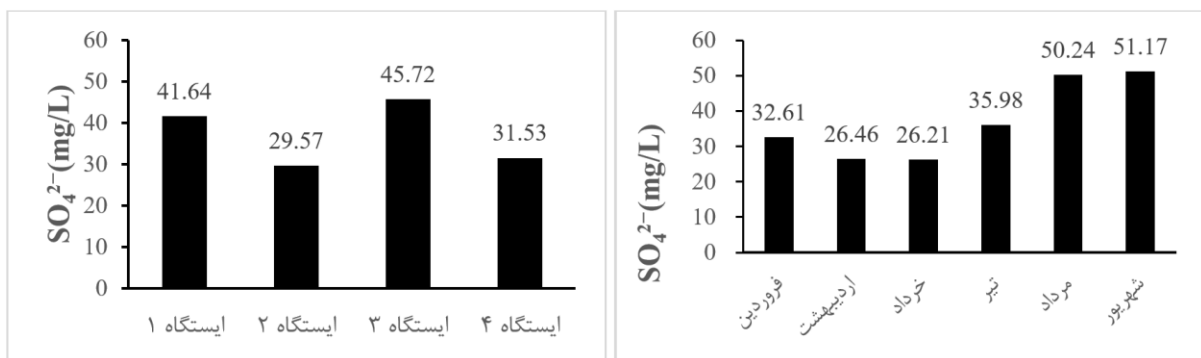
**Table 4. WQI values and the statistical parameter values used for the calculation of WQI in the springs of the Ilam Dam watershed.**

انحراف معیار (mg/L) Standard Deviation (mg/L)	میانگین (mg/L) Mean (mg/L)	حداکثر (mg/L) Maximum (mg/L)	حداقل (mg/L) Minimum (mg/L)	پارامتر Parameter
3.66	49.57	56.18	41.88	Ca <sup>2+</sup>
3.47	16.64	25.78	11.25	Mg <sup>2+</sup>
0.88	3.22	4.83	1.9	Na <sup>+</sup>
0.21	0.56	0.96	0.14	K <sup>+</sup>
32.63	255.20	328	193	TH
25.05	240.83	276	188	TDS
0.45	7.54	8.3	6.8	pH
18.83	182.35	205.7	139.24	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
3.79	12.31	21.8	5.4	Cl <sup>-</sup>
13.88	37.11	62.43	7.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
2.10	41.95	45.45	38.07	WQI

جدول ۵. وضعیت پارامترهای مورد بررسی در منابع آب شرب براساس تطبیق با دیاگرام شولر

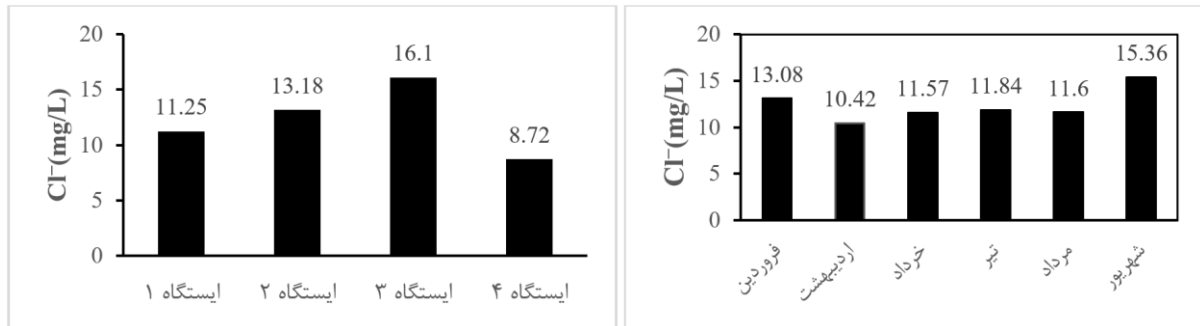
**Table 5. Status of the parameters studied in drinking water sources based on comparison with the Schuler diagram.**

ایستگاه Station				پارامتر Parameter
4	3	2	1	
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Ca <sup>2+</sup>
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Mg <sup>2+</sup>
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Na <sup>+</sup>
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Cl <sup>-</sup>
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	TDS
خوب %50	خوب %50	خوب %100 قابل قبول	خوب %83.34	TH
%50 قابل قبول	%50 قابل قبول		%16.66 قابل قبول	



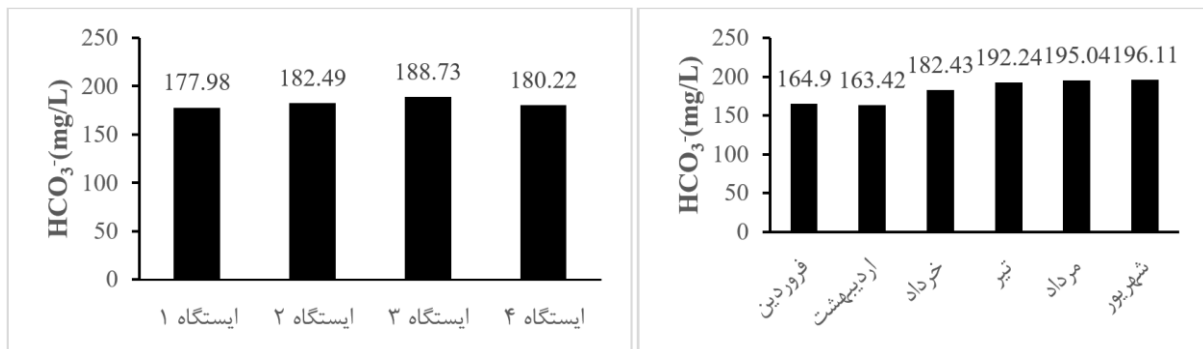
شکل ۲. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سولفات در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

**Figure 2. Average temporal and spatial variations of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in the stations and months studied**



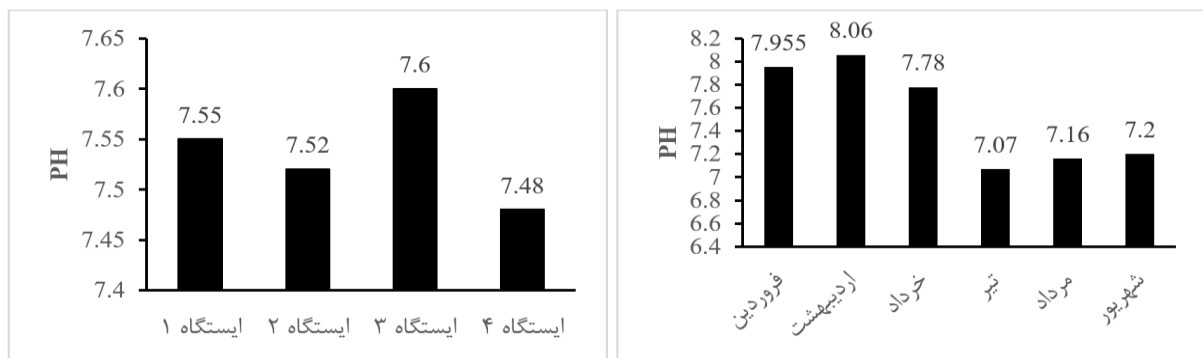
شکل ۳. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلر در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 3. Average temporal and spatial variations of Cl<sup>-</sup> in the stations and months studied.



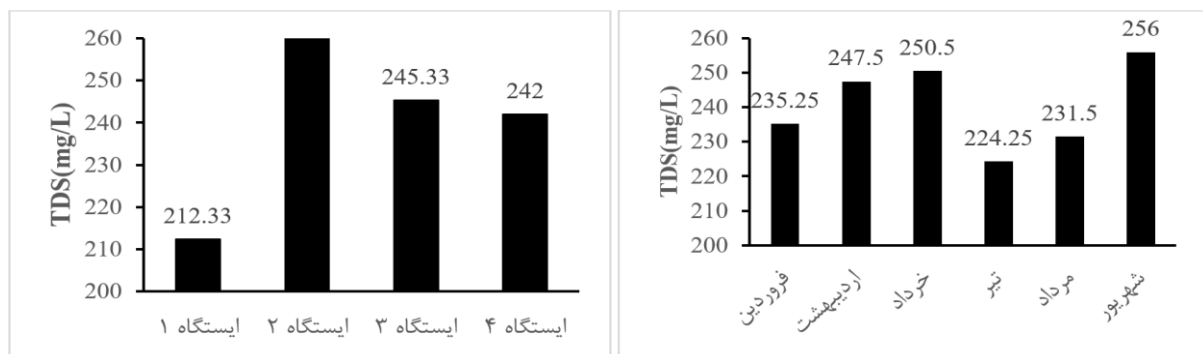
شکل ۴. میانگین تغییرات زمانی و مکانی بی‌کربنات در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 4. Average temporal and spatial variations of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the stations and months studied.



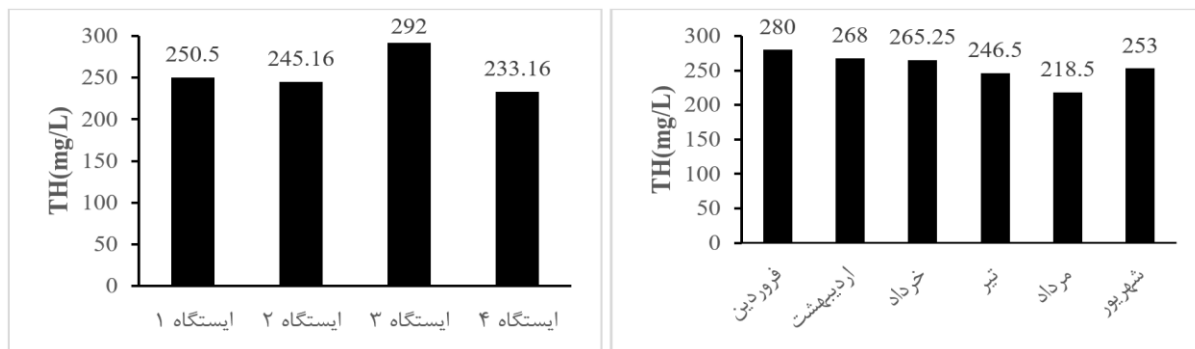
شکل ۵. میانگین تغییرات زمانی و مکانی pH در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 5. Average temporal and spatial variations of pH in the stations and months studied.



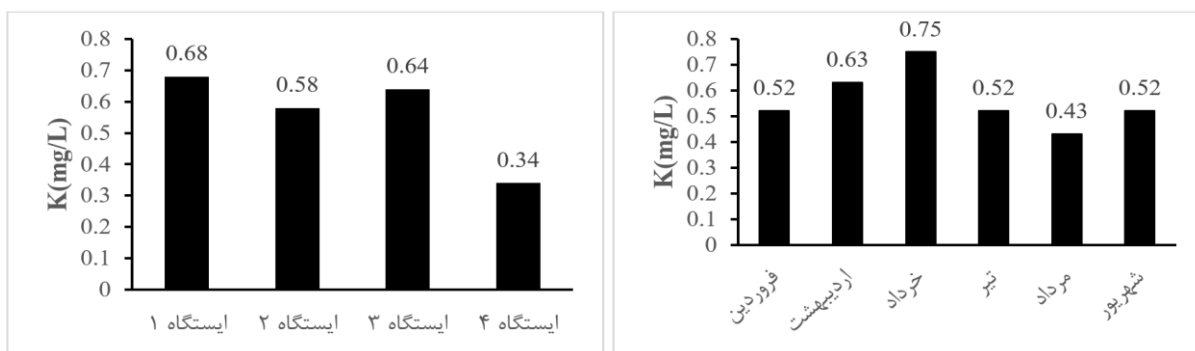
شکل ۶. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کل مواد جامد محلول در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 6. Average temporal and spatial variations of TDS in the stations and months studied.



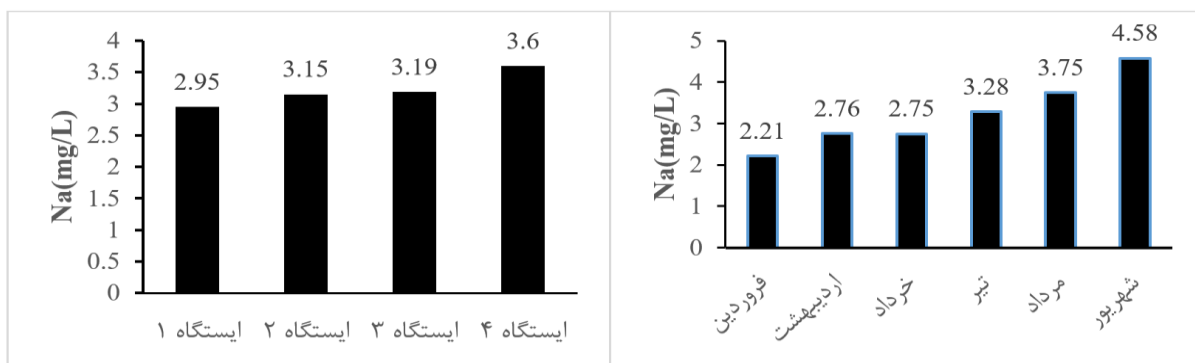
شکل ۷. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سختی کل در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 7. Average temporal and spatial variations of TH in the stations and months studied.



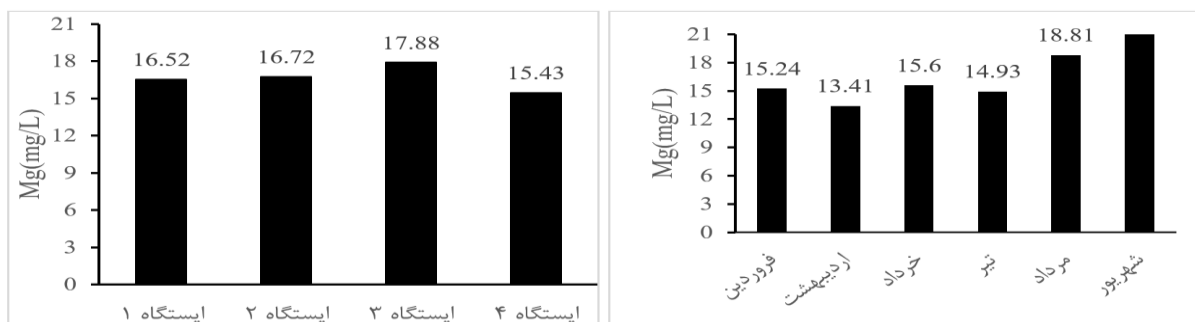
شکل ۸. میانگین تغییرات زمانی و مکانی پتاسیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 8. Average temporal and spatial variations of K<sup>+</sup> in the stations and months studied.



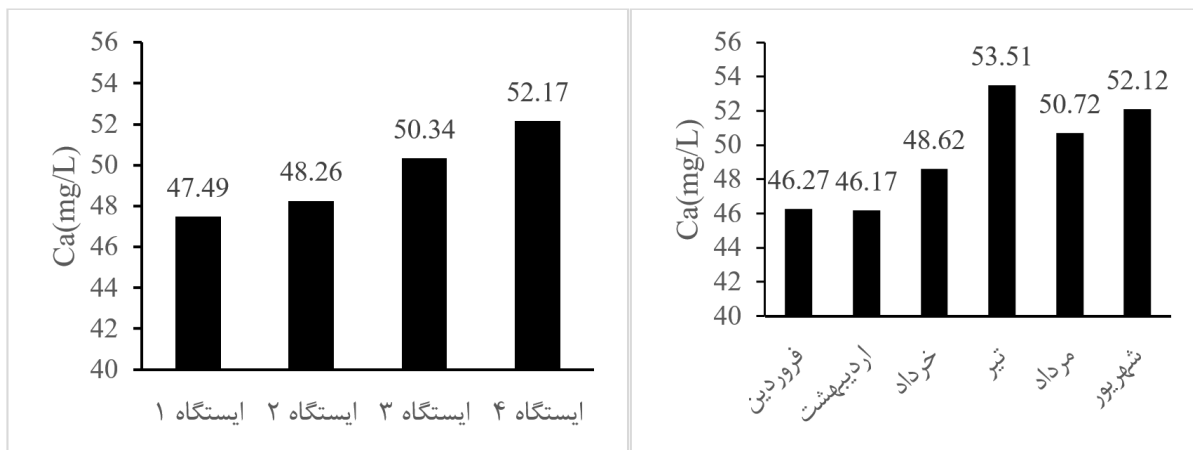
شکل ۹. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سدیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 9. Average temporal and spatial variations of Na<sup>+</sup> in the stations and months studied.

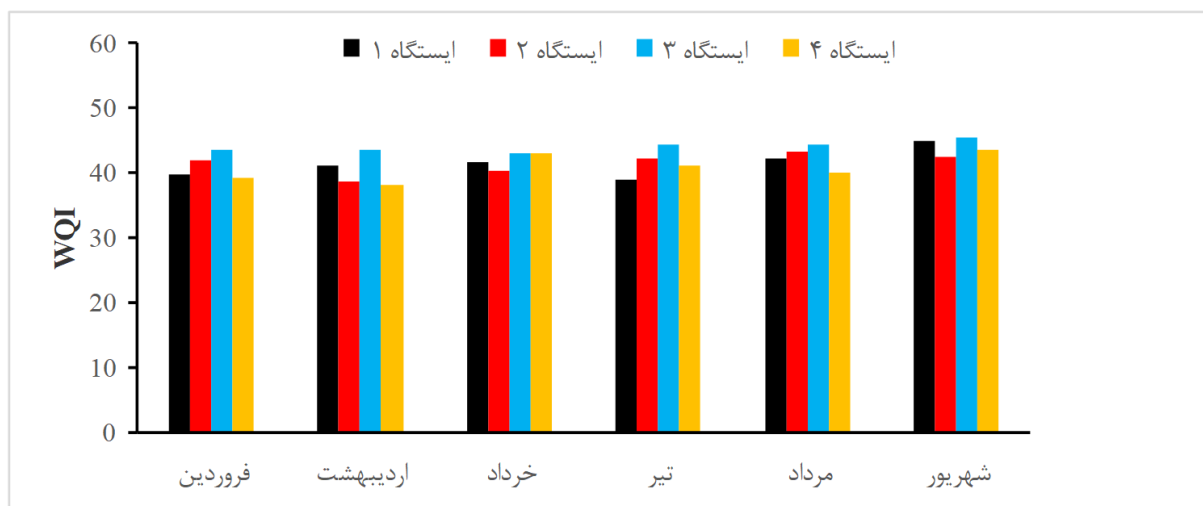


شکل ۱۰. میانگین تغییرات زمانی و مکانی منیزیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 10. Average temporal and spatial variations of Mg<sup>2+</sup> in the stations and months studied.



شکل ۱۱. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلسیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 11. Average temporal and spatial variations of Ca<sup>2+</sup> in the stations and months studied.

شکل ۱۲. میانگین تغییرات WQI در دو فصل بهار و تابستان و در ماه‌های مورد مطالعه

Figure 12. Average variations of WQI in the spring and summer seasons during the months studied.

مقادیر مشاهده شده در شکل‌های ۲ تا ۱۲ نشان‌دهنده کیفیت مناسب آب زیرزمینی در بیشتر پارامترها است، اما تنوع در برخی یون‌ها می‌تواند به تفاوت در ترکیب زمین‌شناسی و منابع آلاینده مرتبط باشد. سختی کل و TDS در محدوده‌ای قرار دارند که نشان‌دهنده نیاز به پایش مستمر برای جلوگیری از افزایش احتمالی است. در نهایت، شاخص کیفیت آب (WQI) وضعیت کلی رضایت‌بخش آب زیرزمینی را تأیید می‌کند، اما مدیریت پایدار منابع آبی برای جلوگیری از تخریب کیفیت ضروری است.

نتایج دیاگرام شولر و پایپر برای چشمه‌های مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. نتایج تحلیل نمودارهای شولر و پایپر می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت آب و مناسب بودن آن برای مصارف مختلف

ارائه دهد. طبق نمودار شولر که برای ارزیابی کیفیت آب از نظر قابلیت شرب استفاده می‌شود، چشمه‌های مورد بررسی در وضعیت خوبی قرار دارند. این نتیجه بیانگر این است که پارامترهای شیمیایی آب، مانند غلظت‌های یون‌های مختلف، در محدوده قابل قبول برای مصرف انسانی قرار دارند. همچنین، نمودار پایپر که نوع غالب یون‌های موجود در آب را تعیین می‌کند، می‌تواند به درک بهتر از خواص شیمیایی آب کمک کند و در کنار نمودار شولر، تصویر جامع‌تری از وضعیت کیفی آب ارائه دهد. طبق نمودار پایپر تیپ آب‌های مورد بررسی در گروه بی‌کربناته کلسیمی قرار دارند. این نوع آب‌ها عموماً در مناطقی با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی کوهستانی و تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی قرار دارند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت مناسب آب از نظر شرب و کشاورزی

خوب حفظ کرده‌اند، اما در برخی موارد، باید به کنترل و مدیریت سختی کل توجه بیشتری شود تا از ورود به دسته‌های پایین‌تر کیفیت جلوگیری شود. این وضعیت به‌وضوح نشان می‌دهد که منابع آب این منطقه از نظر کیفیت شیمیایی برای مصارف شرب ایده‌آل هستند. برای تعدیل سختی کل (TH) در آب چشمه‌ها می‌توان اقداماتی مانند مدیریت کاربری اراضی در حوزه آبخیز شامل کاهش فعالیت‌های انسانی مخرب مانند استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، تخلیه فاضلاب‌ها، و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی است که می‌تواند از ورود املاح به منابع آب جلوگیری کند. همچنین، اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از رواناب‌های سطحی یا آب باران که سختی کمتری دارند، می‌تواند به کاهش غلظت املاح کمک کند. این اقدامات در کنار آموزش و اطلاع‌رسانی به ساکنان محلی درباره حفاظت از منابع آب، نقش مؤثری در کنترل سختی کل و سایر پارامترها خواهد داشت. در ادامه مقایسه‌ای از مقدار میانگین شاخص کیفیت آب در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با چشمه‌های مختلف دنیا در جدول ۶ آورده شده است. مقایسه شاخص کیفیت آب (WQI) چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با سایر چشمه‌ها در نقاط مختلف ایران و جهان نشان می‌دهد که آب این چشمه‌ها از کیفیت مناسبی برخوردار است. بر اساس جدول ۶، شاخص کیفیت آب در حوزه آبخیز سد ایلام بین ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ متغیر است که نسبت به مناطقی مانند آبخوان روئین اسفراین و مناطق شرقی دشت گرگان، در محدوده مناسبی قرار دارد. برای مثال، شاخص WQI در آبخوان روئین اسفراین بین ۱۶/۶۷ تا ۷۵/۱ و در مناطق شرقی دشت گرگان بین ۵۰ تا ۷۵ متغیر است. این نشان‌دهنده کیفیت نسبی بهتر آب چشمه‌های حوزه سد ایلام است. همچنین، در مقایسه با برخی مناطق هند که شاخص WQI آنها بسیار بالا بوده (تا ۶۶۰/۵۶ در ایالت کارناتاکا)، آب چشمه‌های ایلام کیفیت بسیار مطلوب‌تری دارد. این نتایج نشان می‌دهد که چشمه‌های این منطقه با وجود نیاز به پایش و مدیریت، هنوز کیفیت آب مناسبی برای استفاده‌های مختلف دارند و می‌توانند در تأمین آب آشامیدنی محلی نقش مهمی ایفا کنند. جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام، میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی در هر ایستگاه و

باشد. در نهایت، آب‌های بی‌کربناته کلسیمی، به دلیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و منشأ زیرزمینی، معمولاً دارای کیفیت خوبی هستند.

حوزه آبخیز سد ایلام یکی از مهم‌ترین حوزه‌ها از نظر تولید آب می‌باشد. در مطالعه حاضر وضعیت کیفیت آب چهار چشمه انتخابی در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش WHO، استاندارد WHO و ترسیم نمودارهای پایپر و شولر مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی جامع کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و تطبیق آن با استانداردهای جهانی و دی‌اگرام شولر نشان می‌دهد که آب این چشمه‌ها به‌طور کلی از کیفیت بسیار مطلوبی برخوردار است. شاخص WQI که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها برای تعیین قابلیت مصرف آب شرب شناخته می‌شود، در محدوده ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ قرار دارد. این مقادیر به‌وضوح نشان می‌دهند که آب چشمه‌های مورد بررسی در دسته عالی طبقه‌بندی می‌شود و برای مصرف انسانی کاملاً مناسب است. در تحلیل پارامترهای شیمیایی، سولفات ( $\text{SO}_4^{2-}$ )، کلر ( $\text{Cl}^-$ )، بی‌کربنات ( $\text{HCO}_3^-$ )، pH، کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، پتاسیم ( $\text{K}^+$ )، سدیم ( $\text{Na}^+$ )، منیزیم ( $\text{Mg}^{2+}$ ) و کلسیم ( $\text{Ca}^{2+}$ ) بررسی شدند. این پارامترها نه‌تنها به‌طور انفرادی در محدوده‌های مجاز قرار دارند بلکه بر اساس استانداردهای WHO نیز تأیید می‌شوند. با توجه به اینکه بیشتر این پارامترها دارای وزن نسبی بالا در محاسبات شاخص WQI هستند، کیفیت عالی آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام به‌خوبی تأیید می‌شود. این بدان معناست که این پارامترها در محدوده استانداردهای مطلوب برای آب آشامیدنی هستند و به کیفیت مطلوب آب کمک می‌کنند. مطالعات مشابه در مناطق دیگر نشان داده‌اند که ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های WQI و تطبیق آن با استانداردهای جهانی، می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی باشد.

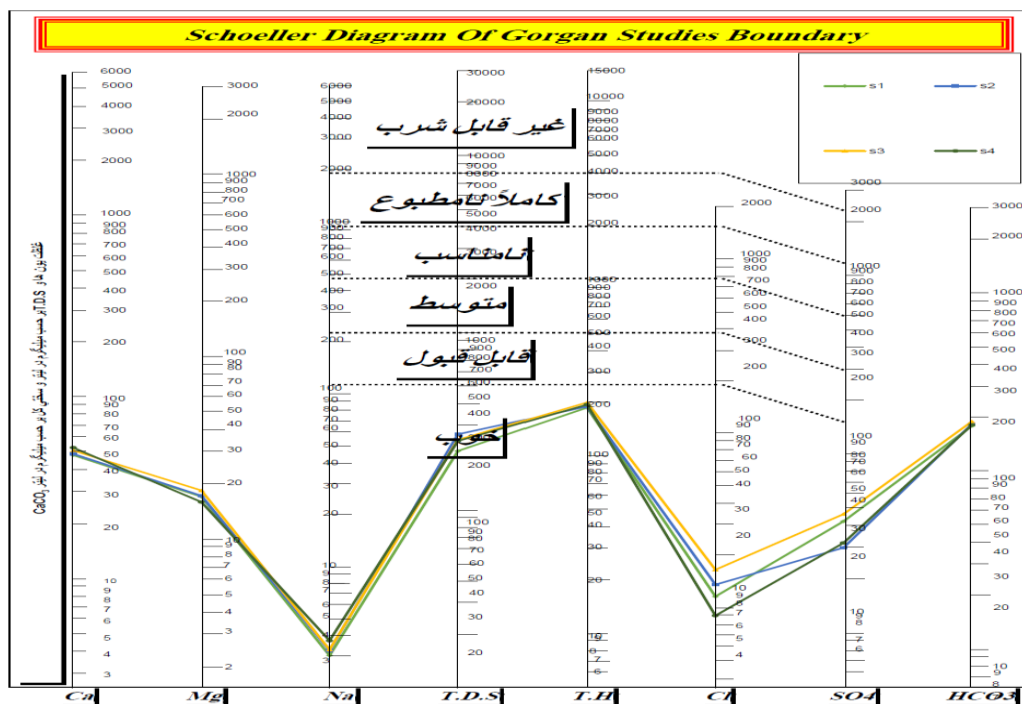
نتایج حاصل از تطبیق پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با دی‌اگرام شولر نیز نشان می‌دهد که تمامی پارامترها به‌جز سختی کل (TH) در تمام ایستگاه‌ها در محدوده خوب قرار دارند. تنها پارامتر سختی کل (TH) در برخی ایستگاه‌ها به صورت ترکیبی از دو کلاس خوب و قابل قبول طبقه‌بندی شده است. این نشان می‌دهد که هرچند بیشتر ایستگاه‌ها کیفیت سختی کل آب را در سطح

شناسایی این مؤلفه‌ها می‌تواند در مدیریت منابع آب و کنترل عوامل آلاینده مؤثر باشد. در نهایت، سهم بالای مؤلفه اول از کل واریانس نشان‌دهنده اهمیت پارامترهای شیمیایی اصلی در کیفیت آب این منطقه است.

مدیریت پایدار و کارآمد منابع آب برای تضمین دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و کافی از اهمیت بالایی برخوردار است. این هدف از طریق اجرای سیاست‌ها و اقداماتی که هدررفت آب را کاهش داده و کیفیت منابع آبی را ارتقا می‌بخشند، قابل دستیابی است. از جمله این اقدامات می‌توان به بهبود سیستم‌های آبیاری، ترویج فناوری‌های کم‌مصرف، کاهش آلودگی منابع آبی، و حفاظت از حوضه‌های آبخیز و سفره‌های زیرزمینی اشاره کرد. آب به‌عنوان یکی از نیازهای اساسی بشر و عنصر حیاتی در تمامی فعالیت‌های انسانی، نقش کلیدی در توسعه پایدار دارد. بنابراین، مدیریت هوشمندانه و پایدار منابع آب نه‌تنها برای تأمین نیازهای کنونی بلکه برای تضمین دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و کافی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

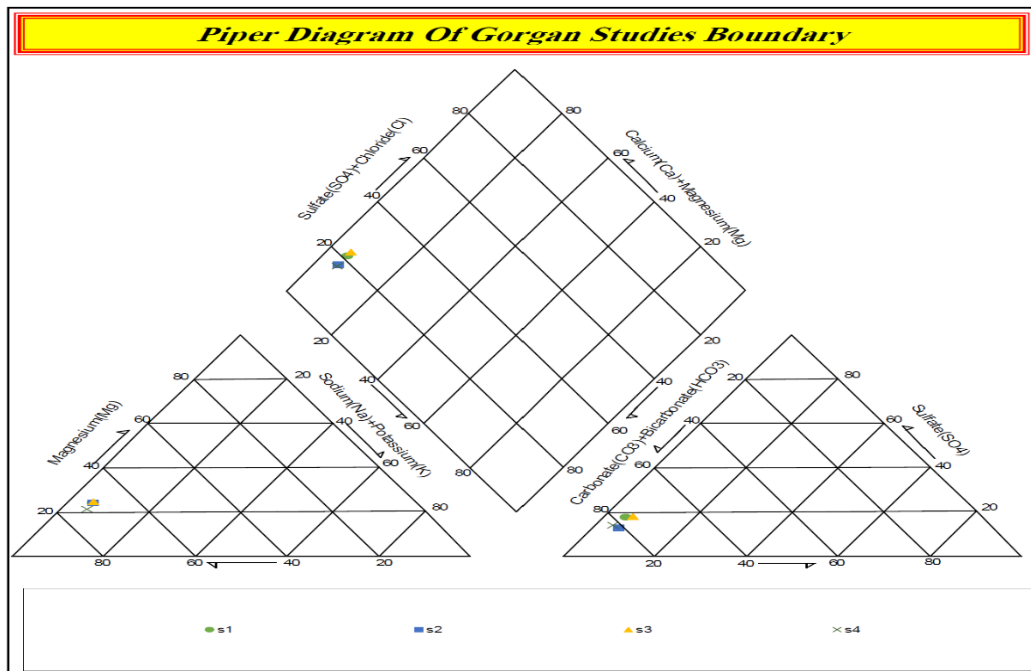
در ۶ ماه اندازه‌گیری شده در جدول ۷ ارائه‌شده، سپس با استفاده PCA مهم‌ترین پارامترها تعیین شدند (جدول ۸).

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تبیین واریانس داده‌های کیفیت آب چشمه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۸). مؤلفه اول به‌عنوان مهم‌ترین عامل معرفی شده است که بیش از نیمی از کل واریانس داده‌ها (۵۲/۰۷۳ درصد) را توجیه می‌کند. این نشان‌دهنده اهمیت بالای پارامترهای شیمیایی مرتبط با مؤلفه اول، شامل سولفات، کلر، بی‌کربنات، pH، سختی کل و منیزیم در تعیین کیفیت آب است. مؤلفه دوم بر ترکیبات یونی شامل پتاسیم، سدیم و کلسیم تمرکز دارد که به نظر می‌رسد نقش مهمی در تغییرات شیمیایی آب ایفا می‌کنند. مؤلفه سوم نیز بر غلظت مواد جامد محلول (TDS) تأکید دارد که شاخصی کلیدی برای ارزیابی کیفیت آب به‌شمار می‌رود. این تفکیک به درک عوامل مختلف تأثیرگذار بر کیفیت آب کمک می‌کند و به پژوهشگران امکان می‌دهد که تغییرات کیفیت آب را با توجه به نقش هر مؤلفه و پارامترهای مربوطه تحلیل کنند. همچنین،



شکل ۱۳. نمودار شولر آب چشمه‌های مورد مطالعه

Figure 13. Schuler diagram of the studied springs' water.



شکل ۱۴. نمودار پایپر آب چشمه‌های مورد مطالعه

Figure 14. Schuler diagram of the water quality of the studied springs.

جدول ۶. مقایسه شاخص کیفیت آب در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام در طی مدت پژوهش با چشمه‌های مختلف

Table 6. Comparison of the Water Quality Index (WQI) in the springs of the Ilam Dam watershed during the study period with springs from other areas.

منطقه مورد مطالعه Study area	WQI	منبع Reference
حوضه آبخیز سد ایلام	38.07 – 45.45	مطالعه حاضر
آبخوان روئین اسفراین	16.67 – 75.1	Motamedi Rad et al., 2021
مناطق شرقی دشت گرگان	50 - 75	Gharemahmoodlu & Shirzadnia, 2023
Srikakulam India	10.84 – 191.33	Sundar Kumar et al., 2010
Karnataka State, India	89.21 – 660.56	Ramakrishnaiah et al., 2009

جدول ۷. میانگین پارامترهای کیفی آب چشمه‌های مورد مطالعه در حوزه آبخیز سد ایلام

Table 7. Average Quality Parameters of the Studied Springs' Water in the Watershed

ایستگاه Station				پارامتر Parameter
4	3	2	1	
31.53	45.72	29.57	41.64	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
8.72	16.1	13.18	11.25	Cl <sup>-</sup>
180.22	188.73	182.49	177.98	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
7.48	7.6	7.52	7.55	PH
242	245.33	263.66	212.33	TDS
233.16	292	245.16	250.5	TH
0.34	0.64	.58	0.68	K <sup>+</sup>
3.6	3.19	3.15	2.95	Na <sup>+</sup>
15.43	17.88	16.72	16.2	Mg <sup>2+</sup>
52.17	50.34	48.26	47.49	Ca <sup>2+</sup>

جدول ۸. نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی برای پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های مورد مطالعه



**Table 8. The results of principal component analysis for measured parameters in studied river springs**

مؤلفه			پارامتر
Component			Parameter
3	2	1	
-0.672	-0.153	0.723	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0.222	-0.329	0.918	Cl <sup>-</sup>
0.312	0.221	0.924	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
-0.272	-0.360	0.893	PH
0.959	0.213	0.189	TDS
-0.148	-0.081	0.986	TH
-0.223	-0.832	0.508	K <sup>+</sup>
0.225	0.941	-0.253	Na <sup>+</sup>
0.053	-0.372	0.927	Mg <sup>2+</sup>
0.046	0.998	0.051	Ca <sup>2+</sup>
17.191	30.736	52.073	واریانس
			Variance

آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام برای تأمین آب شرب سالم تأکید می‌کند و ضرورت حفظ و بهبود کیفیت این منابع را با رعایت اصول مدیریتی و نظارتی مستمر تأیید می‌نماید.

#### سیاس‌گزاری

بدین‌وسیله مراتب قدردانی از شرکت آب و فاضلاب استان ایلام جهت همکاری در انجام این پژوهش اعلام می‌گردد.

#### منابع

- Atashi yazdi, S. S., Motamedvaziri, B., Hosseini, S. Z., & Ahmadi, H. (2022). Assessment of vulnerability and hydrogeochemical specifications of Bahabad Yazd Plain aquifer. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 1-21.
- Bahrami, M., Khaksar, E., & Bahrami, A. (2022). Groundwater quality evaluation for potable and irrigation uses in the semi-arid region of southern Iran. *Irrigation and Drainage*, 71(3), 749-765.
- Bhusal, J., & Gyawali, P. (2015). Water quality of springs in Badigad Catchment, Western Nepal. *Bulletin of the Department of Geology*, 18, 67-74.
- Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Villa-Vargas, L. A., Carrasco-Ochoa, J. A., & Martínez-Trinidad, J. F. (2013). Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. *Ecological indicators*, 29, 148-158.
- Çamdevýren, H., Demýr, N., Kanik, A., & Keskýn, S. (2005). Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 181(4), 581-589.
- Chaudhry, A. K., Kumar, K., & Alam, M. A. (2019). Spatial distribution of physicochemical parameters for groundwater quality evaluation in a part of Satluj River Basin, India. *Water Supply*, 19(5), 1480-1490.

#### نتیجه‌گیری

حفاظت و استفاده بهینه از منابع آب از اصول بنیادین توسعه پایدار در هر کشور به‌شمار می‌رود. این مطالعه به بررسی کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام پرداخته است و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که شاخص کیفیت آب (WQI) در تمامی نمونه‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۶ ماهه (فروردین تا شهریور ۱۴۰۲) در محدوده عالی قرار دارد. این وضعیت نشان‌دهنده کیفیت بالای آب برای مصارف شرب است و مقادیر شاخص WQI در طی ماه‌های مختلف، بیانگر ثبات کیفیت آب در این منطقه است. تحلیل پارامترهای مورد مطالعه نیز تأیید کرد که تمامی این پارامترها در محدوده‌های استاندارد و مناسب قرار دارند. با توجه به تطابق این داده‌ها با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) و دی‌اگرام‌های شولر و پایپر، می‌توان نتیجه گرفت که آب چشمه‌های این منطقه از نظر شیمیایی بسیار مطلوب و برای مصرف شرب کاملاً مناسب است. باین‌حال، ضروری است که توجه داشته باشیم که استانداردهای کیفیت آب ممکن است در طول زمان به دلیل تغییرات کاربری زمین، منابع آلودگی و تغییرات آب و هوایی تغییر کنند؛ بنابراین، نظارت و ارزیابی مستمر منابع آب برای اطمینان از رعایت مستمر استانداردهای لازم و ایمن‌بودن آنها برای استفاده ضروری است. درحالی‌که منابع آب در منطقه مورد مطالعه در حال حاضر از کیفیت مطلوبی برخوردارند، حفظ این استانداردها از طریق نظارت دوره‌ای، ارزیابی مستمر، و مدیریت صحیح آب بسیار حائز اهمیت است. به‌طور خلاصه، نتایج این مطالعه بر پتانسیل بالای منابع

- a case study in and around Hua County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-17.
- Lotfinasabasl, S., Dargahian, F., & Khosroshahi, M. (2020). Water quality assessment of Gopalriver and its variations in the Maroon basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(3), 835-852. (In Persian)
- Motamedi Rad, M., Goli Mokhtari, L., Bahrami, S. & zanganeh asadi M A. (2021). Assessment of the quality of water resources for drinking, agriculture, and industry in the karstic aquifer of Roein Esfarayen basin of North Khorasan province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 21(62), 62-73. (In Persian)
- Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., & Farokhnia, A. (2010). Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistics. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 5856-5862.
- O'Dwyer, J., Hynds, P. D., Byrne, K. A., Ryan, M. P., & Adley, C. C. (2018). Development of a hierarchical model for predicting microbiological contamination of private groundwater supplies in a geologically heterogeneous region. *Environmental Pollution*, 237, 329-338.
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635.
- Pantha, S., Timilsina, S., Pantha, S., Manjan, S. K., & Maharjan, M. (2022). Water quality index of springs in mid-hill of Nepal. *Environmental Challenges*, 9, 100658.
- Patil, V. B., Pinto, S. M., Govindaraju, T., Hebbalu, V. S., Bhat, V., & Kannanur, L. N. (2020). Multivariate statistics and water quality index (WQI) approach for geochemical assessment of groundwater quality—a case study of Kanavi Halla Sub-Basin, Belagavi, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 2667-2684.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- Qureshimatva Umerfaruq, M., Maurya Rupesh, R., Gamit Sandip, B., & Solanki Hitesh, A. (2015). Seasonal Variation of Phytoplankton in Bibi Lake, Ahmedabad, Gujarat, India. *Preservation*, 4(10).
- Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna, G. (2009). Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, 6(2), 523-530.
- Saadatmand, A., Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, A. (2021). Investigation, modeling, and analysis of qualitative parameters of groundwater resources in Kurdistan's Kamyaran plain. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 357-367. (In Persian)
- Chitsazan, M., Aghazadeh, N., Mirzaee, Y., & Golestan, Y. (2019). Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in the suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, development and sustainability*, 21, 331-351.
- Choramini, M., Safaei, A., Khajavi, S., Hamid, H., & Abozari, S. (2015). Analyzing and studying chemical water quality parameters and their changes on the basis of Schuler, Wilcox, and Piper diagrams (project: Bahamanshir River). *WALIA journal*, 31(S4), 22-27.
- Chung, S. Y., Venkatramanan, S., Kim, T. H., Kim, D. S., & Ramkumar, T. (2015). Influence of hydrogeochemical processes and assessment of suitability for groundwater uses in Busan City, Korea. *Environment, Development and Sustainability*, 17, 423-441.
- de Paul Obade, V., & Moore, R. (2018). Synthesizing water quality indicators from standardized geospatial information to remedy water security challenges: A review. *Environment International*, 119, 220-231.
- Dwivedi, S. L., & Pathak, V. (2007). A preliminary assignment of water quality index to Mandakini River, Chitrakoot. *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(11), 1036.
- Gharemahmoodlu, M. (2023). Assessment and comparison of the spring and well water resources quality for Drinking and Irrigation Purposes (Case study: East of Gorgan Plain. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), 47-66. (In Persian)
- Gurung, A., Adhikari, S., Chauhan, R., Thakuri, S., Nakarmi, S., Rijal, D., & Dongol, B. S. (2019). Assessment of spring water quality in the rural watersheds of western Nepal. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(11), 39-53.
- He, S., & Wu, J. (2019). Hydrogeochemical characteristics, groundwater quality, and health risks from hexavalent chromium and nitrate in groundwater of Huanhe Formation in Wuqi county, northwest China. *Exposure and Health*, 11, 125-137.
- Kazakis, N., & Voudouris, K. S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25.
- Kibetu, P.M., Thumbi, G.M., Okwadha, G.O., & Nyadawa, M.O. (2017). Groundwater quality assessment and water quality indexing: Case study of Makueni County, Eastern Kenya. In Jkuat Annual Scientific Conference Proceedings, 130-143.
- Kresic, N., & Stevanovic, Z. (Eds.). (2009). *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability*. Butterworth-heinemann.
- Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2016). Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors:

- Sadat-Noori, S. M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. M. (2014). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3827-3843.
- Sadeghi-Lari, A., Bahrami, M., & Dastandaz, T. (2024). Temporal and spatial variations of groundwater quantity and quality for drinking and irrigation purposes in the arid and hot weather of Southern Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103582.
- Shrestha, A. K., & Basnet, N. (2018). An evaluation of physicochemical analysis and water quality index of Ratuwa River of Damak, Jhapa, Nepal. *Int J Recent Res Rev*, 11(2), 1-9.
- Solgi, E., Bigmohammadi, F., Rozbhani, Z., & Ghiasvand, S. (2022). Water quality assessment of surface and groundwater sources used for drinking and agriculture. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 97-111. (In Persian)
- Sundar Kumar K., Kumar PS., Babu M. J. R., & RAO C.H. (2010). Assessment and mapping of groundwater quality using geographical information systems. *Assessment*, 2(11), pp.6035-6046.
- Tripathi, D. K., Pandey, G., & Jain, C. K. (2015). Physicochemical analysis of selected springs water samples of Dehradun City, Uttarakhand, India. *Int J for Innov Res Sci Tech*, 2(5), 99-103.
- WHO. (2004a). Guidelines For Drinking-Water Quality. World Health Organization.
- WHO. (2004b). Guidelines for drinking water quality vol. 1 recommendations (p. 130). Geneva: WHO.
- WHO. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *World Health Organization*, 216, 303-304.
- WHO. (2014). Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization (3rd ed., 1(515). Geneva, Recommendations.
- WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality. In: Incorporating 1st Addendum, fourth ed. World Health Organization, Geneva.
- Zahedi, S., Azarnivand, A., & Chitsaz, N. (2017). Groundwater quality classification derivation using multi-criteria-decision-making techniques. *Ecological Indicators*, 78, 243-252





## Investigating the Impact of Watershed Plans on Flood Risk Zoning Using Fuzzy Operators (Case Study: Darmian Study Area)

Hannan Hanafi<sup>1</sup> | Hosein khozeymehnezhad<sup>2</sup> | Mohammad Fouladi Nasrabad<sup>1</sup>

1. PhD student in Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
- 2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: [Hannan.hanafi77@gmail.com](mailto:Hannan.hanafi77@gmail.com)

Received:  
15 November 2024

Accepted:  
22 January 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*watershed management,  
flood risk,  
fuzzy logic,  
zoning, ArcGIS,  
Analytical Hierarchy Process  
(AHP), flood susceptibility*

### Extended abstract

#### Introduction

Flooding is one of the most dangerous natural disasters, encompassing many global hazards (Das, 2020). Among these disasters, according to the statistics published by the United Nations, floods and storms caused the highest damages in the 2000-2010 decade, amounting to \$21 billion and \$18 billion, respectively, in human casualties (AmirAhmadi et al., 2011). The factors contributing to floods can be divided into three main categories: climatic, regional characteristics, and human activities (Lotfi and Jafari, 2012). Flood risk zoning maps effectively manage flood, land use control, developmental programs, and environmental protection (Hassanzadeh and Khajebafghi, 2017; Büchele et al., 2006). Numerous studies have been conducted on flood-prone areas and the prioritization of factors influencing flood occurrence in different regions. In 2020, a study analyzed potential flood risks in Allahabad, India, using multi-criteria analysis.

**Cite this article:** Hanafi, H., Khozeymehnezhad, H. & Fouladi Nasrabad, M. (2024). Investigating the impact of watershed plans on flood risk zoning using fuzzy operators (case study: Darmian study area), *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 101-124. DOI: <http://doi.org/10.22077/10.22077/jaaq.2025.8580.1084>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

This study considered seven criteria—stream accumulation, drainage capacity, groundwater level, land use, runoff, slope, and geology—to assess flood damage risk. The findings indicated that 81% of the agricultural lands in the region were located in flood-prone areas (Dash and Sar, 2020). In 2019, a study modeled urban flood susceptibility based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System (GIS), focusing on the flood risk of the city of Xingguozhai, China. The results showed that the city center was more vulnerable to flooding than other areas (Wu et al., 2019). In 2015, a study used AHP and GIS to assess flood risk potential in the Heiyai River Basin, finding that the AHP method was consistent and effective in flood risk zoning for the years 1960–2010 (Nikolova and Zlateva, 2017). In 2019, a study investigated flood susceptibility in the Ajorlou Chai watershed using fuzzy logic. The results revealed that most of the watershed's area was classified as having low, very low, and medium flood risk (Esfandiary Darabad et al., 2019). In 2018, a study in Sari used fuzzy logic to prepare a flood risk zoning map for the city. Multi-criteria decision-making (MCDM) methods were applied to the flood risk zoning, with the results showing severe flood susceptibility in the center and south of the city. The final flood risk zoning map indicated that 12.24% of the areas were in the very high-risk zone, and 37.05% were in the very low-risk zone (Mahmoudzadeh and Bakoi, 2018).

Reviewing these studies reveals that flood risk zoning using GIS and AHP methods has been significantly effective in identifying flood-prone regions. This research, using fuzzy operators as an innovative method, focuses on flood risk zoning and assesses the impact of watershed management plans on flood risk. The use of fuzzy models, especially in areas with limited data, significantly increases the accuracy and predictive capacity of the model. Moreover, for the first time, this study investigates the effects of watershed management plans on flood risk zoning in the Darmiyan region.

## Materials and Methods

### Study Area

The study area, Darmian-Asadabad, is located between 59°28' to 60°47' eastern longitude and 32°32' to 33°21' northern latitude. It is part of the second-order drainage basins of the Dagh-Petergan and Khaf regions, located to the south of this drainage basin. The area covers 3073 square kilometers, representing approximately 9% of the area of the second-order Dagh-Petergan and Khaf basin.

Politically, this study area is within the plains of South Khorasan province. The Darmian study area is bordered to the north by the Sadeh and Esfden plains, to the east by the Birjand and Sarbishah plains, to the south by the Hosseinabad and Khushab plains, and to the west by the Gazik and Avaaz plains (The update report of the water balance of the study area of Darmian, 2016).

### Data

In this study, the flood risk zoning map was generated using several criteria, including topography, land cover, river morphology, hydroclimate, geology, and human activities. These criteria include sub-criteria, as listed in Table 1, with their respective raster data and maps used for the zoning process. The following introduces each sub-criterion:

Criteria & Sub-Criteria	Description
<b>Topography</b>	Elevation, Slope, Landform
<b>Land Cover</b>	Vegetation cover, Land use
<b>River Morphology</b>	Waterway density, Distance to waterway
<b>Hydroclimate</b>	Precipitation
<b>Geology</b>	Geological characteristics
<b>Human Activities</b>	Watershed management plans

- **Elevation Layer:** This layer directly relates to flooding and was derived from the Digital Elevation Model (DEM) with a 30x30m resolution.
- **Slope Layer:** The slope layer determines the speed and direction of water movement, derived from the DEM.
- **Land Form Layer:** Differentiates mountainous and elevated areas from plains and lowlands.
- **Geology Layer:** Directly influences flooding and was obtained from the 1:100,000 geological map of the Geological Organization.
- **Distance to Waterway Layer:** One of the major factors influencing flood damage is the improper use of waterway buffers. This layer was also derived from the DEM.

- **Land Use Layer:** Land use influences floods in various ways. Any activity that reduces soil moisture and permeability increases flood risk. The land use map was obtained from the Department of Natural Resources of South Khorasan at a 1:50,000 scale.
- **Vegetation Cover Layer:** This layer classifies vegetation based on type and density, obtained from the Department of Natural Resources of South Khorasan.
- **Precipitation Layer:** The most important factor in the hydrological cycle. The precipitation data was obtained from the local meteorological organization for the area, using 30 years of rainfall data to generate an annual average precipitation map.
- **Drainage Density Layer:** This layer is inversely related to flood risk and was derived from the DEM.
- **Human Activities Layer:** This layer includes the locations of watershed management projects (such as stone-mortar structures, gabions, earthen dams, and spillways). The location coordinates of these projects were processed using buffer zones and then converted into raster layers.

### Weighting Method

Evaluating the various criteria involved in flood risk zoning is part of decision-making. For this, a multi-criteria decision analysis (MCDA) approach was used, which includes various methods such as the Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), fuzzy methods, and combinations of different techniques. This study applied a hybrid AHP-fuzzy method, initially proposed by Chang in 1996. The key difference between this method and traditional AHP is the way weights are assigned to criteria and options.

For determining the weights of the specified criteria in this study, a questionnaire was employed. The criteria and sub-criteria were first identified through field studies and a review of previous research. Then, a questionnaire was designed to compare the criteria with each other and the sub-criteria within each category. In AHP questionnaires, unlike typical SPSS questionnaires (which often use a 5-point Likert scale), there is no reliability index (e.g., Cronbach's alpha). Instead, the concept of inconsistency is used. The inconsistency ratio indicates contradictions and discrepancies in the pairwise comparison matrix. According to Saaty (2012), if the inconsistency ratio is less than 0.1, the matrix is considered consistent and acceptable. After completing the questionnaires by experts, the validity and reliability of the survey were verified using the inconsistency ratio in the Expert Choice software, yielding a value of 0.04, which is acceptable as it is less than 0.1.

### Framework for Design and Implementation

This study aims to provide an appropriate assessment of flood susceptibility for the Darmian study area. To achieve this, the factors affecting flood occurrence in the region were identified, and a system expert approach was used, including field studies (questionnaire surveys) with specialists from various fields such as water engineering, civil engineering, geography, geology, environmental science, rangeland management, and watershed management. In total, 25 experts participated in the survey. Moreover, to address uncertainties and standardize information, crisis management guidelines, field studies, historical data, and related research were consulted (Behrouz, Ali-Mohammadi & Attari, 2019; Malazahi et al., 2019).

### Results and Discussion

Flood occurrence depends on various factors. In this study, raster layers of elevation, slope, landform, vegetation cover, land use, precipitation, waterway density, distance from waterways, geology, and watershed plans were used within six main criteria categories: elevation, land cover, hydro-climatic factors, river morphology, geology, and human activities. The weighting of these main criteria and sub-criteria for each category was carried out using the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Expert Choice software. The final weights for each factor and their hierarchy are shown in Table 2.

**Table 2: Final Weight of Factors Used**

Number	Sub-criteria	Final Weight
1	Waterway density	0.288
2	Land cover	0.205
3	Watershed plans	0.146
4	Land use	0.103
5	Precipitation	0.103
6	Distance from waterway	0.072
7	Landform	0.034
8	Slope	0.021
9	Geology	0.021
10	Elevation	0.007

According to Table 2 and the results from the AHP analysis, the waterway density criterion (0.288), land cover (0.205), and watershed plans (0.146) were found to have the highest importance in flood susceptibility in the study area.

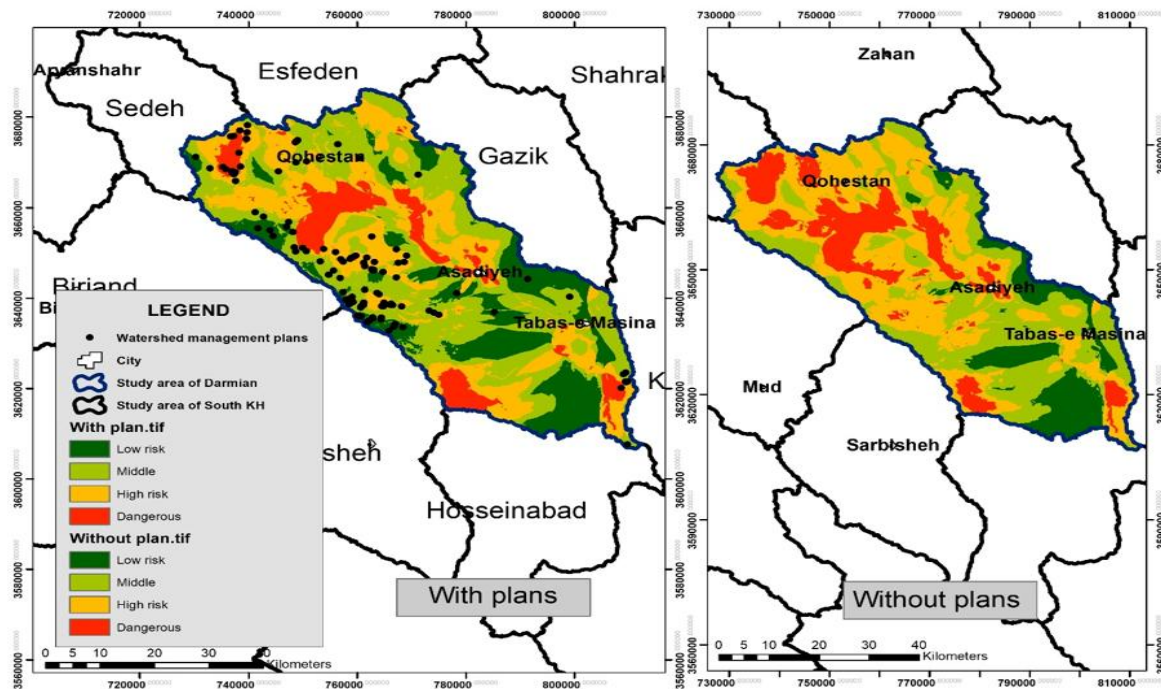
Since raster maps of elevation and slope were already available, no changes were needed. To create raster maps for landforms, vegetation cover, land use, geology, and watershed plans, each factor was assigned a rank based on its importance in flood risk. These layers were then converted into raster maps using the "Feature to Raster" function. The waterway density map was generated using the "Density" tool from the river layer, showing the waterway density for each pixel. Additionally, the distance from the waterways map was extracted using the "Distance" tool from the river layer. For the watershed plans map, the impact area of each structure was determined based on type and disaster management standards. The area of the large earthen dams was considered larger than other structures. Then, using the "Distance" tool, pixel values were assigned, increasing as the distance from the influence area increased.

After creating the raster maps, to normalize the pixel values, they were fuzzified using the "Fuzzy Membership" tool. It should be noted that while some criteria have a direct relationship with flood risk (the higher the pixel value, the higher the flood risk), others have an inverse relationship (the lower the pixel value, the higher the flood risk). The maps for elevation, slope, landform, land use, geology, precipitation, waterway density, and vegetation cover were fuzzified using a direct relationship, while the distance from the waterways map was fuzzified using an inverse relationship.

Next, the weights obtained from the AHP method in Expert Choice, through questionnaires, were applied to the fuzzified maps using the "Raster Calculator" tool. To assess the effect of watershed plans on flood risk, two series of weighted maps were created. In the first series, the human activities (watershed plans) factor was included in the flood risk zoning process. In the second series, the human activities factor was excluded, and its weight was applied to the two most important factors, precipitation and waterway density.

Finally, to create the final flood risk zoning map, a fuzzy overlay operation was performed on all the fuzzified maps using the "Fuzzy Overlay" function. Two flood risk zoning maps were generated: 1- considering the effect of watershed plans and 2-the other without. Figure 1 shows the flood risk zoning maps for the study area.





**Figure 1: The final flood risk zoning map with watershed management plans and without.**

Comparing the flood risk zoning maps with and without considering watershed plans indicates that the western and northwestern regions, where earthen dam structures are most used, show a significant reduction in flood risk due to the larger reservoirs of these dams compared to other watershed structures. In these areas, with the removal of these structures from the zoning process, regions with low-density pastures, relatively high precipitation, short distances from waterways, and dense waterways transition from low-risk to medium and high-risk zones.

In the central regions, due to the dense waterways, short distances from waterways, and weak vegetation cover, and in the northwestern regions due to dense waterway coverage and elevated distance from waterways, the flood risk is notably higher. The southwestern regions, due to high precipitation, elevation, weak vegetation cover, absence of watershed plans, and dense waterways, and the southeastern regions due to waterway presence and poor vegetation cover, are also in the high-risk flood zones.

Moreover, the cities of Darmian and Tabas Mesina, due to being located in the red (high-risk) zones, are at significant flood risk and require appropriate infrastructure and facility placement to mitigate the risk.

## Conclusion

Flooding is one of the most destructive natural events. Flood risk zoning is one of the most effective methods for controlling this natural phenomenon and identifying appropriate management strategies to mitigate its impacts. This study, by integrating fuzzy models and AHP, not only determined the effect of flood-triggering factors but also assessed the impact of watershed plans on reducing flood risk. The results showed that waterway density and vegetation cover had the highest importance, while elevation had the least effect on flood occurrence in the study area. Flood risk zoning maps indicated that the western and northwestern regions, with watershed plans in place, became low-risk zones. Removing these plans shifted these areas to high-risk zones, emphasizing the effectiveness of watershed plans in reducing flood risk. The study also found that the southern region of Darmian was safe from flooding due to its land cover and geological characteristics. However, the cities of Darmian and Tabas Mesina are located in high-risk zones, requiring careful planning for infrastructure development. Future studies could explore the effect of reservoir volume on watershed structures and the potential for artificial recharge of groundwater in the area.



## بررسی تأثیر طرح‌های آبخیزداری در پهنه‌بندی خطر وقوع سیل با استفاده از عملگرهای فازی (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی درمیان)

حنان حنفی<sup>۱</sup> | حسین خزیمه‌نژاد<sup>۲</sup> | محمد فولادی نصر آباد<sup>۱</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.  
۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [Hannan.hanafi77@gmail.com](mailto:Hannan.hanafi77@gmail.com)

### چکیده

سیل رویدادی ناگهانی است که در بروز آن عوامل متعددی دخالت دارند. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر طرح‌های آبخیزداری در کاهش خطر سیل‌خیزی در محدوده مطالعاتی درمیان انجام شده است. در این پژوهش از شش معیار اصلی: توپوگرافی، پوشش زمین، مورفولوژی رودخانه، هیدرو اقلیم، زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی و ۱۰ زیر معیار: ارتفاع، شیب، فرم زمین، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، بارش، زمین‌شناسی و صرفاً وجود یا عدم وجود طرح‌های آبخیزداری استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین وزن هر زیرمعیار در تعیین عوامل تأثیرگذار در وقوع سیل از روش پرسشنامه‌ای و تحلیل سلسله مراتبی AHP در نرم‌افزار Expert choice استفاده شده است. سپس با استفاده از منطق فازی، پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در دو حالت: ۱- وجود طرح‌های آبخیزداری و ۲- عدم وجود طرح‌های آبخیزداری در محیط ArcGIS صورت گرفته است. نتایج نشان داد: زیر معیار تراکم آبراهه و پوشش گیاهی به ترتیب با اوزان ۰/۲۸۸ و ۰/۲۰۵ دارای بیشترین اهمیت و زیرمعیار ارتفاع با وزن ۰/۰۰۷ دارای کمترین اهمیت در وقوع سیل در محدوده مورد مطالعه مشخص شده‌اند. همچنین نتایج نشان داد مساحت مناطق با خیلی زیاد از ۴۹۵۶۷/۵۵ به ۶۰۶۰۶/۸۲ و مناطق با خطر زیاد از ۱۱۶۹۷۶/۴۲ به ۸۸۸۲۴/۳۸ هکتار کاهش پیدا کرده و مساحت مناطق با خطر متوسط از ۱۰۱۴۴۹/۷۱ به ۱۲۳۲۶۰/۳ و مناطق با خطر کم از ۳۹۱۲۶/۱۸ به ۶۴۴۲۸/۰۱ هکتار افزایش پیدا کرده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

عملیات آبخیزداری،  
خطر سیلاب، منطق فازی،  
پهنه‌بندی، ArcGIS  
تحلیل سلسله مراتبی  
(AHP)، سیل‌خیزی.

## مقدمه

یکی از خطرناک‌ترین بلاهای طبیعی سیل است که بخش اعظمی از خطرات جهانی را شامل می‌شود (Das, 2020). در بین این بلاها طبق آمار منتشرشده از سازمان ملل، سیل و طوفان در دهه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، بیشترین خسارت را به میزان ۲۱ میلیارد دلار و ۱۸ میلیارد دلار به ترتیب به زندگی بشر وارد کرده است (AmirAhmadi et al., 2011). عوامل به وجود آورنده سیلاب به سه دسته اصلی: اقلیمی، خصوصیات منطقه‌ای و فعالیت‌های انسانی تقسیم‌بندی می‌شود (Lotfi and Jafari, 2012). نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل در مدیریت سیل، کنترل و مدیریت کاربری اراضی، برنامه‌های توسعه‌ای و حفاظت محیط‌زیست ابزاری مؤثر می‌باشد (Hassanzadeh and Khajebafghi, 2017; Büchele et al., 2006). مطالعات زیادی در زمینه پهنه بندی مناطق سیل خیز و اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار در ایجاد سیل هر منطقه انجام شده است.

سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای به مناطق بالقوه خطر سیل از طریق تجزیه تحلیل چندمعیاره در اطراف الله‌آباد هند پرداخته شده است. در این پژوهش با استفاده از تجزیه و تحلیل هفت معیار: تجمع جریان، قابلیت تخلیه، تراز آب زیرزمینی، کاربری زمین، رواناب، شیب و زمین‌شناسی بررسی احتمال آسیب سیل بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ۸۱ درصد زمین‌های کشاورزی آن منطقه، در محدوده سیل‌خیز قرار گرفته‌اند (Dash and Sar, 2020). سال ۲۰۱۹ در پژوهشی، خطر سیل‌پذیری شهری، بر اساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> (GIS) مدل شده است و خطر سیلاب شهر زینگوژای چین را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصله حاکی از آن است که مرکز شهر ژینگزو نسبت به سایر مناطق شهر در برابر سیل، آسیب‌پذیرتر است (Wu et al., 2019). سال ۲۰۱۵ در حوضه رودخانه هیائی، به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، پتانسیل سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه بررسی

شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه برای سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ سازگار و کارآمد بوده است (Nikolova and Zlateva, 2017). سال ۲۰۱۹ در پژوهشی سیل‌خیزی حوضه آبخیز آجرلوچای به کمک منطق فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج پژوهش گویای قرارگیری اکثر مساحت حوضه در پتانسیل سیل‌خیزی کم، خیلی کم و متوسط است (EsfandiaryDarabad et al., 2019). سال ۲۰۱۸ در پژوهشی تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از منطق فازی برای شهر ساری انجام شده است. در این پژوهش روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۳</sup> (MCDM) برای پهنه‌بندی سیلاب مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پژوهش، سیل‌خیزی شدید در مرکز و جنوب شهر ساری را نشان می‌دهد. نقشه نهایی پهنه بندی خطر سیل، ۲۴/۱۲ درصد مناطق را در پهنه‌بندی خطر خیلی زیاد و ۳۷/۰۵ درصد مناطق را در پهنه‌بندی خطر خیلی کم نشان می‌دهد (Mahmoudzadeh and Bakoi, 2018).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که عملیات پهنه بندی توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در مشخص کردن مناطق سیل‌خیز به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر بوده است. این تحقیق با استفاده از عملگرهای فازی به‌عنوان روشی نوین به پهنه‌بندی خطر سیلاب و ارزیابی تأثیر طرح‌های آبخیزداری بر این خطر پرداخته است. استفاده از مدل‌های فازی، به‌ویژه در مناطق با داده‌های محدود، دقت و توان پیش‌بینی مدل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در این پژوهش برای اولین بار تأثیرات طرح‌های آبخیزداری بر پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه درمیان بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی درجه ۳ درمیان- اسدآباد در موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۱

<sup>1</sup> Analytical Hierarchy Process

<sup>2</sup> Geographic Information System

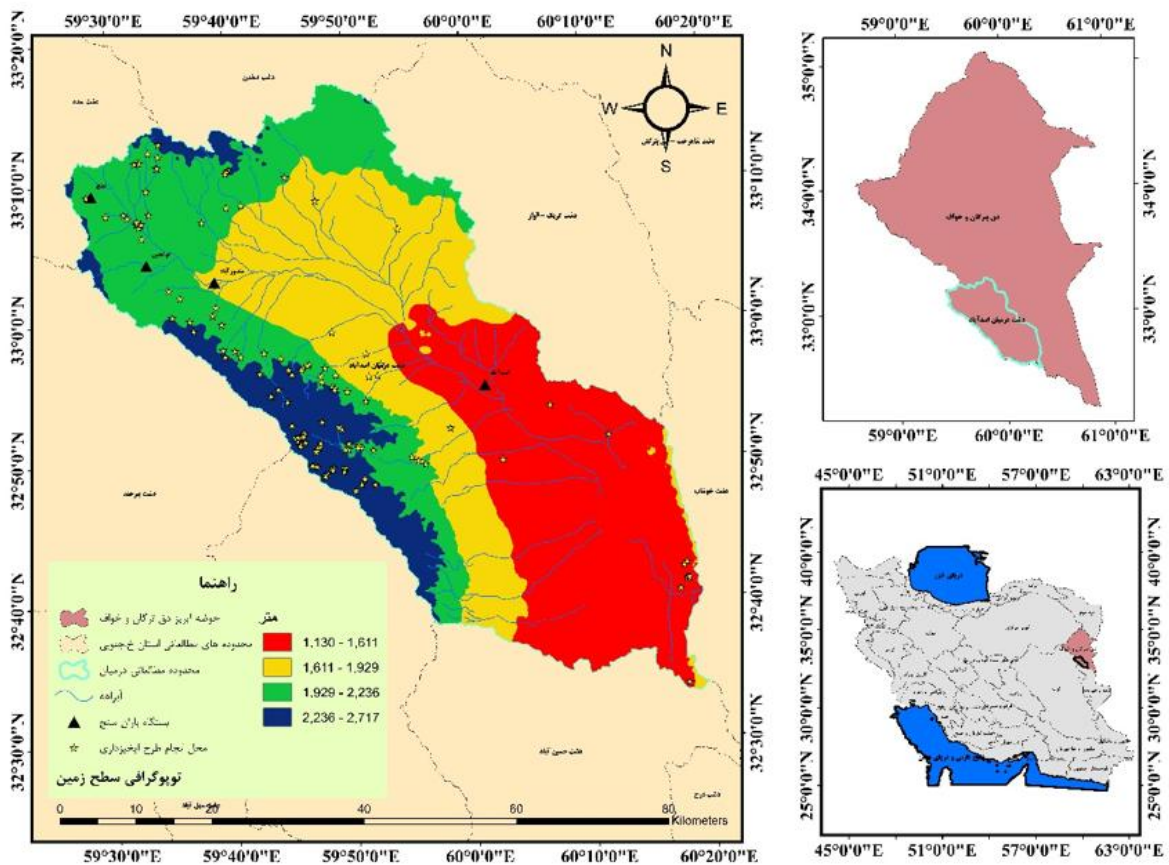
<sup>3</sup> Multi Criteria Decision Making

سیلاب در آن‌ها جریان دارد. رودخانه فخرود طولانی‌ترین رود محدوده درمیان به‌شمار می‌رود که سیلاب‌های فصلی را از سرشاخه‌های ارتفاعات غربی و جنوبی جمع‌آوری و به سمت شرق و افغانستان هدایت می‌کند. رودخانه گزیک نیز که بخشی از حوزه آبریز آن در محدوده قائنات قرار دارد، در همین جهت غربی شرقی رواناب نزولات ارتفاعات شمالی محدوده را پس از عبور از دشت‌های پدخل و گزیک به افغانستان هدایت می‌نماید. به‌منظور استفاده از این منابع دو سازه آبی شامل سد دهانه رزه و بند انحرافی گلوپچ طراحی و اجرایی شده که با بهره‌برداری از آن‌ها امکان استفاده از میلیون‌ها مترمکعب آب که همه ساله از دسترس خارج می‌گردید فراهم شده است. این سازه‌ها قادر به جمع‌آوری ۲۷ میلیون متر مکعب آب در سال هستند. بررسی‌های آماری انجام شده بر روی دبی رودخانه‌های مسیر نشان می‌دهد که بهره‌برداری از این سازه‌ها ده درصد منابع آب قابل بهره‌برداری دشت را افزایش خواهد داد.

دقیقه عرض شمالی قرار گرفته و از محدوده‌های حوضه آبریز درجه ۲ دق پترگان و خوف که در جنوب این حوضه آبریز قرار گرفته است، محسوب می‌شود. مساحت این محدوده مطالعاتی ۳۰۷۳ کیلومتر مربع است. تقریباً نه درصد مساحت حوضه آبریز درجه ۲ دق پترگان و خوف را شامل می‌شود.

از لحاظ تقسیمات سیاسی این محدوده مطالعاتی جز محدوده (دشت) های استان خراسان جنوبی است. محدوده مطالعاتی درمیان از شمال توسط دشت‌های (محدوده مطالعاتی) سده و اسفدن، از شرق توسط دشت‌های بیرجند و سریشه، از جنوب توسط دشت حسین‌آباد و دشت خوشاب و از قسمت شرق توسط دشت گزیک و آواز احاطه شده است (Rouhollahi et al., 2011). شکل شماره (۱) محدوده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

منابع آب سطحی منطقه مورد مطالعه عموماً شامل رودخانه‌های فصلی است که تنها در زمان وقوع بارندگی،



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در کشور و استان خراسان جنوبی

Figure 1. Map of the location of the studied area in South Khorasan province & Iran Country.

## داده‌ها

فعالیت‌های انسانی استفاده شده است. این معیارها شامل زیر معیارهایی است (جدول ۱) که از داده‌ها و نقشه‌های رستری آن‌ها در پهنه‌بندی استفاده شده است. در ادامه به معرفی هریک از زیرمعیارها پرداخته می‌شود.

در این پژوهش به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری سیل در منطقه مورد مطالعه، از معیارهای توپوگرافی، پوشش زمین، مورفولوژی رودخانه، هیدرو اقلیم، زمین‌شناسی و

جدول ۱- معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار در پهنه‌بندی سیل

Table 1. Effective Criteria and Sub-Criteria in Flood Zoning

معیارها و زیر معیارها	
Criteria & Sub-Criteria	
ارتفاع	
Elevation	
شیب	توپوگرافی
Slope	Topography
فرم زمین	
Landform	
پوشش گیاهی	پوشش زمین
Land cover	Land cover
کاربری اراضی	
Land use	
تراکم آبراهه	مورفولوژی رودخانه
Waterway density	River morphology
فاصله از آبراهه	
Distance of waterway	
بارش	هیدرواقلیم
Precipitation	Hydro climate
شناسی زمین	شناسی زمین
Geology	Geology
داری‌های آبخیزداری و آبخوان طرح	های انسانی فعالیت
Watershed plans	Human activities

لایه رقمی ارتفاع: این لایه با سیلاب رابطه مستقیم دارد و از نقشه رقمی ارتفاع<sup>۱</sup> (Dem) با قدرت تفکیک‌پذیری ۳۰×۳۰ متر به دست آمده است.

لایه شیب: شیب تعیین‌کننده میزان و سرعت حرکت آب است. این لایه از نقشه رقمی ارتفاع (Dem) به دست آمده است.

لایه فاصله از آبراهه: از مهم‌ترین عوامل افزایش خسارت سیل، استفاده نامناسب از حریم مسیل‌ها است. این لایه نیز از نقشه رقمی ارتفاع (Dem) به دست آمده است.

لایه فرم زمین: این لایه تعیین‌کننده مناطق کوهستانی و مرتفع نسبت به دشت‌ها و مناطق پست می‌باشد که این دو را از هم تفکیک می‌کند.

لایه کاربری اراضی: کاربری اراضی به شیوه‌های گوناگون در بروز سیلاب تأثیر گذار است. هرگونه اقدامی که باعث کاهش رطوبت خاک و کاهش نفوذپذیری شود، افزایش سیلاب را به همراه خواهد داشت. نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از اداره کل منابع طبیعی استان تهیه شده است.

لایه رقمی ارتفاع: این لایه با سیلاب رابطه مستقیم دارد و از نقشه رقمی ارتفاع<sup>۱</sup> (Dem) با قدرت تفکیک‌پذیری ۳۰×۳۰ متر به دست آمده است.

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model

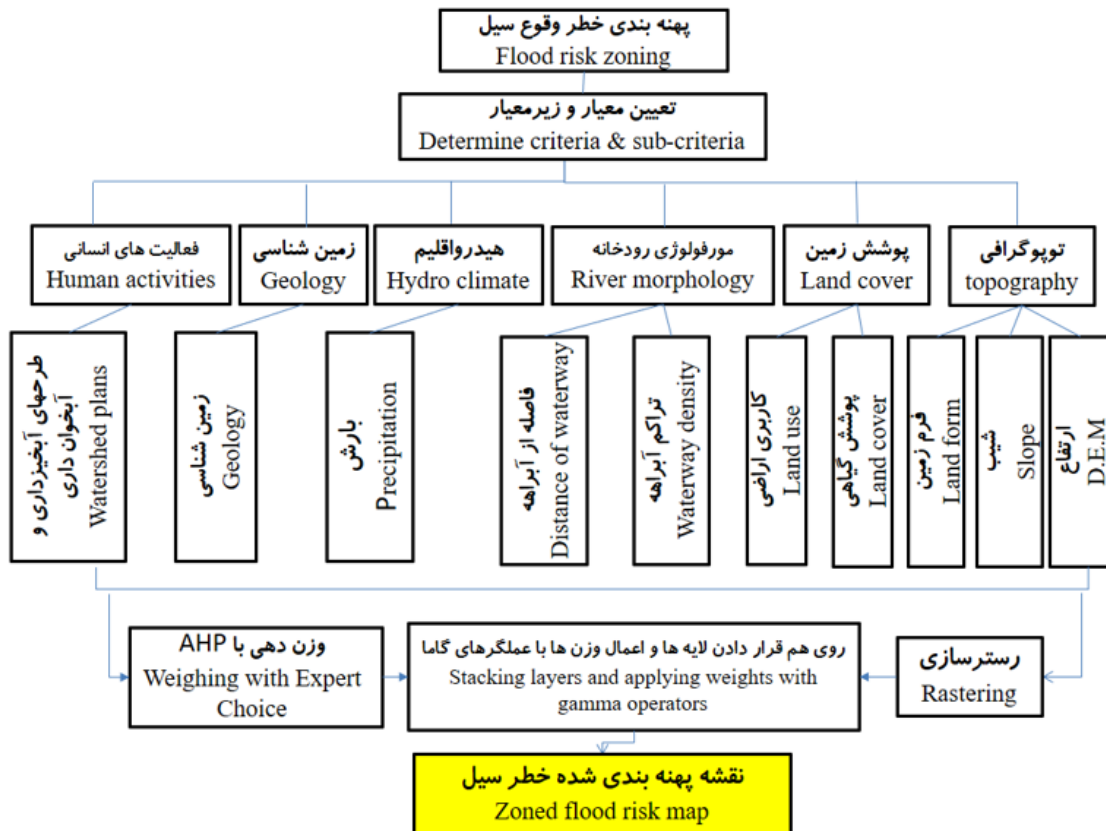
لایه پوشش گیاهی: در این لایه پوشش گیاهی سطح زمین از نظر جنس و تراکم به طبقه‌های مرتع کم‌تراکم و پرتراکم، جنگل، زراعت بوت‌ه‌زار و غیره تقسیم بندی شده است. این لایه از اداره کل منابع طبیعی استان تهیه شده است.

لایه بارش: بارش مهم‌ترین عامل در چرخه هیدرولوژی است. این لایه از داده‌های بارش سازمان هواشناسی استان تهیه شده است. برای دخالت دادن این لایه در محاسبات، از بارش سالانه منطقه که خود از داده‌های بارندگی ۳۰ ساله اخیر مستخرج و میانگین گرفته شده، به‌دست آمده است و نقشه بارش رستری منطقه، از بارش متوسط سالانه نشئت می‌گیرد.

لایه تراکم زهکشی: این لایه با سیل‌خیزی رابطه عکس دارد و از نقشه رقومی ارتفاع (Dem) با قدرت تفکیک‌پذیری ۳۰×۳۰ متر به‌دست آمده است.

لایه فعالیت‌های انسانی: در این لایه از موقعیت قرارگیری طرح‌های آبخیزداری (سازه‌های سنگ و ملات، گابیون، بند خاکی و سرریز ملاتی) استفاده شده است. لایه نقطه‌ای مختصات محل ایجاد طرح‌های آبخیزداری، حریم بندی (buffer) و سپس به لایه رستری تبدیل شده است.

شکل شماره (۲) گردش کار مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری سیل و همچنین معیارهای اصلی و زیرمعیارها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- گردش کار مراحل و معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار در پهنه بندی سیل در این پژوهش

Figure 2. study steps, criteria & sub-criteria been used in flood zoning

تحلیل شبکه‌ای<sup>۱</sup> (ANP)، روش فازی و ترکیب روش‌های مختلف است. در این پژوهش از تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی و فازی استفاده شده است. روش فازی-AHP را نخستین بار در سال ۱۹۹۶ ارائه شده است (Chang, 1996).

### روش وزن دهی

بررسی معیارهای مختلف، درگیر و مؤثر در موضوعات مختلف یکی از روش‌های تصمیم‌گیری است. به این منظور روشی به نام تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره طراحی شده است. این روش خود شامل زیرمجموعه‌ای از روش‌های مختلف می‌باشد؛ مانند روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، روش

<sup>1</sup> Analytical Network Process

### چارچوب طراحی و پیاده‌سازی

در مطالعه حاضر سعی شده است ارزیابی مناسبی از شرایط سیل‌خیزی برای محدوده مطالعاتی درمیان ارائه شود. بدین‌منظور، عوامل مؤثر و محرک در رخداد سیل برای منطقه شناسایی شده و با رویکرد سیستم خبره و مطالعه میدانی (پرسشنامه‌ای) از بین متخصصان مهندسی آب، عمران- آب، جغرافیا، زمین‌شناسی، محیط زیست، مرتع و آبخیزداری و اساتید دانشگاه که ۲۵ نفر بودند، به روش توصیفی-پیمایشی بهره گرفته شده است. علاوه بر این، به‌منظور یکنواخت‌سازی اطلاعات، از دستورالعمل‌ها و استانداردهای مدیریت بحران، مطالعات میدانی (مکانی)، اطلاعات تاریخی، مطالعات پژوهش‌های انجام شده‌ی مرتبط بهره گرفته شده است (Mollazehi et al., 2020).

### نتایج و بحث

وقوع سیلاب به عوامل مختلفی بستگی دارد. در این پژوهش از لایه‌های اطلاعاتی رستری ارتفاع، شیب، فرم زمین، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، بارش، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی و طرح‌های آبخیزداری در شش دسته معیار اصلی ارتفاع، پوشش زمین، هیدرواقليم، مورفولوژی رودخانه، زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی استفاده شده است. وزن‌دهی معیارهای اصلی و زیرمعیارهای هر دسته، با تحلیل سلسله مراتبی AHP در نرم‌افزار Expert Choice انجام شده که وزن‌های نهایی هر عامل و سلسله مراتب آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

تفاوت اساسی این روش با روش AHP، نحوه وزن‌دهی معیارها و گزینه‌هاست.

برای پژوهش حاضر و رسیدن به اوزان معیارهای مشخص‌شده، از روش پرسشنامه بهره گرفته شده است. ابتدا معیارها و زیرمعیارها با مطالعات میدانی و بررسی پژوهش‌های گذشته تعیین شده است، سپس پرسشنامه‌ای در جهت مقایسه معیارها با هم و زیرمعیارهای هر دسته با خودش، تدوین شده است.

در پرسشنامه‌های تحلیل سلسله مراتبی یا روش AHP موضوعی به نام پایایی، آن‌طوری که در پرسشنامه‌های معمول نرم افزار SPSS (که معمولاً گزینه‌های ۵ تایی طیف لیکرت دارد) مطرح است، وجود ندارد. این وضعیت در خصوص پرسشنامه‌های روش ANP و AHP فازی، نیز صدق می‌کند. یعنی برای پرسشنامه مقایسه زوجی شاخص سنجش پایایی یا روایی، به مانند ضریب پایایی آلفای کرونباخ وجود ندارد. بلکه به جای مفهوم پایایی در پرسشنامه‌های AHP، از مفهوم نرخ ناسازگاری<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. نرخ ناسازگاری شاخصی است که مقدار آن نشان دهنده تناقضات و ناسازگاری‌های احتمالی در ماتریس مقایسات زوجی است. بنابر نظر آقای ساعتی بنیان‌گذار روش AHP، چنانچه نرخ ناسازگاری کمتر از ۰.۱ باشد، سازگاری ماتریس مقایسات مورد تایید بوده و قابل قبول می‌باشند (Saaty, 2012). منظور از پایایی یک پرسشنامه این است که اگر خصیصه مورد سنجش را با همان پرسشنامه و در شرایط مشابه، مجدداً اندازه گیری شود، نتایج تا چه اندازه مشابه به‌دست آید. به‌عبارت دیگر این پرسشنامه تا چه میزان، قابل اعتماد می‌باشد. روایی پرسشنامه دلالت بر این دارد که پرسشنامه تا چه حد رواست، یعنی آیا دقیقاً همان موضوع و خصیصه‌ای که مد نظر است را اندازه گیری می‌کند یا خیر. با توجه به اینکه پرسشنامه روش AHP به تایید خبرگان موضوع می‌رسد، لذا روایی آن مورد تایید می‌باشد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها توسط متخصصین و صاحب‌نظران، روایی و پایایی پرسشنامه با ضریب ناسازگاری در نرم‌افزار Expert choice بررسی شده و مقدار ۰/۰۴ که کمتر از ۰/۱ و قابل قبول است، به‌دست آمد.

<sup>1</sup> Inconsistency

جدول ۲- وزن نهایی زیرمعیارها و فاکتورهای مورد استفاده

Table 2. the final weight of factors used.

وزن نهایی Final weight	زیرمعیار Sub-criteria	شماره number
۰/۲۸۸	تراکم آبراهه Waterway density	۱
۰/۲۰۵	پوشش گیاهی Land cover	۲
۰/۱۴۶	های آبخیزداری طرح Watershed plans	۳
۰/۱۰۳	کاربری اراضی Land use	۴
۰/۱۰۳	بارش Precipitation	۵
۰/۰۷۲	فاصله از آبراهه Distance of waterway	۶
۰/۰۳۴	فرم زمین Land form	۷
۰/۰۲۱	شیب Slope	۸
۰/۰۲۱	شناسی زمین Geology	۹
۰/۰۰۷	ارتفاع Elevation	۱۰

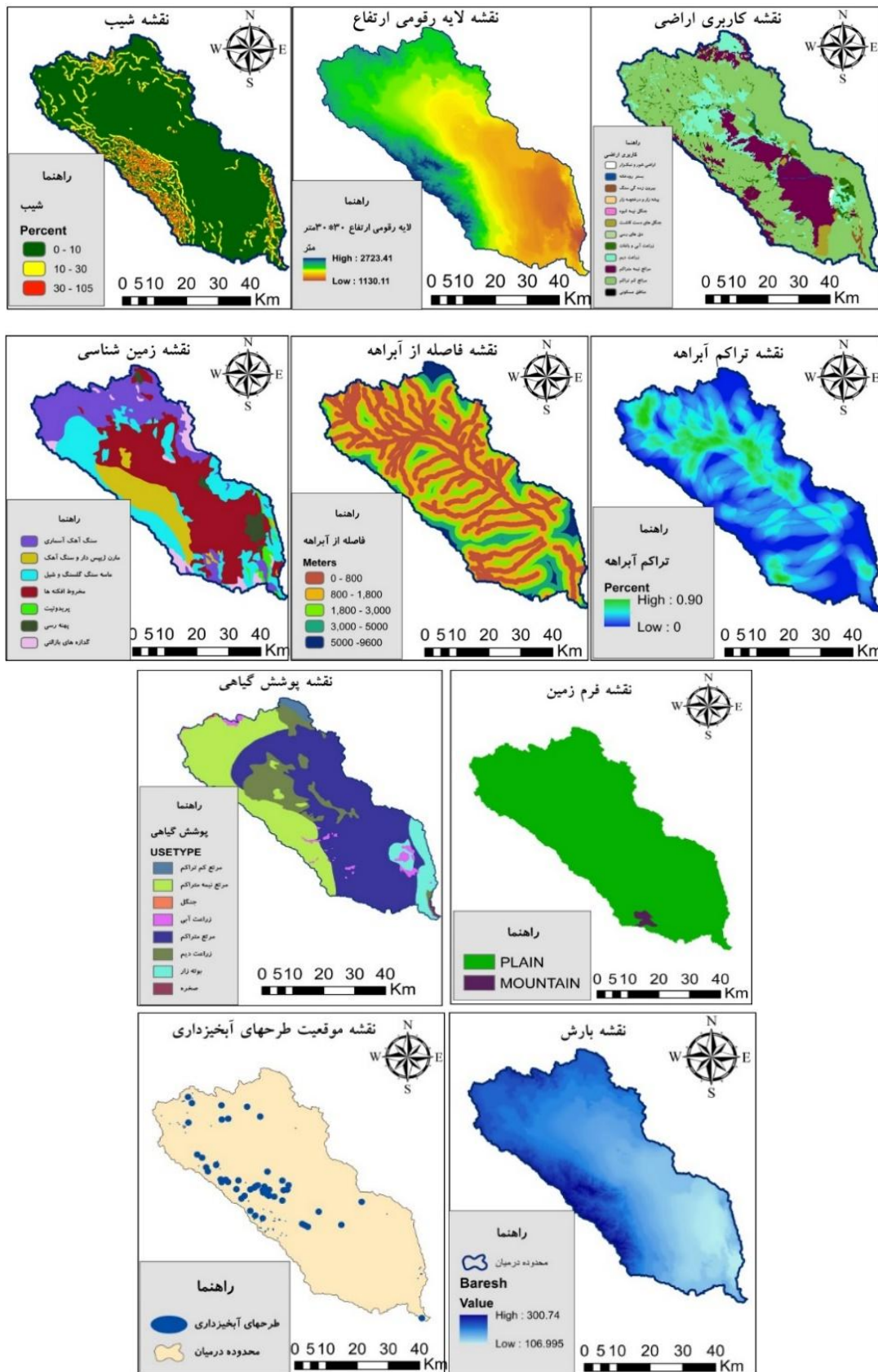
فاکتور براساس اهمیت آن در خطرپذیری سیل، رتبه‌ای اختصاص داده شد. سپس این لایه‌ها با استفاده از دستور Feature to Raster به نقشه‌های رستری تبدیل شدند. نقشه تراکم آبراهه با دستور Density از لایه رودخانه‌ها تولید شده که درصد تراکم آبراهه را برای هر پیکسل نشان می‌دهد. همچنین نقشه فاصله از آبراهه با دستور Distance از لایه رودخانه‌ها استخراج شد. برای نقشه طرح‌های آبخیزداری، محدوده اثر هر سازه بر اساس نوع آن و استانداردهای مدیریت بحران مشخص شد. محدوده سازه‌های بند خاکی بزرگ‌تر از سایر سازه‌ها در نظر گرفته شد. سپس با دستور Distance به هر پیکسل مقداردهی شد، به طوری که با افزایش فاصله از محدوده اثر، ارزش پیکسل نیز افزایش یابد. شکل شماره (۳) نقشه رس‌تر شده هر یک از زیرمعیارها را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول شماره ۲ و نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی، به ترتیب معیار تراکم آبراهه با وزن ۰/۲۸۸، پوشش گیاهی با وزن ۰/۲۰۵ و طرح‌های آبخیزداری با وزن ۰/۱۴۶ بیشترین اهمیت را در سیل‌خیزی محدوده مورد مطالعه به خود اختصاص داده‌اند.

از آنجایی که برای اعمال وزن‌ها و انجام محاسبات و تهیه نقشه پهنه‌بندی به نقشه رستری هر یک از عوامل مذکور نیاز است، طی مراحل زیر نقشه رستری هر یک از معیارها به دست آمد:

نقشه‌های ارتفاع و شیب منطقه مطالعاتی به صورت رس‌تر بوده است و نیازی به اعمال تغییرات نداشتند. به منظور ایجاد نقشه‌های رستری برای فرم زمین، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و طرح‌های آبخیزداری، ابتدا به هر

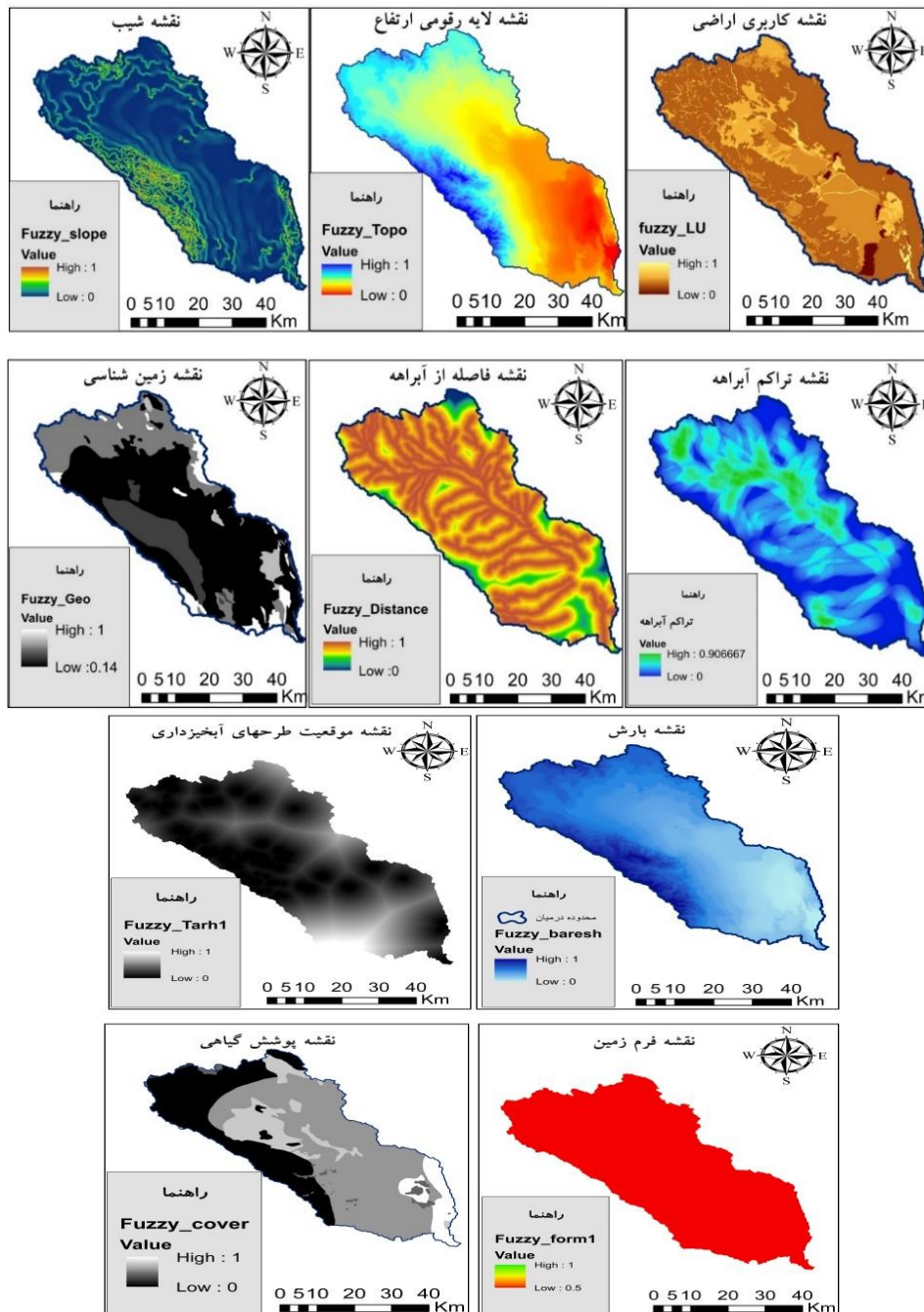




شکل ۳- نقشه رس تر شده هریک از زیرمعیارهای مورد استفاده در پژوهش  
 Figure 3. Rasterized map of each of the sub-criteria used in this study.

دارند، برای فازی کردن نقشه‌های ارتفاع، شیب، فرم زمین، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، بارش، تراکم آبراهه و پوشش گیاهی از رابطه مستقیم، و برای فازی‌سازی نقشه فاصله از آبراهه از رابطه معکوس استفاده شده است. نقشه‌های فازی‌سازی شده هریک از زیرمعیارها در شکل شماره (۴) نشان داده شده است.

در ادامه پس از تهیه نقشه‌های رستری، به‌منظور نرمال‌سازی مقادیر پیکسل‌های هریک از نقشه‌های رستری، اقدام به فازی کردن آنها با دستور Fuzzy membership شده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که برخی از معیارها با خطر سیل‌خیزی رابطه مستقیم (هرچه ارزش پیکسل‌ها بیشتر باشد خطرپذیری سیل بالاتر است) و برخی رابطه عکس (هرچه ارزش پیکسل‌ها کمتر باشد، خطرپذیری سیل بالاتر است)

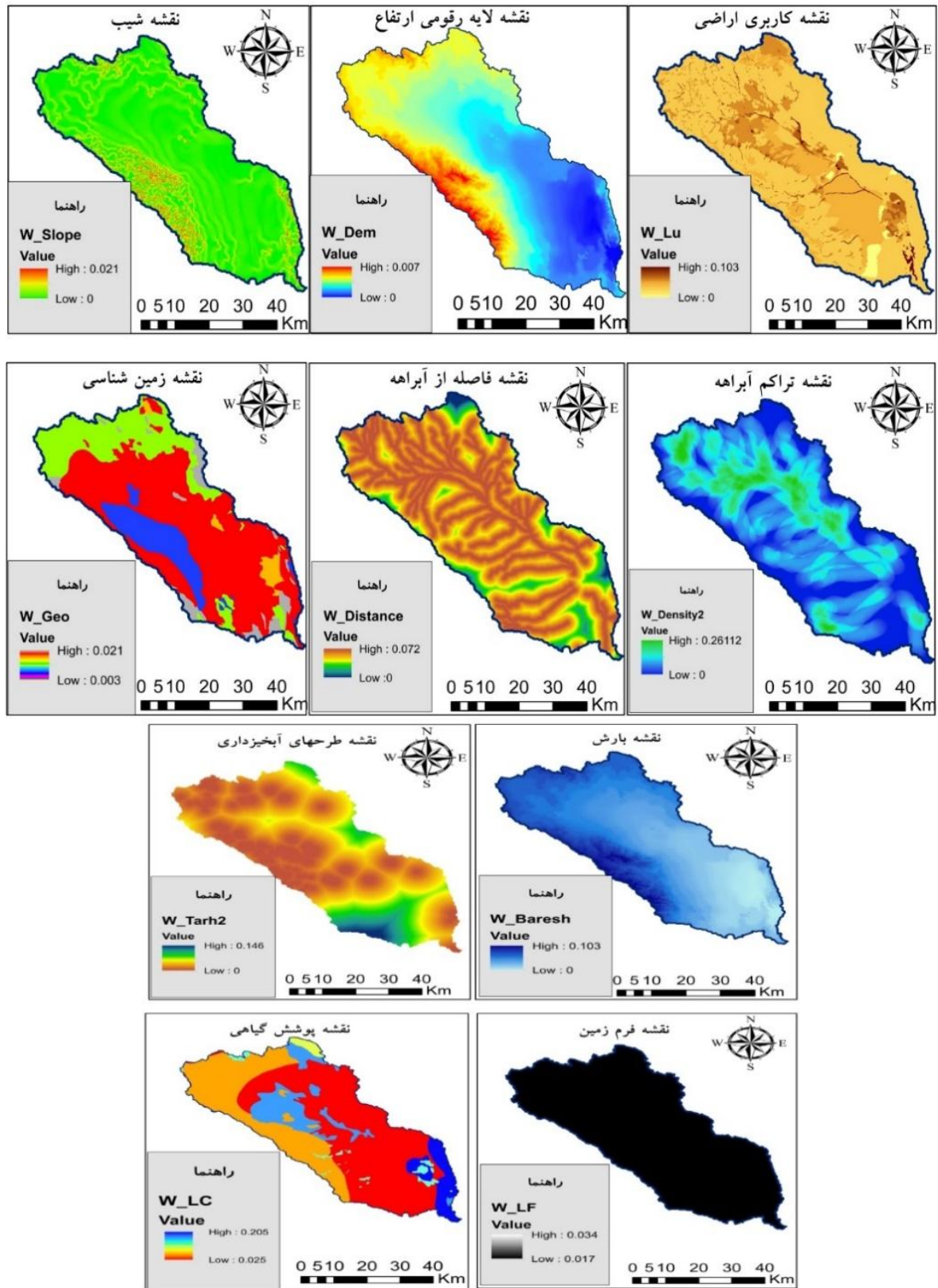


شکل ۴- نقشه فازی سازی شده هریک از زیرمعیارها  
Figure 4. Fuzzified map of each sub-criterion.

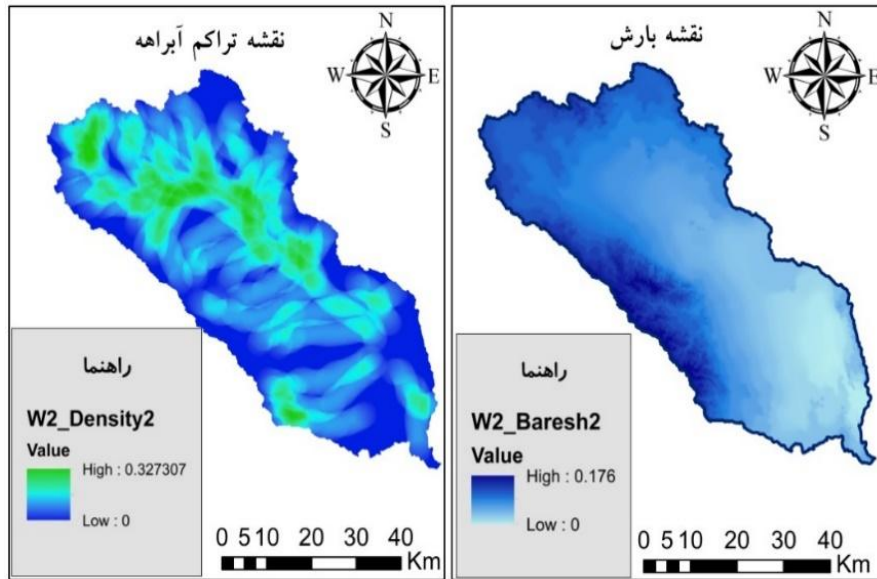
باتوجه به شکل شماره (۴)، در تمامی نقشه‌ها هرچه ارزش هر پیکسل بیشتر باشد، خطر وقوع سیل در آن پیکسل بیشتر می‌باشد. در گام بعد اوزان برآورد شده از روش AHP در نرم‌افزار Expert Choice با کمک پرسشنامه‌ها، با استفاده از ابزار Raster calculator روی نقشه‌های فازی شده اعمال گردید. لازم به ذکر است به‌جهت مشاهده نتایج اجرای طرح‌های آبخیزداری بر روی خطرپذیری سیل، دو سری نقشه وزن دهی شده تهیه گردید که در سری اول عامل فعالیت‌های انسانی (طرح‌های آبخیزداری) در فرآیند تهیه نقشه پهنه‌بندی اثر داده شده و در سری دوم عامل فعالیت انسانی اثر داده نشده است و وزن مربوط به این عامل بر روی دو عامل مهم دیگر یعنی لایه بارش و لایه تراکم آبراهه (بر اساس وزن‌های بالایی که در AHP اختصاص داده بودند) اثر داده شده است. شکل شماره (۵) نقشه وزن دهی شده سری اول (اثر هر ۱۰ عامل در تهیه نقشه پهنه‌بندی) و شکل شماره (۶) نقشه وزن دهی شده دو لایه بارش و تراکم آبراهه (با اوزان تغییر یافته) را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل شماره ۵، وزن هر معیار در نقشه فازی شده آن معیار، اثر داده شده است. به‌طوری که ارزش پیکسل‌ها در نقشه‌های شیب در بازه ۰ تا ۰/۰۲۱، لایه رقمی ارتفاع بین ۰ تا ۰/۰۰۷، کاربری اراضی بین ۰ تا ۰/۱۰۳، زمین‌شناسی بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۲۱، فاصله از آبراهه بین ۰ تا ۰/۰۷۲، تراکم آبراهه بین ۰ تا ۰/۲۶۱۱۲، طرح‌های آبخیزداری بین ۰ تا ۰/۱۴۶، بارش بین ۰ تا ۰/۱۰۳، پوشش گیاهی بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۲۰۵ و فرم زمین بین ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۳۴ متغیر است و هرچه ارزش پیکسل در این نقشه‌ها بیشتر باشد، آن پیکسل از نظر خطر وقوع سیلاب در وضعیت خطرناک‌تری قرار دارد. لازم به ذکر است، پس از حذف معیار فعالیت‌های انسانی و اعمال وزن این معیار بر روی دو معیار بارش و تراکم آبراهه، ارزش پیکسل‌های نقشه این دو معیار به‌ترتیب در بازه ۰ تا ۰/۱۷۶ و ۰ تا ۰/۳۲۷۳۰۷ قرار گرفت.

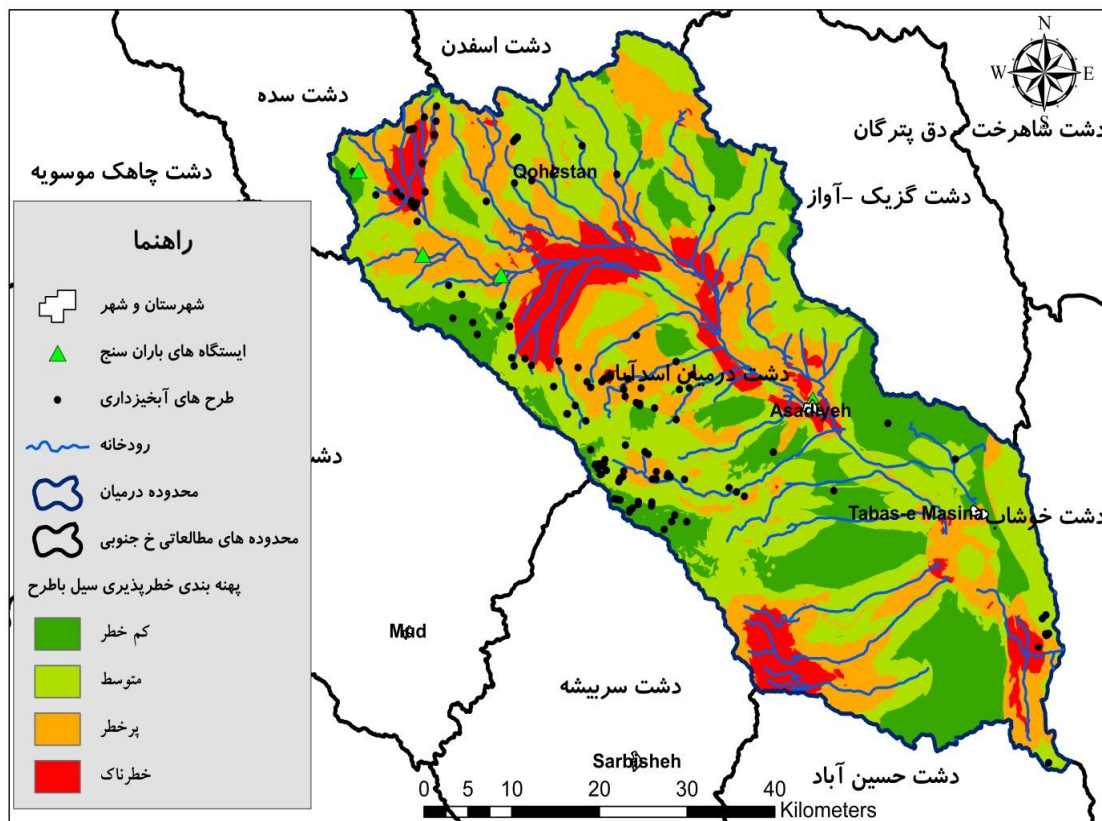
در انتها به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی نهایی، روی تمامی نقشه‌های فازی شده، با استفاده از دستور Fuzzy Overlay عمل جمع فازی صورت پذیرفت و دو نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری سیل (اثر دادن عامل فعالیت انسانی و حذف نقش عامل انسانی) تهیه گردیده است. شکل شماره ۷ و ۸ نقشه‌های پهنه بندی خطر وقوع سیل در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



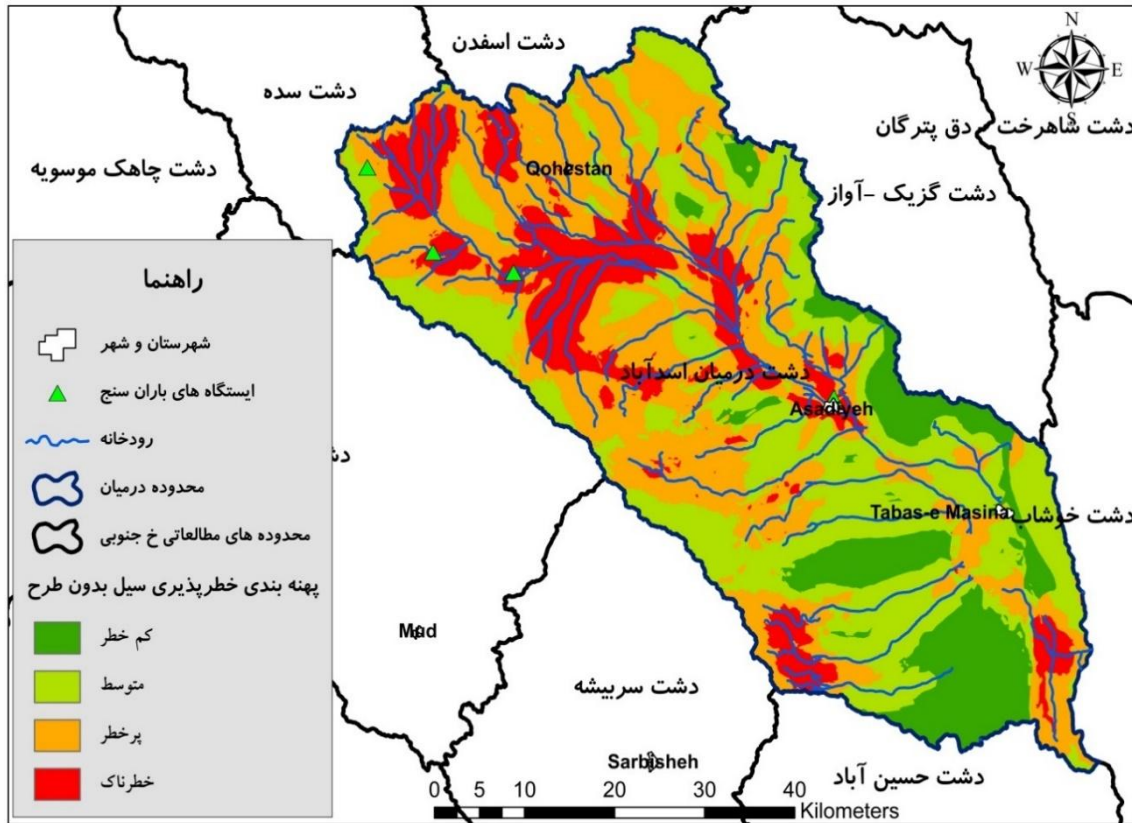
شکل ۵- نقشه وزن دهی شده سری اول  
Figure 5. Weighted map of the first series



شکل ۶- نقشه وزن دهی شده لایه بارش و تراکم آبراهه با اوزان تغییر یافته  
Figure 6. Weighted map of the second series.



شکل ۷- نقشه پهنه بندی خطر وقوع سیل با در نظر گرفتن اثر طرح های آبخیزداری  
Figure 7. Flood risk zoning map considering the effect of watershed plans.



شکل ۸- نقشه پهنه بندی خطر وقوع سیل بدون در نظر گرفتن اثر طرح‌های آبخیزداری

Figure 8. Flood risk zoning map without considering the effect of watershed plans.

کم خطر شده است، اما با حذف اثر طرح‌های آبخیزداری این مناطق در منطقه پرخطر و خطرناک قرار می‌گیرند که نشان دهنده اثرگذاری طرح‌های آبخیزداری در کاهش خطر سیلاب بوده است. لازم به ذکر است در مناطق مذکور طرح‌های آبخیزداری به کار رفته از نوع بند خاکی می‌باشد که سازه‌های مخزنی است و باعث مهار سیلاب می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مساحت مناطق با خیلی زیاد از  $49567/55$  به  $60606/82$  و مناطق با خطر زیاد از  $116976/42$  به  $88824/38$  هکتار کاهش پیدا کرده و مساحت مناطق با خطر متوسط از  $101449/71$  به  $123260/3$  و مناطق با خطر کم از  $39126/18$  به  $64428/01$  هکتار افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد؛ منطقه جنوبی محدوده درمیان از لحاظ خطرپذیری سیلاب در منطقه‌ای امن واقع شده است، چرا که نوع پوشش گیاهی در آن منطقه مرتع، نوع سازند زمین‌شناسی آن مخروط افکنه‌ای و مقدار بارندگی و درصد تراکم آبراهه کم می‌باشد. لازم به ذکر است شهر در میان طبس مسینا به ترتیب در محدوده خطرناک و پر خطر قرار دارند و بایستی در این شهرها نسبت به جانمایی مناسب

### نتیجه‌گیری

سیلاب از مخرب‌ترین وقایع طبیعی شناخته شده است. پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل یکی از کارآمدترین روش‌هایی است که برای کنترل این پدیده طبیعی و شناخت راهکارهای مدیریتی مناسب در جهت مقابله با آن می‌باشد. تحقیقات بسیاری در خصوص تعیین عوامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از روش فازی و AHP در محیط GIS صورت گرفته است. در همین راستا پژوهش حاضر با استفاده از تلفیق مدل‌های فازی و AHP علاوه بر تعیین میزان اثرگذاری عوامل مؤثر در وقوع سیلاب، به بررسی اثر طرح‌های آبخیزداری در کاهش خطر وقوع سیل پرداخته است. نتایج نشان داد زیر معیارهای تراکم آبراهه و پوشش گیاهی به ترتیب با وزن‌های  $0/288$  و  $0/205$  دارای بیشترین اهمیت و زیرمعیار ارتفاع با وزن  $0/007$  دارای کمترین اثرگذاری در وقوع سیلاب در محدوده مطالعاتی مذکور می‌باشند. همچنین بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی تولید شده نشان داد که در مناطق غرب و شمال غرب محدوده مورد مطالعه، وجود طرح‌های آبخیزداری سبب قرار گرفتن این مناطق در بازه

- Criteria Decision Analysis System (Case Study: Sheytoor Watershed in Bafgh), *Journal of Watershed Management Research*, 7(14), 29-37. 10.22126/arww.2022.6667.1218
- Nikolova, V., and Zlateva, P. (2017). *Assessment of flood vulnerability using fuzzy logic and geographical information systems*. In *Information Technology in Disaster Risk Reduction*. First IFIP TC 5 DCITDRR International Conference, ITDRR 2016, Sofia, Bulgaria, November 16–18, 2016, Revised Selected Papers 1 (pp. 254-265). Springer International Publishing. 10.1504/IJSSCI.2008.017590
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., & Li, Y. (2020). Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104868. 10.1016/j.envsoft.2020.104868
- Wu, Y., Zhong, P. A., Zhang, Y., Xu, B., Ma, B., & Yan, K. (2015). Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China. *Natural Hazards*, 78, 635-651. 10.1007/s11069-015-1737-3
- Wu, Z., Shen, Y., & Wang, H. (2019). Assessing urban areas' vulnerability to flood disaster based on text data: A case study in Zhengzhou city. *Sustainability*, 11(17), 4548. 10.3390/su11174548
- Rouhollahi, A., Shahidi, A., Akbarpour, A., & E'tebari, B. (2011). *Zoning of groundwater quality parameters: A case study in Asadabad region, South Khorasan Province*. In *Proceedings of the 4th Iran Water Resources Management Conference (Tehran)*. Retrieved from <https://civilica.com/doc/117445>.
- Mollazehi A, Pudineh M, Khosravi M, Armesh M, Dehvareh A. (2020). Assessment of the Potential Flood Risk in Sarbaz Drainage Basin. *Jgs*. 20(58), 241-260. 10.29252/jgs.20.58.241.
- زیرساخت‌ها و تأسیسات اقدامات لازم انجام شود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی تأثیر حجم مخزن سازه‌های آبخیزداری بررسی گردد. همچنین می‌توان تأثیر مناطق مناسب جهت تغذیه مصنوعی آبخوان‌های محدوده را مورد مطالعه قرار داد و موقعیت مکانی مناسب آن را تعیین کرد.
- منابع**
- Mehrabi, A., Karimi, S. and Safipour, M. (2021). Groundwater Potential Assessment Using Sentinel 1 Radar Data Processing and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Technique (Case Study: the Sirjan Catchment), *Geography and Environmental Planning*, 31(2), 1-24. 10.22108/GEP.2020.122611.1292
- AmirAhmadi, A., Behniafar, A., and Ebrahimi, M. (2011). Flood hazard zonation for Sabzevar urban sustainable development. *Geographical Journal of Environmental Planning*, 16, 33-17. 10.47176/jwss.23.4.38301
- Büchle, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., Ihringer, J., Oberle, P., and Nestmann, F. (2006). Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4), 485-503. 10.5194/nhess-6-485-2006
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655. 10.1016/0377-2217(95)00300-2
- Das, S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. 10.1016/j.rsase.2020.100379
- Dash, P., and Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard areas using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12620. 10.1111/jfr3.12620
- EsfandiaryDarabad, F., Rahimi, M., and Pourmortaza, Gh. (2019). Flood zonation of Agerloo Cay Basin using the L-THIA method and fuzzy logic, *quantitative geomorphological researches*, 8(2), 155-171.
- Mahmoudzadeh, H., and Bakoi, M. (2018). Flood zoning using fuzzy analysis (case study: Sari city), *Journal of Natural Environment Hazards*, 7(18), 51-68. 10.22111/jneh.2018.19885.1238
- Lotfi, H., and Jafari, M. (2012). Urban Immunization Process with the Purpose of Tackling with Natural Disasters of Floods (The Case Study of Tehran), *Geographic Space*, 11(36), 283.
- Hassanzadeh Nafoti, M., and Khajebafghi, H. (2017). Flood Hazard Zoning Using Multiple

## پیوست

در این قسمت پرسش نامه استفاده شده در پژوهش قرار داده شده است.

بسمه تعالی

صاحب‌نظر گرامی

با سلام؛

ضمن عرض تشکر از همکاری شما، مدت زمان تقریبی برای تکمیل این پرسش نامه ۳ دقیقه می‌باشد. خواهشمندم که برای نتیجه هرچه بهتر پژوهش، بنده را یاری کنید.

پرسش نامه‌ای که در دست دارید به‌منظور انجام پژوهشی با عنوان «پهنه بندی خطر وقوع سیل با استفاده از عملگرهای فازی (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی درمیان)» می‌باشد. اطلاعات شخصی پاسخنامه‌های شما صرفاً به‌منظور انجام تحقیق استفاده خواهد شد و در اختیار هیچ فرد، گروه یا سازمانی قرار داده نخواهد شد. به‌منظور انجام این تحقیق نیاز به مشارکت صاحب‌نظران در تخصص‌های مختلف می‌باشد.

۱. محقق جهت طراحی پرسش نامه فعلی (تعیین فهرست اولیه معیارها) ابتدا معیارها را از طریق بررسی تجربیات و مطالعات بین‌المللی و داخلی و بررسی ویژگی‌های طرح‌های برتر انتخاب شده برای اجرای پهنه بندی مختلف در گذشته انتخاب نموده است.

۲. هدف از طرح این پرسش نامه شناسایی میزان اهمیت هر کدام از این معیارها و زیرمعیارها نسبت بر دیگری بر «تأثیر هر معیار بر پهنه بندی مناطق مستعد سیلاب و تأثیر هر زیرمعیار در خوشه خود» می‌باشد.

۳. استحضار دارند که افزایش تعداد شاخص‌ها معمولاً نقشی در مفید بودن آنها در ارزیابی یک مسئله و تصمیم‌گیری ندارد بلکه آنچه در ارزیابی یک مسئله اهمیت دارد این است که اجتماع چندین شاخص بتواند تصویر روشنی از مسئله ارائه کند و کاربر را در درک مسئله مورد بررسی یاری دهد. بنابراین تعیین چندین معیار که امکان تأمین اطلاعات دقیق یا نسبتاً دقیق برای آنها فراهم بوده نتایج بهتری در تصمیم‌گیری ایجاد خواهد کرد.

۴. محقق در نظر دارد با تهیه این پرسشنامه به این هدف نائل آید: به‌دست آوردن درجه اهمیت معیارها و زیرمعیارها

(در خوشه خود) از دیدگاه محققان و پژوهشگران با توجه به دانش فنی و تجربیات ارزنده صاحب‌نظران.

۵. پس از مشخص شدن معیار و وزن آن توسط این پرسشنامه، با استفاده از روش AHP نسبت به تعیین وزن معیار اقدام گردد.

از عنایت، دقت نظر و بردباری شما در تکمیل این پرسشنامه کمال تشکر را دارم.

حنان حنفی و محمد فولادی نصرآباد، دانشجویان دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب دانشگاه بیرجند

اگر در روند پاسخ دهی ابهامی وجود داشت به ایمیل اینجانبان پیام بفرستید.

[hannan.hanafi@birjand.ac.ir](mailto:hannan.hanafi@birjand.ac.ir)

[mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir](mailto:mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir)

## پرسش‌نامه

در تکمیل این پرسش نامه به موارد زیر توجه فرمائید:

۱. کلیه مقایسه‌ها به‌صورت زوجی انجام می‌گیرد با این تفاوت که ابتدا معیارها با هم مقایسه زوجی می‌شوند، سپس زیرمعیارهای هر دسته درون خوشه خود با هم مقایسه خواهند شد. به طور مثال اگر بخواهیم معیارها را بررسی کنیم، ابتدا معیار توپوگرافی را با پوشش زمین مقایسه کرده و سپس این مقایسه را درمورد توپوگرافی با هیدرواقلیم و... انجام می‌دهیم. در مرحله بعد زیرمعیارهای هر معیار با همدیگر مقایسه می‌شوند مثلاً ابتدا زیرمعیارهای توپوگرافی با هم مقایسه شده و سپس زیرمعیارهای پوشش زمین با هم و... مقایسه می‌شوند.

۲. در این مقایسه‌ها از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهد شد، به‌گونه‌ای که اگر عنصر I با عنصر J مقایسه شود، تصمیم‌گیرنده اهمیت عناصر را بر یکدیگر طبق جدول ۹ کمیته تکمیل کند.

۳. در مقایسه معیار I با J اگر اهمیت هر دو معیار یکسان بود عدد ۱ را علامت بزیند. اگر معیار سمت راست مهم‌تر بود به همان اندازه که با اهمیت‌تر است عدد سمت راست انتخاب شود. مثلاً اگر معیار سمت راست سه درجه مهم‌تر بود عدد ۳ سمت راست را علامت بزیند اما اگر سمت چپ مهم‌تر بود عدد سمت چپ را علامت بزیند. دقت کنید فقط عدد یک سمت یعنی سمت معیاری که مهم‌تر است را علامت بزیند.



## نحوه ارزش گذاری ارجحیت در ماتریس مقایسه زوجی

مقدار عددی	قضاوت شفاهی
۱	اهمیت یکسان
۲	اهمیت ناچیز یا ضعیف
۳	اهمیت متوسط
۴	اهمیت متوسط بیشتر
۵	اهمیت قوی
۶	اهمیت بیشتر قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۸	اهمیت خیلی خیلی قوی
۹	حداکثر اهمیت

معیارها و زیر معیارها	
ارتفاع	توپوگرافی
شیب	
فرم زمین	
پوشش گیاهی	پوشش زمین
کاربری اراضی	
تراکم آبراهه	مورفولوژی رودخانه
فاصله از آبراهه	
بارش	هیدرواقلیم
زمین شناسی	زمین شناسی
طرح های آبخیزداری و آبخوان داری	فعالیت های انسانی

رقومی زمین را می توان یک نقشه رقومی رستری دانست، که حاوی اطلاعات ارتفاعی تمامی نقاط یک محدوده است. اگر یک DEM از محدوده مورد مطالعه خود در اختیار داشته

در زیر توضیحاتی از زیرمعیارها جهت رفع ابهامات احتمالی، ارائه شده است:

- ارتفاع: برای این زیرمعیار از لایه مدل رقومی ارتفاع منطقه استفاده می شود. مدل رقومی ارتفاع یا همان مدل

اما اصولی‌ترین روشی که می‌توان برای ایجاد چنین نقشه‌ای در نرم‌افزار GIS اجرا کرد، به‌کارگیری ابزار فاصله اقلیدسی است. این ابزار فاصله تک تک نقاط منطقه تا نزدیک‌ترین رودخانه و آبراهه را نشان می‌دهد. ابزار Euclidean Distance در بین ابزارهای توابع مختلف مجاورت محسوب می‌شود. چنین نقشه‌ای معمولاً در مطالعات و پژوهش‌های مرتبط با مکان یابی یا پهنه‌بندی به کار گرفته می‌شود.

- بارش: این معیار از میانگین بارندگی طولانی مدت ایستگاه‌های باران سنجی منطقه حاصل می‌شود. برای این نقشه، به هر ایستگاه یک میانگین بارش نسبت داده شده و سپس برای کل منطقه درون‌یابی می‌شود و رس‌تر خروجی آن دارای مقدار بارش برای هر سلول از منطقه است.

- زمین‌شناسی: نوعی نقشه تخصصی است که برای نمایش پدیده‌های زمین‌شناسی به‌کار می‌رود. این نقشه‌ها واحدهای سنگ و چینه را در جایی که در سطح زمین رخمون می‌یابند، با استفاده از رنگ‌ها و علائم نشان می‌دهد.

- طرح‌های آبخیزداری و آبخوان‌داری: راهکارهای پیشگیرانه کنترل و بهره‌برداری از رواناب‌ها و سیلاب‌ها در بخش‌های مختلف حوزه‌های آبخیز است که می‌تواند با جلوگیری و کاهش خسارات سیل، تهدید این نعمت الهی را به فرصت تبدیل کند. اجرای این طرح‌ها با هدف کنترل سیلاب، جلوگیری از فرسایش خاک و تغذیه سفره‌های آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال: ایجاد بندهای گابیونی در طول مسیل‌ها، ایجاد بسترهای جاذب برای تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی، ایجاد بندهای خاکی در مسیر سیلاب‌ها و غیره.

\*در جداول زیر میزان اهمیت هر یک از معیارها و زیرمعیارها را نسبت به هم دیگر تعیین نمایید: (در کادرهای زیر گزینه موردنظر را علامت بزنید).

باشید، در نرم‌افزار ArcGIS روی هر نقطه‌ای کلیک کنید، ارتفاع آن نقطه را خواهید دید.

- شیب: تابع شیب حداکثر مقدار تغییراتی که ارتفاع یک سلول نسبت به مقدار ارتفاع ۸ سلول مجاور خود دارد را محاسبه می‌کند. برای مثال در یک کاربرد آبی شیب‌دارترین زاویه حرکت به سمت پایین آب را از موقعیت یک سلول ارتفاعی به سمت یک سلول مجاور که دارای کمترین ارتفاع در بین ۸ سلول مجاور می‌باشد را تعیین می‌کند. برای این کار از روی لایه DEM، نقشه Slope منطقه تهیه می‌گردد.

- فرم زمین: نقشه شکل زمین ورودی بسیاری از مدل‌ها است بنابراین این نوع نقشه ترکیبی از سه نقشه طبقه‌بندی ارتفاعی، شیب زمین و جهت شیب می‌باشد که برای این منظور از لایه Land form استفاده می‌شود.

- پوشش گیاهی: به کلیه رستنی‌های سطح هر منطقه شامل درخت، درختچه، گونه‌های مرتعی که در زیستگاه‌های طبیعی و مصنوعی وجود دارد. به تعبیری دیگر پوشش گیاهی شامل کلیه گونه‌های گیاهی یک ناحیه و نحوه پراکنش مکانی و زمانی آنهاست. لایه‌ای است (Land cover) که پوشش گیاهی منطقه را دسته‌بندی می‌کند و پس از رستری کردن آن، پوشش گیاهی هر سلول مشخص می‌شود.

- کاربری اراضی: کاربری زمین یا کاربری اراضی، نحوه استفاده از زمین است. در واقع برنامه ریزی کاربری زمین تعیین نوع فعالیت قابل استقرار روی زمین و چگونگی اجرای آن فعالیت را مشخص می‌سازد. این معیار تحت لایه Land use استفاده می‌شود.

- تراکم آبراهه: نسبت طول کل شبکه هیدروگرافی شامل کلیه آبراهه‌ها (فرعی و اصلی (به مساحت حوضه، تراکم زهکشی را نشان می‌دهد. این خصوصیت بیانگر وضعیت رواناب و فرسایش در قسمت‌های مختلف آن می‌باشد.

- فاصله از آبراهه: نشان دهنده فاصله تا رودخانه می‌باشد، در GIS می‌توان از روش‌ها و ابزارهای مختلفی استفاده نمود.

معیار	اولویت															معیار		
توپوگرافی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پوشش زمین
توپوگرافی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	هیدرواقليم
توپوگرافی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمین شناسی
توپوگرافی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فعالیت انسانی
توپوگرافی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مورفولوژی رودخانه
پوشش زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	هیدرواقليم
پوشش زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمین شناسی
پوشش زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فعالیت انسانی
پوشش زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مورفولوژی رودخانه
هیدرواقليم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مورفولوژی رودخانه
هیدرواقليم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمین شناسی
هیدرواقليم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فعالیت انسانی
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مورفولوژی رودخانه
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فعالیت انسانی
فعالیت انسانی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مورفولوژی رودخانه

- حال مقایسه زوجی زیرمعیارهای هر معیار در خوشه خود را امتیازدهی کنید.

زیرمعیار ۱	اولویت																زیرمعیار ۲	
ارتفاع	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب
ارتفاع	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فرم زمین
شیب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فرم زمین
زیرمعیار ۳	اولویت																زیرمعیار ۴	
پوشش گیاهی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کاربری اراضی
زیرمعیار ۵	اولویت																زیرمعیار ۶	
تراکم آبراهه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	فاصله از آبراهه

- معیارهایی (هیدرواقلیم، زمین شناسی و فعالیت های انسانی) که فقط یک زیرمعیار داشته اند، مقایسه زوجی ندارند و وزن زیرمعیار برابر یک است، لذا آورده نشده اند.

در انتها ممون و سپاسگزارم از وقتی که گذاشتید و ما را با دانش، تخصص و اظهار نظر خود در انجام این پژوهش یاری رساندید.

# Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 125-138

10.22077/jaaq.2025.8579.1083

## Assessment of Groundwater Hardness in Khorramabad Plain Using Hybrid Models Based on Metaheuristic Algorithms

Hamidreza Babaali<sup>1</sup> | Ebrahim Nohani<sup>2</sup> | Reza Dehghani<sup>3</sup>✉

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Khorramabad branch, Khorramabad, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
3. PhD in Water Sciences and Engineering, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Lorestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Khorramabad, Iran.

✉Corresponding Author: [A.saberinasr@scu.ac.ir](mailto:A.saberinasr@scu.ac.ir)

Received:  
15 November 2024

Accepted:  
01 December 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Groundwater,  
Khorramabad,  
Support Vector Regression,  
Metaheuristic.*

### Extended abstract

#### Introduction

Over the past century, water scarcity has become a significant global issue due to climate change, population growth, urbanization, and agriculture. In response to this problem, groundwater resources have been used extensively for various purposes, including agriculture, industry, and drinking. However, the increasing global demand for water has led to the overexploitation of groundwater and a decline in quality. Groundwater pollution has adversely affected the accessibility and suitability of groundwater and is detrimental to human health. Furthermore, cleaning up polluted groundwater is costly and time-consuming due to the complex nature of groundwater systems and the invisible threat of groundwater contamination. Therefore, assessing and monitoring groundwater quality is crucial, considering the potential risk of groundwater contamination and its effects on human usability. In recent years, models based on artificial intelligence approaches have been employed due to the non-linear and complex nature of geohydrological issues. Khorramabad is one of the important regions of Lorestan province, where the drinking water of the city is supplied from groundwater resources.

**Cite this article:** Babaali, H., Nohani, E. & Dehghani, R. (2024). Assessment of groundwater hardness in Khorramabad plain using hybrid models based on metaheuristic algorithms, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 125-138. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8579.1083>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

In recent years, the quality of drinking water in this region has faced problems. The quality of groundwater in this area has decreased annually from the past to the present, posing a serious threat to the health of living organisms. Therefore, it is essential to analyze and investigate the quality of groundwater in this region using a hybrid model of support vector regression with metaheuristic algorithms to estimate the hardness of groundwater.

### Methodology

To model the hardness of groundwater in the Khorramabad plain, a support vector regression (SVR) model was used in conjunction with wavelet, grey wolf, and firefly algorithms. In the SVR model, activation functions known as kernels were also utilized. These kernels included radial basis, polynomial, and linear functions, which were examined in this research. For this purpose, the values of the qualitative parameters of the Nasirvand piezometric well were normalized and then fed into the SVR model. In recent years, because the parameter values of the kernel functions in the SVR model are chosen randomly, optimization algorithms have been used to increase the model's accuracy and reduce errors. In this study, wavelet, grey wolf, and firefly algorithms were also used to optimize the tuning parameters to improve the model's performance. Therefore, in this research, after entering the input parameter data into the model and optimizing the tuning parameters, a hybrid model structure is formed, leading to the computational response of the model. Since the stopping criterion in training artificial intelligence models is the error rate, the model stops at the lowest error rate, and the output is generated.

### Results and Discussion

The results showed that hybrid models in the combined scenario, which included all input parameters, had less error compared to other scenarios. Therefore, increasing the number of effective parameters in hybrid models based on support vector regression leads to an increase in the model's performance. Also, all models show better accuracy with the radial basis kernel function. The results of the studied models, according to the evaluation criteria, showed that the support vector regression-wavelet model with the highest correlation coefficient of 0.917, the lowest root mean square error (ppm) of 0.190, the lowest mean absolute error (ppm) of 0.115, and the highest Nash-Sutcliffe coefficient of 0.920, showed better performance in the validation stage.

### Conclusions

The results of the study, based on the evaluation of scenarios consisting of input parameters, showed that in all the models examined, increasing the number of effective parameters in different modeling methods leads to better performance in estimating the hardness of groundwater. Furthermore, the results from the evaluation criteria indicated that the support vector regression-wavelet model has high accuracy and negligible error. Additionally, according to the examined graphs, the support vector regression-wavelet model estimated the groundwater hardness values close to their actual amounts.

Overall, the results of this study indicate that the use of artificial intelligence models based on the support vector regression approach can be beneficial for estimating the quality of groundwater over a 20-year statistical period for other regions of the country and is a step towards making appropriate management decisions. It is also suggested that to improve the quality of results, precise statistics and long-term datasets should be used, and to evaluate the model, the results should be compared with other regions.

## ارزیابی سختی آب زیرزمینی دشت خرم آباد با استفاده از مدل‌های هیبریدی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری (مطالعه موردی: لندفیل همدان)

حمیدرضا باباعلی<sup>۱</sup> | ابراهیم نوحانی<sup>۲</sup> | رضا دهقانی<sup>۳</sup> ✉

۱. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، خرم‌آباد، ایران
۲. استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.
۳. دکترای علوم و مهندسی آب، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [R.kh72777@gmail.com](mailto:R.kh72777@gmail.com)

### چکیده

در این پژوهش از مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مویک، کرم شب تاب و گرگ خاکستری به منظور برآورد میزان سختی آب زیرزمینی چاه ناصرون واقع در دشت خرم‌آباد استان لرستان استفاده شد. جهت مدل‌سازی از داده‌های کیفی چاه موجود شامل پارامتر هیدروژن کربنات ( $HCO_3$ )، کلرید ( $Cl$ )، سولفات ( $SO_4$ )، منیزیم ( $Mg$ )، کلسیم ( $Ca$ ) و سختی آب ( $TH$ ) همگی بر حسب  $ppm$  در مقیاس زمانی ماهانه در طی سال آبی (۱۴۰۲-۱۳۸۲) به عنوان ورودی و میزان سختی آب زیرزمینی به عنوان خروجی مدل انتخاب گردید. به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از معیارهای ارزیابی ضریب هم‌بستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف استفاده شد. همچنین جهت تحلیل نتایج مدل‌ها از نمودار سری زمانی و باکس پلات و تیلور استفاده شد. نتایج نشان داد سناریوهای ترکیبی در مدل‌های مورد بررسی باعث بهبود عملکرد مدل می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان - مویک عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون بردار پشتیبان - گرگ خاکستری در مدل‌سازی دارد، به گونه‌ای که مدل رگرسیون بردار پشتیبان - مویک با ضریب هم‌بستگی ۰/۹۱۷، کمترین ریشه میانگین مربعات ( $ppm$ ) ۱۹۰ / ۰، کمترین میانگین قدر مطلق خطا ( $ppm$ ) ۰/۱۱۵ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۲۰ در مرحله صحت سنجی در اولویت قرار گرفت. در مجموع نتایج نشان داد استفاده از مدل‌های هوشمند مبتنی بر رویکرد رگرسیون بردار پشتیبان می‌تواند رویکردی مؤثر در مدیریت کیفی آب‌های زیرزمینی باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،

خرم‌آباد،

رگرسیون بردار پشتیبان،

فراابتکاری.

## مقدمه

در طول قرن گذشته، کمبود آب به دلیل تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت، شهرنشینی و کشاورزی به یک مسئله مهم در سطح جهانی تبدیل شده است (Raj and Singh, 2021). در پاسخ به این مشکل، از منابع آب زیرزمینی به طور متناوب برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب استفاده می‌شود (Dwivedi and Pathak, 2007). با این حال، افزایش تقاضای جهانی برای آب منجر به بهره برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت آن شده است. تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی به شدت تحت تأثیر عوامل طبیعی (نفوذ آب دریا و واکنش‌های شست و شوی آب-سنگ) و عوامل انسانی (معدن کاری، آلودگی صنعتی، استفاده بیش از حد از کودها و آفت‌کش‌ها و فاضلاب خانگی) است که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد (Gupta et al., 2020). آلودگی آب‌های زیرزمینی تأثیرات نامطلوبی بر دسترسی و مناسب بودن آب‌های زیرزمینی داشته و برای سلامت انسان مضر است. علاوه بر این، به دلیل سیستم‌های پیچیده آب‌های زیرزمینی و تهدید نامرئی آلودگی‌های آب زیرزمینی، پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین، ارزیابی و پایش کیفیت آب زیرزمینی با توجه به خطر بالقوه آلودگی آب زیرزمینی و اثرات آن بر قابلیت مصرف انسانی، بسیار ضروری است. در سال‌های اخیر به دلیل ماهیت غیر خطی و پیچیده مسائل ژئوهیدرولوژی از مدل‌های مبتنی بر رویکرد هوش مصنوعی استفاده نمودند. این مدل‌ها از طبیعت موجودات زنده الهام گرفته و قادرند مسائل با پیچیدگی و گستردگی فراوان را حل نمایند. این مدل‌ها در زمینه پایش بینی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی مورد توجه محققین قرار گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود

در پژوهشی ارزیابی مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-رقابت استعماری و رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری به منظور پایش بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت سلماس واقع در کشور ایران بررسی نمودند نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری از عملکرد بهتری برخوردار است (Emami et al., 2021). در پژوهشی جهت پایش بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت

خارطوم سودان از مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند در این پژوهش از ۱۱ پارامتر فیزیکی و شیمیایی جمع آوری شده از ۲۰ چاه آب زیرزمینی pH، EC، TDS، TH، Cl<sup>-</sup>، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>، NO<sub>3</sub><sup>-</sup>، Ca<sup>+2</sup>، Mg<sup>+2</sup>، Na<sup>+</sup> و HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> بهره گرفتند نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان از خطای کمتری نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی برخوردار است (Mohammed et al., 2023). جهت پایش بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت حمیر پر هیمالچال واقع در هند از مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان از دقت بیشتری نسبت به مدل عصبی مصنوعی برخوردار است (Chandel et al., 2024). در پژوهشی جهت پایش بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت مراغه واقع در کشور ایران از مدل‌های شبکه‌های عصبی پایش‌خور، رگرسیون بردار پشتیبانی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی استفاده نمودند نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان از عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است (Nourani et al., 2024).

در مجموع با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، مدل هوش مصنوعی رگرسیون بردار پشتیبان به عنوان ابزاری کارآمد در برآورد کیفیت آب‌های زیرزمینی و مسائل ژئوهیدرولوژی می‌باشد. امروزه به منظور افزایش کارایی و بهبود عملکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان، از ترکیب این مدل با الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان یک راهکاری مناسب جهت پایش بینی میزان سختی آب زیرزمینی استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز از مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب و رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری جهت تخمین میزان سختی آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد واقع در استان لرستان استفاده شد. شهرستان خرم‌آباد یکی از مناطق مهم استان لرستان می‌باشد به گونه‌ای که آب شرب این شهرستان از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و در سال‌های اخیر کیفیت آب شرب این منطقه با مشکل مواجه شده است به گونه‌ای که در از گذشته تاکنون کیفیت آب زیرزمینی این منطقه سالانه کاهش یافته و این سبب مخاطره جدی برای سلامت موجودات زنده می‌شود. بنابراین تحلیل و بررسی کیفیت آب زیرزمینی این منطقه با شرایط سرمایه گذاری



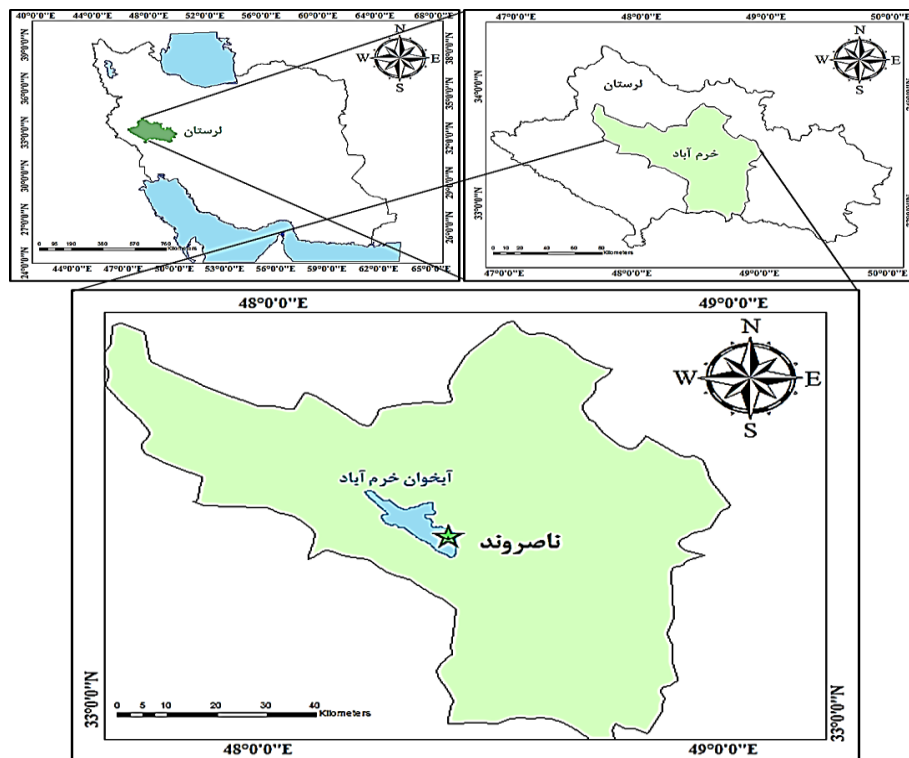
می‌باشد. همچنین متوسط بارش سالانه محدوده مطالعاتی خرم‌آباد ۵۰۹ میلی‌متر و متوسط دمای آن ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد است. سفره آبدار اصلی دشت خرم‌آباد را رسوبات آبرفتی تشکیل می‌دهد که این دشت دارای یک حلقه چاه پیژومتر با آمار همگن بوده و فاقد آمار و اطلاعات مفقود است که در شکل ۱ قابل‌مشاهده است. همچنین جهت مدل‌سازی از پارامترهای هیدروژن کربنات ( $\text{HCO}_3$ )، کلرید ( $\text{Cl}$ )، سولفات ( $\text{So}_4$ )، منیزیم ( $\text{mg}$ ) و کلسیم ( $\text{ca}$ ) و به‌عنوان ورودی و سختی آب ( $\text{TH}$ ) به‌صورت ماهانه که در شرکت آب منطقه‌ای لرستان طی بازه زمانی ۱۳۸۲-۱۴۰۲ در دسترس بود، استفاده گردید. که ۸۰٪ داده‌ها برای مدل‌سازی و ساخت مدل (دوره آموزش) و ۲۰ درصد آن برای صحت‌سنجی و یا ارزیابی مدل (دوره تست) می‌باشد. جدول (۱) موقعیت جغرافیایی چاه‌های پیژومتر موردبررسی نشان داده شد. بدین‌منظور برای مدل‌سازی پارامترهای هیدروژن کربنات ( $\text{HCO}_3$ )، کلرید ( $\text{Cl}$ )، سولفات ( $\text{So}_4$ )، منیزیم ( $\text{mg}$ ) و کلسیم ( $\text{ca}$ ) و به‌عنوان ورودی و سختی آب ( $\text{TH}$ ) به‌عنوان پارامتر خروجی مدل انتخاب شد.

اقتصادی، تولید محصولات آبی، گردشگری و موقعیت ویژه جغرافیایی برنامه‌ریزی آمایش استان لرستان و حتی کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، امری لازم و ضروری است. از طرف دیگر اگرچه استفاده از مدل رگرسیون بردار پشتیبان به‌طور گسترده برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی این منطقه استفاده شده است. تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده و مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و کرم شب‌تاب در این منطقه انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با هدف ترکیب با مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای برآورد میزان سختی آب زیرزمینی شهرستان خرم‌آباد استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دشت خرم‌آباد در مرکز استان لرستان واقع در کشور ایران بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع منطقه ۱۹۰۳ متر و حداقل آن ۹۲۹ متر و مساحت این محدوده مطالعاتی ۲۵۱۷ کیلومترمربع



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Study area

جدول ۱ - موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1 - Geographical location of the studied stations

شماره	چاه پیزومتر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	ناصروند	۴۸° ۲۳' ۴۱"	۳۳° ۲۳' ۵۳"	۱۲۳۴

مدل رگرسیون بردار پشتیبان به صورت زیر می باشد (Vapnik, 1998).

(۱)

(۲)

رگرسیون بردار پشتیبان همانند مدل‌های هوش مصنوعی دارای توابع محرکی بوده که کرنل نام دارند این کرنل‌ها شامل کرنل چندجمله‌ای<sup>۱</sup> و کرنل توابع پایه شعاعی<sup>۲</sup> (RBF) و کرنل خطی می‌باشند و مطابق روابط زیر برآورد می‌شوند (Vapnik and Chervonenkis, 1991; Basak et al., 2007). در این پژوهش نیز از این سه تابع کرنل استفاده شد. همچنین مدل رگرسیون بردار پشتیبان در نرم‌افزار متلب کدنویسی شد.

(۳)

(۴)

(۵)

### سناریوی گرگ خاکستری

گرگ خاکستری GWO یک الگوریتم شبیه‌سازی بوده که از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری و فرآیند سلسله‌مراتبی بهره گرفته است (Ostu, 1979). این الگوریتم بر مبنای جمعیت بوده و به‌سادگی به مسائل با ابعاد قابل‌گسترش قابل‌تعمیم است. در این الگوریتم شکارچیان رأس، گرگ‌های خاکستری هستند که در بالای هرم قرار می‌گیرند. این گرگ‌ها در یک دسته قرار دارند، که هر گروه ۵-۱۲ عضو به‌طور متوسط دارد. گرگ‌های واقع در رأس هرم دارای وظایف خاصی بوده و

در این پژوهش داده‌های مورد استفاده به صورت سری زمانی ماهانه از شرکت آب منطقه‌ای لرستان اخذ شد. سپس طول دوره آماری که همگن بوده و فاقد داده گمشده می‌باشد، انتخاب شد. همچنین در این پژوهش از پارامترهایی که مقادیر آنها ثابت و در دسترس بود استفاده شد. به‌منظور یکپارچه سازی داده‌های مورد استفاده فرآیند نرمال‌سازی بر روی داده‌ها صورت گرفت و سپس وارد مدل‌های هوشمند مبتنی بر رویکرد ماشین بردار پشتیبان شدند. امروزه به دلیل افزایش دقت و کارایی مدل‌های هوشمند از فرآیند بهینه نمودن پارامترهای تنظیم مدل‌های هوش مصنوعی استفاده می‌نمایند که به صورت اختصار مدل و الگوریتم‌های مورد بررسی در زیر به اختصار تشریح می‌گردد. در این پژوهش نیز از الگوریتم های موجک، گرگ خاکستری و کرم شب تاب جهت بهینه نمودن پارامترهای تنظیم توابع فعال‌سازی (کرنل) مدل رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شد. جهت فرآیند مدل‌سازی ۸۰ درصد داده‌ها از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ برای آموزش و ۲۰ درصد باقی مانده از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ برای آزمون یا صحت سنجی به صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس، بعد از ساخت مدل داده‌های ورودی وارد مدل شده و منجر به پاسخ خروجی می‌گردد. در نهایت پاسخ خروجی طبق شاخص‌های ارزیابی و نمودارهای کیفی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### رگرسیون بردار پشتیبان

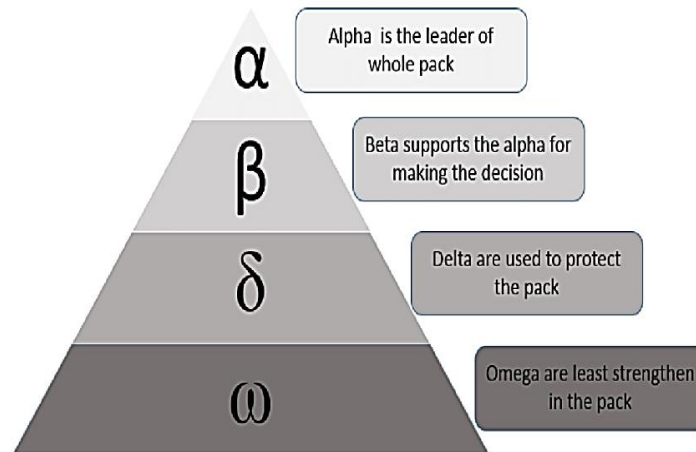
رگرسیون بردار پشتیبان یکی از روش‌های هوش مصنوعی می‌باشد که بر مبنای تئوری بهینه سازی و از قانون کمینه سازی خطا پیروی می‌نماید که این امر سبب می‌گردد به یک جواب بهینه کلی منجر شود (vapnik, 1995). در مدل رگرسیون SVR که شامل تابعی است با متغیرهای وابسته  $Y$  می‌باشد که این متغیر وابسته از چند متغیر مستقل  $X$  و مقداری خطا تشکیل شده است. همانطور که در مسائل رگرسیون مشاهده می‌شود میان متغیر وابسته و مستقل رابطه جبری مانند زیر وجود دارد که در ساختار

1. Polynomial

2. Radial Basis Functions (RBF)

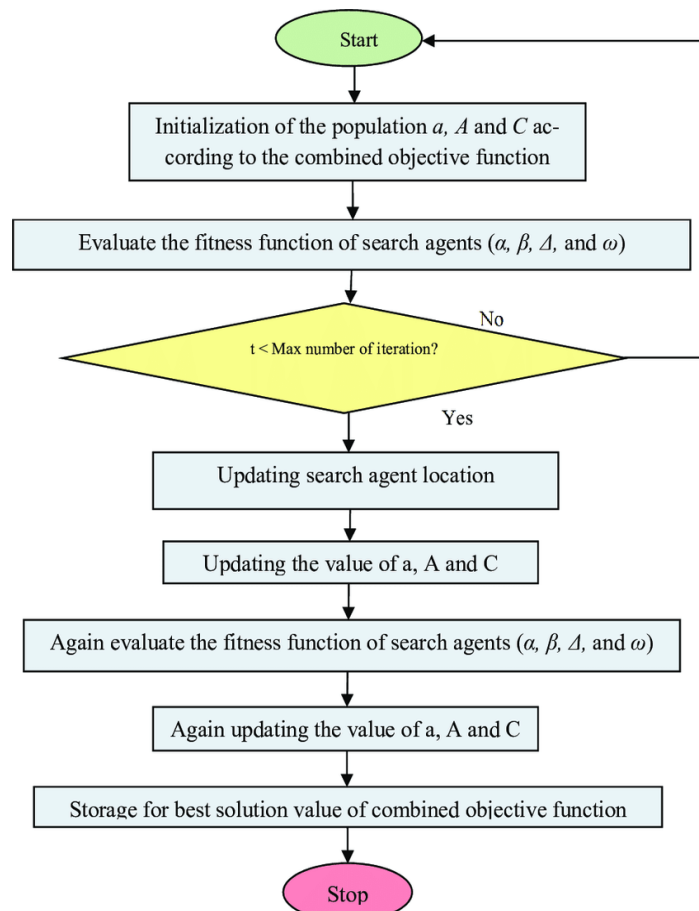
آلفا ( $\alpha$ )، بتا ( $\beta$ )، دلتا ( $\delta$ ) و امگا ( $\omega$ ) برای شبیه‌سازی سلسله‌مراتب رهبری استفاده شده است. ( $\alpha$  آلفا: مناسب‌ترین جواب،  $\beta$  بتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از  $\alpha$ ، دلتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از  $\alpha$  و  $\beta$ ، امگا: مابقی راه‌حل‌های کاندید شده).

سلسله‌مراتب تسلط اجتماعی دقیقی دارند. در هر گله گرگ‌ها ۴ درجه جهت شکار کردن وجود دارد. در این سناریو بهینه‌سازی، از رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله‌مراتب رهبری و روش شکار آن‌ها سناریو برداری می‌شود. در این سناریو از چهار نوع گرگ خاکستری شامل



شکل ۲- سناریو سلسله‌مراتبی گرگ‌ها (Khan et al., 2018)

Figure 2 - Wolves Hierarchy Scenario (Khan et al., 2018)



شکل ۳. نمودار جریان‌ی سناریو گرگ خاکستری (Chawla et al., 2019)

Figure 3. Flowchart of the Gray Wolf Scenario (Chawla et al., 2019)

## تبدیل موجک

شب تاب جهت حل مسائل استفاده می‌شود (Yang, 2008). در الگوریتم کرم شب‌تاب هر راه‌حل مسئله به‌صورت یک کرم شب‌تاب در نظر گرفته می‌شود و کرم‌های شب‌تاب برحسب شایستگی می‌توانند از خود نور تولید و سایر کرم‌های شب‌تاب را به سمت خود جذب نمایند. این الگوریتم، یک الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت محور و تصادفی می‌باشد که اولین بار توسط یانگ به جامعه علمی معرفی شد (Yan et al., 2012). این الگوریتم بر مبنای رفتار کرم‌های شب‌تاب در جذب جفت عمل می‌کند. سه فرضیه اساسی این الگوریتم به‌صورت زیر است.

الف) برای کرم‌های شب‌تاب جنسیت خاصی در نظر گرفته نمی‌شود

ب) هر کرم شب‌تاب به کرم‌های شب‌تاب دیگر با توجه به شدت نور آن‌ها جذب می‌شود

ج) در مسائل ماکزیمم سازی میزان شدت نور با تابع هدف رابطه مستقیم دارد و در مسائل مینیمم سازی شدت نور با تابع هدف رابطه عکس دارد.

میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب نسبی بوده و به فاصله بین دو کرم شب‌تاب و ضریب جذب نور بستگی دارد که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\beta(r) = \quad (6)$$

در این رابطه  $\beta$ ، میزان جذابیت کرم درخشان‌تر در  $r=0$  است (فاصله کرم شب‌تاب کم‌نور نسبت به کرم شب‌تاب پر نور تر است). موقعیت کرم  $i$  ام پس از حرکت به سمت کرم  $j$  ام که درخشان‌تر است از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$(7)$$

$$(8)$$

Rand عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و  $\alpha$  بین ۰ و ۱ است و پارامتر تصادفی سازی نامیده می‌شود.

## معیار ارزیابی

در این پژوهش جهت ارزیابی مدل‌های مورد بررسی به‌منظور تخمین کیفیت آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد از شاخص‌های ارزیابی زیر استفاده شد.

تبدیل موجک به‌عنوان روشی جایگزین برای تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه ارائه‌شده است و هدف از ارائه‌ی آن، غلبه بر مشکلات مربوط به قدرت تفکیک‌پذیری فرکانس در تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه است. در تبدیل موجک همانند تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه، سیگنال موردنظر به پنجره‌هایی تقسیم‌شده و تبدیل موجک بر روی هرکدام از این پنجره‌ها به‌صورت جداگانه انجام می‌گیرد (Wang et al., 2000). اما مهم‌ترین تفاوت آن‌ها در این است که در تبدیل موجک علاوه بر اینکه قدرت تفکیک فرکانس‌های یک سیگنال یا طول پنجره، متناسب با نوع فرکانس تغییر می‌کند، هم‌زمان عرض پنجره یا مقیاس فرکانس نیز متناسب با نوع فرکانس تغییر می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، در تبدیل موجک به‌جای فرکانس، مقیاس وجود دارد. یعنی تبدیل موجک، نوعی تبدیل زمان - مقیاس است. بر همین اساس با استفاده از تبدیل موجک، در مقیاس‌های بالا سیگنال منبسط‌شده و جزئیات سیگنال قابل تجزیه و تحلیل است و در مقیاس‌های پایین سیگنال منقبض‌شده و کلیات سیگنال قابل‌بررسی می‌باشد. یک موجک به‌معنای موج کوچک، بخشی یا پنجره‌ای از سیگنال اصلی است که انرژی آن در زمان متمرکز شده است. با استفاده از تبدیل یا آنالیز موجک می‌توان یک سیگنال یا سری زمانی مادر را به موجک‌هایی با سطح تفکیک و مقیاس‌های مختلف تجزیه کرد. بنابراین موجک‌ها نمونه‌های انتقال‌یافته<sup>۲</sup> و مقیاس‌شده‌ی<sup>۳</sup> سیگنال مادر هستند که نوساناتی در یک طول متناهی داشته و شدیداً میرا هستند (Nourani et al., 2018). بر اساس این ویژگی مهم تبدیل موجک، می‌توان سری‌های زمانی نا مانا و گذرا<sup>۴</sup> را به‌صورت موضعی مورد تجزیه و تحلیل قرارداد (shin et al., 2005).

## الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد که از رفتار موجودات زنده الهام گرفته شده است. این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری بوده که در حل مسائل پیچیده بسیار کارایی دارد. این الگوریتم از رویکرد گروهی الهام گرفته به‌صورتی که از حالت نورافشانی کرم‌های

2 Translation

3Dilation

4 Transient

آب زیر زمینی از اهمیت بالاتری نسبت به دیگر پارامترها برخوردار می‌باشد بنابراین این پارامتر به‌عنوان متغیر هدف انتخاب شد. در جدول ۱ ویژگی‌های آماری پارامتر استفاده‌شده، ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت تست، به‌صورت تصادفی، که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را پوشش دهد، انتخاب شد (Nagy et al., 2002; Kisi et al., 2006). یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی، انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی است. در مدل‌های هوشمند انتخاب ورودی‌های اولیه مناسب و تأثیرگذار در پدیده به‌منظور آموزش ماهیت سازوکار حاکم بر پدیده باعث بهبود عملکرد خواهد شد بنابراین در سناریو سازی میزان میزان سختی آب زیر زمینی نیز سعی گردید تا مؤثرترین داده‌های مشاهداتی به‌عنوان داده‌های آموزشی انتخاب شود (Dehghani et al., 2020). بدین‌منظور ترکیب‌های مختلفی از پارامتر ورودی به‌منظور دستیابی به مدل بهینه جهت تخمین میزان سختی آب زیر زمینی استفاده شد که در جدول ۲ آمده است.

به‌منظور مدل‌سازی میزان سختی آب زیر زمینی دشت خرم‌آباد از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های موجک، گرگ خاکستری و کرم شب تاب استفاده شد. همچنین در مدل رگرسیون بردار پشتیبان از توابع محرکی که کرنل نام دارند، استفاده شد این توابع شامل توابع پایه شعاعی، چندضلعی و خطی می‌باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور مقادیر پارامترهای کیفی چاه پیژومتری ناصروند نرمال‌سازی شده سپس وارد مدل رگرسیون بردار پشتیبان می‌شود لازم به ذکر است فرآیند نرمال‌سازی مطابق رابطه (۱۳) صورت گرفت (Zhu et al., 2007). در سال‌های اخیر به‌دلیل آنکه در مدل رگرسیون بردار پشتیبان مقادیر پارامترهای تنظیم توابع کرنل به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردند از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت افزایش دقت و کاهش خطای مدل استفاده شده است (Dehghani and Torabi, 2021). در این پژوهش نیز جهت افزایش عملکرد مدل از الگوریتم‌های موجک، گرگ خاکستری و کرم شب تاب جهت بهینه نمودن مقادیر پارامترهای تنظیم استفاده شد. بنابراین در این پژوهش بعد از ورود اطلاعات پارامترهای ورودی به مدل و بهینه نمودن پارامترهای تنظیم ساختار مدل هیبریدی شکل گرفته و

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad 1 \leq R \leq 1 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (11)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{y})^2} \quad \infty \leq NS \leq 1 \quad (12)$$

در روابط بالا،  $R$  ضریب هم‌بستگی،  $RMSE$  ریشه میانگین مربعات خطا برحسب  $NS$  معیار نش سانتکلیف،  $y_i$  و  $x_i$  به‌ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سختی آب زیرزمینی در گام زمانی  $i$  ام،  $N$  تعداد گام‌های زمانی،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  نیز به‌ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سختی آب زیرزمینی می‌باشد. علاوه بر معیارهای فوق از نمودارهای پراکنش و سری زمانی مقادیر مشاهداتی - محاسباتی نسبت به زمان نیز جهت مقایسه و تحلیل بیشتر استفاده می‌گردد.

## نتایج و بحث

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی میزان سختی آب زیر زمینی دشت خرم‌آباد واقع در استان لرستان از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های موجک، کرم شب تاب و گرگ خاکستری استفاده شد هیدروژن کربنات ( $HCO_3$ )، کلرید ( $Cl$ )، سولفات ( $SO_4$ )، منیزیم ( $mg$ ) و کلسیم ( $ca$ ) و به‌عنوان ورودی و سختی آب ( $TH$ ) به‌عنوان پارامتر خروجی مدل در دوره زمانی ماهانه، سال ۱۴۰۲-۱۳۸۲ برای چاه پیژومتری ناصروند دشت خرم‌آباد به کار برده شد. هدف کلی از مدل‌های هوشمند بیان ارتباط بین متغیرهایی است که یافتن پیچیدگی آن‌ها در طبیعت کاری دشوار با عدم قطعیت بالا است. میزان سختی آب زیر زمینی از پارامترهای مهم هیدرولوژیکی از جمله کیفیت آب است که تخمین آن در گام‌های زمانی آینده از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور در جهت کاهش خطا و همچنین برآورد پارامتر میزان سختی آب زیر زمینی با دقت بالا با استفاده از کمترین پارامترهای ورودی روش ذکرشده مورد استفاده قرار گرفت که در مقایسه با روش‌های تقریبی به‌مراتب عملکرد بهتری را ارائه می‌نماید. هدف از این پژوهش دریافت این پیچیدگی طبیعی بین پارامترهای ژئوهیدرولوژی و ارائه مدل جهت پیش‌بینی در آینده است و از آنجایی که میزان میزان سختی

پشتیبان-موجک در تخمین کلیه مقادیر نسبت به داده‌های مشاهداتی عملکرد بهتری از خود نشان داده است در صورتیکه مدل رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری ضعیف عمل نموده است و مدل رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب نیز از دقت مطلوبی برخوردار است و در رتبه دوم می‌باشد.

بنابراین مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی از عملکرد بهتری برخوردار است که این نتایج با پژوهش‌های فوق مطابقت دارد ( Zeidalinejad and Dehghani, 2023; Babaali and Dehghani, 2023). در تحلیل این نتایج می‌توان بیان داشت برتری این مدل ناشی از تبدیل موجک می‌باشد که سیگنال‌های دریافتی را به دو دسته بالاگذر و پایین گذر تقسیم نموده و در دسته بالاگذر قدرت تفکیک افزایش یافته که سبب می‌گردد مقادیر بیشینه سیگنال با دقت مطلوبی تجزیه و تحلیل گردد.

مدل رگرسیون بردار پشتیبان- الگوریتم کرم شب تاب ترکیبی از بهینه‌سازی پیوسته و گسسته است که زمان رسیدن به یک راه‌حل بهینه را در یک منطقه جستجوی وسیع کاهش می‌دهد زیرا از راه‌حل‌های بهینه محلی اجتناب می‌کند. این امر باعث می‌شود که الگوریتم برای حل مسائل غیر خطی با ابعاد بزرگ با سرعت مناسب در همگرایی به سمت یک جواب بهینه قابل قبول باشد. که این امر سبب گردیده این مدل از دقت بالایی نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار باشد.

به‌طور کلی پیشنهاد می‌شود از مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-موجک و کرم شب تاب به‌عنوان مدلی با خطای ناچیز برای حل مسائل غیرخطی با ابعاد بزرگ با سرعت مناسب در همگرایی به سمت یک جواب بهینه استفاده شود. همچنین می‌توان به‌عنوان راهکاری نوین در پیش بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی منظور اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای بهبود منابع آبی، آماده سازی زمین و سرمایه‌گذاری اقتصادی، تولید محصولات آبرزی دانست.

منجر به پاسخ محاسباتی مدل می‌گردد از آنجایی که معیار توقف در آموزش مدل‌های هوش مصنوعی میزان خطا می‌باشد بنابراین مدل در کمترین میزان خطا متوقف و خروجی حاصل می‌گردد.

$$X_n = 0.1 + 0.8 \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (13)$$

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است مدل‌های هیبریدی در سناریو شماره ۵ که شامل کلیه پارامترهای ورودی به مدل می‌باشد از خطای کمتری نسبت به سایر سناریوها برخوردار است بنابراین افزایش تعداد پارامترهای مؤثر در مدل‌های هیبریدی مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان منجر به افزایش عملکرد مدل می‌شود. همچنین کلیه مدل‌ها در تابع کرنل پایه شعاعی از دقت بهتری برخوردار هستند. نتایج مدل‌های مورد بررسی در سناریو شماره ۵ در جدول ۴ نشان داده شده است همان‌طور که در جدول مشخص است مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک با بیشترین ضریب هم‌بستگی ۰/۹۱۷، کمترین ریشه میانگین مربعات (ppm) ۰/۱۹۰، کمترین میانگین قدر مطلق خطا (ppm) ۰/۱۱۵ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۲۰ در مرحله صحت سنجی عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در شکل ۴ نمودار سری زمانی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک نسبت به مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری و رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب در تخمین اکثر نقاط از جمله مینیم، ماکزیمم و میانی دقت قابل قبولی از خود نشان داده است همچنین مدل رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب نیز از عملکرد مناسبی در تخمین اکثر نقاط برخوردار است اما مدل رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری در تخمین مقادیر میانی عملکرد نسبتاً مطلوبی داشته است و در تخمین مقادیر مینیم و ماکزیمم ضعیف عمل نموده است.

در شکل ۵ نمودار میزان خطای مدل‌های مورد بررسی نشان داده شد همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل رگرسیون بردار

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای کیفی مورد بررسی

Table 1 - Statistical characteristics of the qualitative parameters under study

مرحله	پارامتر	واحد	میانگین	حداقل	حداکثر
Phase	Parameters	Unit	Mean	Minimum	Maximum

17.500	3.200	6.791	ppm	HCO <sub>3</sub>	آموزش
22	0.400	3.024	ppm	Cl	
10	0.300	2.360	ppm	So <sub>4</sub>	
6.900	1.200	3.250	ppm	Mg	
9.300	1.600	4.640	ppm	Ca	
805	160	395.560	ppm	Th	صحت سنجی
10.500	3	6.650	ppm	HCO <sub>3</sub>	
24.700	0.400	3.040	ppm	Cl	
5.900	0.400	2.220	ppm	So <sub>4</sub>	
9.300	1.800	3.660	ppm	Mg	
9.200	1.200	5.150	ppm	Ca	
925	240	434.460	ppm	Th	

جدول ۲- ترکیبات ورودی مدل‌های مورد بررسی

Table 2 - Input combinations of the models under study

شماره Number	ورودی Input	خروجی Output
1	HCO <sub>3</sub> (t)	TH (t)
2	HCO <sub>3</sub> (t), Cl (t)	TH (t)
3	HCO <sub>3</sub> (t), Cl (t), SO <sub>4</sub> (t)	TH (t)
4	HCO <sub>3</sub> (t), Cl (t), SO <sub>4</sub> (t), Ca (t)	TH (t)
5	HCO <sub>3</sub> (t), Cl (t), SO <sub>4</sub> (t), Ca (t), Mg (t)	TH (t)

جدول ۳- میزان خطای مدل‌های مورد بررسی تحت سناریوهای مختلف

Table 3 - Error rate of the models under study under different scenarios

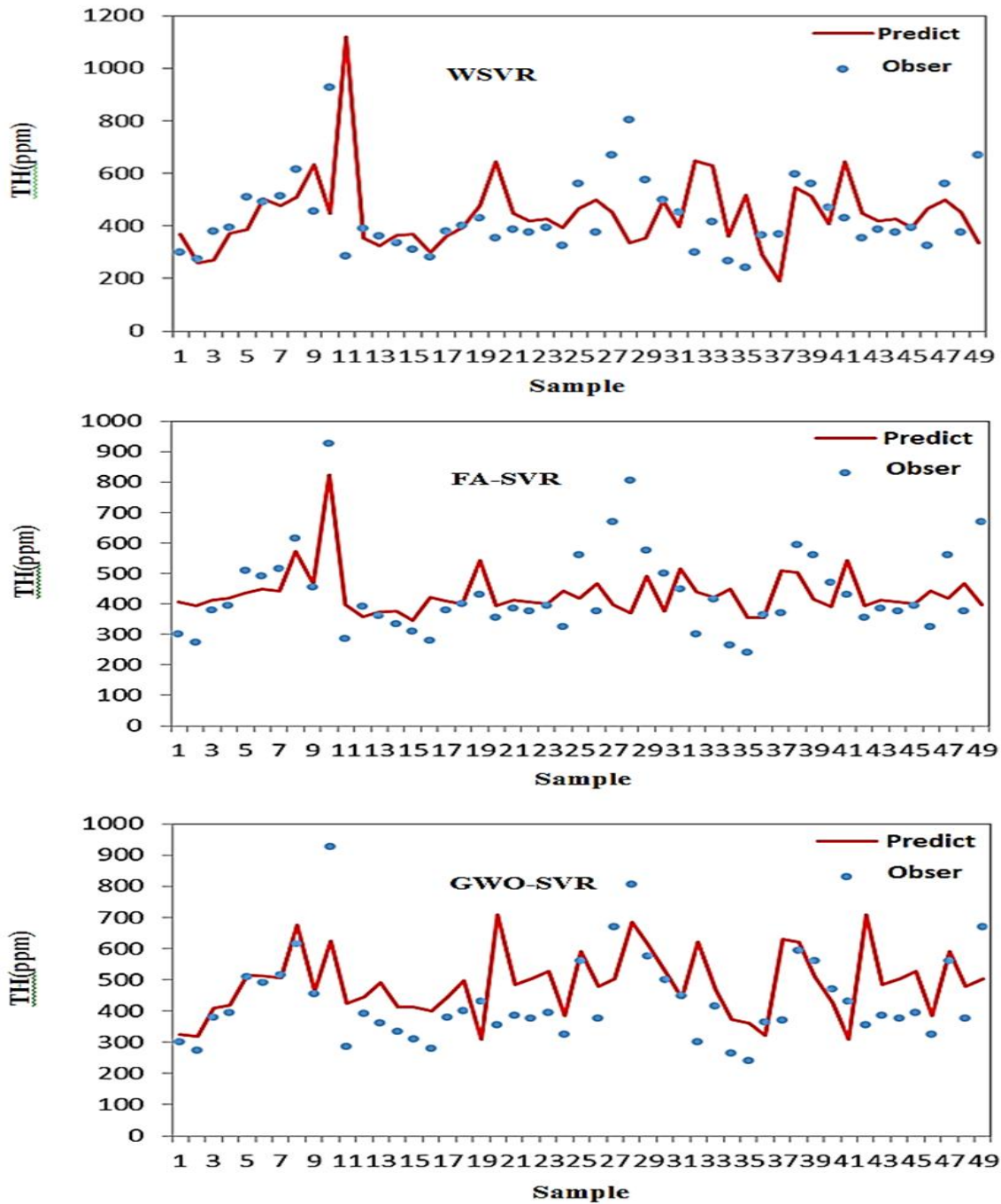
مدل Model	سناریو Senario	آموزش Training RMSE (ppm)	صحت سنجی Testing RMSE (ppm)
GWO-SVR	1	0.278	0.248
	2	0.256	0.234
	3	0.245	0.220
	4	0.238	0.210
	5	0.231	0.205
FA-SVR	1	0.258	0.236
	2	0.247	0.221
	3	0.238	0.212
	4	0.231	0.205
	5	0.225	0.198
WSVR	1	0.261	0.244
	2	0.248	0.228
	3	0.242	0.221
	4	0.236	0.210
	5	0.231	0.205

جدول ۴- نتایج مدل‌های مورد بررسی

Table 4 - Results of the models studied

مدل Model	کرنل Kernel	آموزش Training	صحت سنجی Testing
--------------	----------------	-------------------	---------------------

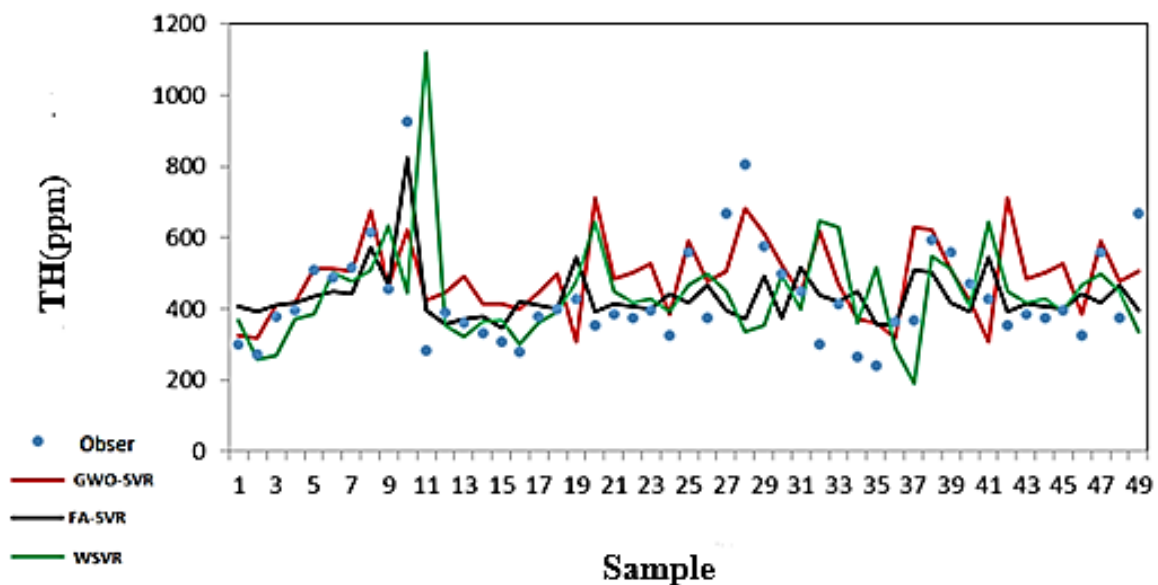
NS	MAE (ppm)	RMSE (ppm)	R	NS	MAE (ppm)	RMSE (ppm)	R		
0.905	0.131	0.205	0.900	0.895	0.146	0.231	0.890	RBF	GWO-SVR
0.895	0.144	0.217	0.890	0.885	0.154	0.240	0.880	Poly	
0.890	0.155	0.224	0.885	0.880	0.162	0.248	0.870	Line	
0.910	0.122	0.198	0.910	0.905	0.139	0.225	0.901	RBF	FA-SVR
0.905	0.129	0.208	0.900	0.900	0.148	0.238	0.895	Poly	
0.900	0.148	0.216	0.897	0.895	0.155	0.242	0.880	Line	
0.920	0.115	0.190	0.917	0.915	0.132	0.220	0.910	RBF	WSVR
0.910	0.123	0.202	0.905	0.908	0.141	0.227	0.900	Poly	
0.905	0.142	0.224	0.895	0.900	0.148	0.236	0.890	Line	



شکل ۴- نمودار سری زمانی مدل‌های مورد بررسی

Figure 4- Time series diagram of the models under study





شکل ۵- نمودار میزان خطای مدل‌های مورد بررسی  
Figure 5 - Error rate diagram of the models under study

به عملکرد بهتر در تخمین میزان سختی آب زیر زمینی می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک از دقت بالا و خطای ناچیزی برخوردار است. همچنین مطابق نمودارهای مورد بررسی مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک مقادیر میزان سختی آب زیر زمینی را نزدیک به مقدار واقعی‌شان برآورد نموده است. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر رویکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان می‌تواند در زمینه تخمین کیفیت آب‌های زیرزمینی طی ۲۰ سال آماری برای سایر مناطق کشور و گامی در جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد جهت بهبود کیفیت نتایج از آمار و اطلاعات دقیق و دارای دوره زمانی طولانی مدت استفاده شود و نیز جهت ارزیابی مدل نتایج با سایر مناطق مقایسه شود.

#### منابع

- Chandel, N., Gupta, S., Ravi, A. (2024). Ground Water Quality Analysis using Machine Learning Techniques: a Critical Appraisal. *Journal of Mining and Environment (JME)*, 15(2), 419-426. <https://doi.org/10.22044/jme.2023.13452.2484>
- Chawla, V.K., Chanda, A.K., Angra, S. (2019). The scheduling of automatic guided vehicles for the workload balancing and travel time minimization in the flexible manufacturing system by the nature-

#### نتیجه‌گیری

تخمین میزان سختی آب زیر زمینی توسط مدل‌های ترکیبی مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان به‌عنوان ابزاری کارآمد در طراحی سیستم‌های ژئوهیدرولوژی می‌باشد. در پژوهش حاضر مطالعه موردی جهت ارزیابی عملکرد مدل فراابتکاری هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان به‌منظور برآورد میزان سختی آب زیر زمینی دشت خرم‌آباد واقع در استان لرستان صورت گرفت. بدین‌منظور از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت شامل موجک، کرم شب تاب و گرگ خاکستری که با مدل رگرسیون بردار پشتیبان ترکیب شده، استفاده گردید. همچنین جهت مدل‌سازی از پارامترهای هیدروژن کربنات ( $\text{HCO}_3$ )، کلرید ( $\text{Cl}$ )، سولفات ( $\text{So}_4$ )، منیزیم ( $\text{mg}$ ) و کلسیم ( $\text{ca}$ ) و به‌عنوان ورودی و سختی آب ( $\text{TH}$ ) به‌عنوان خروجی مدل استفاده شد. به‌منظور ساخت مدل هیبریدی بهینه رگرسیون بردار پشتیبان ۸۰ درصد داده جهت آموزش و ۲۰ درصد باقی مانده جهت آزمون بررسی و انتخاب شدند. جهت ارزیابی مدل‌های مورد بررسی از شاخص‌های آماری ضریب هم‌بستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف استفاده شد همچنین جهت تحلیل نتایج از نمودارهای سری زمانی استفاده گردید. نتایج تحقیق طبق ارزیابی سناریوهایی متشکل از پارامترهای ورودی نشان داد که در کلیه مدل‌های مورد بررسی افزایش تعداد پارامترهای مؤثر در مدل‌های مختلف مدل سازی منجر

- A.(2024).Spatiotemporal assessment of groundwater quality and quantity using geostatistical and ensemble artificial intelligence tools. *Journal of Environmental Management*.355(4),120-145.10.1016/j.jenvman.2024.120495 .
- Nourani, V., Tajbakhsh, A.D., Molajou, A. (2018). Data mining based on wavelet and decision tree for rainfall-runoff simulation. *Hydrol. Res*, 50, 75–84. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.049>.
- Ostu, N. A. (1979). Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*,9 (1), 62-66.10.1109/TSMC.1979.4310076.
- Raj, C., & Singh, V. (2021). Spatial and temporal variation of fluvial islands and sandbars in River Ganga from Bhagalpur to Farakka during 1955– 2019. *Sustainable Water Resources Management*, 7(3), 22-38.<https://doi.org/10.1007/s40899-021-00522-y>.
- Shin, S., Kyung, D., Lee, S., Taik & Kim, J., and Hyun, J. (2005). An application of support vector machines in bankruptcy prediction model. *Expert Systems with Applications*, 28(4), 127-135.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.08.009>.
- Vapnik, V., Chervonenkis, A.(1991). The necessary and sufficient conditions for consistency in the empirical risk minimization method. *Pattern Recognition and Image Analysis*,1(3), 283-305.10.12691/jgg-2-3-9.
- Vapnik, V.N. (1995).The nature of statistical learning theory. *Springer, New York*, 3(1), 250-320.<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>.
- Vapnik, V.N.(1998). Statistical learning theory. *Wiley, New York*, 4(1), 250-320. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>.
- Wang, D., Safavi, A.A., and Romagnoli, J.A.(2000). Wavelet-based adaptive robust M-estimator for non-linear system identification. *AIChE Journal*,46(4), 1607-1615. <https://doi.org/10.1002/aic.690460812>.
- Yan, X., Zhu, Y., Wu, J., Chen, H.(2012). An improved firefly algorithm with adaptive strategies. *Adv Sci Lett*, 16(1), 249–254.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113340>.
- Yang, X.S.(2008). Firefly algorithm, nature-inspired meta-heuristic algorithms. *Wiley Online Libr*, 20, 79–90.[https://doi.org/10.1007/978-3-642-29694-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29694-9_16).
- Zeidalinejad, N., Dehghani, R.(2023). Use of meta-heuristic approach in the estimation of aquifer's response to climate change under shared socioeconomic pathways. *Groundwater for Sustainable Development*, 20(4), 112-132.<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100882>.
- Zhu, Y. M., Lu, X. X., & Zhou, Y. (2007). Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*, 84(1-2), 111-125.
- inspired algorithm. *Journal of Project Management*, 4(1):19-30.10.5267/j.jpm.2018.8.001
- Dehghani, R., Babaali, H.(2023). Evaluation of Statistical Models and Modern Hybrid Artificial Intelligence in Simulation of Runoff Precipitation Process. *Sustain. Water Resour. Manag*, 8, 154-172. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00743-9>.
- Dehghani, R., Torabi Poudeh, H., Younesi, H., Shahinejad, B.(2020). Daily Streamflow Prediction Using Support Vector Machine-Artificial Flora (SVM-AF) Hybrid Model. *Acta Geophysica*, 68(6), 51-66. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00472-7>
- Dehghani, R., Torabi, H.(2021). Dissolved oxygen concentration predictions for running waters using hybrid machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 64-78. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01253-x>.
- Dwivedi, S. L., & Pathak, V. (2007). A preliminary assignment of water quality index to Mandakini River, Chitrakoot. *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(11), 103-122.10.4236/jwarp.2011.36050.
- Emami, S., Emami, H., Choopan, Y., Jahandideh, O.(2021). Modeling groundwater quality using three novel hybrid support vector regression models. *Advances in Environmental Technology* .2 (4),99-110.10.22104/aet.2021.4286.1212
- Gupta, S. K., Singh, P. K., Tyagi, J., Sharma, G., & Jethoo, A. S. (2020). Rainstorm-generated sediment yield model based on soil moisture proxies (SMP). *Hydrological Processes*, 34(16), 3448-3463. <https://doi.org/10.1002/hyp.13789>.
- Gupta, S. K., Tyagi, J., Sharma, G., Jethoo, A. S., & Singh, P. K. (2019). An event-based sediment yield and runoff modeling using soil moisture balance/budgeting (SMB) method. *Water Resources Management*, 33, 3721-3741.<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02329-1>.
- Khan, M. F., Aadil, F., Maqsood, M., Khan, S., & Bukhari, B. H. (2018). An efficient optimization technique for node clustering in VANETs using gray wolf optimization. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 12(9), 4228-4247.
- Kisi, O., Karahan, M., Sen, Z. (2006). River-suspended sediment modeling using the fuzzy logic approach. *Hydrol Process*, 20(2),4351-4362.10.1002/hyp.6166.
- Mohammed, M.A.A., Khleel, N.A.A., Szabó, N.P., Szűcs , P. (2023). Modeling of groundwater quality index by using artificial intelligence algorithms in northern Khartoum State, Sudan. *Model. Earth Syst. Environ*. 9, 2501–2516.<https://doi.org/10.1007/s40808-022-01638-6>.
- Nagy, H. M., Watanabe, K. A. N. D., & Hirano, M. (2002). Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6), 588-595.
- Nourani, V., Ghaffari, A., Behfar, N., Foroumandi, E., Zeinali, A., Qing, C., Sankaran,



## Examining the Impact of the Central Qanat (Qasabeh) of Birjand on the Formation of the Historical Fabric of the City

Mohammad Shahdadi<sup>1</sup> | Saman Farzin<sup>2</sup> | Ali Zarei<sup>3</sup>

1. Master's degree graduate in Archaeology, Faculty of Arts, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Archaeology, Faculty of Arts, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Associate Professor, Department of Archaeology, Faculty of Arts, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: [Farzin@birjand.ac.ir](mailto:Farzin@birjand.ac.ir)

Received:  
28 October 2024

Accepted:  
07 December 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Qanat Qasabeh,  
historical fabric,  
Birjand,  
formation.*

### Extended abstract

#### Introduction

The historical fabric of Birjand has a structured organic order in its physical layout. This harmony in shape and continuity in space has been achieved by applying design principles in all public and private spaces. In the historical fabric of Birjand, several main passages connect urban and neighborhood elements. For instance, a passage that, while passing through the Chahardarak Square, encompasses several schools, mosques, and water reservoirs, extending to the back of the lower city fortress. However, this passage has changed today, having been disrupted by a street running through it. In the city center, there was a strong continuity and connection among elements, which has now been lost. The historical fabric of Birjand consists of diverse and significant collections with a clear organization that reflects the identity and main structure of the city (Vafaifard, 2005).

**Cite this article:** Shahdadi, M., Farzin, S. & Zarei, A. (2024). Examining the impact of the central qanat (Qasabeh) of Birjand on the formation of the historical fabric of the city, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 139-168. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8599.1087>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The hot, dry, and low-rainfall climate of Birjand, along with the absence of permanent surface water, has made the use of groundwater in the region essential as the only available water source for agriculture and residents. The historical city of Birjand is located in an area with fertile soil for agriculture, and the slope of the land has allowed for the extraction and management of groundwater through qanat technology. The presence of groundwater in the upper regions of the historical city of Birjand (including the slopes of Mount Baqeran and the Bajd plain) and the direction of the slope have been determining factors in the establishment of the city of Birjand. It can be inferred that the qanat (Qasabeh) was the main factor in the formation of the fabric and the historical city of Birjand in this location. In defining the structure of the historical fabric of Birjand, it can be said that this fabric is a collection of settlements, pathways, passages, and neighborhoods, most of which contain elements for accessing qanat water. The presence of water in private buildings, such as residential houses, and the utilization of water within homes serve as symbols of life, purity, and beauty, contributing to the vitality and dynamism of the space. This presence, apart from its consumptive aspect, has been noted for its symbolic significance. Additionally, the presence of water in the center of the courtyard signifies the centrality and importance of water in existence.

### **Materials and Methods**

The present research is analytical-descriptive in terms of method and is considered fundamental research in terms of nature. It aims to examine the formation of the historical texture of Birjand and the Qanat Qasabeh to understand the impacts of the qanat on the formation of the texture and its effects on the execution and elements of the texture. To achieve this goal, a survey method was employed to visit the historical texture, and historical documents on this subject were also reviewed. Initially, the necessary information was collected and relevant data was documented through field research, where the location discussed in this study was first visited and then photographed, and the required information was gathered. Subsequently, the collection and study of necessary information, including library and visual resources, were conducted, and finally, based on field data and library information, a final analysis was performed. In conclusion, to provide a clearer understanding for readers, a map of the Qanat Qasabeh's route and its movement within the texture, as well as the shape, components, and elements of the historical texture, will be illustrated.

### **Results**

Based on observations and field reports, it was concluded that the water flow path of the qanat has not been significantly influenced by the texture, while the water has had the most impact on the texture, with only minor changes observed in the water's flow path. One of the changes made was relocating the qanat's outlet, which, according to interviews with codes (2 and 3), was due to the overflow of the outlet pit caused by the high volume of water that infiltrated the courtyard and rooms of the Shokatieh school, prompting the decision to change the outlet. Another instance involved the water turning towards the Sajid garden and directing water to the laundry house located along the water distribution path, which was necessary for the residents of this neighborhood, as each neighborhood at that time had its own laundry house, bath, water reservoir, etc.

Finally, the last change involved the piping of some houses, which transferred water through pipes into their courtyards and pools. Thus, it can be concluded that the historical texture of Birjand has been shaped based on the water flow path of the Qanat Qasabeh.

### **Conclusion**

The research findings of this study indicate that the impacts of the Qanat on the historical fabric are evident in various components, including the selection of locations for spaces and the overall fabric, as well as the formation of private and public spaces such as residential houses, bathhouses, mosques, mortuaries, Hussainiyas, and gardens. Water has manifested itself in different forms within each of these spaces. The factors influencing the formation of urban fabric include

natural forces, economic and financial forces, political forces, social and cultural forces, and so on. In addition to these, another very important factor that plays a role in the formation of the network of pathways is the consideration of the water flow path, and access to the Qanat generally determines the main networks of the fabric. Therefore, the formation of the fabric has been influenced by the Qanat, and the main spaces and elements of the city, such as bathhouses, mosques, canals, and neighborhood centers, have been shaped in a way that allows for the easiest access to Qanat water.

In a general conclusion, it can be stated that the formation of the historical fabric of Birjand relied on the Qanat Qasabeh, and its development over time was due to extensive connections with other cities and countries. Additionally, the presence of the 'Ilm family in this area and their contributions to the advancement and expansion of the city also contributed to the increase in population and the growth of the Birjand village. Considering that there is no precise historical record of the exact time of the formation of the Birjand village, and given that Birjand has been destroyed and reshaped several times due to earthquakes, its significant progress can be attributed to the Safavid era, with the establishment of security by the Safavid dynasty and its role as a commercial hub for merchants being key reasons.



## بررسی تأثیر قنات مرکزی (قصبه) بیرجند، بر روند شکل‌گیری بافت تاریخی این شهر

محمد شاهدادی<sup>۱</sup> | سامان فرزین<sup>۲</sup> | علی زارعی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌شناسی، دانشکده هنر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲. استادیار، گروه باستان‌شناسی، دانشکده هنر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳. دانشیار، گروه باستان‌شناسی، دانشکده هنر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

✉ نویسنده مسئول: [Farzin@birjand.ac.ir](mailto:Farzin@birjand.ac.ir)

### چکیده

یکی از نیازهای اساسی برای شکل‌گیری روستاها و شهرها، وجود یک منبع آب قابل دسترسی می‌باشد. نعمت وجود آب در مناطق کویری ایران، همواره مورد توجه همگان بوده به طوری که از زمان‌های گذشته تا زمان حال آب را مقدس می‌شماردند. منطقه کویری بیرجند نیز با تکیه بر قنات قصبه شکل گرفت و با گذشت زمان و تلاش اشخاص رو به گسترش نهاد. بافت تاریخی بیرجند و محله‌های وابسته به آن تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله حکومت، هم‌بستگی خانوادگی، طبقات اجتماعی و غیره شکل گرفت و از زمان گذشته همچنان در حال پیشرفت می‌باشد و بخش بزرگی از این پیشرفت مدیون قنات قصبه بیرجند بوده است. لذا در این پژوهش سعی در جستجو و اکتشاف نحوه شکل‌گیری بافت تاریخی بر اساس تأثیر مسیر حرکت قنات شده است. این پژوهش از نظر هدف در زمره تحقیقات بنیادی و از حیث ماهیت از نوع تحقیقات تحلیلی-توصیفی به شمار می‌آید. پژوهش پیش‌رو با بهره‌گیری از روش مطالعات میدانی، کتابخانه‌ای، انجام مصاحبه و هم‌چنین برگزاری جلسه گفت و گوی تخصصی انجام گرفت. با توجه به مطالعاتی که صورت گرفت این نتیجه حاصل شد که ساکنین کمتر دخالتی در تغییر مسیر حرکت قنات داشته و شرایط خود را با توجه به مسیر حرکت قنات وفق داده‌اند و این قنات تأثیر به‌سزایی در شکل‌گیری شهر بیرجند و پیشرفت آن داشته است. یکی از شریان‌های حیاتی در این منطقه قنات می‌باشد که بدون کمک هیچ نیروی خارجی همیشه جریان داشته و موجبات آبادی این منطقه را فراهم ساخته و باعث استقرار جوامع انسانی و ایجاد روستا شده است. بافت تاریخی بیرجند از زمان شکل‌گیری، تابع حرکت آب بوده و اساس جانمایی و احداث آن بر اساس مسیر قنات قصبه این شهر بوده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

قنات قصبه،

بافت تاریخی،

بیرجند، شکل‌گیری.

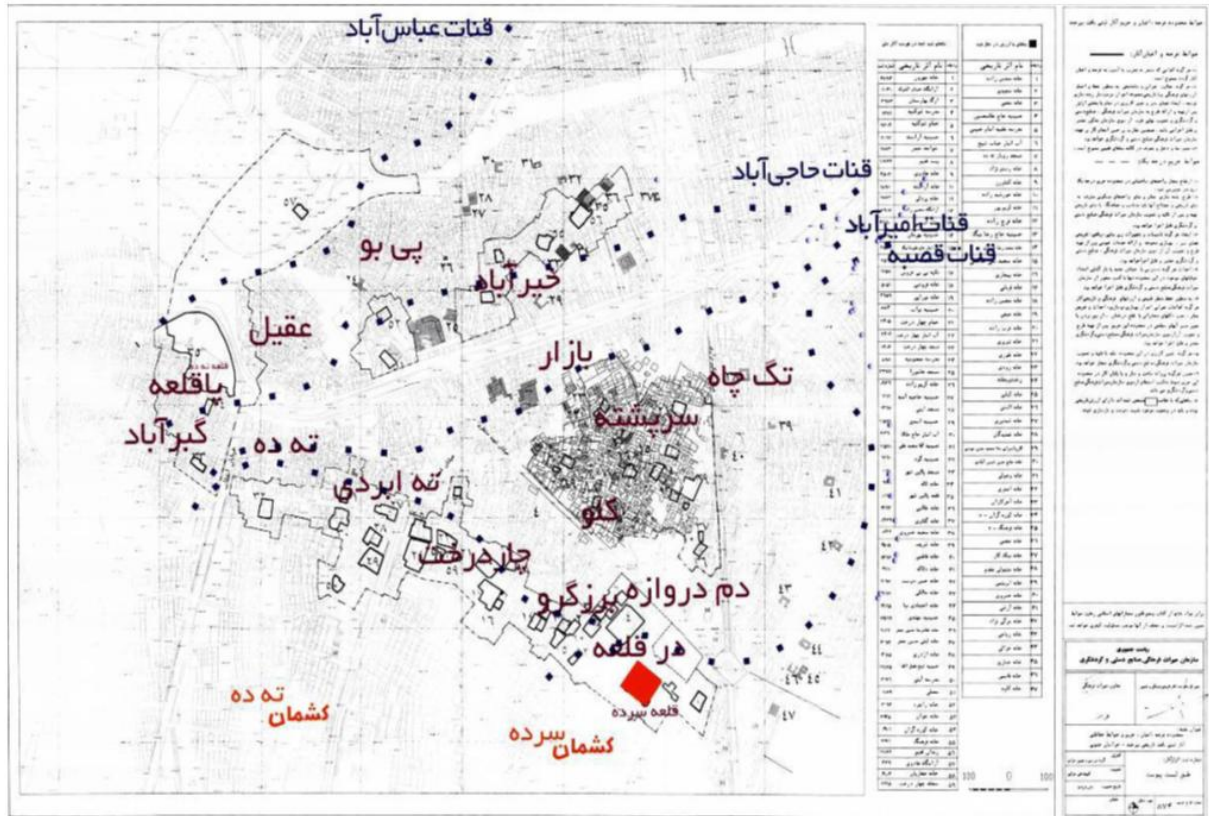
## مقدمه

تحقیق و بررسی در خاستگاه اولیه و هسته اصلی شکل‌گیری شهر بیرجند کار دشواری است. تنها مرجعی که می‌توان به آن استناد جست نوشته‌های مربوط به سفرنامه هاست و یا آثار جغرافی‌دانان و مورخانی است که در قرون گذشته از آن یاد کرده‌اند که البته هم محدود و مختصر می‌باشند. برای اولین بار یاقوت حموی در معجم البلدان (تألیف ۶۲۱ هجری قمری) از بیرجند به عنوان شهری زیبا یاد کرده است (معجم البلدان، ۱۳۸۰). در واقع اولین سند مکتوب که نام بیرجند در آن به عنوان شهر آمده، همین کتب است (Vafaifard, 2005). وی از بیرجند با شک و گمان، به عنوان دهی در کوهستان یاد کرده و خواجه رشیدالدین فضل‌الله همدانی در ابتدای قرن هشتم (سال ۷۰۰ ه. ق) از بیرجند به عنوان یک ولایت یاد کرده که بهترین زعفران در آن تولید می‌شده است. در دوران فرمانروایی اسماعیلیان، بیرجند تا اندازه‌ای وسعت یافت و پس از قلع و قمع اسماعیلیان مقر حکمرانان مغولی نخست، گیوک‌خان و سپس طوغان که بر تمام قهستان حکومت داشتند شد. آن گونه که از اشعار حکیم نزاری قهستانی برمی‌آید بیرجند در دوره ایلخانی مرکز حکومت قهستان بوده است و شمس‌الدین علی (حاکم قهستان در سال ۶۸۸ ه. ق) مشهور به علی شاه فرزند خواجه نصیرالدین سجستانی در این شهر مستقر بوده است (Jannatifar, 2018).

بافت تاریخی بیرجند به لحاظ کالبدی از نظمی اندام‌واره برخوردار بوده است. این هماهنگی در شکل و پیوستگی در فضا با به کار بستن اصول طراحی در کلیه فضاهای عمومی و خصوصی به وجود آمده است. در بافت تاریخی بیرجند چند گذر اصلی عناصر شهری و محله‌ای را به هم پیوند داده‌اند. مانند گذری که با عبور از میدانچه چهاردرخت در مسیر خود چندین مدرسه و مسجد و آب انبار را در بر می‌گرفته و تا پشت قلعه پایین شهر ادامه

می‌یافته است. اما این گذر امروزه تغییراتی پیدا کرده و با عبور خیابانی از میان آن از هم گسسته شده است. در مرکز شهر پیوستگی و ارتباط قوی میان عناصر وجود داشته که در حال حاضر پیوند هماهنگ و ارتباط آن از میان رفته است. بافت تاریخی بیرجند از مجموعه‌های متنوع و قابل توجه با ساماندهی مشخص برخوردار است که هویت و ساخت اصلی شهر را نشان می‌دهند (شکل ۱) (Vafaifard, 2005).

اقلیم گرم و خشک و کم باران شهر بیرجند و همچنین عدم وجود آب‌های سطحی دائمی، استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه را به عنوان تنها منبع آب قابل استفاده برای کشاورزی و ساکنین را الزامی ساخته است. شهر تاریخی بیرجند در مکانی واقع شده است که خاک حاصلخیزی برای کشاورزی دارا است و از نظر شیب زمین، امکان استحصال و هدایت آب‌های زیرزمینی توسط فناوری قنات وجود داشته است. وجود آب‌های زیرزمینی در مناطق بالادست شهر تاریخی بیرجند (از جمله دامنه کوه باقران و دشت بجد) و جهت شیب عامل تعیین کننده در ایجاد شهر بیرجند بوده است. شاید بتوان چنین استنباط کرد که قنات (قصبه) عامل اصلی شکل‌گیری بافت و شهر تاریخی بیرجند در این مکان بوده است. در تعریف ساختار بافت تاریخی شهر بیرجند می‌توان گفت که این بافت مجموعه‌ای از سکونتگاه‌ها، مسیرها، گذرها و مجموعه‌ای از محلات است که در اکثر آنها یکی از عناصر دسترسی به آب قنات وجود دارد. حضور آب در بناهای خصوصی مانند خانه‌های مسکونی، بهره‌گیری از آب در دل خانه‌ها به عنوان نمادی برای زندگی، پاک‌ی و زیبایی بوده و باعث سرزندگی و پویایی فضا نیز می‌گردد. این حضور جدای از جنبه مصرفی آن، به دلیل جنبه‌های نمادین آن مورد توجه بوده است. همچنین وجود آب در فضای وسط حیاط اشاره بر مرکزیت و اهمیت آب در هستی دارد.



شکل ۱. نقشه نام‌گذاری محلات بیرجند در گذشته (Hosseini Abadi, 2021).

Fig 1. Map of the naming of neighborhoods in Birjand in the past (Hosseini Abadi, 2021).

سازه‌های پایدار را بر شهر و زندگی مردم مورد بررسی قرار داده است (Ebizadeh, 2010).

- جنتی‌فر در پژوهشی با عنوان گونه‌شناسی باغ‌های تاریخی بیرجند با رویکرد حفاظت محلی به معرفی باغ‌های بیرجند پرداخته و اقلیم و موقعیت جغرافیایی بیرجند و قنات‌های آن را معرفی کرده است. در این پژوهش سابقه تاریخی بیرجند و نحوه شکل‌گیری محلات بررسی شده است (Jennatifar, 2018).

### روش پژوهش

پژوهش پیش‌رو به لحاظ روش، تحلیلی-توصیفی و از حیث ماهیت جزء تحقیقات بنیادی محسوب می‌گردد. سعی شده است تا شکل‌گیری بافت تاریخی بیرجند و قنات قصبه، مورد بررسی قرار گرفته تا بتوان به تأثیرات قنات بر شکل‌گیری بافت و تأثیرات آن بر اجرا و عناصر بافت پی‌برد. برای رسیدن به این مقصود از یک سوء به روش پیمایشی به بازدید از بافت تاریخی پرداخته شده و از سوی دیگر مستندات تاریخی این موضوع بررسی گردید.

در خصوص موضوع مورد مطالعه، پژوهش‌هایی به‌طور غیرمستقیم انجام شده است که در ذیل به مهم‌ترین آنها اشاره می‌گردد اما هیچ‌کدام به‌طور تخصصی به کشف مسیر قنات در دل بافت تاریخی شهر بیرجند اشاره نکرده است که پژوهش حاضر برای اولین بار به این موضوع خواهد پرداخت:

- وفائی فرد در کتاب در جستجوی هویت شهری بیرجند به بررسی هسته اولیه شهر بیرجند و عوامل مؤثر در شکل‌گیری بافت تاریخی پرداخته و بازشناسی ساخت و ریخت‌شناسی بافت را مورد بررسی قرار داده است (Vafaeifard, 2005).

- اعتصام‌الملک در سفرنامه خانلرخان در سفر و اقامتش در ایران به توصیف شهرهای ایران پرداخته و در بخشی از آن اشاره به شهر بیرجند و قنات آن داشته است (Estesam-ol-molk, 1909).

- ابی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان نگرشی بر قنات با محوریت آموزش و احیا فناوری بومی، فرهنگ و معماری ایرانی به آب و قنات در ایران پرداخته و تأثیرات این



تپه‌ماهورهایی که در طول شرقی و غربی شهر بیرجند کشیده شده و شهر در دو قسمت شمالی و جنوبی آن قرار دارد به داخل آب‌انباری می‌ریخت که به همین منظور ساخته شد و بعد از این آب‌انبار دو رشته لوله جدا می‌شد که یک رشته در دامنه شمالی و رشته دیگر در دامنه جنوبی تپه ماهورهای مورد بحث کشیده شد. و هر دو قسمت شهر را از شرق به غرب در بر می‌گرفت. در آن تاریخ به علت اینکه موجبات و وسایل فنی برای لوله کشی منازل وجود نداشت در مسیر دو رشته لوله مورد بحث به فواصل معین در معابر عمومی شیرهای نصب و تعبیه کردند که اشخاص از آن آب بر می‌داشتند و به مصرف نیازمندی‌های خود می‌رسانیدند و بدین ترتیب شهر بیرجند نه تنها از گرفتاری بی‌آبی نجات پیدا کرد، بلکه به صورت اولین شهر درآمد که از آب لوله کشی بهداشتی بهره‌مند بود (Monsef, 1975).

این قنات (قصبه) که مادرچاه آن در دشت بجد قرار دارد و هنوز جاری است در شرقی‌ترین نقطه شهر بیرجند و مظهر آن درست در مقابل حسینیه شوکتیه است. آب این قنات چون از لایه‌های نمکی عبور می‌کند، شور است. از این آب برای کشاورزی استفاده می‌شود. قنات قصبه از جمله قنات‌های قدیمی است که پیش از ظهور اسلام به دست زرتشتیان و همزمان با قنات گناباد احداث شده است (Zaferanlu & Hamzeh, 2003).

نکته‌ای که توجه به آن دارای اهمیت زیادی بوده، اینکه بدون تأمین آب از طریق قنات‌ها، شرایط ایجاد شهر و آبادی بزرگ در محدوده بیرجند وجود نداشته است. چون قنات قصبه بزرگ‌ترین قنات این محدوده بوده و میزان آب آن نیز زیاد بوده است، از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و تقویت اعتقادات مذهبی تأثیر عمیقی بر بیرجند داشته است (Papoli Yazdi & et al., 2010).

این قنات توانسته موجبات یک‌جانشینی و در عمل نیز شرایط پایداری یک فرهنگ غنی را فراهم سازد. معمولاً وقتی آب قنات وارد یک شهر می‌شود، ابتدا به خانه باغ‌های بزرگی که مختص اشراف و بزرگان شهر بوده وارد شده و در ادامه به شاخه‌های کوچک‌تری منشعب شده و به خانه‌های کوچک‌تر وارد می‌شود. و تا جایی ادامه دارد که دیگر آب قنات وارد منازل نشده بلکه در کوچه جریان دارد و منازل دو طرف از آب آن برداشت می‌کنند. هر یک

که ابتدا به جمع‌آوری اطلاعات لازم و مستندسازی داده‌های مربوطه به شیوه بررسی میدانی اقدام شده، که در این شیوه مکان مورد بحث در این پژوهش ابتدا بازدید و سپس مورد عکاسی قرار گرفته و اطلاعات مورد نیاز از آن جمع‌آوری شده است. و سپس به گردآوری و مطالعه اطلاعات مورد نیاز اعم از منابع کتابخانه‌ای و تصویری پرداخته شده و در نهایت بر اساس داده‌های میدانی و اطلاعات کتابخانه‌ای، تجزیه و تحلیل نهایی صورت گرفته است. در پایان برای فهم دقیق‌تر خوانندگان به ترسیم نقشه مسیر قنات قصبه، و نحوه حرکت آن در بافت و در نهایت شکل، اجزا و عناصر بافت تاریخی پرداخته خواهد شد.

قنات قصبه و بافت تاریخی بیرجند

بیرجند فاقد قنات آب شیرین است و یکی دو قنات دارد که آب آنها شور و غیر قابل شرب است و فقط به مصارف کشاورزی و شستشو می‌رسد. در سال‌های گذشته برای رفع این مشکل در شهر بیرجند آب انبارهای متعدد به وسیله اشخاص خیر و نیکوکار ساخته شده بود که در فصل زمستان و بهار از آب قنات و آبدی‌های دامنه کوه باقران پر آب می‌شد و این ذخیره آب در تابستان تنها منبع شرب اهالی بود. هرگاه یک سال بارندگی به قدری کم بود که آب آبدی‌های دامنه کوه باقران کافی برای پر کردن آب انبارها نبود در تابستان مردم شهر بیرجند دچار قحطی آب می‌شدند و ناچار بودند یا از قنات آب شور شهر بیاشامند و یا اینکه از افرادی که کارشان آب فروشی بود و از کوه با الاغ و یا روی دوش آب به شهر می‌آوردند، آب شیرین به قدر شرب خریداری کنند. از این لحاظ شوکت الملک متوجه شد که باید فکری اساسی برای تأمین آب شرب شهر کرد (Monsef, 1975).

ابتدا که قسمتی از قنات متعلق به شهر بود، در داخل قنات قبل از آنکه آب در سطح زمین جاری شود، مقسمی با دقت ساخته شد که از آنجا آن مقدار آب که متعلق به شهر بود وارد لوله می‌شد و بقیه از مظهر قنات خارج و به مصرف آبیاری محل می‌رسید و بعدها تمام آب قنات مزبور به شهر جاری گردید و به مصرف شهر می‌رسید (Monsef, 1975).

رشته لوله‌ای که آب قنات را به شهر می‌آورد با طی فاصله‌ای در حدود ۹ کیلومتر در مرتفع‌ترین نقطه از

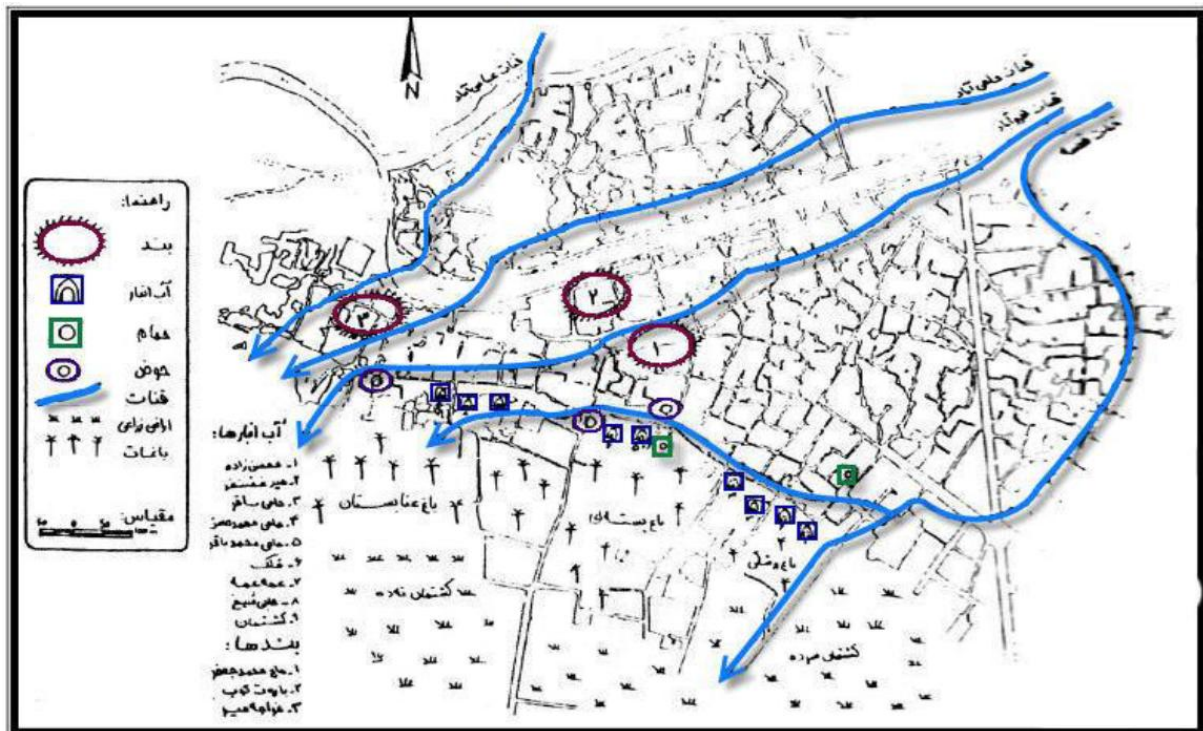
پراکندگی و از هم‌گسیختگی جامعه بوده است ( Papoli Yazdi & et al., 2010).

#### مسیر حرکت قنات قصبه

در دامنه شیب جنوبی تپه‌ها، کوچه بزرگ و دراز آهنگ و نسبتاً عریضی وجود داشت که آب قصبه در جایی سرپوشیده از میان آن می‌گذشت. این کوچه که به نام "کوچه خواجه‌ها" موسوم بود و هنوز معروف است از مقابل آب انبار حاجی‌خان و منزل مرحوم احمد محسن‌زاده شروع می‌شد و به میدان سرآب میان‌ده (چهار درخت) و کوچه مدرسه طلاب و با یکی دو پیچ که در درازنای آن بود به میدان لب‌جوی گسکی و از آنجا به کوچه بزرگ و معروف ته‌ده (پایین شهر) مرتبط می‌گشت و دورترین نقطه شرقی شهر را به دورترین نقطه غربی آن (منزل سالار کربلایی حسن مزروعی) وصل می‌کرد. این کوچه، کوچه اصلی محله خواجه‌ها بود و کوچه‌های متعددی از آن منشعب می‌شد. در نهایت آب قصبه برای آبیاری کشتان ته‌ده مصرف می‌شد (شکل ۲) ( Rezaei, 2001).

از جوی‌ها که از یک شاه‌جو جدا می‌شد در مسیر خود زمین‌ها و باغات را آبیاری می‌کرده و همه از آب قنات قصبه آب می‌گرفته‌اند. اما امروزه بسیاری از آن جوی‌ها در اثر تغییر و تحولات و ساخت و سازها محو گردیده یا تغییر مسیر داده و یا بر بستر سیمانی جوی‌های کنار خیابان‌ها نامی دیگر به خود گرفته و دگرگون شده‌اند ( Papoli Yazdi & et al., 2010).

در حقیقت شبکه آب قنات نه‌تنها بافت کالبدی شهرها را مشخص کرده، بلکه بر بافت اجتماعی نیز تأثیر داشته است. در شهرهایی که آب شهر با آب قنات تأمین می‌شود و برای اعیان همچون فقرا ممکن نبود که در فاصله‌های نسبتاً زیاد با جوی‌های قنات زندگی کنند، لاجرم غنی و فقیر در یک محله و حول محور شبکه قنات جمع می‌شدند. از یک حسینیه، مسجد، بازارچه، حمام و زورخانه استفاده می‌کردند. لذا غنی و فقیر هر روز چهره به چهره بودند. در حقیقت شبکه سنتی آب قنات موجب انسجام اجتماعی افراد بود و شبکه آب لوله‌کشی موجب



شکل ۲. ساختار قدیم شهر بیرجند با تکیه بر منابع آب (Behnia, 2001).

Fig 2. The old structure of the city of Birjand is based on water resources (Behnia, 2001).

### باغ‌های مشروب از قنات قصبه

شمار قابل ملاحظه‌ای باغ وجود داشتند که چون همه آنها به جز باغ کوشه از آب قنات قصبه مشروب می‌شدند در جنوب مجرای آب این قنات که شیب ملایمی به سوی جنوب داشت احداث شده بودند. علاوه بر این باغ‌ها تعدادی از خانه‌های اشراف و اعیان و کارگزاران حکومت و مالکان قصبه و بازرگانان و توانگران که در جنوب نهر قصبه واقع بودند باغ یا باغچه‌ای داشتند. این باغ‌ها و باغ منزل‌ها که عموماً در جنوب نهر قصبه - واقع بودند از شرق به غرب عبارت بودند از:

- باغ بی‌بی‌زهره: این باغ در جنوب مقبره خانوادگی حسام‌الدوله واقع بود و یک ساختمان مسکونی بزرگ هم در آن قرار داشت. این باغ به بی‌بی زهره دختر دوم شوکت‌الملک علق تعلق داشت.

- باغ زرشکی: این باغ از بزرگ‌ترین باغات بیرجند به شمار می‌آید که هنوز آثاری از آن به جا مانده است. مظهر قنات قصبه در شمال این باغ واقع شده و از ناحیه شرق به باغ بی‌بی زهره محدود می‌شد.

- باغ صفا (بیمارستان امام رضا): در جنوب باغ زرشکی واقع بوده و از درخت انار پوشیده شده بود. این باغ به شوکت‌الملک علم تعلق داشت که بعداً به هزینه نام‌برده در محل این باغ بیمارستان بزرگی ساخته شد که اکنون نیز وجود دارد.

- باغ منزل محسن زاده: در غرب باغ زرشکی و در شرق آب انبار حاجی خان واقع بود و آب قصبه بیشتر اوقات از این باغ منزل می‌گذشت.

- باغ حاجی آقا: این باغ به موازات باغ زرشکی واقع بوده و در حد فاصل آن از کوچه باغی عبور می‌کرده است.

- باغ زری: در جنوب باغ حاجی آقا و در غرب جوی قصبه وجود داشته است.

- باغ سالار: در جنوب باغ زری باغ اناری به نام باغ سالار وجود داشت.

- باغ منصف: در غرب باغات مذکور و در فاصله نزدیک به آن و در انتهای یک کوچه که از کوچه خواجه‌ها منشعب می‌شد، این باغ قرار داشته است.

- باغ حاجی احمد بیک: این باغ شاهسون‌پور نیز نامیده شده، در شرق محلی به نام کلگاه بویان قرار داشته و باغ اناری بوده است.

- باغ بی‌بی عروس: این باغ در کوچه‌ای به نام خواجه‌ها و در کنار یک میدان قرار داشت.

- باغ میدانی: در جنوب میدان و در غرب باغ بی‌بی عروس باغ اناری بزرگی وجود داشت که به آن باغ میدانی می‌گفتند.

- باغ بهرمان: باغ اناری که در جنوب باغ بی‌بی عروس قرار داشت و باغ نسبتاً بزرگی بود.

- باغ آراسته: در جنوب و در امتداد باغ بهرمان قرار داشته است.

- باغ عبدالله‌زاده: باغ اناری در جنب باغ آراسته بود.

- باغ سرآب میان ده: باغ کوچکی که اناری بوده و در کوچه‌ای به نام باغچه قرار داشته است (Pouyan, 2013).

محللات مشروب از قنات قصبه

کوچه خواجه‌ها

این کوچه شاه کوچه بیرجند بوده است که عرض آن فراخ‌تر از دیگر معابر و با امتدادی طولانی، حدود جنوبی شهر را از شرق به غرب در بر می‌گرفت. در دو طرف کوچه مذکور، بخش مهمی از مساجد و حسینیه‌ها و مدارس و حمام‌ها و آب انبارها قرار گرفته بود. نهر قصبه از زیر این گذر می‌گذشت و در چند نقطه آب‌نمایی را به رؤیت می‌گذاشت. در ابتدای شرق این کوچه شکستگی کوتاهی به سوی شمال بود که به میدان قلعه منتهی می‌شد. در این میدان خانه آیت‌الله حاج شیخ محمد هادی هادوی و اداره پست و تلگراف و خواجه خضر و مدارس دخترانه و پسرانه شوکتیه قرار داشت که هنوز هم پابرجاست و جنبه تاریخی دارد (Ayati, 1997).

مسجد خواجه‌ها

این مسجد در کوچه مذکور و نزدیک آب‌نمای (کلگاه بویان) بود. مسجد مزبور توسط پیشینیان خاندان خواجه‌ها که قبل از رواج نام فامیلی در ایران، به آنها خواجه‌ها می‌گفتند، ساخته شده بود (Ayati, 1997).

مسجد جامع

در غرب سر آب میان‌ده (چهار درخت) قرار داشت. سر آب میان‌ده میدان کوچکی بود که چند راه به آن منتهی می‌شد. وسط این میدان آب‌نمایی قرار داشت که با چهار پله به ژرفا می‌رفت و نهر قصبه از آن می‌گذشت. حمام بزرگ مردانه شهر در زاویه جنوب شرقی این میدان بود (Ayati, 1997).

مانندی بود و آب قنات قصبه هنگامی که به کشمان تده می‌رفت از آن می‌گذشت. محله اطراف این جوی را به نام آن محله لب‌جوی گسکی می‌نامیدند (Rezaei, 2001).

پایاب‌های مشروب از قنات قصبه

پایاب سرآب میان ده

در گوشه جنوب غربی میدان سر آب میان‌ده (چهار درخت) دو کوچه بود که هنوز هم وجود دارند: یکی کوچه مدرسه طلاب که شرقی-غربی بود و دیگری کوچه باغچه که شمالی جنوبی و عمود بر کوچه طلاب بود. در نیش شمال غربی کوچه باغچه و جنوب شرقی کوچه طلاب پایابی مسقف بود که در آن از روبه‌روی مسجد جامع آن محل باز می‌شد و آب قصبه هنگامی که به کشمان تده می‌رفت از آن می‌گذشت و اختصاص به شستن و غسل دادن مردگان داشت. این پایاب را بعداً تعطیل و تخریب کردند و در عوض در ابتدای کوچه باغچه، در ضلع شرقی آن روبه‌روی پایاب قبلی، پایاب جدیدی احداث کردند که مدت‌ها دایر بود و هر وقت آب از آن می‌گذشت در آن مرده می‌شستند (شکل ۳). این پایاب پس از احداث مرده‌شور خانه جدید تعطیل شد و متروکه گشت (Plan for the Protection and Restoration of the Baharestan Citadel in Birjand, 2016).

پایاب کشمان

این پایاب در ابتدای کشمان پایین شهر، پیوسته به باغ فرزانه و در انتهای کوچه‌ای به همین نام، نزدیک و در شمال شرقی آب انبار کشمان قرار داشت که هر وقت آب به کشمان می‌رفت، از آن می‌گذشت. سپس به مصرف کشاورزی می‌رسید. پایاب کشمان پایابی متروکه و تا اندازه‌ای ویران بود و به نظر می‌رسید که در گذشته‌های دور هم از آن استفاده نمی‌شده یا کمتر می‌شده است. علت این امر شاید این بوده که آب همیشه از این پایاب نمی‌گذشت و تنها در اوقاتی که آب قصبه به قسمت‌های غربی کشمان تده می‌رفت از آن عبور می‌کرد. این پایاب اکنون وجود ندارد و به کلی از میان رفته است

پایاب تک چاه

در جنوبی‌ترین نقطه محلی تک چاه و نزدیک به میدانی به همین نام که شیبی تند داشت و بر روی آخرین چاه قنات قصبه یک چاه پایاب وجود داشت که شمار زیادی پله می‌خورد. این چاه پایاب اکنون وجود ندارد (

محله سرآب میان ده

نام این محله نشان می‌دهد که محله مزبور متعلق به دوره‌ای است که هنوز بیرجند گونه یک ده داشته است. این محله یکی از سه محله بزرگ و قدیمی بیرجند بود و هست که در غرب محله خواجه‌ها و شرق کوچه مدرسه طلاب قرار دارد و آب قصبه از میدان میانی وسط این محله می‌گذشت. این میدانی در حقیقت میدان مرکزی شهر آن روز به شمار می‌آمد و چون در چهارگوشه میدان، چهار درخت نارون کهنسال وجود داشت به آن میدان چهاردرخت هم می‌گفتند. نام قدیمی‌تر این محله و میدان آن، سرآب میان‌ده بود که هنوز هم فراموش نشده است (Rezaei, 2001).

محله کشمان

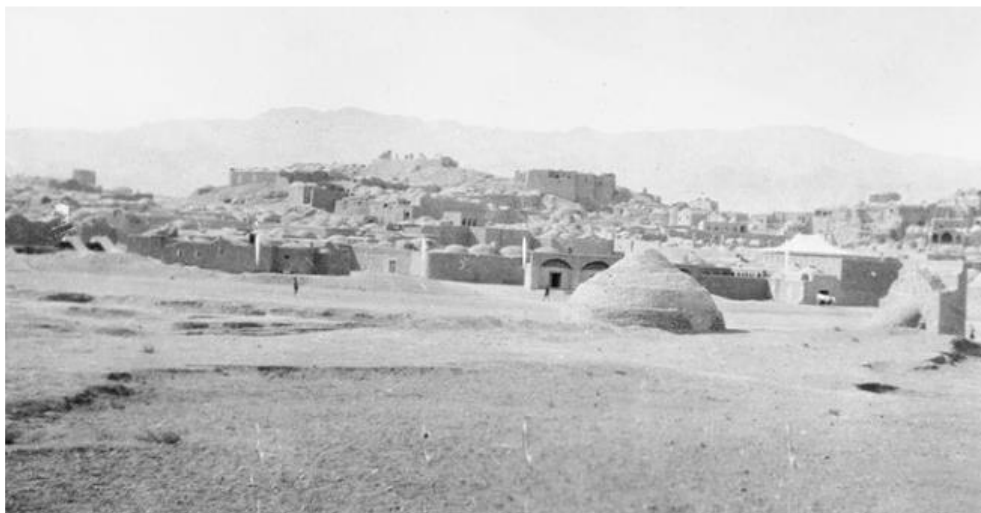
جنوبی‌ترین محله شهر که به زمین‌های زراعتی (کشمان) قصبه پیوسته بود به این نام خوانده می‌شد. بزرگ‌ترین خانه‌ها و باغ منازل و باغات شهر در این محله قرار داشت و محله اعیان نشین بود این محله در جنوب نهر قصبه قرار داشت و باغ‌ها و باغچه‌های خانه‌های آن از آب قصبه آبیاری می‌شد و محله سرسبز و آباد شهر بود. در این محله باغ‌ها و باغ منزل‌های متعدد وجود داشت و بیشتر خانه‌های آن متعلق به مالکان قصبه، کارگزاران حکومتی، بازرگانان و اشراف بود و به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شد: یک محله کشمان سرده و دیگری محله کشمان ته ده (Rezaei, 2001).

محله کل گاه بویان

این محله در جنوب نهر قصبه قرار داشت و راه اصلی آن از کوچه خواجه‌ها، روبه‌روی حمام غیناب، آغاز می‌شد. کلگاہ در گویش بیرجندی به معنی گودال بزرگ است که معمولاً مانند آبریز بزرگی است. در این محله چندین گودال بزرگی وجود داشت که هم آبریز کوچه‌های شمالی بود و هم فاضلاب دو حمام غیناب و آقا میرزا به آن می‌ریخت و بر اثر آن همیشه بوی گند می‌داد و مقداری گندآب در قعر آن بود. اکنون آن دو حمام از میان رفته و گودال را هم پر کرده‌اند و دیگر از آن بوها هم نشانی نیست (Rezaei, 2001).

محله لب جوی گسکی

در شرق در ورودی مسجد آیتی میدان کوچکی بود به نام میدان لب جوی گسکی. در وسط این میدان حوض



شکل ۳. نمایی از پایاب‌های بیرجند قدیم (Hosseinabadi, 2021)

Fig3. A view of the ancient qanats of Birjand (Hosseinabadi, 2021).

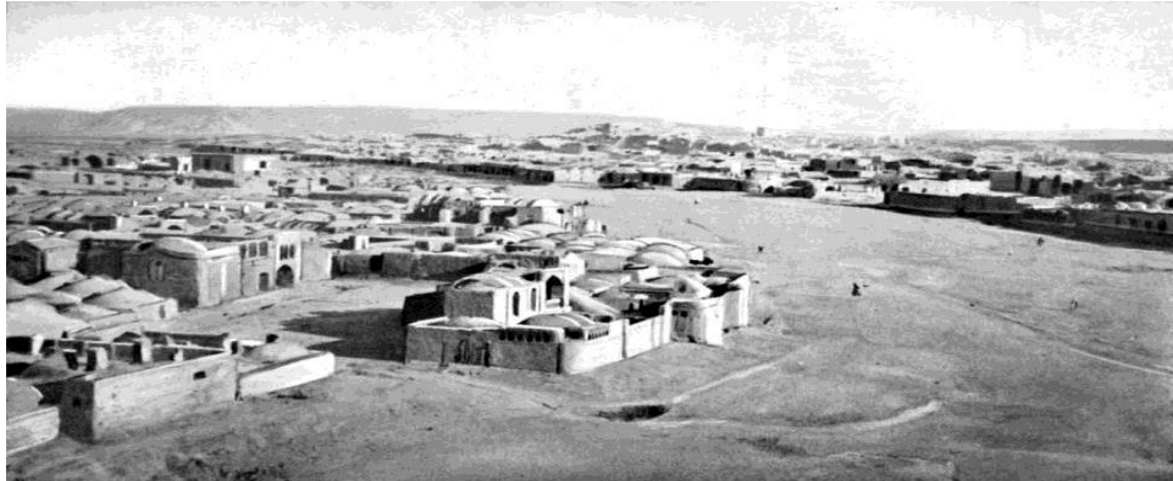
این گونه تعریف می‌کنند که زمین دهن باز کرده و کل ده به داخل زمین فرو رفته‌اند. در نهایت پس از زلزله و ویرانی‌هایی که به بار آمد گروهی که به خواجگان (غربت نشین) معروف بودند در کنار نهر قصبه ساکن شده و به مرور فضاهای کوچک برای خود بنا کرده و سپس با گذر زمان مردم دیگری نیز به این شهر آمده‌اند (مصاحبه کد ۱، ۲، ۳).

شهر قدیم بیرجند بر فراز و نشیب و دامنه‌های یک رشته تپه‌های خاکی به هم پیوسته، با خانه‌هایی طبق معماری سنتی بومی، متناسب با اقلیم و آب و هوا و محیط، از خشت خام و گل با سقف‌های گنبدی و بادگیرهای متعدد، به گونه‌ای متراکم و تنگاتنگ و به هم پیوسته ساخته شده بود. در این شهر خیابانی وجود نداشت و شبکه ارتباطی شهر کوچه‌هایی بود کم و بیش تنگ، کوتاه و دراز، با شکستگی و پیچ و خم‌های بسیار و به تمام معنی کلمه ماریچ بودند (شکل ۴) (Rezaei, 2001).

تحلیل و تفسیر داده‌ها (مطالعات میدانی)

با توجه به این موضوع که شهر بیرجند در ابتدای شکل‌گیری به صورت تپه‌ماهورهایی بوده که فقط مسیری برای ارتباط دادن شهرهای تجاری به همدیگر مورد استفاده قرار می‌گرفته و بعدها گروهی از اشخاص که در ابتدا برای استراحت بین راهی از این مکان استفاده می‌کرده و سپس با تکیه بر آب قنات این منطقه، به فکر ایجاد ده کوچکی شدند و به مرور زمان با گسترش این ده و ایجاد فضاهای جدیدی برای زندگی و کشاورزی و به تبع آن با افزایش جمعیت روبه‌رو شده است، لذا نحوه شکل‌گیری این شهر به گونه‌ای مورد توجه قرار گرفت که نویسندگان به دنبال کشف این موضوع هستند.

پس از بررسی‌های ضروری، چنین دریافت شد بیرجند چندین بار در اثر زلزله‌های مهیب خراب و مجدداً بازسازی گردیده است. در روزگاری دور زلزله‌ای رخ داده که بنا به گفته اشخاص، شهر کاملاً از بین رفته و عده‌ای از زلزله

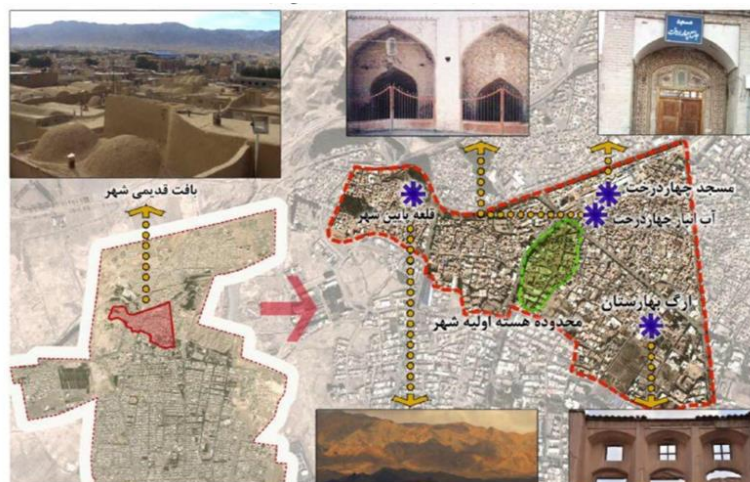


شکل ۴. نمای کلی بیرجند (Hosseinabadi, 2021).

Fig 4. Overview of Birjand (Hosseinabadi, 2021).

و کم کم گسترش یافت و تشکیلات حکومتی و سازمان‌های اداری و تأسیسات گوناگون در آن ایجاد شد و مردم بسیاری از روستاهای دور و نزدیک به آنجا مهاجرت کردند (شکل ۵) (Rezaei, 2001).

بیرجند از دوره صفویه اندک اندک رو به شهر شدن گذاشت و مرکزی‌تری پیدا کرد. اما تا دوره قاجاریه مرکز قنات شهر قائم بود و بیرجند هنوز قصبه داشت. در این دوره بیرجند که امیرنشین شده بود رسماً حاکم نشین ولایت قاینات شد و اندک اندک از حالت ده و قصبه درآمد



شکل ۵. هسته اولیه و بافت تاریخی شهر بیرجند (Hosseinabadi, 2021).

Fig 5. The historical core and fabric of the city of Birjand (Hosseinabadi, 2021).

سؤالات، اقدام به مصاحبه با افراد محلی و اشخاص کهنسال گردید.

برای رسیدن به پاسخ‌های منطقی و قانع‌کننده با ۱۳ نفر از اشخاصی که اطلاعاتی در این زمینه داشتند، مصاحبه و همچنین بازدیدهای میدانی صورت گرفت و برای اطمینان از درست بودن برخی صحبت‌ها، به اداره‌های مربوطه (اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری، اداره منابع طبیعی، اداره جهاد کشاورزی و اداره آب منطقه‌ای) مراجعه و پس از

پس از بررسی‌های کتابخانه‌ای، به دلیل عدم کفایت اطلاعات به دست آمده، اقدام به مطالعه میدانی شد. روش جمع‌آوری اطلاعات در مطالعات میدانی، بازدید از مادرچاه و میله‌چاه‌های قنات و همچنین بازدید میدانی از بافت تاریخی بود که در تاریخ‌های ۱۴۰۱/۰۸/۱۶ و ۱۴۰۱/۰۹/۲۱ و ۱۴۰۱/۱۲/۰۸ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۹ و ۱۴۰۲/۰۵/۲۸ صورت گرفت. پس از جمع‌آوری اطلاعات و عکس‌های مورد نیاز و همچنین مطرح شدن تعداد زیادی

کشاورزی و گذراندن زندگی، اضافه یا کم شده‌اند. کم شدن آب قنات نیز به دلیل ایجاد چاه‌های متعدد دلیلی برای تغییرات ایجاد شده در چاه‌های قنات و اضافه کردن میله چاه‌های فرعی برای افزایش میزان آب در طی دوران مختلف می‌باشد (شکل ۶).

در کنار این موضوعات، کویری بودن شهر بیرجند و کم بودن بارندگی در بعضی سال‌ها و حتی خشک‌سالی، باعث ساخت آب انبارهایی برای ذخیره آب در این منطقه شده که این امر نیز مسیر جدیدی برای انتقال آب نیاز دارد.

جمع‌آوری اطلاعات، به گفت و گو با اشخاصی که در گذشته چه خود به عنوان مقنی یا کارگر در قنات کار کرده‌اند یا از میله چاه‌های قنات قصبه بازدید کرده بودند و یا کشاورزان که از آب قنات استفاده می‌کرده‌اند پرداخته شد.

در بازدیدهای میدانی مشخص گردید، این قنات تغییراتی هر چند اندک را در نظام آبرسانی داشته است. تعدادی از میله چاه‌ها و مسیرهای عبور آب، کاملاً از بین رفته یا دچار تغییر شده‌اند. تعداد زیادی از مسیرها نیز با توجه به گسترش شهر و نیاز اهالی به استفاده از آب برای



شکل ۶. میله چاه سر پوشیده قنات قصبه.

Fig 6. Covered Well Pole of the Qanat Qasabeh.

جلسه بحث و تبادل اطلاعات گروهی در اداره میراث فرهنگی و گردشگری با حضور متخصصین در حوزه قنات و بافت تاریخی برگزار شد.

در عکس‌های هوایی مشاهده شده در دهه‌های مختلف مشخص شد باغ‌ها و منازل جدیدی به شهر افزوده شده که این خود حرکت‌های فرعی جدیدی را به آب داده است (شکل ۷). در ادامه برای کشف بیشتر ظرایف این موضوع،



شکل ۷. الف) نمای کلی بافت و کوشمان‌های بیرجند در سال ۱۳۳۵. ب) نمای کلی بافت و کوشمان‌های بیرجند در زمان حال (Google Earth).

Figure 7. A) Overview of the texture and landscapes of Birjand in 1956, B) Overview of the texture and landscapes of Birjand in the present time (Google Earth).

این شاخه به عنوان قدیمی‌ترین شاخه از قنات‌ها در منطقه بیرجند می‌باشد که مادرچاه آن در زیر روستای شهاباد در ابتدای دشت شهاباد واقع شده است (مصاحبه کد ۵).

مساحت این قنات حدود ۲۴ کیلومتر می‌باشد و یک قنات بسیار پر آب بوده است. تمامی امورات شهر بیرجند از قنات قصبه تأمین آب مورد نیاز خود را داشته‌اند و حجم آب بالای این قنات باعث پیشرفت شهر و افزایش جمعیت شده است (شکل ۸) (مصاحبه کد ۱).

شاخه‌های قنات قصبه

همان طور که در بالا ذکر گردید، پیدا کردن مادر چاه اصلی قنات قصبه کاری دشوار بوده و نمی‌توان با قاطعیت یک نقطه را به عنوان مادرچاه انتخاب کرد اما با توجه به گزارش‌های میدانی و جمع‌آوری اطلاعات از افراد کهنسال و با توجه به اینکه همه افراد متخصص موضوع برای یک منطقه اتفاق نظر داشتند، به بررسی این منطقه به عنوان مادر چاه خواهیم پرداخت.

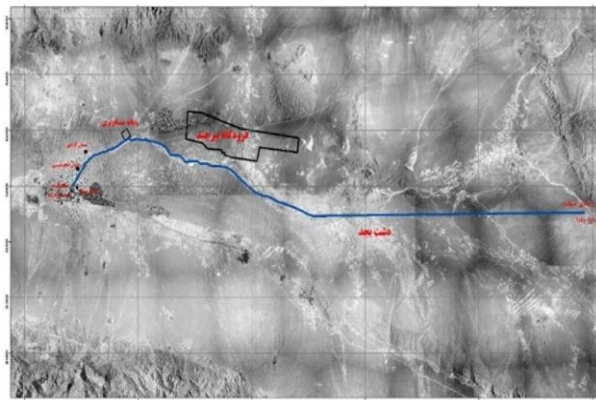
مادر چاه شاخه شور



مسیر قنات قصبه شهرستان بیرجند



مسیر قنات قصبه شهرستان بیرجند



شکل ۸. الف) مادرچاه شاخه شور قنات قصبه در عکس هوایی سال ۱۳۳۵. ب) مادرچاه شاخه شور قنات قصبه در عکس هوایی حال حاضر (Archive of the General Directorate of Agricultural Jihad of South Khorasan).

**Fig 8. A Mother Well, a branch of the salty qanat of the village in the aerial photo of the year 1956, B) The mother well of the salty branch of the Qanat of the village in the current aerial photo. (Archive of the General Directorate of Agricultural Jihad of South Khorasan).**

رشته از قنات، خشک شدن شاخه قبلی به دلیل حفر قناتی دیگر به موازات این قنات بوده که باعث کم شدن آب قنات قصبه شده بود (شکل ۱۰) (مصاحبه کد ۲۱). در خصوص این شاخه از قنات گفته‌ها حاکی از آن بود که در زمان خاندان علم شاخه شور این قنات بسیار کم آب شده بود و کارشناسی را از کشور دیگری آوردند تا برای این قنات چاره‌ای بیندیشد. این شخص وارد میله چاه شده و با دستگاہی به بررسی پرداخته و اظهار نظر کرده است که میله چاه‌هایی به سمت دشت مرک حفر کنند تا قنات مجدد به آبدی برسد (مصاحبه کد ۱).

مادر چاه این قنات حدود ۱۲۰ متر ارتفاع دارد و سهم آب این قنات ۱۹۲۰ فنجان بوده و مالکین اولیه این قنات ۵۷ نفر بوده‌اند. مدار آب این قنات بر ۱۶ بوده است و هر قسمت از ده نصف سهم خود را می‌برده‌اند به این معنی که ۲ روز آب برای سرده، ۳ روز می‌ون ده، ۳ روز ته ده (شکل ۹) (مصاحبه کد ۳ و ۶).

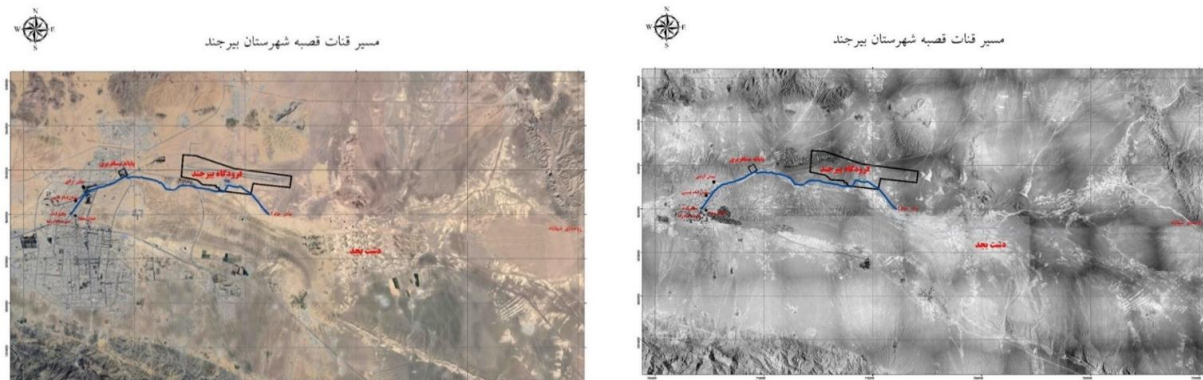
مادر چاه شاخه شیرین

مادر چاه این شاخه از قنات در دشت مرک، پشت فرودگاه بیرجند قرار گرفته است که بعد از فرودگاه و در مسیر رودخانه به شاخه شور قنات متصل می‌شود. بر اساس گفته‌هایی که از گذشتگان باقی مانده است، دلیل حفر این



شکل ۹. تصویر سند مالکین اولیه قنات قصبه (Archive of the Astan Quds Razavi Museum).

Figure 9. Image of the original ownership document of the Qanat Qasbeh. (Archive of the General Directorate of Agricultural Jihad of South Khorasan).



شکل ۱۰. الف) مادرچاه شاخه شیرین قنات قصبه در عکس هوایی سال ۱۳۳۵، ب) مادرچاه شاخه شیرین قنات قصبه در عکس هوایی حال حاضر (Archive of the General Directorate of Agricultural Jihad of South Khorasan).

Figure 10. A) The mother well of the sweet branch of the Qanat of Qasbeh in the aerial photograph of 1956., B) The main well of the sweet branch of the Qanat of Qasbeh in the current aerial photograph. (Archive of the General Directorate of Agricultural Jihad of South Khorasan).

در این مسیر، خصوصاً در دشت بجد به دلیل کشاورزی و بعدها به دلیل حفر چاه‌های فراوانی در این دشت، میله چاه‌ها و آثار آن از بین رفته است اما در عکس‌های هوایی دهه ۳۰ این میله چاه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. میله چاه‌ها تا پایانه باربری امتداد یافته و در نزدیکی پایانه بار، قنات به دو شاخه تقسیم شده و مسیر دیگر میله چاه‌ها به سمت دشت مرک ادامه می‌یابد. در ادامه مسیر میله چاه‌ها به سمت میدان فرودگاه رفته و به رودخانه می‌رسند. در

مسیر قنات از مادر چاه تا مظهر در زمان گذشته برای بیان فاصله میله چاه‌ها از کلمه "گَز" استفاده می‌کرده‌اند و فاصله میله چاه‌های قصبه به اصطلاح ۷۰ گز می‌باشد و هر گز تقریباً ۱ متر بوده است که از این راسته چاه تا راسته چاه بعدی ۷۰ متر است (مصاحبه. کد ۲).

مادرچاه این قنات از زیر آغل‌های روستای شهباد شروع شده و به سمت دشت شهباد و دشت بجد امتداد می‌یابد.

۲ و ۳.

سمت چپ رودخانه تعدادی از میله چاه‌ها قابل رؤیت هستند و درب چاه‌ها باز می‌باشد (شکل ۱۰) (مصاحبه کد



شکل ۱۰. میله چاه قنات قصبه.

**Figure 10. The Well Rod of the Qanat Qasabeh.**

پارک امتداد می‌یابد. پس از خروج از پارک در کوچه جمهوری ۲ از درب منزل مرحوم رسته مقدم گذر کرده و وارد شرکت نفت می‌گردد (شکل ۱۱) (مصاحبه کد ۲).

در ادامه در دامنه تپه‌های بلوار شهید ناصری و صیاد شیرازی ادامه می‌یابد و سپس به پارک آزادی رسیده و از ضلع شمالی پارک به سمت ضلع غربی و جنوب غرب



شکل ۱۱. منزل مرحوم رسته مقدم.

**Figure 11. The home of the late Rasteh Moghadam.**

میله چاه بعدی در انتهای جمهوری ۶ در محل پشت  
شهربانی قدیم قرار دارد و سپس در کوچه ۱۷ شهریور ۲۹،  
در کنار تعمیرگاه اتومبیل امیر یک میله چاه قرار دارد.  
(شکل ۱۲).

میله چاه‌های شرکت نفت کاملاً از آب پر شده‌اند طوری  
که اگر سنگی داخل چاه انداخته شود از صدای ایجاد شده  
میزان بالای آب قابل درک است. بر طبق گفته اشخاص  
این چاه‌ها دارای کمر بند می‌باشد. (مصاحبه کد ۵ و ۷ و  
۲).



شکل ۱۲. مکان قرار گیری میله چاه کنار تعمیرگاه اتومبیل.

Figure 12. The well pole is located next to the car repair shop.

(۱۳) و پس از آن در هیئت صاحب الزمانی قدیم (حکیم  
نزاری ۱۱) میله چاه‌ها قرار دارد (مصاحبه. کد ۲).

در ادامه در کوچه ۱۷ شهریور ۲۸ در مکانی که در گذشته  
کارخانه موزائیک‌سازی بود میله چاهی قرار گرفته است.  
سپس مقابل درب منزل آقای نقره‌گی (پلاک ۲۵) (شکل



شکل ۱۳. منزل آقای نقره‌گی.

Figure 13. Mr. Naghaei's House.

هستند (شکل ۱۴). در گذشته کوچه تا همین مکان بوده و بعد از آن هیچ ساخت و سازی نبوده است. و در نهایت مظهر قنات در خیابان اسدی در مدرسه شوکتیه قرار داشته است (مصاحبه، کد ۲).

سپس در حکیم نزاری ۴ با یک پیچ میله چاه‌ها حفر شده‌اند و مسیر مستقیم نیست. در ادامه در کوچه ربانی که در گذشته این کوچه به نام کوچه آقای فاضل معروف بوده است و در ادامه درب منزل آقای رئوفی و در ادامه در منتظری ۴ آموزش پرورش قدیم میله چاه‌ها قابل مشاهده



شکل ۱۴. کوچه ربانی.

Figure 14. Rabbani Alley.

مظهر جدید

مظهر جدید واقع در آشپزخانه مدرسه شوکتیه (حسنیه امام رضا) واقع در خیابان اسدی بین منتظری ۱ و ۳ قرار دارد (شکل ۱۶).

مظهر قنات قصبه

مظهر قدیم

مظهر قدیم در مقابل درب مدرسه شوکتیه بوده است که بنا به گفته افراد مطلع در مقابل مظهر حوضچه‌ای شکل گرفته بوده که حدوداً ۴ متر عمق داشته است (شکل ۱۵) (مصاحبه کد ۳).



شکل ۱۵. مظهر قدیم جلوی مدرسه شوکتیه.

Figure 15. The old image in front of the Shokatiyeh School.



شکل ۱۶. مظهر داخل مدرسه شوکتیه.

Figure 16. The image inside the Shaukatiya school

بوده است. بعدها و در زمان علم تغییر کاربری و تغییر فضا داشته و از آنجا به عنوان مدرسه استفاده شده است. پس می‌توان این نتیجه را نیز در ذهن داشت که مظهر داخل قلعه به حساب می‌آید (مصاحبه، کد ۳).

مسیر جدید

آب قنات در مظهر وارد حوضچه‌ای که در آشپزخانه مدرسه شوکتیه قرار داشت می‌شد که تأمین کننده آب مدرسه بود. در گذشته آب به صورت مستقیم از مدرسه خارج می‌شده است اما بعدها علم دستور می‌دهد آب را در مدرسه شوکتیه به سمت حیاط ببرند و در آنجا یک حوض بسیار کوچک تعبیه می‌کنند برای استفاده از آب به قصد وضو (مصاحبه، کد ۳) و از حوضچه مسیر خروجی به سمت ضلع جنوب غربی مدرسه قرار داشت که آب از مدرسه خارج می‌شد (شکل ۱۷).

مسیر حرکت آب

مسیر قدیم

لازم به ذکر است مظهر قنات در گذشته به صورت امروزی نبوده است و آب مستقیم وارد فضایی گودال مانند در جلوی مدرسه شوکتیه می‌شده است و پس از آن وارد جوی‌ها برای استفاده می‌شده است (مصاحبه، کد ۳).

به دلیل نبودن اطلاعات و آثار از زمان‌های بسیار گذشته، نمی‌توان مسیری مشخص و دقیقی را برای گذر آب از میان بافت مشخص کرد. در نتیجه در این پژوهش مسیر آب را از زمانی که شواهد و گفته‌هایی در خصوص این موضوع است بیان شده است.

نکته قابل توجه دیگری که از مصاحبه‌های میدانی روشن شد این بوده است که مدرسه شوکتیه در ابتدا به قلعه سرده متصل و جزئی از قلعه بوده و از سمت خیابان منتظری سوراخی داشته که برای رفت و آمد مورد استفاده



شکل ۱۷. خروج آب از مدرسه شوکتیه.

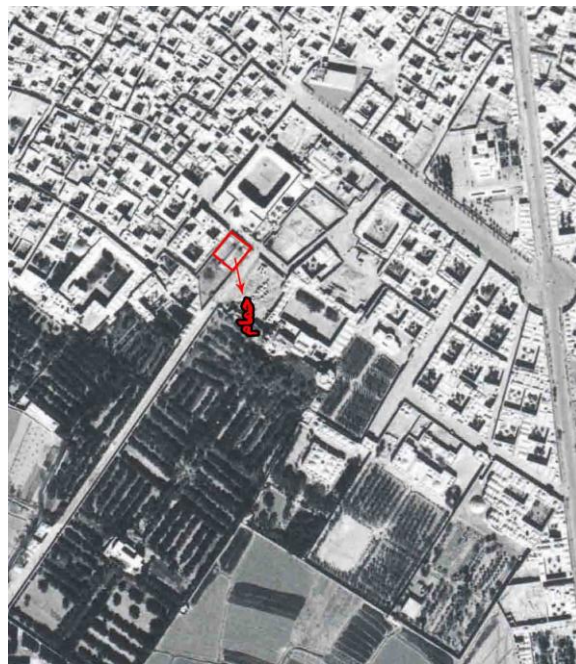
Figure 17. Water leaving the Shokatiyeh school.

آثار تنبوشه‌های سفالین که وظیفه تقسیم آب را بر عهده داشته‌اند در کاوشی که در حدود سال ۸۰ صورت گرفت پیدا شد (مصاحبه. کد. ۴). در گذشته آب قنات در حدی بوده که برای انتقال آب به جوی‌های مخصوص هر قسمت از ده، به ۳ شخص نیاز بوده است و به تنهایی امکان انتقال آب به جوی‌ها امکان‌پذیر نبود. حتی از گذشتگان خود نقل کرده‌اند که میزان آب در حدی بوده که کشاورزان و زارعین از حجم آب ناراضی و گله‌مند بوده‌اند (مصاحبه. کد ۳).

۱۱ شاخه دیگر در سمت راست مدرسه وارد جویی می‌شد که این جوی در ابتدای کوچه تأمین‌کننده آب حمام عمومی مقابل مدرسه شوکتیه بود که در اصطلاح به آن حمام کوچک می‌گفتند. این حمام چندین پله به پایین داشته است و دلیل آن استفاده از آب قصبه به دلیل شیب زمین بوده است. بعدها این حمام تبدیل به حمام نمره شده است و دلیل آن لوله کشی بیرجند بوده است (شکل ۱۸) (مصاحبه. کد ۱ و ۲ و ۳).

پس از آن در جویی در جلوی مدرسه، آب توسط لوله‌هایی که برای تقسیم در نظر گرفته شده بود به ۱۲ لوله تقسیم می‌شد. ۱ لوله به سمت چپ می‌رفت و وارد قلعه سرده می‌شد که تأمین‌کننده آب قلعه و باغ‌های متعلق به آن بود. این ۱ لوله نیز در ۱۲ لوله تقسیم شده و ۹ سهم متعلق به ابراهیم خان، ۲ سهم متعلق به حسام‌الدوله و ۱ سهم متعلق به خدیجه علم بوده است. پشت قلعه نیز یک استخر قرار داشته است که ارگ بهارستان و باغ زرشکی و باغ ژاندارمری از این استخر برای آبیاری استفاده می‌کرده‌اند (مصاحبه. کد ۲ و ۳).

این استخر در هر شبانه‌روز ۴ دفعه از آب پر و خالی می‌شده است و این نشان از میزان دبی بالای این قنات در گذشته بوده است. طبق تعریفی که مصاحبه کد ۱ و ۳ از اجداد خود نقل قول می‌کرد آب قصبه به حدی زیاد بوده است که در مسیر ورود آب دربی برای کنترل سرعت آب می‌گذاشتند. و به حدی حجم آب بالا بوده است که در تعریف خود از میزان آب مکرر از تشبیه آب به یک جزیره و سیلاب سخن به میان می‌آوردند (مصاحبه. کد ۳).



شکل ۱۸. حمام روبه‌روی مدرسه شوکتیه در عکس هوایی دهه ۱۳۳۵.

Figure 18. The bathroom in front of the Shokatiyeh School in an aerial photo from the 1950s.

می‌خورد که برای وضو گرفتن از آب استفاده می‌کردند (شکل ۱۹) (مصاحبه. کد ۲).

پس از حمام وارد کوچه سمت چپ شده و پس از پیچی به سمت راست و مجدداً سمت چپ به مقابل مسجد شاه رسیده و در کنار منزل مرحوم سالک زاده سه پله به پایین



شکل ۱۹. مسیر حرکت آب در پیچ کوچه‌ها.

Figure 19. Water movement path in the winding alleys.

در حوض‌های حیاطها نگهداری می‌کرده‌اند اما بعدها به کمک لوله‌هایی که تعبیه کردند آب به بعضی خانه‌های اشخاص راه می‌یافت. (مصاحبه. کد ۲ و ۳) پس از منزل سالک زاده و در مقابل منزل مرحوم محسن‌زاده آب پیچی به سمت راست داشت (شکل ۲۰).

آب قنات در مسیر خود در کوچه خواجه‌ها تا بعد از پایاب میدان چهار درخت و ورودی باغ بچه سرکار رو نبوده و از زیر در حرکت بوده است. در ابتدا آب به داخل هیچ‌کدام از منازل راه نداشته است و اشخاص برای استفاده خود از پایاب آب برداشته می‌کردند و گاهی بعضی اشخاص آب را



شکل ۲۰. مسیر آب در روبه‌روی منزل محسن‌زاده.

Figure 20. The water path in front of Mohsenzadeh's house.

بویان می‌رسیده و در آنجا آب تمامی حمام‌ها جمع می‌شده است و بوی بدی ایجاد می‌کرده به همین دلیل به کل گاه بویان معروف بوده است (مصاحبه کد ۱ و ۲ و ۳). سپس در مقابل سراجچه میرزا حسن‌خان به حمام غیناب می‌رسید. این حمام از زمان ساخت تا زمانی که به طور

در ادامه در مقابل منزل آراسته لوله‌ای برای انتقال آب به این منزل داشته است سپس مسیر خود را به صورت تقریباً مستقیم ادامه داده و در مسیر لوله‌ای برای استفاده به حمام آقامیرزا برای استحمام راه می‌یافته است. آب استفاده شده در حمام پس از خروج از حمام به کل گاه

کامل از بین نرفته بود چندین بار دچار تغییراتی در ساخت شده بود. این حمام نیز لوله‌ای برای انتقال آب



شکل ۲۱. مکان قدیمی حمام غیناب.

**Figure 21. The old location of Ghinab Bath.**

آب در این مسیر تأمین کننده آب این دو حمام بود. پس از حمام غیناب آب در کوچه پیچیده و از زیر منزل مرحوم راغبی گذشته و از ضلع جنوب شرقی

حسینیه نواب وارد حسینیه شده است (شکل ۲۲) (مصاحبه کد ۲ و ۳).



شکل ۲۲. حسینیه نواب.

**Figure 22. Hosseiniyeh Nawab.**

سپس از قسمت آشپزخانه حسینیه آب خارج و از زیر منزل طوفانی گذشته وارد میدان چهار درخت می‌شد. در میدان چهار درخت پایابی قرار داشت که چندین پله به پایین می‌خورد و برای وضو مورد استفاده بود (شکل ۲۳). این جوی به جوی "می‌ون ده" معروف بود (مصاحبه کد ۲ و ۳).





شکل ۲۳. مکان قرار گیری پایاب در میدان چهار درخت.

**Figure 23. Location of the footbridge in Chahar Derakht Square.**

لوله‌ای برای انتقال آب به آنجا نیز تعبیه شده بود (مصاحبه. کد ۲).

قبل از اینکه این حمام وجود داشته باشد در گذشته در این مکان فضایی چهار دیواری که حالتی شبیه به استخری داشته و اشخاص برای شست و شوی خود و آبتنی از این فضا استفاده می‌کرده‌اند (شکل ۲۴) (مصاحبه. کد ۱).

همچنین مکان سرویس بهداشتی مسجد چهار درخت در گذشته در ابتدا غسلخانه بود که از آب قصبه استفاده می‌کرد و بعدها با تغییر کاربری تبدیل به رختشوخانه شد. این رختشوخانه اختصاص به افراد ثروتمندتر داشته است. در کنار اینها حمام چهار درخت واقع در ضلع شرقی میدان چهار درخت نیز از آب قصبه استفاده می‌کرده که



شکل ۲۴. مکان قرار گیری حمام چهار درخت در گذشته.

**Figure 24. Location of the Four Trees Bath in the past.**



شکل ۲۵- جوی‌های انتقال آب به کشمان ته ده

Fig 25 - Water transfer channels to Keshmon Tah Deh

فقیرتر داشته است. در گذشته اهالی حیوانات خود را برای نوشیدن آب به این باغ می‌آوردند (مصاحبه، کد ۲). پس از آن آب وارد باغ صالحی شده و سپس باغ منصف و سپس باغ مهدی‌خان و سپس باغ کریم‌پور را آبیاری می‌کرده است. آب پس از خروج از باغ کریم‌پور وارد رختشویخانه‌ای که در ضلع جنوب باغ کریم‌پور قرار داشت می‌شد (شکل ۲۶). وقتی صحبت از حجم آب شد در نظر آن‌ها این قسمت مانند دریایی آب داشته که زن‌ها برای شستن لباس می‌آمدند و باید مراقب می‌بودند که به دلیل حجم و شدت زیاد، آب لباس‌ها را از دست آنها جدا نکند (مصاحبه کد ۳).

از این قسمت جویی تعیین شده بود که آب را به سمت مدرسه معصومیه و سپس خیابان آیتی و مسجد آیتی حرکت و در ادامه وارد کشمان ته ده (اراضی قصبه) می‌کرد. (شکل ۲۵) (که به آن جوی ته ده می‌گفتند). از محل میدان چهار درخت آب به سمت جنوب حرکت کرده و وارد باغ سرکار شده و پس از پیچی مجدداً به سمت شرق برگشته و وارد باغ ساجد می‌شد. باغ سرکار اولین جایی بوده آب به رو آمده و قابل مشاهده بود. پس از باغ ساجد به رختشویخانه پشت باغ ساجد می‌رسید. (مصاحبه کد ۲ و ۳) این رختشویخانه اختصاص به افراد



شکل ۲۶. مکان قرارگیری رختشویخانه در گذشته.

Figure 26. Location of the laundry room in the past.

جوی‌ها بسیار بزرگ بودند و حجم بالایی از آب را انتقال می‌داده‌اند اما بعدها با خشک شدن قنات سائز این جوی‌ها را تغییر داده‌اند (شکل ۲۷) (مصاحبه کد ۲ و ۳).

پس از آن آب در جویی در ادامه مسیر پس از طی حدود ۱۵۰ متر به محل تقسیم می‌رسید که جوی سمت راست به سمت کشمان میان ده و جویی که به سمت چپ پیچ می‌خورد وارد جوی کشمان سرده می‌شد. در گذشته این



شکل ۲۷. جوی انتقال آب به میان ده و سرده.

Figure 27. Water transfer channel to the village and the Sardeh.

که هنوز هم وجود دارد. روی تنه درخت عناب علامتی درست کرده بودند که شبیه یک خار بزرگ بوده است (شکل ۲۸). زمانی که آب بالا می‌آمد و به این نشان می‌رسید آب را تحویل می‌دادند برای جوی می‌ون ده. (مصاحبه کد ۳).

از این جوی به سمت بیمارستان امام رضا مسیری را برای انتقال آب تعبیه کرده بودند که حجم آب را در حدی انتقال می‌داده است که اگر یک ماشین در این مکان قرار داشت به زیر آب رفته و قابل دیدن نبود. از نشانه‌های زمان آبیاری سرده وجود درخت عنابی در این جوی بوده



شکل ۲۸. جوی انتقال آب به سرده و مکان قرار گیری درخت عناب.

Figure 28. Water transfer channel to the jujube tree and its location.

استفاده می‌شده است (شکل ۲۹). مسیر دیگر در این تقسیم به سمت جوی میان ده و سرده بوده است. طبق مصاحبه کد ۳ یکبار در سال از این مسیر استفاده می‌شده است.

در کنار این مسیرها، یک مسیر دیگر تعبیه شده بود که آب بعد از مظهر مستقیم به داخل باغ محسن‌زاده رفته و در آنجا در محل تقسیم آب، شاخه‌ای به سمت محله ته ده در نظر گرفته شده بود که در مواقعی که حوض انبار ته ده دچار کم‌آبی بوده از آب قصبه برای پر کردن حوض انبار



شکل ۲۹. مسیر انتقال اضطراری آب در مواقع کم‌آبی.

Fig 29. Emergency Water Transfer Route in Drought Conditions.

آن به دوره زندیه برمی‌گردد. پس از آن مسجد خواجه‌ها و مسجد شاه شکل گرفت. به تبعیت از آن و با توجه به نیاز ساکنین حمام‌ها به وجود آمدند. قدیمی‌ترین حمام بیرجند حمام چهاردرخت بوده است. پس از آن حمام عمومی روبه‌روی مدرسه شوکتیه و حمام آقامیرزا و حمام غیناب درست شدند. حسینیه نواب و حسینیه روبه‌روی آن شکل گرفت. حوض انبارها شکل گرفت. و باغ‌ها با درختان و محصولات زراعی مورد نیاز برای ساکنان شهر به وجود آمد. (مصاحبه کد ۲ و ۳ و ۴)

تغییرات و تأثیرات بافت براساس مسیر حرکت آب در خصوص بافت تاریخی بیرجند نیز این موضوع صدق می‌کند و در کنار این ما شاهد وجود خانه‌های اشخاص معروف و سرشناس در کنار محل گذر آب قصبه هستیم. همچنین در مرکز قدیم شهر (محله چهاردرخت) یکی از مظاهر عمده این قنات وجود پایاب در میدان اصلی بوده و این سهل الوصول بودن آب، دسترسی راحت به آب و غیره اشخاص را موظف کرده که ساختار شهر را آرام آرام به سمت میان چهار درخت شکل دهند.

شکل‌گیری بافت تاریخی

گفته‌ها و شنیده‌ها حاکی از آن است که خواجه‌ها قومی غریبه بوده‌اند که به آنها استاکار (چادر نشین) می‌گفتند که پس از گذر از این منطقه با آب قنات مواجه شدند که این خود محکم‌ترین دلیل برای بار انداختن آن‌ها در این منطقه و سپس سکنی‌گزیدن و در ادامه کم‌کم محله ساختن بوده است. محله‌ای که به نام خواجه‌ها شکل گرفت و معروف شد. خواجه‌ها پس از آشنایی با منطقه و کشمان این قصبه بهترین مکانی را که می‌توانستند در آنجا مکانی برای زندگی فراهم سازند، چه به لحاظ نزدیکی به آب چه به لحاظ جغرافیایی چه به لحاظ امنیتی و غیره. این فاصله بین قلعه تا میدان چهار درخت بود که آنها با ساختن مسجد، منازل و حمام‌ها از آب در این مسیر بهره بردند. به نحوی که هم بتوان آب را برای این مکان‌ها استفاده کرد و هم آب برای کشمان سه محله ته ده، میان ده و سرده مورد استفاده قرار گیرد.

بدین ترتیب با ساختن مساجد و حمام‌ها و حوض انبارها، یکی پس از دیگری بافت قدیمی یا تاریخی بیرجند شکل گرفت. اولین مسجد، مسجد چهار درخت بود. که قدمت

### نتیجه‌گیری

قنات قصبه بیرجند قناتی بوده که دو کاربرد داشته است. کاربرد اول استفاده برای عناصر شهری و پس از آن در کاربرد دوم به عنوان آبیاری برای زمین‌های کشاورزی و باغات استفاده می‌شده است.

تحقیقات پژوهش حاضر حاکی از آن بود که تأثیرات قنات بر بافت تاریخی در مولفه‌هایی از جمله انتخاب محل فضاها و کلیت بافت و شکل‌گیری فضاهای خصوصی و عمومی از قبیل خانه‌های مسکونی، گرمابه‌ها، مساجد، غسالخانه و حسینیه‌ها و باغات قابل لمس بوده است. آب خود را در هر یک از این فضاها به اشکالی نمایان کرده است. عوامل مؤثر در شکل‌گیری بافت شهری شامل نیروهای طبیعی، نیروهای اقتصادی و مالی، نیروهای سیاسی، نیروهای اجتماعی و فرهنگی و غیره می‌باشند. علاوه بر این‌ها، عامل بسیار مهم دیگری که در شکل‌گیری شبکه معابر نقش دارد توجه به مسیر حرکت آب بوده است و دسترسی به مسیر قنات عموماً شبکه‌های اصلی بافت را تعیین می‌کرده است.

بنابراین تبعیت شکل‌گیری بافت از قنات بوده و فضاها و عناصر اصلی شهر مانند حمام‌ها، مساجد، جوی‌ها و مرکز محله طوری شکل می‌گرفته است که دسترسی به آب قنات به آسان‌ترین شکل صورت‌پذیر باشد.

باید بیان داشت که بافت تاریخی بیرجند با توجه به زمین‌های قابل ساخت شکل گرفته بود و ساختن متراکم منازل و کوچه‌های تنگ به نوعی باعث صرفه‌جویی در زمین‌ها می‌شده است. همچنین در ساخت بافت باید به حفظ زمین‌های زراعتی نیز دقت می‌شده است. چون زندگی مردم این شهر از کشتان‌ها تأمین می‌شده است. در کنار این موضوعات توجه به شغل اشخاص نیز موضوع مهمی است. افراد معمولاً خانه‌هایشان را در نزدیکی محل کار خود می‌ساختند تا دسترسی آن‌ها به محل کارشان آسان‌تر باشد. این نیز دلیلی برای ساخت متراکم بافت بوده است که با گذشت زمان و افزایش جمعیت، این ساخت و سازها باعث فشرده‌تر شدن آن محله می‌شده است.

همچنین شغل و پیشه افراد و میزان ثروتمند یا فقیر بودن افراد نیز در شکل‌گیری هر محله تأثیر داشته است. برای نمونه محله کشتان که در جنوب زمین‌های زراعتی کشتان قصبه قرار داشت و محله‌ای اعیان‌نشین بود. محله

عناصر کالبدی-خدماتی و عمومی نیز که شامل آب انبارها و حمام‌ها می‌شد برای برطرف کردن نیاز ساکنان و در کنار آنها مسافرانی که به قصد تجارت، سفر و... از بیرجند گذر کرده نیازمند استفاده از آب بوده‌اند که این موضوع نیز نیاز به تغییر حرکت آب داشته است.

لازم به ذکر است باید به این نکته توجه داشته باشیم که شرایط آب و هوایی هم‌راستا با سایر عوامل محیطی، از دلایل مهم در شکل‌گیری بناها و بافت تاریخی بیرجند به شمار می‌آید. این عوامل محیطی به حدی بر زندگی مردم تأثیر داشته است که هر ساخت و ساز و تصرف انسان در محیط نیز به مقدار بسیار زیادی با توجه به شرایط آب و هوایی صورت گرفته است. به طور کلی در پیدایش محلات در بافت تاریخی بیرجند و شکل‌گیری آنها عوامل مختلفی مؤثر بوده که مهم‌ترین آنها را می‌توان عوامل حکومتی، خویشاوندی، اقلیمی، نظامی، اشتراک شغل و پیشه، طبقات اجتماعی، وضعیت مالی مردم، مذهب، هم‌دیاری بودن دانست.

تغییرات و تأثیرات حرکت آب براساس شکل‌گیری بافت با توجه به مشاهدات و گزارش‌های میدانی انجام شده این نتیجه حاصل شد که مسیر حرکت آب قنات تأثیر زیادی از بافت نگرفته است و بیشترین تأثیر را آب بر بافت گذاشته و ما فقط در موارد اندکی شاهد تغییراتی بسیار ناچیز بر مسیر حرکت آب هستیم. از تغییرات صورت گرفته عوض کردن مکان مظهر قنات بوده که یکی از دلایل آن با توجه به صحبت‌های مصاحبه‌کد (۲ و ۳) سرریز شدن گودال مظهر به دلیل حجم بالای آب بوده که آب به حیاط و اتاق‌های مدرسه شوکتیه نفوذ پیدا کرده و تصمیم به تغییر مظهر گرفته‌اند. مورد بعدی دیگر پیچ خوردن آب به سمت باغ ساجد و رساندن آب به رختشوخانه واقع در مسیر تقسیم آب بوده که برای نیاز ساکنین این محله به رختشوخانه بوده است زیرا در آن زمان هر محله رختشوخانه، حمام، حوض انبار و غیره مخصوص به خود را داشته است. (مصاحبه کد ۳).

در نهایت آخرین تغییر مربوط به لوله‌گذاری بعضی از منازل بوده است که آب را توسط تنبوشه‌هایی به داخل حیاط و حوض منازل خود انتقال می‌داده‌اند. پس این نتیجه حاصل می‌شود که بافت تاریخی بیرجند بر اساس مسیر حرکت قنات قصبه شکل گرفته است.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اذعان کرد، شکل‌گیری بافت تاریخی بیرجند با تکیه بر قنات قصبه بوده و پیشرفت آن با گذشت زمان به دلیل ارتباط‌های گسترده با شهرها و کشورهای دیگر بوده است. هم‌چنین وجود خاندان علم در این ناحیه و کمک به پیشرفت و گسترش شهر نیز دلیلی برای افزایش جمعیت و بزرگ شده ده بیرجند بوده است. با توجه به اینکه پیشینه‌ای از زمان دقیق شکل‌گیری ده بیرجند وجود ندارد و با توجه به اینکه بیرجند بر اثر زلزله چندین بار خراب شده و از نو شکل گرفته می‌توان پیشرفت چشم‌گیر آن را به زمان صفویه نسبت داد و دلیل آن را می‌توان ایجاد امنیت توسط سلسله صفویه و همچنین پایگاه تجاری بودن برای بازرگانان دانست.

با توجه به مطالعاتی که صورت گرفت این نتیجه حاصل شد که ساکنین کمتر دخالتی در تغییر مسیر حرکت قنات داشته و شرایط خود را با توجه به مسیر حرکت قنات وفق داده‌اند و این قنات تأثیر به‌سزایی در شکل‌گیری شهر بیرجند و پیشرفت آن داشته است. یکی از شریان‌های حیاتی در این منطقه قنات می‌باشد که بدون کمک هیچ نیروی خارجی همیشه جریان داشته و موجبات آبادی این منطقه را فراهم ساخته و باعث استقرار جوامع انسانی و ایجاد روستا شده است (شکل ۳۰).

تأثیر قنات بر بافت به‌گونه‌ای است که فضاهای متکی به آب قنات در پایین‌ترین سطح ممکن ساخته شده تا آب قنات در جوی‌هایی که جاری است به‌طور طبیعی وارد آن فضا شده و آب مورد نیاز را تأمین کند. حتی در بعضی فضاها که آب از آنجا گذر می‌کرده پایایی درست می‌کردند که امکان برداشت آب یا استفاده در جهت عبادات، شستشو و غیره فراهم باشد.

خواججه‌ها که همان‌طور که از نام آن مشخص است مختص به خواججه‌ها بوده است که در ابتدا ده بیرجند را پایه‌گذاری کرده بودند. محله ته ده که یکی از محله‌های قدیم بیرجند بوده برای سکونت طبقات متوسط بوده است. پس با توجه به تقسیم‌بندی‌های این چنینی می‌توان نتیجه گرفت در شکل‌گیری عوامل بسیاری از جمله عوامل حکومتی، شغلی، طبقات اجتماعی و در کنار تمام این عوامل نزدیکی به آب قنات نقش اساسی داشته‌اند.

تحلیل تأثیرگذاری و نقش قنات قصبه در شکل‌گیری بافت تاریخی بیرجند نشان‌دهنده پیوندی بسیار قوی و همه‌جانبه میان این دو عنصر می‌باشد. توجه به نقشه‌های هوایی و بافت بیرجند نشان می‌دهد ارتباط بین ساختار فضاهای بافت و شبکه آبرسانی قنات به‌صورت خطی و متمرکز و ویژه شکل گرفته است. شکل‌گیری مسیرهای بافت اعم از اصلی و فرعی مطابق با حرکت آب و مسیرهای منشعب از آن می‌باشد. همچنین پیوند عناصر شبکه آبی در فضاهای بافت به‌عنوان یک عنصر جدایی‌ناپذیر در کنار سایر عناصر مربوط به بافت شکل گرفته است. باید به این نکته اشاره کرد که مکان‌های شکل گرفته مانند مسجد چهار درخت و مسجد عاشورا در کنار جوی قصبه شکل گرفته‌اند و در کنار این دو عنصر مهم ساخت مکان‌های دیگر مانند حسینیه نواب، حمام‌های غیناب و آقامیرزا، و در کل ساخت کوچه‌ها با توجه به مسیر حرکت آب قصبه بوده است و مسیر حرکت آب تا میدان چهار درخت تغییر نداشته و بافت براساس این حرکت شکل گرفته است از مسیر چهار درخت که آب دور می‌زده و به سمت محل تقسیم جوی‌های سرده و میان ده می‌رسیده است به دلیل شکل‌گیری باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی دچار تغییرات اندکی شده است.



شکل ۳۰. نمای کلی حرکت آب در بافت.

Fig 30. Overview of Water Movement in Tissue.

Rezaei, J. (2001). *Birjand Nameh*. Tehran: Hirmand Publishing. [In Persian]

Zaferanlu, R., & Hamzeh, H. (2003). *The Face of Cultural Heritage in Birjand County*. Birjand: General Directorate of Education, Publishing, and Cultural Productions. [In Persian]

Sarvghad Moghadam, A., & Papoli Yazdi, M. H. (1992). *Technical Qanat for Accessing Water*. Mashhad: Cultural Deputy of Astan Quds Razavi. [In Persian]

Soltani Mohammadi, M. (2017). Study of the effects of Qanat on the structural fabric of Mohammadiyah Naein. *Journal of Architecture in Hot and Dry Climates*, 5(6), 97-115. [In Persian]

Monsef, M. A. (1975). *Amir Shokat al-Molk Elm (Amir Qain)*. Tehran: Amir Kabir Publishing. [In Persian]

Vafaifard, M. (2005). *In Search of Urban Identity of Birjand*. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development. [In Persian]

Plan for the protection and restoration of the Baharestan Citadel in Birjand (2016). Birjand: Archive of the General Directorate of Cultural Heritage of Southern Khorasan [In Persian]

#### Interviews:

#### منابع

Ahmadian, M. A. (1995). *Geography of Birjand County*. Mashhad: Astan Quds Razavi Printing and Publishing Institute. [In Persian]

Ayati, A. (1997). *Memories of Birjand and its Political Events*. Tehran: Movafagh Publishing. [In Persian]

Behnia, M. R. (2001). *Birjand, the Jewel of the Desert*. Tehran: Tehran University Printing and Publishing Institute. [In Persian]

Papoli Yazdi, M. H., Labaf Khaniki, R., Labaf Khaniki, M., Jalali, A., & Votoughi, F. (2010). *Qanat of Qasabeh Gonabad*. Tehran: Papli Publishing. [In Persian]

Pouyan, M. (2013). *Agriculture in South Khorasan*. Tehran: Bokar Thought Publishing. [In Persian]

Jannatifar, M. A. (2018). *Typology of Historical Gardens in Birjand with a Local Conservation Approach* (Master's thesis, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan University of Art). [In Persian]

Hosseinabadi, S. (2021). *Rerecognition and Analysis of Structural-Functional Patterns of the Historical Market of Birjand* (Master's thesis, Faculty of Art, Birjand University). [In Persian]

Code 5: Ahmad Amirabadi (Singer of the Amirabad Qanat in Birjand)

Code 6: Mohammad Hossein Zareh Fard (Farmer and Qanat Supervisor)

Code 7: Mohammad Amirabadi (Supervisor of Qanats in South Khorasan Province)

Ali Jafari (Head of the Water and Soil Department in Birjand)

Code 1: Hassan Mazrouei (Retired from the Electricity Distribution Company)

Code 2: Ghasem Pourrasa (Employee of the Birjand Endowment Office)

Code 3: Gholamhossein Barzgaran (Architect of the Historical Fabric of Birjand)

Code 4: Mohammad Ali Jannati Far (Manager of the Historical Fabric Base of Birjand)





## Predicting the effect of dam construction on the quantity and quality of the aquifer downstream of the dam (case study: Ardak Dam in Mashhad Plain catchment, Iran)

Farshad Sanagar Darbani<sup>1</sup> | Alireza Moghaddam<sup>2</sup> | Hamid Omranian Khorasani<sup>3</sup> | Amir Hossein Hosseini<sup>4</sup> | Seyed Javad Seyed Alhosseini<sup>5</sup>

1. Msc graduated in Civil Engineering, Khayyam University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Assistant professor, Department of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.
3. Msc graduated in Water Resource Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4. Msc graduated in Civil Engineering and Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
5. Msc graduated in Water Science and Engineering, Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

✉Corresponding Author: [Alireza.moghaddam@yahoo.com](mailto:Alireza.moghaddam@yahoo.com)

Received:  
29 October 2024

Accepted:  
04 December 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Groundwater,  
Khorramabad,  
Support Vector  
Regression, Metaheuristic.*

### Extended abstract

#### Introduction

Water resource development, including dam construction, is one of the most significant measures for optimal water management worldwide. These structures are built to store and regulate water resources, supply drinking and agricultural water, control floods, and generate hydroelectric power. However, despite the numerous benefits provided by dams, their adverse environmental and hydrogeological impacts on groundwater resources have always been a concern for researchers. One such impact is the reduction of groundwater recharge in downstream aquifers, which can lead to groundwater level decline, water quality degradation, and, in some cases, land subsidence.

**Cite this article:** Sanagar Darbani, F., Moghaddam, A.R., Omranian Khorasani, H., Hosseini, A.H., & Seyed Alhosseini, S.J. (2024). Predicting the effect of dam construction on the quantity and quality of the aquifer downstream of the dam (case study: Ardak dam in Mashhad plain catchment, Iran), *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 169-182. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.7821.1073>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

In Iran, where surface water resources are scarce and demand increases, dam construction is crucial in water resource management. Ardak Dam, located in the Mashhad Plain watershed, is one of the projects whose impact on the region's aquifer needs thorough investigation. This study aims to examine the effects of Ardak Dam construction on the quantity and quality of the Mashhad Plain aquifer using dynamic modeling in VENSIM software.

Understanding these effects can contribute to better comprehending the interaction between surface and groundwater resources and provide appropriate management strategies.

## Materials and Methods

### Study Area

Ardak Dam is located 55 km north of Mashhad along the Mashhad–Quchan road. It is built on the Ardak River, which serves as a water source for the Mashhad Plain. The primary objective of constructing this dam was to regulate water flow for various purposes, including drinking water supply and agriculture. The annual average discharge of the Ardak River is estimated at 25.13 million cubic meters, while the annual regulated capacity of the dam is approximately 3.30 million cubic meters.

### Research Methodology

To assess the impact of Ardak Dam on the downstream aquifer, hydrological, hydrogeological, and piezometric data from the region were utilized. The groundwater level variations in two observation wells, Shirhesar and Kalateh-Sheikha, were examined. Shirhesar well is located downstream of the dam, where the water enters the aquifer, whereas Kalateh-Sheikha well is upstream and was used as a control well.

For data analysis, dynamic modeling in VENSIM software was employed. Key variables included dam reservoir inflow, evaporation rates, aquifer discharge, and agricultural demands. The model was run for a 14-year period (2012-2026) to analyze changes in groundwater levels and water quality downstream of the dam.

## Results and Discussion

### Impact of the Dam on the Aquifer Level

The results indicated that the groundwater level in Shirhesar observation well decreased by approximately 4 meters after the construction of Ardak Dam. Additionally, the analysis of the unit hydrograph of the Mashhad Plain showed that, in general, the groundwater level across the entire plain declined by about 5 meters. A comparison of groundwater level decline in upstream and downstream wells demonstrated that the reduction in recharge was more significant in wells closer to the dam, indicating the direct impact of dam construction.

During the reservoir filling period (2007-2013), the rate of groundwater level decline in the Shirhesar observation well increased, confirming that changes in aquifer recharge were influenced by dam construction. However, in the Kalateh-Sheikha well, located upstream of the dam, similar variations were not observed, indicating the limited impact of the dam on upstream areas.

### Impact of the Dam on Aquifer Water Quality

A crucial aspect of assessing the effects of dam construction is the examination of groundwater quality changes. The findings revealed that parameters such as electrical conductivity (EC) in the Shirhesar well increased after dam construction. However, similar trends in water quality deterioration were also observed before the dam was built, suggesting that the dam was not the sole factor contributing to these changes. The analysis indicated that cumulative factors, including over-extraction of groundwater for agriculture and changes in aquifer balance, played a more significant role in water quality degradation.

### Modeling and Future Predictions

Simulating groundwater level changes under different scenarios revealed that:

- In 66% of cases, the irrigation water demand was not fully met by the dam, resulting in increased groundwater extraction and, consequently, a decline in

aquifer levels.

- In a scenario where water demand was reduced, and the dam's influence was removed, the groundwater level showed an improvement.
- In a scenario of increased groundwater withdrawal, the groundwater level continued to decline until 2026.

### **Conclusion**

This study demonstrated that the construction of Ardak Dam has directly impacted the reduction of groundwater recharge in the downstream aquifer, leading to a decline of approximately 4 meters in observation wells near the dam and 5 meters across the entire Mashhad Plain. Additionally, the analysis of groundwater quality indicated an increase in salinity (EC) in downstream wells, although this change was not solely attributed to the dam but rather to a combination of factors, including excessive groundwater extraction.

Modeling results revealed that in 66% of cases, the irrigation water demand was not entirely met by the dam, leading to an increased reliance on groundwater sources and further depletion of the aquifer. Thus, optimizing groundwater withdrawal, improving agricultural water use efficiency, and implementing sustainable water resource management policies can mitigate the negative impacts of dam construction on the aquifer.



## پیش‌بینی اثر سدسازی بر کمیت و کیفیت آبخوان پایین دست سد (مطالعه موردی: سد ارداک در حوضه آبریز دشت مشهد، ایران)

فرشاد ثناگر دربانی<sup>۱</sup> | علیرضا مقدم<sup>۲✉</sup> | حمید عمرانیان خراسانی<sup>۳</sup> | امیر حسین حسینی<sup>۴</sup> | سید جواد سیدالحسینی<sup>۵</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه خیام مشهد، مشهد، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.
۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۵. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [Alireza.moghaddam@yahoo.com](mailto:Alireza.moghaddam@yahoo.com)

### چکیده

منابع آب قابل استفاده به دلیل توزیع نامتقارن و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی با محدودیت‌هایی مواجه شده است. برای مقابله با این چالش‌ها، انسان به تدابیر مختلفی متوسل شده است. یکی از این تدابیر، کاهش عدم قطعیت در دسترسی به آب از طریق ساخت سدهای مخزنی و ایجاد مکان‌های ذخیره آب است. گرچه ساخت سد یکی از مهم‌ترین دستاوردهای بشر محسوب می‌شود و مزایای بسیاری به همراه داشته است، اما تأثیرات منفی نیز بر وضعیت هیدروژئولوژی مناطق داشته است. یکی از این تأثیرات منفی، کاهش تغذیه آبخوان‌ها است. مطالعات محدودی در خصوص تأثیر سدها بر آبخوان‌ها وجود دارد؛ اما در این پژوهش تلاش شده است تا تأثیر ساخت سد ارداک بر کمیت و کیفیت آبخوان دشت مشهد بررسی شود. به همین منظور میزان آب ورودی به رودخانه ارداک قبل از احداث سد بررسی و تحلیل شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار VENSIM میزان افت آبخوان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن شعاع تأثیر سد ارداک تا محل چاه مشاهده‌ای شیرحصار، میزان افت ناشی از احداث سد قابل مشاهده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی پس از احداث سد ارداک و در چاه‌های مشاهده‌ای پایین‌دست آن حدوداً ۴ متر کاهش یافته است. هیدروگراف واحد دشت مشهد نیز حدود ۵ متر افت را نشان می‌دهد. بررسی‌های انجام شده در سال‌های آگیری سد ارداک نشان داد که سرعت افت ۰/۵ متر بوده است. همچنین شبیه‌سازی اثرات سد بر اساس برداشت اضافی در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که این امر می‌تواند موجب افزایش سرعت افت سطح آب زیرزمینی تا سال ۱۴۰۵ شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

آبخوان دشت مشهد،

سد ارداک،

نرم‌افزار VENSIM

**مقدمه**

مهندسان و مدیران در طراحی و ساخت سدها معمولاً تمرکز اصلی خود را بر مسائل سازه‌ای مانند پایداری، مقاومت سد و جنبه‌های فنی معطوف می‌کنند. با این حال، مسائل دیگری مانند مسائل انسانی (از جمله موضوعات اجتماعی و اقتصادی منطقه) و تأثیرات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی (مانند تأثیر سد بر آبخوان‌ها و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی) اغلب کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. این مسائل معمولاً در مرحله بهره‌برداری از سد خود را نشان می‌دهند، در حالی که در مرحله طراحی کمتر به آنها پرداخته می‌شود. این غفلت می‌تواند به عواقب جدی‌تری مانند افت سطح آبخوان‌ها و در نهایت نشست زمین منجر شود. البته در برخی موارد، با توجه به شرایط خاص مورفولوژیکی و زمین‌شناسی یک منطقه، ممکن است ساخت سد تأثیر چندانی بر وضعیت آبخوان‌ها نداشته باشد. با این وجود، بررسی و توجه بیشتر به تأثیر سدها بر آبخوان‌ها و محیط‌زیست منطقه امری ضروری است تا از بروز مشکلات بلندمدت جلوگیری شود (Ghazavi & Ebrahimi, 2018). طرح‌های توسعه منابع آب، همچون احداث سدها در رودی آبخوان‌ها یا ساخت آب‌بندها، همواره تأثیراتی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی مناطق پایین‌دست به همراه دارند. فعالیت‌های انسانی، مانند تغییر وضعیت طبیعی رودخانه‌ها، موجب دگرگونی‌های گسترده‌ای در جریان طبیعی رودخانه‌ها، میزان انتقال آب در آبخوان‌ها و جریانات ورودی و خروجی سفره‌های زیرزمینی شده‌اند (Walter, 2010; Daolei et al., 2019). پیش‌بینی تأثیرات زهکشی بر کمیت و کیفیت سفره‌های آب زیرزمینی در پایین‌دست سدها برای مدیریت مؤثر منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعات نشان می‌دهند که تخلیه مخازن سدها می‌تواند منجر به فرسایش قابل توجه، آزدسازی رسوبات و تغییرات در غلظت مواد مغذی در پایین‌دست شود (Bowen, 2004; Kumar et al., 2014). علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند دینامیک سیستم‌ها و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی سیستم‌های زهکشی، می‌تواند به پیش‌بینی متغیرهای مهمی مانند نوسانات سطح آب، میزان تخلیه زهکشی و سطح شوری کمک کند و نقش مؤثری در

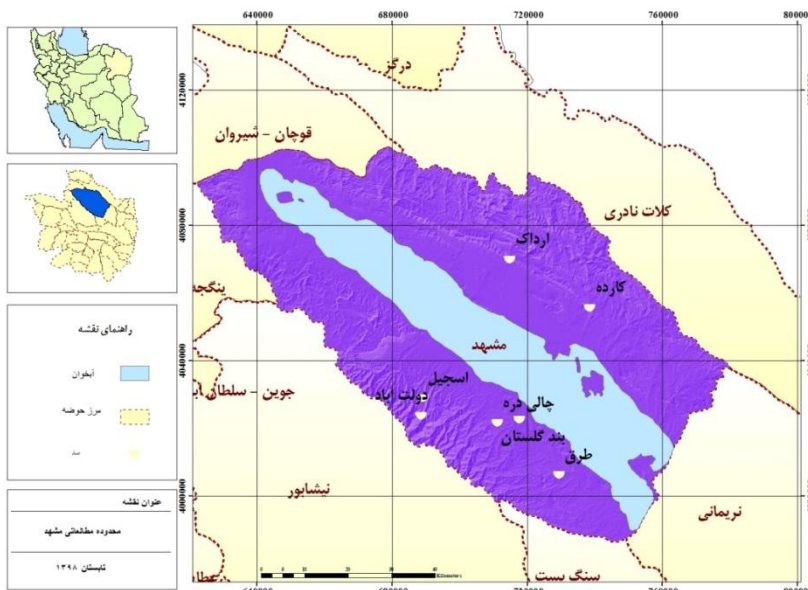
مدیریت پساب زهکشی ایفا نماید (Nozari & Liaghat, 2014; Woong et al., 2002; Hong et al., 2021). روش‌های دیگری مانند رگرسیون بردار پشتیبان فازی نیز برای برآورد میزان زهکشی از سدها به کار گرفته شده‌اند که نشان‌دهنده اهمیت مدل‌های پیش‌بینی دقیق در مدیریت بهینه سدها است (Wiriyanattanakun, 2011; Jahangiri et al., 2019).

در محدوده مطالعاتی مشهد، چندین سد خارج از محدوده آبخوان احداث شده است. این پژوهش به طور خاص به بررسی سد ارداک و تأثیرات آن بر آبخوان محدوده مطالعاتی مشهد پرداخته است. لازم به ذکر است که سد ارداک علاوه بر تأثیر بر آب‌های زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب شهر مشهد نیز محسوب می‌شود. بنابراین، توجه به اثرات کمی و کیفی این سد بر وضعیت آبخوان دشت مشهد از اهمیت بالایی برخوردار است. اهداف اصلی این مطالعه شامل تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی در پایین‌دست سد ارداک قبل و بعد از احداث سد، و همچنین بررسی تغییرات هیدروگراف واحد در پایین‌دست این سد است. این بررسی‌ها می‌توانند به درک بهتر تأثیرات سد بر منابع آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب کمک کنند.

**مواد و روش‌ها****منطقه مورد مطالعه**

سد ارداک در فاصله ۵۵ کیلومتری شهر مشهد و در مسیر جاده مشهد-قوچان احداث شده است (شرکت آب منطقه‌ای، ۱۳۹۵) (شکل ۱). ساخت این سد در سال ۱۳۸۱ آغاز شد و در سال ۱۳۸۶ مرحله آبگیری آن شروع گردید. نهایتاً در سال ۱۳۹۲، این سد به بهره‌برداری رسید. هدف اصلی از احداث سد ارداک، مهار و ذخیره رواناب رودخانه، تنظیم جریان آب برای تأمین نیازهای شرب، صنعت و حقابه اراضی کشاورزی پایین‌دست است. بر اساس آمار دوره ۱۱ ساله، متوسط آبدهی سالانه این رودخانه ۲۵/۱۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است. در سال آبی ۱۳۶۴-۶۵، این مقدار به حدود ۲۸/۲ میلیون مترمکعب رسید. این رودخانه در مواقع بارندگی‌های شدید، حالت طغیانی به خود می‌گیرد و دبی لحظه‌ای آن در روستای ارداک به ۶۰ مترمکعب در ثانیه می‌رسد.

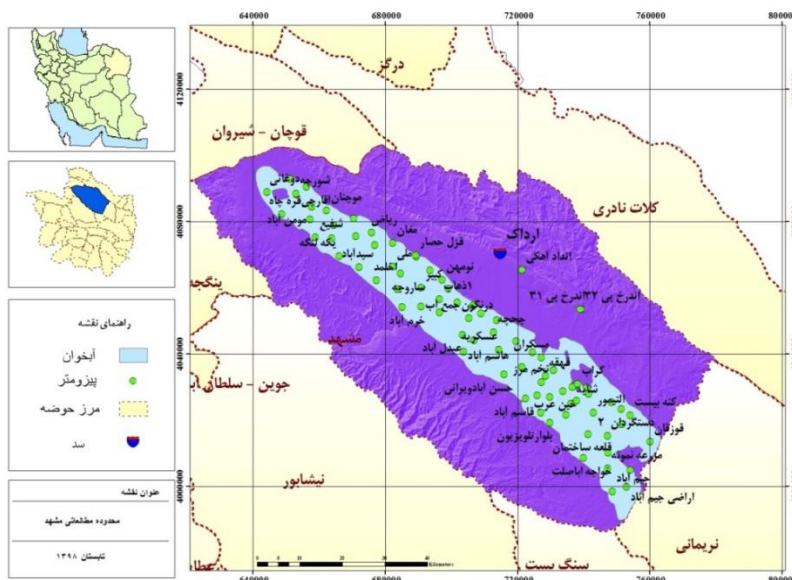
همچنین، حجم آب قابل تنظیم سالانه توسط این سد، ۳/۳۰ میلیون مترمکعب است.



شکل ۱. سد های موجود در محدوده مطالعاتی مشهد.   
 Fig 1. Existing dams in the Mashhad study area

پایین‌دست محل تقاطع حوضه آبریز سد ارداک و آبخوان دشت مشهد قرار دارد، در حالی که چاه مشاهده‌ای کلاته‌شیخ‌ها در بالادست این تقاطع واقع شده است. این انتخاب امکان مقایسه تغییرات سطح ایستابی در دو موقعیت متفاوت نسبت به سد را فراهم می‌کند.

در شکل (۲)، موقعیت سد ارداک و چاه‌های مشاهده‌ای موجود در محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است. برای بررسی تأثیر سد ارداک بر سطح ایستابی منطقه، از دو چاه مشاهده‌ای شیرحصار و کلاته‌شیخ‌ها به‌عنوان ایستگاه‌های شاهد استفاده شده است. چاه مشاهده‌ای شیرحصار در



شکل ۲. موقعیت سد ارداک و چاه‌های پیزومتر.   
 Fig 2. Location of the Ardak Dam and piezometric wells.

رواناب تشکیل‌شده در رودخانه‌ها دارای ویژگی‌های متعددی است که برخی از آنها با استفاده از روش‌های

روش انجام پژوهش

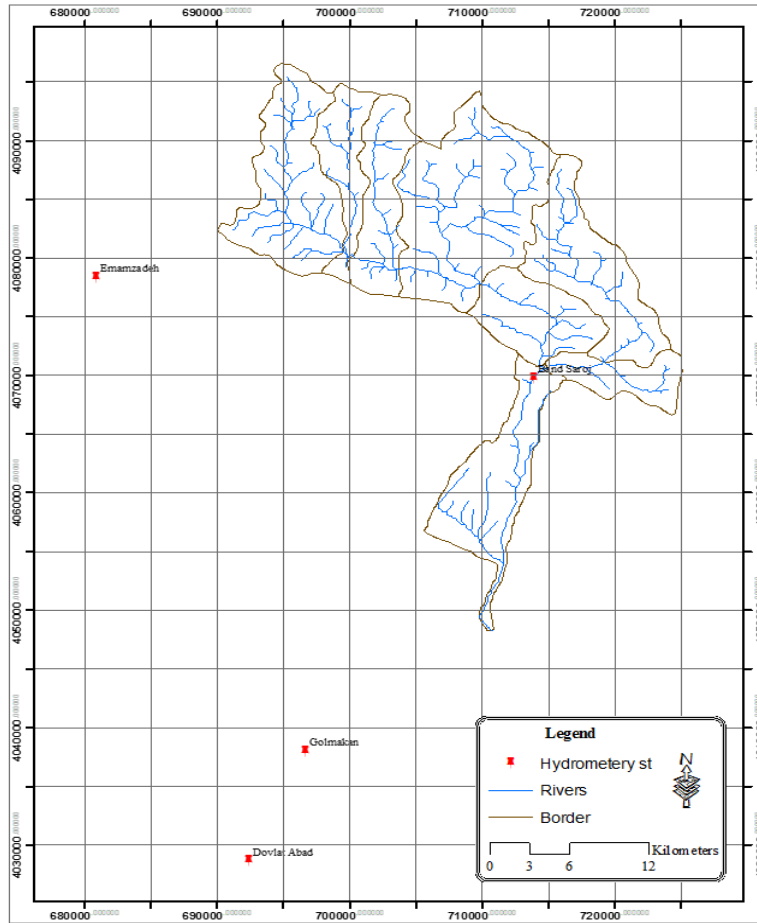
برای ارزیابی تأثیر سد بر آبخوان، بررسی تغییرات سطح آب پیزومترها ضروری است. به همین منظور، ابتدا کلیه داده‌ها و اطلاعات مرتبط از دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی جمع‌آوری شد. در مرحله بعد، داده‌های کنترلی شامل سطح آب پیزومترها، اطلاعات هیدرومتری و دبی چاه‌های بهره‌برداری تهیه گردید. همچنین، برای بررسی افت متوسط سالانه، هیدروگراف مرکب درازمدت تهیه شد. مشخصات چاه‌های مشاهداتی نزدیک به سد ارداک در شکل (۴) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که نزدیک‌ترین پیزومترها به محل تقاطع رودخانه ارداک و آبخوان دشت مشهد، چاه‌های مشاهده‌ای شیرحصار و چهچه هستند (شکل‌های ۵ و ۶). در ادامه تأثیر سد بر آبخوان پایین‌دست با استفاده از مدل VENSIM مورد تحلیل قرار گرفته است.

برای پیش‌بینی تغذیه آینده آبخوان، لازم است پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی آبخوان ناشی از تغییرات آب سطحی به مدل وارد شوند. از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تغییرات آبخوان، تغییرات رواناب ورودی به آبخوان و همچنین تغییرات تقاضای آب هستند. در این مطالعه، فرض شده است که تغییرات ورودی آب به آبخوان محدوده سد ارداک تقریباً ثابت است. همچنین، میزان تخلیه از چاه‌های کشاورزی به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شده است. اگرچه در گذشته تغییرات تخلیه نوسانات زیادی داشته است، اما در سال‌های اخیر روندی نسبتاً ثابت را نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از محدودیت‌های اعمال‌شده بر برداشت آب از طریق نصب کنتورهای حجمی است. بر اساس مدل مفهومی طراحی‌شده، اطلاعات ورودی به مدل شامل موارد زیر است: سری بلندمدت آبدهی ماهانه ورودی به مخزن سد (میلیون مترمکعب)، توزیع ماهانه تبخیر از سطح مخزن (میلی متر)، جدول سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد (به ترتیب کیلومتر مربع، میلیون مترمکعب و متر)، حجم حداکثر مخزن (میلیون مترمکعب)، حجم حداقل مخزن (میلیون مترمکعب)، توزیع ماهانه نیاز کشاورزی (میلیون مترمکعب)، نشت به آبخوان و بارندگی. دوره آماری انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی سد ارداک، یک دوره ۱۴ ساله شامل سال‌های آبی ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۵ (۱۶۸ ماه) است.

محاسباتی قابل تعیین هستند. دو ویژگی اصلی که در این روش‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند، عبارتند از: الف) دبی اوج سیلاب؛ و ب) تغییرات زمانی دبی سیلاب یا هیدروگراف. علاوه بر این، ویژگی‌های دیگری مانند زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب، زمان تأخیر و حجم سیلاب نیز مطرح هستند که عمدتاً در روش‌های محاسبه هیدروگراف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پارامترها به درک بهتر رفتار سیلاب و مدیریت منابع آب کمک می‌کنند.

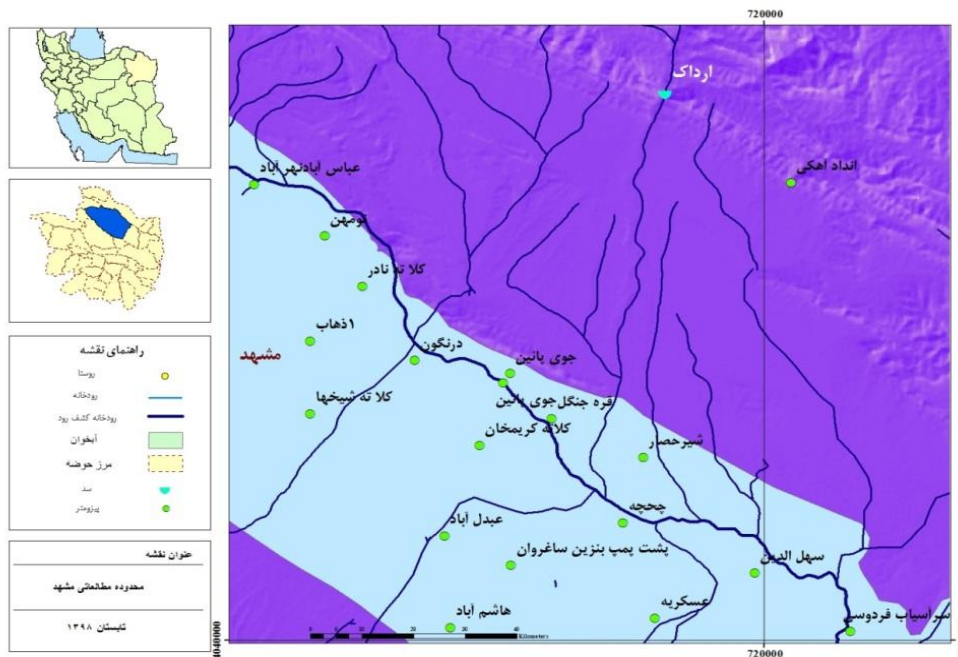
از آنجا که مقادیر دبی لحظه‌ای ایستگاه بند ساروج در دوره قبل از احداث سد ارداک بر روی رودخانه ارداک موجود بود، برای تعیین دبی سیلاب متناظر با دوره‌های بازگشت یا احتمالات مختلف، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Hyfa، توابع توزیع مناسب بر داده‌ها برازش داده شدند. سپس، بر اساس شاخص مجموع مربعات انحرافات نسبی، توزیع مناسب انتخاب گردید. به‌منظور درک بهتر ویژگی‌های هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای برآورد و پهنه‌بندی سیلاب، حوضه آبریز به واحدهای هیدرولوژیکی کوچک‌تر تقسیم‌بندی شد.

در حوضه آبریز رودخانه ارداک، ایستگاه هیدرومتری «بند ساروج» به‌عنوان ایستگاهی فعال و معتبر وجود دارد (شکل ۳). ایستگاه هیدرومتری بند ساروج بر روی رودخانه ارداک و در داخل حوضه آبریز مطالعاتی قرار داشته و از طول دوره آماری مناسبی نیز برخوردار است، از این رو این ایستگاه بهترین گزینه جهت بررسی وضعیت آبی حوضه مطالعاتی است. لذا، به‌منظور بررسی تناوب دوره‌های خشک و مرطوب حوضه آبریز مطالعاتی از روش‌های میانگین متحرک با دوره‌های ۳، ۵ و ۷ ساله و آزمون دنباله‌ها و ایستگاه بند ساروج به‌عنوان مبنا استفاده شد. لازم به ذکر است، آمار این ایستگاه به‌تنهایی می‌تواند نیازهای پژوهش حاضر را برآورده کند و بهترین ایستگاه برای این منظور محسوب می‌شود، اما برای ارائه دید جامع‌تر از وضعیت منابع آب سطحی در منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های هیدرومتری مجاور محدوده طرح نیز شناسایی و آمار آنها جمع‌آوری شد. این ایستگاه‌ها از شرایط مشابه با منطقه طرح برخوردار بوده و دارای دوره‌های آماری مناسبی هستند.



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه.

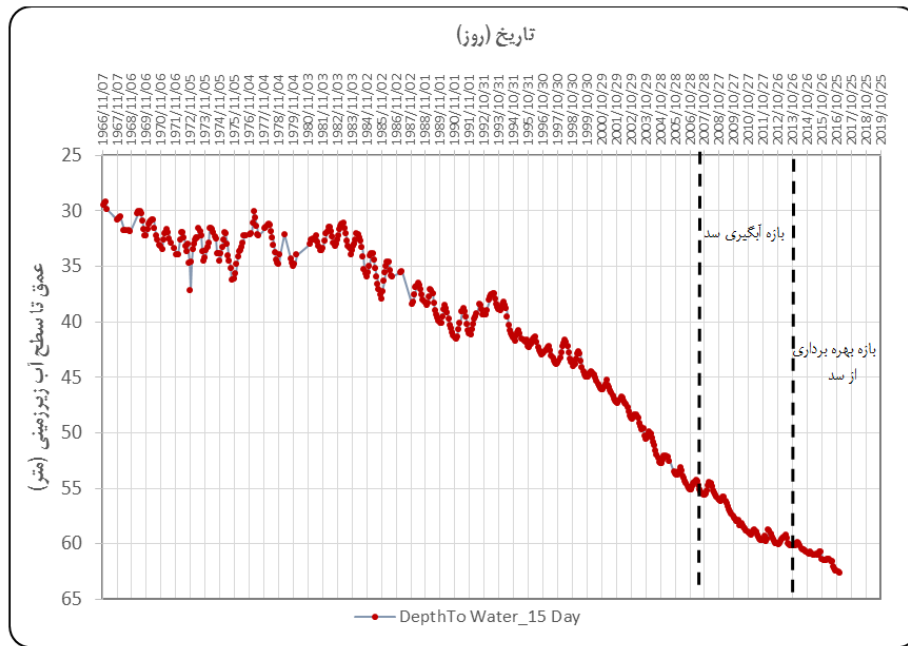
Fig 3. Location of the hydrometric stations under study.



شکل ۴. مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای در نزدیکی سد ارداک.

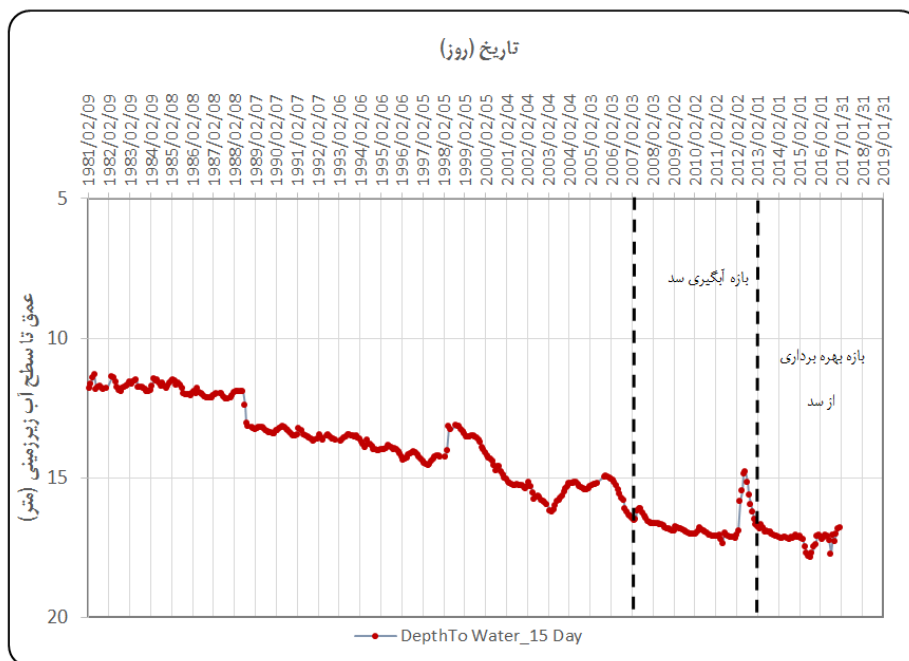
Fig 4. Characteristics of observation wells near the Ardak Dam





شکل ۵. تغییرات عمق تا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شیر حصار.

Fig 5. Changes in depth to groundwater level in the Shir Hesar observation well



شکل ۶. تغییرات عمق تا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای چهچه.

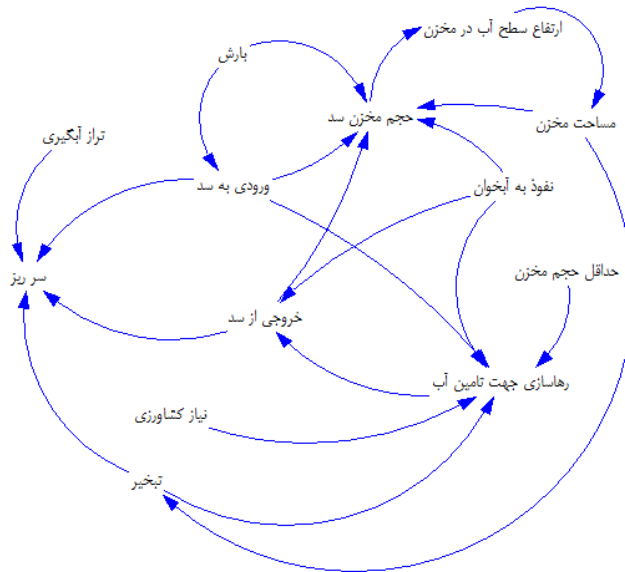
Fig 6. Changes in depth to the groundwater level in the Chahchahe observation well

متغیرها از نوع انباشتی هستند، مانند آب موجود در مخزن، و برخی دیگر نرخ تغییرات را نشان می‌دهند، مانند دبی خروجی که نرخ تغییر آب مخزن است. پس از تعیین نوع متغیرها، نمودار جریان رسم شد و روابط بین آن‌ها فرموله گردید. مدل آماده‌شده وارد نرم‌افزار شده و

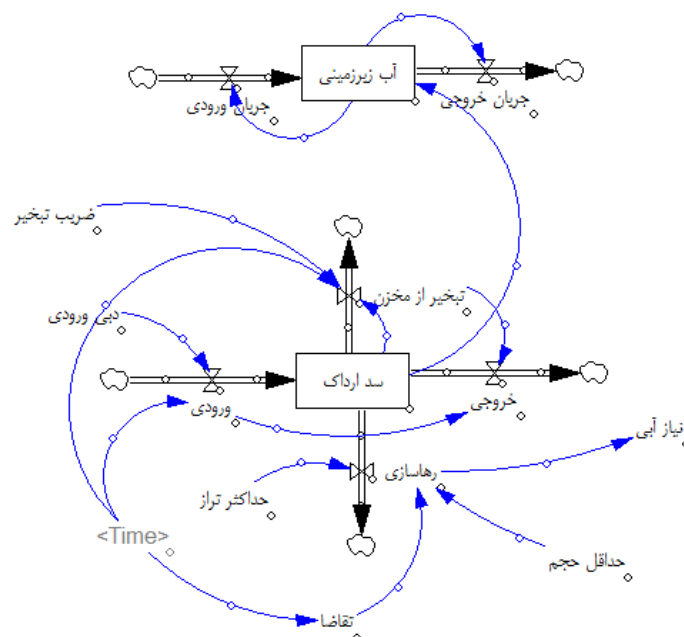
پس از تعریف متغیرها و تعیین نوع روابط بین آن‌ها، نمودار علی‌معلولی (شکل ۷) برای متغیرها در محیط نرم‌افزار VENSIM ترسیم شده است. این نمودار نشان‌دهنده چگونگی تعامل اجزای سیستم است. سپس، با بررسی دقیق‌تر متغیرها، نوع آن‌ها مشخص شد. برخی از

شد. روش مدل‌سازی در VENSIM به این صورت است که پیشرفت از کلیات به جزئیات انجام گرفت؛ به طوری که به تدریج توابع و اجزای متصل شده افزایش می‌یابند تا مدل کامل شده و آماده اجرا گردد. ساختار تهیه شده برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب سد ارداک، با در نظر گرفتن کلیه پارامترها و متغیرهای مؤثر، در شکل (۸) نشان داده شده است.

فرمول‌هایی که تعامل متغیرها را توصیف می‌کنند، نوشته شدند. به این ترتیب، یک مدل شبیه‌سازی آماده اجرا شد. هدف از ساخت این مدل، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد و افزایش سطح شناخت از تعامل سد با آبخوان است. نمودارهای ذخیره و جریان ترسیم شده در مدل، با استفاده از یک سری معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که به روش Runge-Kutta حل می‌شوند، ساخته



شکل ۷. نمودار علی معلولی سد و آبخوان.  
Fig 7. Causal Diagram of the Dam and Aquifer



شکل ۸. مدل تهیه شده شامل مخزن سد، آبخوان و ورودی و خروجی آن‌ها.  
Fig 8. The developed model includes the dam reservoir, aquifer, and their inflow and outflow.

## نتایج و بحث

بررسی‌های انجام‌شده برای سد ارداک شامل تحلیل مشخصات مخزن سد، تأثیر سد بر چاه‌های مشاهده‌ای پایین‌دست، اثر سد بر تراز آب زیرزمینی دشت، برآورد حجم تبخیر از مخزن و همچنین بررسی تأثیر آورد حوضه بر آب زیرزمینی پایین‌دست سد است. نزدیک‌ترین پیژومترها به سد ارداک در فاصله‌های ۲۰ و ۴۰ کیلومتری از سد قرار دارند که این فاصله نسبتاً زیاد، ناشی از کمبود داده‌های مربوط به چاه‌های دیگر در منطقه است. در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲، سد ارداک در حال آبیگری بود. در این دوره، تغییرات ارتفاع سطح ایستابی در چاه مشاهده‌ای شیرحصار مشاهده می‌شود که با شروع آبیگری سد، تغییر شیب در سطح ایستابی این چاه رخ داده است. این تغییرات به احتمال زیاد به آبیگری سد مرتبط است، چراکه در چاه‌های دورتر مانند کلاته‌شیخ‌ها (واقع در شمال غربی سد) چنین نوساناتی دیده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای شیرحصار تا حد زیادی به سد ارداک وابسته است. با این حال، میزان افت در این چاه مشاهده‌ای دارای شیب ملایمی است. مقایسه سرعت افت آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شیرحصار قبل و بعد از آبیگری سد نشان می‌دهد که بیشترین سرعت افت در دوره آبیگری مخزن سد رخ داده است.

تغییرات در تعداد چاه‌های مشاهده‌ای باعث تغییر در شبکه تیسن و ایجاد شکستگی در منحنی هیدروگراف واحد شده است. به‌طور مشخص، چهار تغییر در شبکه تیسن در سال‌های آبی ۱۳۷۰-۷۱، ۱۳۷۳-۷۴، ۷۸-۱۳۷۷ و ۱۳۸۱-۸۲ در محدوده آبخوان دشت مشهد رخ داده که منجر به شکست منحنی هیدروگراف واحد شده است. با توجه به گستردگی قابل توجه آبخوان، تراکم شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در هر ۲۵ کیلومتر مربع، ۰٫۷۸ چاه است. بررسی هیدروگراف ترسیم‌شده نشان می‌دهد که نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان تحت تأثیر نزولات جوی و میزان برداشت از آبخوان قرار دارد. این نوسانات به وضوح در دوره‌های مرطوب و خشک هر سال آبی قابل مشاهده است. دوره مرطوب معمولاً از شهریور یا مهر آغاز شده و تا فروردین یا اردیبهشت ادامه می‌یابد، در حالی که دوره خشک یا بهره‌برداری از سفره آب زیرزمینی

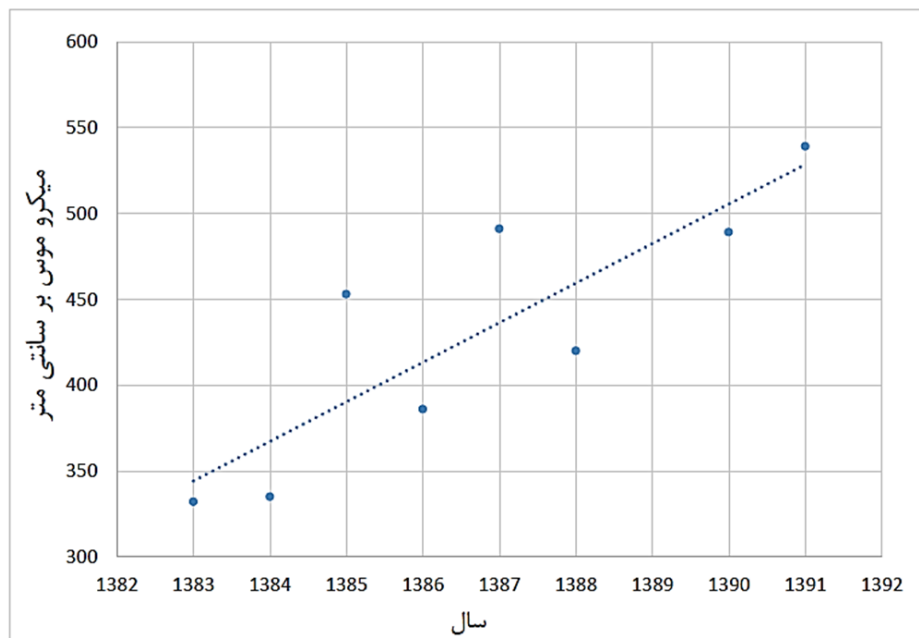
و کاهش تغذیه آبخوان از اردیبهشت شروع شده و تا شهریور به مدت ۵ ماه ادامه دارد.

از سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۹۴-۱۳۹۳، افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان تشدید شده است. با این حال، تغییرات قابل توجهی در روند افت تراز آبخوان قبل و بعد از احداث سد ارداک مشاهده نمی‌شود. افت تجمعی آبخوان در محدوده سد ارداک در بازه زمانی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۹۴-۱۳۹۳ به وضوح نشان‌دهنده روند کاهش سطح آب است. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که جهت جریان آب‌های زیرزمینی به‌طور کلی از غرب به شرق است. همچنین، در یک نقشه واحد، تراز آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ برای مقایسه در بخش غربی آبخوان (محدوده سد ارداک) ارائه شده است. تغییرات محسوسی در افت آب دیده نمی‌شود و افت موجود با توجه به شرایط آبیگری سد قابل انتظار است. بنابراین، نمی‌توان علت اصلی این افت را به سد ارداک نسبت داد. بر اساس مطالعات انجام‌شده و بررسی‌های صورت‌گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که ساخت و آبیگری سد ارداک تأثیرات اندکی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه داشته است. یکی از موارد بسیار مهم در مطالعات مربوط به ساخت یک سد، تخمین شعاع تأثیر سد بر تغییرات آب زیرزمینی می‌باشد. در این تخمین فاصله‌ای از محل احداث سد که در آن تغییر در منحنی‌های هم‌تراز ایجاد می‌شود برآورد می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که منحنی‌های جدیدی با ارتفاع هم‌تراز پایین‌تر در این محدوده مشاهده گردیده است و با توجه به مقیاس نقشه مورد بررسی جهت اندازه‌گیری این تغییرات، حداکثر شعاع که از محل سد منحنی جدیدی تشکیل شده، ۱۱ کیلومتر تخمین زده شده است. همچنین برای به‌دست آوردن تغییر حجم آب مخزن زیرزمینی به ضریب ذخیره متوسط سفره آبدار نیاز است، با توجه به مطالعات گذشته آزمایشات پمپاژ<sup>۱</sup> مقدار این پارامتر به‌طور متوسط ۱۳ درصد برای کل آبخوان در نظر گرفته شده است. در شکل (۹) اطلاعات حاصل از چاه شیرحصار ارداک نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌گردد که با شروع آبیگری مخزن سد، پارامترهای کیفی آب زیرزمینی کاهش یافته است. اما از

<sup>۱</sup> pumping test

تغییرات شده است. از این‌رو نمی‌توان تأثیر قابل ملاحظه‌ای را برای آن لحاظ نمود.

آنجایی که این کاهش کیفیت در سال‌های قبل از احداث سد نیز به چشم می‌خورد لذا ساخت سد تنها به دلیل اثرگذاری تجمعی با سایر پارامتر، سبب شدت گرفتن این



شکل ۹. تغییرات EC آبخوان پایین دست ارداک.

Fig 9. Changes in EC of the downstream Ardak aquifer.

شده است. هرچند در چاه‌های مشاهده‌ای کل دشت (بر اساس اطلاعات هیدروگراف واحد) میزان افت مشاهده شده در حدود ۵ متر است. اما میزان افت ناشی از کاهش ورودی به آبخوان در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به سد ارداک مشهود است. ضمناً جهت تایید موضوع از چاه مشاهده‌ای شاهد کلاته شیخ‌ها که بالاتر از محل ورودی سد ارداک به آبخوان دارد، استفاده شده است.

مدل‌سازی VENSIM نشان داد که در ۶۶ درصد مواقع نیاز آبی کشاورزی به‌طور کامل از سد تأمین نشده و بخشی از آن از منابع زیرزمینی برداشت شده که موجب افت سطح آبخوان شده است. همچنین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی به عوامل تجمعی مختلف مرتبط بوده و صرفاً نتیجه احداث سد نیست.

در نهایت، مدیریت بهینه بهره‌برداری از سد و منابع زیرزمینی، کنترل برداشتها و افزایش بازدهی مصرف آب می‌تواند در کاهش اثرات منفی بر آبخوان مؤثر باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیرات سد انجام شود.

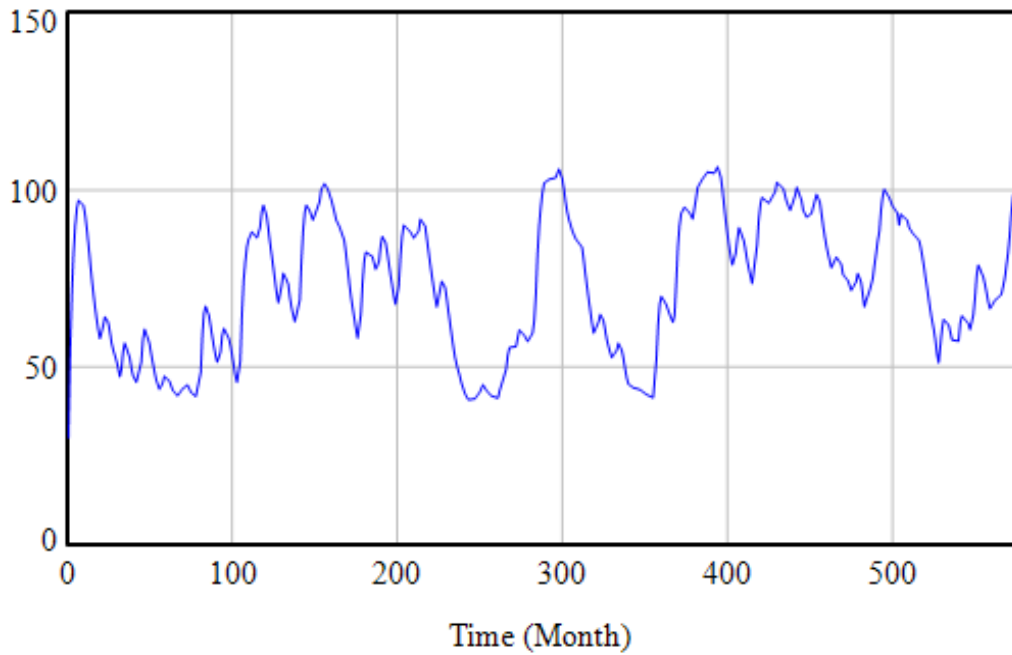
به‌منظور بررسی آبخوان قبل از احداث سد حجم مخزن صفر در نظر گرفته شده نتایج (شکل ۱۰) نشان داد که با توجه به آبدهی رودخانه<sup>۱</sup> و کاهش میزان تقاضا به صفر در دوره شبیه‌سازی تراز آبخوان بهبود می‌یابد. با وجود سد در ۶۶ درصد مواقع با توجه به نیاز کشاورزی تعیین شده از جریان‌های سطحی سد برای کشاورزی، حجم آب مورد نیاز، تأمین نشده و اضافه برداشت به آبخوان منتقل می‌شود در نتیجه افت سطح ایستابی قطعی خواهد بود (شکل ۱۱).

#### نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داد که چاه‌های مشاهده‌ای پایین دست سد ارداک بعد از احداث سد دچار افت سطح آب شده‌اند. این افت در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به سد ارداک یعنی چاه‌های مشاهده‌ای شیرحصار و چهچه دارای روند نزولی‌تری هستند. لازم به ذکر است میزان افت آب در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک سد ارداک حدود ۴ متر گزارش

<sup>1</sup> streamflow record

### Ground Water

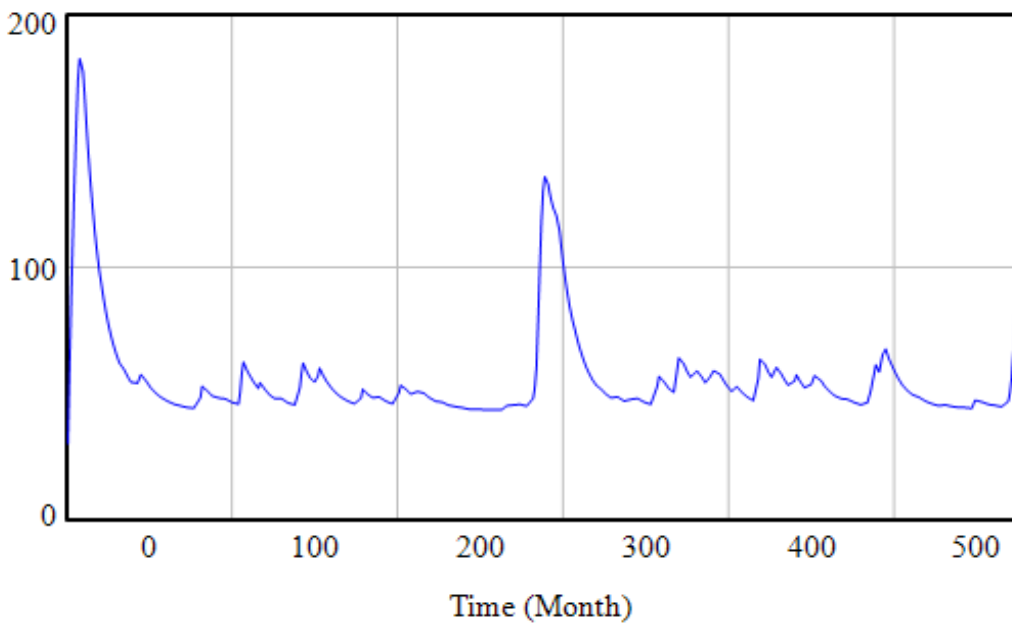


— Current

شکل ۱۰. نمودار تغییرات آبخوان با کاهش تقاضا و حذف سد.

Fig 10. Aquifer variation chart with reduced demand and removal of the dam.

### Ground Water



— Current

شکل ۱۱. نمودار کاهش حجم آبخوان با افزایش تقاضا و وجود سد.

Fig 11. Diagram of aquifer volume reduction with increasing demand and the presence of a dam.

(2019). Aquifer drainage feasibility analysis method based on hydrological exploration and dewatering test.

## منابع

- Chung, S. W., & Kim, J. H. (2002). Development of artificial neural network models supporting reservoir operation for the control of downstream water quality. *Water Engineering Research*, 3(2), 143-153.
- Ghazavi, R., & Ebrahimi, H. (2018). *Hydrological Impacts of Large Reservoir Dam and Land Subsidence on Downstream Groundwater Resources Using Mathematical Modeling*. 1(1), 43–52. <https://doi.org/10.22052/JDEE.2017.63257>.
- Hamed, Nozari., Abdolmajid, Liaghat. (2014). Simulation of Drainage Water Quantity and Quality Using System Dynamics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000748.
- Jiyeong, Hong., Seoro, Lee., Gwanjae, Lee., Dongseok, Yang., Joo, Hyun, Bae., Jonggun, Kim., Ki-Sung, Kim., Kyoung, Jae, Lim. (2021). Comparison of Machine Learning Algorithms for Discharge Prediction of Multipurpose Dam. *Water*, doi: 10.3390/W13233369.
- Krzysztof, Polak., Karolina, Kaznowska-Opala., Katarzyna, Pawlecka., Kazimierz, Rózkowski., Jerzy, Klich. (2015). The Assessment of Susceptibility on Drainage in an Aquifer on the Basis of Pumping Tests in a Lignite Mine / Ocena Podatności Ośrodka Wodonośnego Na Odwodnienie Na Podstawie Próbných Pompowań W Kopalni Węgla Brunatnego. *Archives of Mining Sciences*, doi: 10.1515/AMSC-2015-0008
- Jahangiry Fard, M., Amanipoor, H., Battaleb-Looie, S., & Ghanemi, K. (2019). Evaluation of effect factors on water quality of Karun River in downstream and lake of the Gotvand-e-Olya Dam (SW Iran). *Applied Water Science*, 9, 1-14.
- Mark, W., Bowen. (2004). Consequences of Reservoir Drainage on Downstream Water Chemistry, Suspended Sediment, and Nutrients, Southwest Missouri.
- Pradeep, Kumar, Agarwal., Jitendra, Gurjar., Shrikant, Choudhary. (2014). Evaluation of Effect of Drainage Quality on Performance of Low Volume Roads in India.
- Ranjbar, M., & Amini, N.. (2014). Assessing The Impact Of Dams On Groundwater Resources: Case Study Salman Farsi Dam-Fars. *Geography*, 12(40), 187-206. [In Persian].
- S., Wiriyarattanakun., A., Ruengsiriwatanakun., S., Noimanee. (2011). Drainage Prediction for Dam using Fuzzy Support Vector Regression. *World Academy of Science, Engineering, and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control, and Information Engineering*.
- Walter, W., "Environmental hazards of dams and reservoirs", Vol. 88, pp. 187–197, 2010.
- Xie, Daolei., Zhang, Weijie., Wei, Jiuchuan., Yin, Huiyong., Gongyishan, Yu., Han, Chenghao.



## An Overview of Integrated Flood Management in Iran: Current Status and Challenges

Reyhaneh Khajehnejad <sup>1</sup> | Abdolreza Bahremand <sup>2</sup> | Maryam Mohammadrezaei <sup>3</sup>

1. Master's student in desert management and control, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Professor of Watershed Management Department, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. PhD student in watershed management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

✉ Corresponding Author: [khajehnejad79@gmail.com](mailto:khajehnejad79@gmail.com)

Received:  
15 September 2024

Accepted:  
29 September 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*flood,*  
*flood risk,*  
*Integrated flood*  
*management,*  
*risk management,*  
*water resources*

### Extended abstract

#### Introduction

Flooding is a part of the hydrological cycle. However, the frequency of its occurrence has significantly increased, necessitating new and comprehensive approaches to managing this natural phenomenon (Mall & Srivastava, 2012). Therefore, Integrated Flood Management (IFM), much like integrated water resources management, must encourage the participation of users, planners, and policymakers at all levels. This approach should be open, transparent, comprehensive, and communicative; it must focus on decentralizing decision-making and include public consultation and stakeholder participation in planning and execution. Representatives of all upstream and downstream stakeholders should be involved in this process. Implementing both IFM and integrated water resources management effectively requires a conducive environment in terms of policies, laws, and information, with clear institutional roles and responsibilities, as well as management tools for effective regulation, monitoring, and enforcement. These needs depend on the specific climatic, hydrological, and physical conditions of the watershed, the cultural, political, and socio-economic interactions, and the existing development plans for the region (APFM, 2009).

**Cite this article:** Khajehnejad, R., Bahremand, A. & Mohammadrezaei, M. (2024). An overview of integrated flood management in Iran: current status and challenges. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 183-202. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2024.8149.1077>.



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Material and method

The research method of this article is a descriptive-review approach, focusing on IFM in Iran. For data collection, various sources and library-based information related to the subject at both global and Iranian scales were reviewed. The introduction first elaborates on the importance of floods in the water sectors of both the world and Iran, as well as the associated risk management. Next, the history of flood management globally and in Iran is presented, with references to international research in the literature review section. Subsequently, the concept of IFM, its structure, and its elements are discussed, along with its goals. The review also covers global practices in IFM (examples from several foreign countries) and Iran, followed by related challenges at both scales and concludes with a general summary and suitable recommendations.

### Results and Discussion

IFM is a strategic approach aimed at balancing flood risk management with sustainable development. Unlike traditional flood control methods that focus solely on preventing floods, IFM integrates various disciplines—hydrology, land use planning, environmental management, and socio-economic development—to mitigate the impacts of flooding. This approach promotes collaboration among different sectors, including government bodies, communities, and private stakeholders. Key principles of IFM include decentralizing decision-making, ensuring stakeholder participation, and adapting to local climatic and geographic conditions. Public involvement plays a crucial role in planning, as diverse views and values contribute to more resilient solutions. With increasing climate variability and land-use changes, IFM's focus on future scenarios is critical for managing uncertainties (UNESCO, 2013; WMO, 2009).

In planning IFM, achieving the common goal of sustainable development requires coordinating the decision-making processes of various development authorities. Every decision that affects the hydrological response of the watershed must take into account other similar decisions. Unfortunately, the geographical boundaries of a river basin rarely align with the institutional boundaries involved in managing that basin. Integrating the principles of IFM into broader frameworks for the utilization and protection of international waterways at the international basin scale is essential (APFM, 2009).

The need to consider vulnerability in risk management requires a multidisciplinary approach, with close cooperation and coordination between development ministries, various sectors, and institutions at different management levels. Decision-making is no longer one-dimensional and focused solely on economic efficiency but is increasingly multidimensional, aiming to achieve multiple, often conflicting, objectives. The involvement of various stakeholders plays a central role in making better decisions. The growing diversity of values and public opinions has made it difficult to assess and justify a project using a single method. Capturing these diverse values and opinions requires public participation in the planning process. A significant number of countries have adopted laws requiring public participation in decision-making processes, and IFM demands the involvement of all stakeholders, including civil society and communities directly affected by the decisions (APFM, 2009).

Flood management plans must consider not only the current situation but also possible future scenarios. Climate change, which affects the intensity of rainfall and rising sea levels, will steadily impact the future characteristics of floods, while land use changes, including urbanization and infrastructure development, will influence the areas at risk. Comprehensive urban planning alongside flood risk management is essential to avoid new risks in newly developed areas (Asian Development Bank, 2022).



## مروری بر مدیریت جامع سیل در ایران: وضعیت موجود و چالش‌ها

ریحانه خواجه نژاد<sup>۱</sup> | عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup> | مریم محمدرضایی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۲. استاد گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۳. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [khajehnejad79@gmail.com](mailto:khajehnejad79@gmail.com)

## چکیده

حدود ۷۰ درصد بلایای جهانی به رویدادهای هیدرومتئورولوژیکی مرتبط هستند. سیل‌ها یکی از بزرگ‌ترین خطرات طبیعی برای توسعه پایدار به‌شمار می‌رود. این پدیده به‌دلیل عوامل اقلیمی و جمعیتی در حال وخیم‌تر شدن است. چارچوب مدیریت جامع سیل دو دهه پیش توسعه یافت، تا روش‌هایی برای مقابله با این مشکلات فراهم کند. این چارچوب با توجه به پیچیدگی‌ها و نیازهای چندجانبه، به‌عنوان یک ابزار اساسی برای کاهش خطرات سیل و افزایش تاب‌آوری جوامع در برابر این خطرات شناخته می‌شود. در این چارچوب، همکاری‌های چندجانبه، توسعه ظرفیت‌ها و پیشرفت‌های فناوری ضروری است. مطالعه حاضر به‌مرور مدیریت جامع سیل در ایران و بیان چالش‌های موجود می‌پردازد. روش تحقیق، توصیفی مروری می‌باشد، که ابزار جمع‌آوری اطلاعات، اسناد و مدارک مرتبط با موضوع است. در واقع، مدیریت جامع سیل یک فلسفه برای توسعه یکپارچه منابع آب است، که هدف آن به حداکثر رساندن منافع خالص در مناطق سیل‌خیز و در عین حال کاهش خسارات ناشی از سیل است. مدیریت جامع سیل در ایران بر اساس قانون توزیع عادلانه آب و آیین‌نامه‌های مرتبط اجرا می‌شود، اما وظایف دستگاه‌های اجرایی فاقد انسجام لازم است. نظام‌نامه سیل وزارت نیرو، به‌عنوان سندی جامع، اقداماتی را به‌منظور مدیریت سیل در مراحل پیش و پس از وقوع مشخص کرده است، اما هنوز بسیاری از اقدامات کلیدی مانند سامانه‌های پایش و هشدار سیل به‌طور مؤثر عملیاتی نشده‌اند. مشارکت همه‌جانبه و رویکرد یکپارچه در تدوین برنامه‌های مدیریت سیل ضروری است، تا ضمن جلوگیری از انتقال مشکلات به مناطق دیگر، از سیلاب‌ها به‌عنوان فرصتی برای توسعه پایدار استفاده شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

## کلیدواژه‌ها:

سیل،

سیل‌خیزی،

مدیریت جامع سیل،

مدیریت خطر،

منابع آب.

## مقدمه

از میان بلایای طبیعی، سیل و رعد و برق به‌طور جهانی بیش‌ترین خسارت را به بار می‌آورد، که هر ساله میلیاردها دلار خسارت می‌رساند، علاوه بر خسارت‌های اجتماعی و محیطی که ایجاد می‌کند. هیچ معیاری وجود ندارد که کل تأثیرات سیل‌ها را هر ساله به‌خوبی نشان دهد، اما تحقیقات نشان می‌دهد که به‌دلیل تغییرات اقلیمی، شدت آن‌ها در حال افزایش است (Rodell, 2023). با افزایش جمعیت و ارتفاع سطح دریا، آسیب‌پذیری‌ها نیز در حال افزایش است که منجر به بزرگ‌تر شدن مقیاس خسارت‌ها می‌شود (Munich, 2024). خسارت‌های ناشی از سیل علاوه بر تلفات انسانی باعث کاهش پایه دارایی خانوارها و جوامع از طریق تخریب محصولات کشاورزی، مسکن، زیرساخت‌ها، ماشین‌آلات و ساختمان‌ها می‌شود. در برخی موارد، تأثیر سیل‌های شدید نه‌تنها در سطح خانوارهای فردی، بلکه در کل کشور بسیار چشم‌گیر است (APFM, 2009). در سال ۲۰۱۷، سیل‌ها بیش از ۵۰۰۰ کشته در منطقه آسیا و اقیانوسیه بر جای گذاشت. با این حال، روند مرگ و میر و خسارت‌های ناشی از سیل الگوهای متفاوتی را دنبال می‌کند. مرگ و میرها ثابت مانده‌اند، که نشان‌دهنده بهبود اقدامات آمادگی جمعیت مانند سیستم‌های هشدار زود هنگام است، در حالی که خسارت‌های اقتصادی هم‌چنان افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که توسعه اقتصادی بدون توجه کافی به ریسک بلایا در طراحی یا مکان‌یابی زیرساخت‌ها، خانه‌ها و دیگر دارایی‌ها انجام می‌شود و نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در کاهش ریسک بلایا وجود دارد. بنابراین، نیاز به یک رویکرد یکپارچه برای توسعه اقتصادی و مدیریت ریسک بلایا احساس می‌شود. توسعه اقتصادی در آسیا به‌طور ثابت با افزایش شهرنشینی و رشد شهرهای بزرگ همراه است. روند جابه‌جایی جمعیت از مناطق روستایی به شهری باعث افزایش نرخ شهرنشینی به میزانی بیش‌تر از افزایش جمعیت می‌شود. داده‌های سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که در بنگلادش، هند، اندونزی، میان‌مار، نپال، پاکستان، فیلیپین و ویتنام، ۳۷ درصد از جمعیت در مناطق شهری زندگی می‌کنند و این عدد تا سال ۲۰۵۰ به ۵۶ درصد افزایش خواهد یافت، که معادل افزایش ۷۵۰ میلیون

نفر در مناطق شهری است. گسترش سریع مناطق پرجمعیت تأثیرات گسترده‌ای دارد، که شامل افزایش تعداد افراد و ارزش دارایی‌های در معرض خطر سیل است، هم‌چنین سیل‌های محلی، به‌شدت تغییرات کاربری اراضی از مناطق روستایی نفوذپذیر به پشت‌بام‌ها، جاده‌ها و پیاده‌روها را افزایش می‌دهد (Asian Development Bank, 2022).

در این راستا، افزایش شدید حوادث سیل و خسارت‌های ناشی از سیل در دهه‌های گذشته این امر را آشکار می‌سازد، که یک رویکرد یکپارچه برای حفاظت از سیل بسیار مهم است. بسیاری از مسائل از قبیل اقدامات فنی، سامان‌دهی هوایی، مقاوم‌سازی، افزایش آگاهی از خطرات و هم‌چنین مدیریت زیست محیطی و کاربری زمین باید در حوزه پیچیده مدیریت جامع سیل<sup>۱</sup> (IFM) گنجانده شود (Evers, 2006). تعداد زیادی گزارش بین‌المللی وجود دارد که شدت خطرات سیل، مشکلات پیش‌بینی و کاهش اثرات آن‌ها و عوامل چندگانه مرتبط با آن‌ها را نشان می‌دهد. برای مقابله با این چالش‌ها، برنامه مرتبط با مدیریت سیل<sup>۲</sup> (APFM)، در دو دهه گذشته توسط سازمان هواشناسی جهانی<sup>۳</sup> (WMO) و مشارکت جهانی آب<sup>۴</sup> (GWP) تأسیس شد. APFM چارچوب مدیریت جامع سیل را توسعه داد، تا کشورها را در اجرای رویکردهای یکپارچه کمک کند که حداکثر مزایا از دشت‌های سیلابی به‌دست آید و هم‌چنین کاهش خسارت و تأثیر بر جان بشر را به حداقل برساند. با توجه به برنامه GWP، IFM به‌عنوان بخشی از چارچوب کلان مدیریت جامع منابع آب<sup>۵</sup> (IWRM) مورد نظر قرار می‌گیرد (APFM, 2024).

مدیریت جامع سیل، چارچوبی است که با ترکیب مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها مانند اجتماعی، اقتصادی، مالی، زیست‌محیطی و نهادی، هم‌چنین مهندسی، آمادگی در برابر بلایا، بیمه و واکنش اضطراری، ترویج پایداری و مقاومت

<sup>1</sup> Integrated Flood Management (IFM)

<sup>2</sup> Associated Programme on Flood Management (APFM)

<sup>3</sup> World Meteorological Organization (WMO)

<sup>4</sup> Global Water Partnership (GWP)

<sup>5</sup> Intergrated Water Resources Management (IWRM)

استفاده از زمین، مناطق ساخته شده و محل زیرساخت‌ها، کاهش سیل را در مناطق سیل‌خیز تقویت کند ( Anguillari & Dimitrijević, 2018).

در کشور ایران تاکنون فعالیت‌های مختلف پیشگیری و کاهش خسارات سیل چه در زمینه‌های سازه‌ای و چه غیرسازه‌ای صورت پذیرفته است، لیکن آن‌چه به‌عنوان معضل در این خصوص مشهود می‌باشد، پراکنده بودن این فعالیت‌ها و انجام طرح‌های مطالعاتی و اجرایی توسط دستگاه‌های مختلف دولتی و نیمه دولتی در بخش‌های خاص از مبحث و عمدتاً بدون هماهنگی با هم می‌باشد. از طرفی با توجه به فرابخشی بودن موضوع سیل، درگیری هر کدام از نهادهای ملی در قسمتی از چرخه مدیریت سیل به‌هنگام بروز پدیده سیل، عدم شفاف سازی مسئولیت‌ها و وظایف آن‌ها و همچنین نحوه تعامل هماهنگی آن‌ها منجر به بروز اشکالاتی در زمینه کمک‌رسانی و انجام اقدامات لازم در مرحله پاسخ و احیا، علاوه بر مرحله پیش‌گیری می‌گردد ( Integrated flood management plan of the country, 2015).

در مقاله حاضر، با استناد بر روش کتابخانه‌ای و مرور منابع به بررسی کلی مدیریت جامع سیل در کشور ایران پرداخته شده است. بنابراین با اشاره به اهمیت سیل در جهان و ایران، به‌بیان عناصر و ساختار مدیریت جامع سیل، نحوه مدیریت جامع سیل در کشورهای مختلف جهان و ایران، همچنین چالش‌های موجود پرداخته خواهد شد. در ادامه نیز نتیجه‌گیری کلی موضوع و ارائه پیشنهادات مناسب در این زمینه بیان خواهد شد.

### روش تحقیق

روش تحقیق مقاله حاضر، مروری توصیفی می‌باشد. در این راستا، ابزار جمع‌آوری اطلاعات لازم، مرور منابع مختلف و اطلاعات کتابخانه‌ای مرتبط با موضوع مدنظر در مقیاس جهانی و ایران است. بنابراین، ابتدا به تشریح مقدمه شامل اهمیت سیل در حوزه‌های آبی جهان و ایران و مدیریت خطر آن پرداخته شده است. سپس تاریخچه مدیریت سیل در جهان و ایران با اشاره به تحقیقات جهانی بیان شده است. در ادامه، به‌بیان مفهوم مدیریت جامع سیل، ساختار و عناصر

طولانی‌مدت در برابر سیل را هدف قرار می‌دهد. هدف این رویکرد مدیریت خطرات ناشی از سیل است، نه تمرکز بر کنترل فیزیکی آب‌ها. رویکرد جامع دارای مزایایی است که از جمله آن‌ها می‌توان به استحکام، انعطاف‌پذیری و قابلیت انطباق (توانایی مقابله با شرایط متغیر) و همچنین جامعیت اشاره کرد (Asian Development Bank, 2022). در این مورد، هنگام بررسی سیل، منطقه جغرافیایی طبیعی که باید مورد توجه قرار گیرد، کل حوزه رودخانه است. یکپارچه‌سازی نیازمند در نظر گرفتن همه جنبه‌های حوزه شامل حوزه آبخیز بالادست، مناطق میانی رودخانه و همچنین مناطق پایین‌دست و ساحلی است. یک راه‌حل جامع ممکن است نیازمند ترکیبی از کنترل رواناب (حوزه آبخیز بالادست)، بهبود انتقال یا حفظ ذخیره سیلاب دشت (رودخانه میانی) و مناطق حائل (ساحلی) باشد (Asian Development Bank, 2022).

به‌بیان دیگر، مدیریت جامع سیل دیدگاهی جامع از پدیده سیل ارائه می‌دهد و تمامی جنبه‌های «سازه‌ای» و «غیر سازه‌ای» را پوشش می‌دهد، که شامل تمامی جنبه‌های حفاظت از سیل، آمادگی، پیشگیری، حفاظت، بازیابی و پذیرش است؛ استراتژی‌هایی که به یک پاسخ انتقالی و رویکرد مدیریتی نیاز دارند. برنامه‌ریزی حفاظت از سیل، در دهه‌های زیادی به‌عنوان یک راه حل سنتی سازه‌ای استفاده شده است. با این حال، راه‌حل‌های سازه‌ای به‌تنهایی ممکن است تنها راه‌حل‌های موقتی باشد و ممکن است با شرایط غیرمنتظره یا تغییرات اقلیمی مقابله نکند. بهترین روش برای مدیریت سیل شامل استفاده از ترکیبی از اقدامات سازه‌ای و غیر سازه‌ای است، که به حفظ عملکرد مناطق سیلاب‌دستی کمک می‌کند ( Anguillari & Dimitrijević, 2018). اجرای کارآمد مدیریت جامع سیل نیازمند یک حکومت کارآمد در سطوح مختلف تصمیم‌گیری (دولتی، عمومی، فنی و مدیریتی) است. وظایف و نقش‌های روشن نهادی، هماهنگی بین سطوح محلی، منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی در حوزه‌های رودخانه‌ای و رویکرد چند رشته‌ای، از پیش‌نیازهای مهم برای توسعه موفقیت‌آمیز است. ادغام مدیریت جامع سیل به‌ویژه با برنامه‌ریزی شهری اهمیت دارد. برنامه‌ریزی کاربری زمین می‌تواند با تنظیم برنامه‌های

تصمیم‌گیری باشد. اوپه بوده (Oyebode, 2018) بیان کرد که حفاظت در برابر سیل هرگز به‌صورت مطلق نمی‌باشد و امکان وجود احساس امنیت کاذب است. پیش‌بینی و هشدار وقوع سیل، متضمن کاهش خسارت سیل است و اثربخشی آن وابسته به میزان آمادگی و پاسخ صحیح می‌باشد. پیش‌گیری از سیل نیز باید بر اساس اصل احتیاط باشد. بیمه سیل باید از قربانیان بلایای سیل به‌نحوی حمایت کند که بتوان شرایط اقتصادی زندگی را در زمان مناسب احیا کرد. میش را و همکاران (Mishra et al, 2021) در مطالعات خود نشان داد که فعالیت‌های انسانی با تغییر محیط منجر به اختلال در چرخه آب و افزایش خطر سیل می‌شود، بنابراین ریسک سیل و مدیریت آن، ارتباط تنگاتنگی با فعالیت‌های انسانی دارد. تأثیر تغییر کاربری زمین شامل عوامل مختلفی چون شهرنشینی و توسعه کشاورزی می‌شود. سیاست کاربری اراضی یک عامل کلیدی در توسعه شهری است. علاوه بر این نتیجه گرفت که مشکلات مرتبط با آب، مانند سیل و خشک‌سالی به راه‌حل‌های پایدار در زمینه‌های متنوع، توجه به ارزش‌های اجتماعی و هم‌افزایی با مدیریت منابع دیگر و اتخاذ تدابیر لازم به‌منظور حفاظت از آب، ارتقا و تحکیم قوانین و زیرساخت‌های مربوط به آن نیاز دارد. هاشیم و همکاران (Hashim et al, 2023) نتیجه گرفت که در مدیریت سیل، با هدف کاهش خطرات احتمالی باید تمهیدات آماده‌سازی و برنامه‌ریزی قبل از وقوع سیل به کار گرفته شود. حکمرانی مدیریت سیل یک زنجیره ضروری است، که حکومت و جامعه را به‌هم متصل می‌کند. هم‌چنین دولت‌های محلی، جوامع و شوراهای قانون‌گذاری قدرت خواهند گرفت. در بخش‌های بعدی، مفهوم مدیریت جامع سیل، ساختار تشکیل‌دهنده و اهداف اجرای آن بیان خواهد شد.

### مفهوم مدیریت جامع سیل

مدیریت جامع سیل فرایندی است که ترویج یک رویکرد یکپارچه به‌جای پراکنده به مدیریت سیل را به‌همراه دارد. این روش توسعه منابع آب و زمین در یک حوزه رودخانه‌ای را در چارچوب مدیریت جامع منابع آب ادغام می‌کند و هدف آن به حداکثر رساندن منافع خالص از استفاده از

مدیریت جامع سیل، مروری بر مدیریت جامع سیل در جهان (اشاره به نحوه مدیریت سیل در چندین کشور خارجی) و ایران، علاوه بر این چالش‌های مربوطه آن در هر دو مقیاس و در نهایت نتیجه‌گیری کلی و ارائه پیشنهادات مناسب پرداخته شده است.

### پیشینه تحقیق

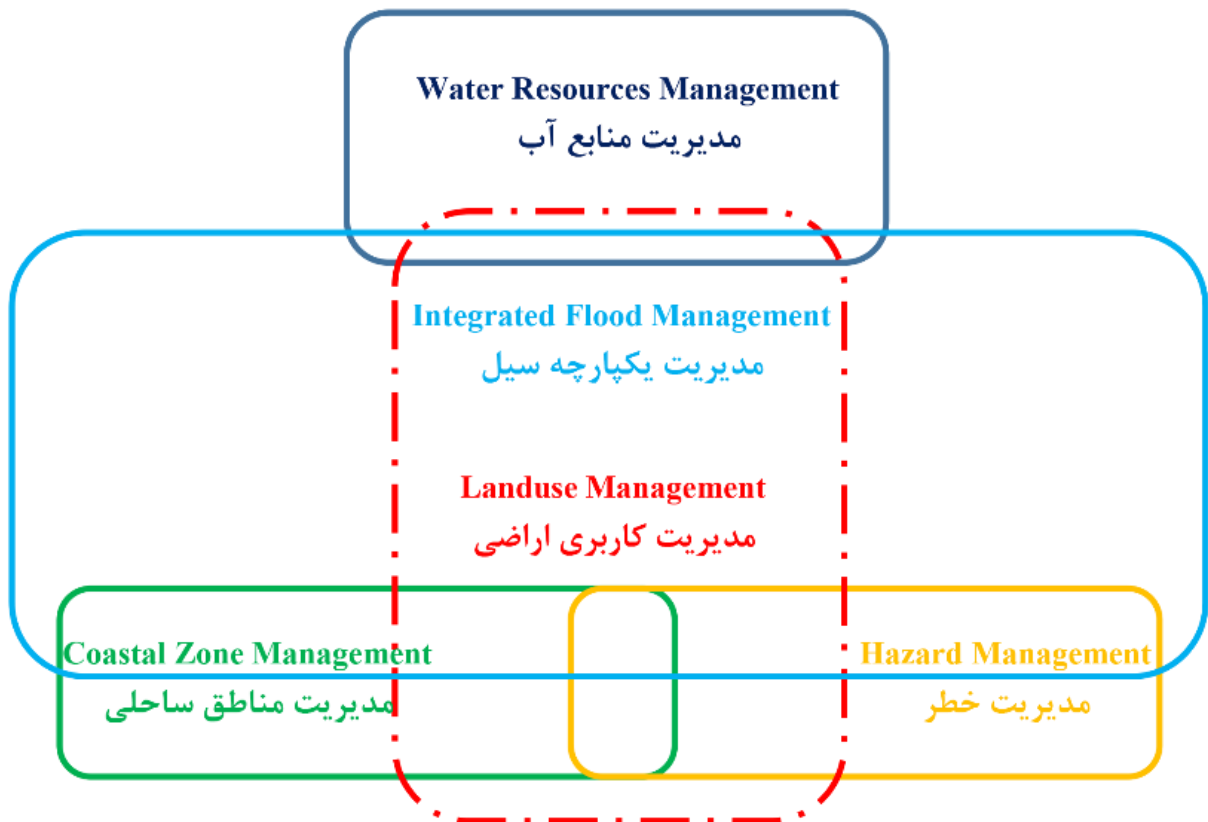
مطالعات خطر سیل از دیدگاه‌های متنوعی در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است و یک جامعه بزرگ از دانشمندان با چندین نشریه که به این موضوع متمرکز هستند، پدیدار شده است (Mitchell, 2023). افزایش قابل توجه مقالات این موضوع در دهه‌های اخیر، نشان‌دهنده افزایش تعداد نهادهای و نویسندگان است (Dordi et al., 2022). تحقیقات قبلی نیاز مبرم به مقابله با حوادث سیل را نشان داده است (da Silva et al., 2020)، به‌طوری‌که توسعه استراتژی‌های مدیریت سیل در آینده برای کاهش پیامدهای نامطلوب و مقابله با انواع پیچیده سیل ضروری است. علاوه بر این، مطالعات مروری قبلی در مورد مدیریت سیل عمدتاً بر روش‌های ارزیابی خطر سیل و مدل‌سازی غرقاب سیل، با تأکید کم‌تر بر تشخیص روندهای تحقیقاتی سیل متمرکز شده‌اند (Aerts et al., 2018; Lyu et al., 2018; Teng et al., 2017).

در بخش حاضر نتایج مختلف محققان ارائه شده است، در این راستا وی‌تر و گوهر (Wheater & Gober, 2013) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که الگوی توسعه انسانی در قرن بیستم، تفکیک دشت‌های سیلابی از کانال‌های رودخانه‌ها، به‌منظور نگهداری و حفاظت از توسعه شهری و یا کشاورزی و بنابراین افزایش خطر سیل در پایین دست حوزه بوده است. انگویلاری و دیمیتری جویس (Anguillari & Dimitrijević, 2018) نشان دادند که اجرای موفقیت‌آمیز مدیریت جامع سیل نیازمند ورودی‌های متعددی در چهار سطح دولتی، عمومی، فنی و مدیریتی است. هم‌چنین نقش‌ها و وظایف نهادی روشن برای ارائه سیاست‌های عینی و واضح همراه با قوانین لازم بر اساس استراتژی‌های مدیریت جامع سیل، ضروری می‌باشد. سیاست مدیریت خطر سیل باید شامل مشارکت ذی‌نفعان و ساکنان در فرآیند

معیشت پایدار به معنی جست و جو برای یافتن راههایی برای بهبود عملکرد سیستم به‌عنوان یک کل است. شکل ۱ مدل مدیریت جامع سیل را نشان می‌دهد (APFM, 2009). در واقع مدیریت جامع سیل، شامل ارکان مختلف مدیریتی چون مدیریت منابع آب، مدیریت کاربری اراضی، مدیریت خطر و مدیریت مناطق ساحلی می‌باشد، که متناسب با شرایط حوزه‌های می‌تواند ترکیب هم‌مورد یا بخشی از آن‌ها باشد. هدف مدیریت جامع سیل نه‌تنها کاهش تلفات ناشی از سیل بلکه به حداکثر رساندن استفاده کارآمد از دشت‌های سیلابی با آگاهی از خطر سیل می‌باشد. به این معنا که در حالی که کاهش تلفات جانی باید در اولویت اول باقی بماند، هدف ثانویه کاهش تلفات سیل باید نسبت به هدف کلی استفاده بهینه از دشت‌های سیلابی باشد (Oyebode, 2018).

دشت‌های سیلابی و به حداقل رساندن تلفات جانی در اثر سیل است. در هنگام اجرای سیاست‌هایی برای به حداکثر رساندن استفاده مؤثر از منابع حوزه رودخانه به‌صورت کلی، باید تلاش‌هایی برای حفظ یا افزایش بهره‌وری دشت‌های سیلابی انجام شود. از سوی دیگر، نمی‌توان زیان‌های اقتصادی و تلفات جانی ناشی از سیل‌ها را نادیده گرفت. رسیدگی به سیل‌ها به‌عنوان مشکلات جداگانه تقریباً به‌طور اجتناب‌ناپذیری به رویکردی جزئی‌نگر و محلی منجر می‌شود. مدیریت جامع سیل خواستار تغییر نگرش از روش پراکنده سنتی مدیریت سیل است (APFM, 2009).

مدیریت جامع سیل، حوزه رودخانه را به‌عنوان یک سیستم پویا می‌پذیرد، که در آن بسیاری از تعاملات و جریان‌های بین آب و زمین وجود دارد. در مدیریت جامع سیل، نقطه شروع یک دیدگاه از آن‌چه که حوزه رودخانه باید باشد، است. چشم‌انداز



شکل ۱. مدل مدیریت جامع سیل (Oyebode, 2018).

Fig 1. Integrated flood management model (Oyebode, 2018).

### پذیرش بهترین ترکیب استراتژی‌ها

انتخاب و اجرای ترکیب بهینه‌ای از استراتژی‌ها که شامل تدابیر پیشگیری، آماده‌سازی، پاسخ و بازسازی می‌شود.

### تضمین رویکرد مشارکتی

رویکرد مشارکتی شامل مشارکت تمامی ذی‌نفعان و جوامع محلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و اجرایی است.

### پذیرش رویکردهای مدیریت یکپارچه مخاطرات

پذیرش رویکردهای مدیریتی، همان یکپارچه‌سازی مدیریت مخاطرات مختلف طبیعی و انسانی به منظور بهبود تاب‌آوری و کاهش اثرات سیل‌ها و سایر بلایا می‌باشد.

### اهداف مدیریت جامع سیل

هدف مدیریت جامع سیل این است که مدیریت پیامدهای ناشی از سیل در مناطق سیلابی، از جمله توسعه‌های فعلی و آینده را به منظور افزایش مقاومت در برابر سیل از طریق ترکیبی از اقدامات زیر به کار گیرد (Asian Development Bank, 2022):

- کاهش خسارات اقتصادی و تلفات جانی و همچنین محدود کردن تأثیرات منفی بر سلامت، رفاه و توسعه اقتصادی،
- افزایش فواید اقتصادی پایدار استفاده از زمین
- بهبود یا حفظ اکوسیستم‌های دشت سیلابی

برای در نظر گرفتن اهداف مدیریت خطر سیل، باید به پیچیدگی‌های وضعیت توجه کرد. شرایط دنیای واقعی شامل ذی‌نفعان بسیار با دیدگاه‌های مختلف است. مدیریت خطر سیل نیاز دارد که با چشم‌انداز و اولویت‌های گسترده‌تر منطقه یا ناحیه هماهنگ باشد. تصمیماتی که برای مدیریت خطر سیل گرفته می‌شود، مانند ساخت یک دیواره رودخانه یا تخصیص زمین برای ذخیره‌سازی سیل، تأثیرات بلند مدت بر توسعه یک منطقه دارند و معمولاً قابل بازگشت نیستند. طرح مدیریت سیل نباید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود، بلکه باید به عنوان پشتیبان چشم‌انداز گسترده‌تر اجتماعی-اقتصادی منطقه دیده شود (Asian Development Bank, 2022).

بهبود عملکرد حوزه رودخانه به عنوان یک کل، هدف نهایی است. با این شناخت که تغییرات در تعاملات بین محیط‌های آب و زمین می‌تواند دارای نوسان باشد. باید تعادلی بین نیازهای توسعه و خسارت‌های سیل برقرار شود. هدف در مدیریت جامع سیل تنها کاهش خسارات ناشی از سیل‌ها نیست، بلکه استفاده بهینه از دشت‌های سیلابی با آگاهی از خطر سیل نیز اهمیت دارد، به ویژه در جاهایی که منابع زمینی محدود هستند. به عبارت دیگر، در حالی که کاهش تلفات جانی باید اولویت اصلی باقی بماند، هدف کاهش خسارات سیل باید در خدمت هدف کلی استفاده بهینه از دشت‌های سیلابی باشد. به همین ترتیب، افزایش خسارات سیل می‌تواند با افزایش استفاده بهینه از دشت‌های سیلابی و به طور کلی حوزه رودخانه سازگار باشد (APFM, 2009).

### ساختار و عناصر مدیریت جامع سیل

مدیریت جامع سیل رویکردی مشارکتی، میان بخشی و شفاف را در تصمیم‌گیری به کار می‌گیرد. ویژگی بارز آن، یکپارچگی است که به صورت هم‌زمان در شکل‌های مختلف بیان می‌شود: ترکیب مناسب استراتژی‌ها، نقاط مداخله با انتخاب دقیق و نوع مداخلات مناسب (سازه‌ای یا غیرسازه‌ای، کوتاه مدت یا بلند مدت). یک برنامه مدیریت جامع سیل باید به شش عنصر کلیدی که به طور منطقی برای مدیریت سیل‌ها در زمینه مدیریت جامع منابع آب تدوین شده‌اند، بپردازد (APFM, 2009).

### مدیریت چرخه آب به عنوان یک کل

مدیریت چرخه آب به عنوان یک سیستم کامل، شامل تمامی منابع آب سطحی و زیرزمینی و جریان‌های سیلابی است.

### یکپارچه‌سازی مدیریت زمین و آب

منظور هماهنگی استفاده از زمین و منابع آب به منظور جلوگیری از تضادها و بهبود بهره‌وری است.

### مدیریت ریسک و عدم قطعیت

مدیریت شامل شناسایی و مدیریت ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های مرتبط با سیل‌ها و سایر مخاطرات طبیعی است.

## مدیریت جامع سیل در جهان

ویران کننده ترین سیل‌ها در کشورهای در حال توسعه رخ می‌دهد، سیل سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۴ در بنگلادش باعث ایجاد خسارت‌هایی به میزان ۲/۸ میلیارد دلار شد. کشورهای ژاپن، هلند و چین به دلیل اقدامات محافظتی مانند مخازن ذخیره‌سازی، کاهش قابل توجهی در وقوع سیل نشان می‌دهند. این اقدامات باعث توسعه سریع شهری و اقتصادی مناطق محافظت شده می‌شود. با این اقدامات، آمار خسارت‌های سالانه به دلیل سیل در ژاپن در طی ۲۵ سال گذشته ثابت مانده است. فراوانی پایین وقوع سیل در حال حاضر باعث کاهش آگاهی عمومی، تمایل به همکاری و پذیرش مسئولیت شده است (Alphen & Lodder, 2006).

به علت وقوع سیل‌های عمده در دهه گذشته، سیاست‌های کشوری مانند آمریکا (۱۹۹۳)، هلند (۲۰۰۰)، چین (۲۰۰۳)، ژاپن (۲۰۰۳)، بنگلادش (۲۰۰۴)، منطقه فلاندرز بلژیک و انگلستان (پیشنویس) بازنگری شده و اکنون بر پایه اصول مدیریت سیل / رودخانه‌ها قرار دارند. این بدان معناست که تأکید بیشتری بر اقدامات غیرسازه‌ای مانند برنامه‌ریزی (برای جلوگیری از تجاوز به دشت‌های سیلابی) و ساختمان‌های مقاوم در برابر سیل علاوه بر اقدامات سازه‌ای واقع شده است (Alphen & Lodder, 2006).

برای بهبود کیفیت تصمیم‌گیری، اکثر کشورها مشارکت عمومی و / یا نهادهای ذی‌نفع را در توسعه سیاست‌ها شامل می‌شود. برخی کشورها هیئت‌های مشاوره برای توسعه سیاست در سطح ملی دارند، که شامل نمایندگانی از وزارتخانه‌ها، مقامات و نهادهای ذی‌نفع می‌شود (مانند شورای آب فدرال در آرژانتین، شورای منابع آب ملی در بنگلادش، کمیسیون مدیریت جامع آب در هلند و فلاندرز بلژیک (Alphen & Lodder, 2006)).

به‌طور کلی تمام کشورها به‌منظور محافظت از خود در برابر سیل یا مدیریت آن‌ها دارای سیاست‌هایی هستند، اما آن‌ها اغلب در رویکردهای سیاست تفاوت دارند. در ادامه به معرفی شیوه‌های مدیریتی سیل در حوزه‌های آبخیز کشورهای مختلف پرداخته شده است (Alphen & Lodder, 2006):

## مدیریت سیل در کشور هلند

هلند قانون مدیریت جامع آب و هم‌چنین قانون حفاظت از سیل را دارد. قانون، آخرین استانداردهای ایمنی را مشخص و تدوین منظم از اقدامات حفاظتی را تعیین می‌کند. علاوه بر این، یک قانون در خصوص مدیریت بلایای طبیعی وجود دارد، که مسئولیت‌ها و اقدامات آمادگی را تعریف می‌کند. جبران مالی خسارت‌های ناشی از سیل در حال ارزیابی است.

## مدیریت سیل در کشور کرواسی

در کرواسی، قانون آب (مدیریت جامع آب) و قانون تأمین مالی مدیریت آب وجود دارد. تقسیم بین آب‌های دولتی و محلی، و حالات مختلف تأمین مالی، مانع از مدیریت جامع آب می‌شود. به‌منظور مدیریت بلایای طبیعی، قانونی در خصوص حفاظت و نجات دارد. این در حالی است که حفظ و بهبود وضعیت اکولوژیکی رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی و ایجاد شرایط برای توسعه اقتصادی بیشتر را با دستیابی به سطوح محافظت اقتصادی توجیه شده برای جمعیت، دارایی‌های آن‌ها، سیستم‌های زیرساختی، سطوح کشاورزی و صنعتی و سایر ارزش‌های در خطر، تشویق می‌کند.

## مدیریت سیل در کشور انگلستان

مدیریت خطر ناشی از سیل با استفاده از یک مجموعه جامع از رویکردها که بازتاب اولویت‌های ملی و محلی است، به‌منظور کاهش تهدیدات به افراد و دارایی‌های آن‌ها و هم‌چنین ارائه بیشترین مزیت‌های محیطی، اجتماعی و اقتصادی، هم‌سو با شیوه‌های توسعه پایدار دولت به کار گرفته می‌شود. انگلستان سه قانون مهم دارد (قانون منابع آب، قانون زهکشی و قانون محیط زیست) که از نظر برنامه‌ریزی کلی (ارزیابی استراتژیک خطر سیل برای استراتژی‌های منطقه‌ای) نیاز به تقویت دارد.

## مدیریت سیل در کشور آرژانتین

در آرژانتین ارجاعات مدیریتی سیل، قانون خاصی ندارد، بلکه محدودیت‌ها و مقررات بسیاری در سطح استانی اجرا می‌شود. اجرای این قوانین معمولاً زمان‌بر است؛ زیرا شرایط اقتصادی، انتخاب‌های غیر پایدار را تشویق می‌کند و نهادهای عمومی دچار نقص مالی هستند. به‌عنوان یک

دستور اجرایی ۱۱۹۹۸ (نیازمندی‌های نهادهای فدرال برای ارائه رهبری در شرایط بحران سیل) و طرح پاسخ ملی.

علاوه بر این، چندین سازمان به‌منظور توسعه راه‌حل‌های سیل کار می‌کنند و هماهنگی بین دولتی بین ۱۴ سازمان فدرال از طریق سازمان مدیریت اضطراری فدرال<sup>۲</sup> (FEMA) فراهم می‌شود. دولت‌های ایالتی نقش‌های کلیدی دارند و دولت‌های محلی بیشترین عناصر برنامه‌هایی مانند مدیریت و نقشه‌برداری دشت‌های سیلابی را اداره می‌کنند. ارتش مهندسان آمریکا به‌دلیل مدیریت رودخانه‌های اصلی و مخازن کنترل سیل نقش اساسی دارد. به‌عنوان یک نتیجه، استاندارد مدیریت فدرال خطر سیل تدوین شده است (US Federal Emergency Management Agency, 2024).

#### مدیریت سیل در کشور ویتنام

در ویتنام قانون آب، قانون استفاده از زمین، قانون حفاظت محیط زیست و آیین‌نامه‌های مدیریت مخازن و سیل وجود دارد و در تلاش است عناصر مدیریت خطر سیل را ادغام کند.

علاوه بر موارد بالا، در ادامه این بخش نیز مروری بر سازمان‌های مسئول مدیریت سیل در کشورهای مختلف ارائه شده است (جدول ۱).

با توجه به مطالب ذکرشده که تجارب کشورهای مختلف در ارتباط با سیل و همچنین سازمان‌های مسئول مدیریت و نگهداری از زیرساخت‌های سیل بیان شد، در ادامه به‌بیان چالش‌های موجود در زمینه مدیریت جامع سیل در جهان پرداخته شده است.

#### چالش‌های مدیریت جامع سیل در جهان

در میان کشورهای درگیر، تنوع بزرگی در مشکلات سیل و ظرفیت‌های موجود برای مقابله با آن وجود دارد. این کشورها در مناطق آب و هوایی معتدل و موسمی واقع شده‌اند و ویژگی‌های کوهستانی یا شبیه منطقه‌های تخلیه‌پذیر به سطح زمین دارند.

نتیجه، بسیاری از منازعاتی وقوع می‌پذیرد که نمی‌تواند به‌صورت قانونی حل شوند و زمان‌بر هستند. آرژانتین در نظر دارد دادگاه‌های ویژه‌ای برای مشکلات مرتبط با آب ایجاد کند.

#### مدیریت سیل در کشور چین

در چین قوانین و مقررات ملی به استان‌ها و شهرستان‌ها اجازه می‌دهد که قوانین اجرایی مربوطه خود را بسازند. قوانین جدیدی به‌منظور اجرای مفهوم مدیریت مناسب سیل مانند مدیریت دسترسی به مناطق سیلابی و مناطق حفاظتی (روش تخمین خسارت، آماده‌سازی طرح‌های اضطراری)، لازم است که ایجاد شود.

#### مدیریت سیل در کشور بنگلادش

در بنگلادش نیاز به هماهنگی و بهبود سازگاری در قوانین مختلف دشت سیلابی و مدیریت سیل است. کار در حال انجام برای تدوین یک کد ملی آب است.

#### مدیریت سیل در منطقه فلاندرز بلژیک

در فلاندرز قانون فدرال مدیریت بلایای طبیعی دارد (با بیمه اجباری برای تمام شهروندان) و قانونی در خصوص مدیریت جامع آب برای بهبود همکاری و هماهنگی بین همه مدیران آب وجود دارد. در این کشور قوانینی برای اجرای استانداردهای ایمنی مدیریت خطر سیل نیاز است.

#### مدیریت سیل در کشور ژاپن

ژاپن یک مجموعه جامع قوانین در حوزه مدیریت سیل شامل قوانین رودخانه، مقابله با سیل، فاضلاب و برنامه شهری، به‌همراه سیاست‌های بازنگری شده، قانون مقابله با آسیب شدید شهری در سال ۲۰۰۴ دارد. این قانون، تدوین طرح مدیریت جامع سیل برای یک حوزه آبخیز را تعیین می‌کند.

#### مدیریت سیل در کشور ایالات متحده آمریکا

ایالات متحده آمریکا دارای یک مجموعه جامع قوانین در حوزه مدیریت سیل است: قانون کنترل سیل، برنامه بیمه ملی سیل<sup>۱</sup> (NFIP)، قانون ملی سیاست محیط زیست،

<sup>2</sup> Federal Emergency Management Agency (FEMA)

<sup>1</sup> National Flood Insurance Program (NFIP)



جدول ۱. سازمان‌های مسئول مدیریت سیل در کشورهای مختلف (Alphen &amp; Lodder, 2006)

Table 1. Overview of organizations responsible for flood management

سند سیاست‌گذاری Policy document	مسئول اجرا در سطح ملی Responsible for implementation on national level by	وزارت / مسئول ایجاد سیاست‌ها Ministry/responsible for policy making	کشور Country
-	معاونت منابع آب (SSRH)	وزارت برنامه‌ریزی فدرال، سرمایه‌گذاری عمومی و خدمات / معاونت منابع آب	آرژانتین
-	کمیته توسعه آب بنگلادش (BWDB)	وزارت منابع آب (MoWR)	بنگلادش
-	مرکز کنترل سیل و کمبود آب در استان	وزارت منابع آب (MWR)	چین
رویکرد جدید مدیریت آب / رودخانه‌ها	(RWS)Rijkswaterstaat	وزارت حمل و نقل، فعالیت عمومی و مدیریت آب (V&W)	هلند
-	National Administration "Romanian Waters"	وزارت آب و حفاظت محیط‌زیست	رومانیا
-	سپاه ارتش ایالات متحده	سازمان مدیریت اضطراری فدرال (FEMA)	آمریکا
فضاسازی برای آب	سازمان حفاظت محیط‌زیست (EA)	وزارت محیط زیست، غذا و کشاورزی (DEFRA)	انگلستان
طرح مدیریت آب	آب‌های کرواسی	وزارت کشاورزی، جنگل‌داری و مدیریت آب	کرواسی
-	وزارت زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل، و گردش‌گری ژاپن	وزارت حمل‌ونقل، زمین و زیرساخت (MLIT)	ژاپن
-	گذرهای آبی قابل ناوبری: اداره گذرهای آبی و امور دریایی (AWZ)	وزارت جامعه فلاندرز	منطقه فلاندرز بلژیک
-	گذرهای آبی غیرقابل ناوبری: اداره محیط زیست (AMINAL)		

### تأمین معیشت

رشد جمعیت و رشد اقتصادی هر دو فشار قابل توجهی بر منابع طبیعی یک سیستم وارد می‌کند. افزایش فشار جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی در دشت‌های سیلابی، مانند ساخت و سازها و زیرساخت‌ها، خطر سیل را بیشتر می‌کند. دشت‌های سیلابی در بسیاری از موارد، فرصت‌های معیشتی عالی و فنی فراهم می‌کند. در کشورهای در حال توسعه با اقتصاد عمدتاً کشاورزی، امنیت غذایی هم‌معنا با امنیت معیشتی است. دشت‌های سیلابی سهم قابل توجهی در تولید مواد غذایی دارند که تغذیه مردم این کشورها را فراهم می‌کند. اگرچه می‌توان استدلال کرد که تجارت آب مجازی و به تبع آن کاهش

به‌عنوان مثال، بنگلادش هر ساله با سیل‌های گسترده‌ای روبه‌رو می‌شود که ۳۰ تا ۶۰ درصد از کشور را تحت پوشش قرار می‌دهد، در حالی که هلند آخرین بار با سیل در سال‌های ۱۹۲۶ (از سوی رودخانه‌ها) و ۱۹۵۳ روبه‌رو شد (Alphen & Lodder, 2006). در بخش حاضر، چالش‌های کلی موجود در مدیریت سیل در جهان، بیان شده است که شامل تأمین معیشت، شهرسازی سریع، توهم امنیت مطلق از سیل، رویکرد اکوسیستم، تغییرپذیری و تغییرات اقلیمی، تغییرات اقلیمی و مدیریت سیل می‌باشد.

افزایش می‌دهد. این بخش‌های جامعه نیز از فقدان امکانات بهداشتی رنج می‌برند و بنابراین بیش‌تر در معرض بلایا و پیامدهای پس از آن قرار دارند. سیاست‌های مدیریت سیل باید نیازهای این جوامع را مد نظر قرار دهد (APFM, 2009).

### توهم امنیت مطلق از سیل

حفاظت مطلق از سیل به‌طور فنی غیرممکن و از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی غیرقابل قبول است. هیچ استاندارد طراحی حفاظتی نمی‌تواند عدم دقت‌های ذاتی در برآورد بزرگی سیل‌های احتمالی را که ممکن است بسیار شدید باشند، یا تغییراتی که به‌مرور زمان به‌واسطه تغییرات اقلیمی رخ می‌دهند، به‌طور کامل پوشش دهد. طراحی برای سیل‌های با فراوانی بالا به‌معنای پذیرش ریسک بیش‌تر در برابر پیامدهای فاجعه‌بار در هنگام وقوع حوادث شدیدتر است. از سوی دیگر، طراحی برای سیل‌های بزرگ باید احتمال شکست در برابر سیل‌های با بزرگی کم‌تر از استاندارد طراحی فرضی، را نیز در نظر بگیرد. در چنین مواردی، شکست ممکن است زمانی رخ دهد که برخی از اقدامات سازه‌ای، مانند دیوارهای محافظ و کانال‌های انحرافی، به‌دلیل عدم استفاده طولانی‌مدت یا کم‌بود مالی، به‌درستی نگهداری نشوند و عملکرد مطلوبی نداشته باشند (APFM, 2009).

مدیریت ریسک سیل باید احتمال وقوع چنین شکست‌هایی را برآورد کند، نحوه وقوع این شکست‌ها را شناسایی کرده و پیش‌بینی برای مدیریت این وقایع داشته باشد. این شامل بررسی و تحلیل نقاط ضعف ساختاری و عملکردی در سیستم‌های مدیریت سیل، ارزیابی شرایطی که ممکن است به خرابی منجر شوند و تدوین استراتژی‌هایی برای کاهش خسارت‌ها و واکنش به‌موقع در صورت وقوع سیل‌های غیرمنتظره است. علاوه بر این، مدیریت ریسک باید شامل برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌رسانی به جامعه برای آمادگی بیشتر در برابر سیل و بهبود سیستم‌های هشدار و پاسخ اضطراری باشد (APFM, 2009).

### رویکرد اکوسیستم

اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و آبی، از جمله رودخانه‌ها، تالاب‌ها و مصب‌ها مزایای زیادی مانند آب آشامیدنی

وابستگی به مناطق سیل‌خیز و کم‌آب، می‌تواند مسئله امنیت غذایی را حل کند، اما این رویکرد به مسئله امنیت معیشتی پاسخ نمی‌دهد. رقابت برای دسترسی به منابع محدود زمین می‌تواند بخش‌های ضعیف‌تر جامعه را که عمدتاً دشت‌های سیلابی را اشغال می‌کند، به خطر اندازد. برنامه‌های اسکان مجدد و سایر تدابیر سیاستی مربوط به دشت‌های سیلابی باید به‌طور کلی اثرات خود را بر فرصت‌های معیشتی جمعیت‌های در معرض خطر ارزیابی کند (APFM, 2009).

### شهری‌سازی سریع

افزایش جمعیت در مناطق روستایی غالباً با دشواری در بهبود استانداردهای زندگی فراتر از نیازهای اساسی مواجه می‌شود. زندگی کشاورزی وابسته به شرایط محیطی است که اغلب پیش‌بینی‌ناپذیر است و در زمان‌هایی که خشک‌سالی و یا سیل رخ می‌دهد، بقا به‌شدت دشوار می‌شود. در این شرایط، مردم از محیط‌های روستایی به شهرها مهاجرت می‌کنند، تا فرصت‌های اقتصادی و دسترسی به خدمات اساسی بهتر را جستجو کنند. تغییرات اقلیمی ممکن است این الگوهای مهاجرت به مناطق شهری را با تغییر بنیادهای معیشتی کشاورزی، ماهی‌گیری و افزایش وقوع و شدت بلایای طبیعی تسریع کند (APFM, 2009). نسبت جمعیت شهری جهان از ۱۳ درصد در سال ۱۹۰۰ به ۴۹ درصد در سال ۲۰۰۵ افزایش یافت. پیش‌بینی می‌شود این رقم تا سال ۲۰۲۵ به ۵۷ درصد و تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۷۰ درصد برسد. بیشتر این شهری‌سازی در کشورهای در حال توسعه اتفاق می‌افتد، که رشد آن عمدتاً برنامه‌ریزی نشده و به‌طور طبیعی رخ می‌دهد، به‌ویژه در آسیا و آفریقا و تا حدی در آمریکای لاتین و کارائیب. شهری‌سازی تغییراتی در پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز ایجاد می‌کند (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2002). رشد جمعیت و مهاجرت به سمت سکونتگاه‌های شهری برنامه‌ریزی‌نشده در دشت‌های سیلابی کشورهای در حال توسعه، آسیب‌پذیری فقیرترین بخش‌های جامعه در برابر سیل را افزایش می‌دهد. این واقعیت که بخش بزرگی از رشد شهری در مناطق ساحلی اتفاق می‌افتد، خطر آسیب‌پذیری سیل‌های رودخانه‌ای و ساحلی ناشی از تغییرات اقلیمی را برای این جمعیت‌ها

که به نوبه خود بر میزان سیل‌ها تأثیر دارد (APFM, 2009). تأثیرات پیش‌بینی شده گرمایش جهانی شامل تغییراتی در چرخش جوی اقیانوسی است و احتمالاً بسیاری از زیرسیستم‌های چرخه آبی جهانی شدت می‌یابند، که منجر به تغییر الگوهای بارش می‌شود (Bates et al., 2008).

هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم تمایل به افزایش رویدادهای شدید بارش در بسیاری از مناطق، حتی در برخی مناطق که میانگین سالانه بارش پیش‌بینی شده کاهش می‌یابد، یافته است (Parry, 2007). در این موارد، کاهش بارش عمدتاً به کاهش تعداد روزهای بارانی نسبت داده می‌شود تا کاهش شدت بارش. بنابراین انتظار می‌رود بارش‌های سنگین و شدیدتری در آینده وجود داشته باشد اما در تعداد کم‌تری از رویدادها، که به معنای افزایش وقوع سیل‌های شدید و خشکسالی‌ها است (Trenberth et al., 2003). در عین حال، پیش‌بینی می‌شود که سطح جهانی دریاها همچنان افزایش یابد، زیرا جهان گرم می‌شود. این پتانسیل ایجاد سیل‌های کم‌ارتفاع، افزایش فرسایش ساحلی، تغییر محدوده جزر و مدی در رودخانه‌ها و خلیج‌ها، تشدید سیل‌های طوفان، افزایش نفوذ آب شور به مصب‌ها و آبخوان‌های آب شیرین و افزایش آسیب‌های باد و باران در مناطق مستعد طوفان‌های گرمسیری را دارد (APFM, 2009).

### تغییرات اقلیمی و مدیریت سیل

تغییرات اقلیمی چالشی اساسی را مطرح می‌کند، زیرا مسیر توسعه آینده و تأثیرات متعاقب شرایط هیدرولوژیکی بر تغییرات اقلیمی تنها می‌تواند بر اساس سناریوهای مختلف توسعه پیش‌بینی شود. مقابله با تغییرات اقلیمی نیازمند رهبری، چشم‌انداز، ظرفیت و منابعی فراتر از تجربیات فعلی ما است. سیاست‌های مدیریت سیل در بسیاری از مناطق به سمت رویکردی فراتر از «امنیت مطلق از سیل» به سمت یک رویکرد انعطاف‌پذیرتر و انطباق‌پذیرتر به نام «زندگی با ریسک سیل» تغییر یافته است. این رویکرد ارزش اقدامات حفاظتی در برابر سیل را به رسمیت می‌شناسد، اما همچنین به ریسک‌های باقیمانده مانند خرابی سد اشاره می‌کند. مدیریت سیل نیازمند ارائه استراتژی‌هایی برای چنین احتمالاتی است،

تمیز، غذا، تصفیه آب، کاهش خطر سیل و فرصت‌های تفریحی ارائه می‌دهند. تغییرپذیری در میزان جریان، زمان‌بندی و مدت زمان جریان آب برای حفظ اکوسیستم‌های رودخانه‌ای حیاتی است. تأثیرات مدیریت سیل‌های مختلف بر اکوسیستم متفاوت است و در عین حال تغییرات در اکوسیستم تأثیراتی بر وضعیت سیل، ویژگی‌های سیل و رفتار رودخانه دارد. برخی از مداخلات مدیریت سیل به دلیل کاهش فراوانی سیل‌ها به تالاب‌هایی که اطراف دشت‌های سیلابی توسعه یافته‌اند، به اکوسیستم‌های رودخانه‌ای آسیب می‌رسانند. این مناطق به سیل‌های مکرر متکی هستند و تنوع زیادی از گیاهان و حیوانات در این اکوسیستم‌ها به دلیل وجود این پدیده‌ها وجود دارد. در این شرایط، تغییرات در سیل‌های با فراوانی بالا (کوچک‌تر) می‌تواند به اکوسیستم‌های توسعه‌یافته حول رژیم سیلابی فعلی آسیب برساند (APFM, 2009).

از سوی دیگر، کاهش سیل‌های شدید، از اکوسیستم‌ها محافظت می‌کند. بنابراین، میزان و تغییرپذیری رژیم جریان که برای به حداکثر رساندن منافع جامعه و حفظ یک اکوسیستم سالم رودخانه‌ای در یک حوزه آبی لازم است، باید بین منافع مختلف در حوزه آبی تعادل ایجاد کند. مداخلات جدید، به‌روزرسانی ساختارهای فعلی و تنظیم قوانین عملیاتی تدابیر موجود می‌تواند فرصت‌هایی برای مدیریت بهبود یافته فراهم کند. رویکرد اکوسیستم یک استراتژی برای مدیریت جامع زمین، آب و منابع زیستی است؛ استراتژی که به ترویج حفاظت و استفاده پایدار به‌صورت عادلانه می‌پردازد. مدیریت جامع منابع آبی و مدیریت جامع سیل‌ها هر دو اصول اصلی رویکرد اکوسیستم را در بر می‌گیرند. این اصول شامل در نظر گرفتن تمام اکوسیستم حوزه به‌عنوان یک واحد و در نظر گرفتن اثرات مداخلات اقتصادی در کل حوزه است. پایداری محیط زیستی گزینه‌های مدیریت سیل یکی از ملزومات در مدیریت جامع سیل‌ها است (APFM, 2009).

### تغییرپذیری و تغییرات اقلیمی

مجموعه‌ای از پارامترهای اقلیمی و غیر اقلیمی بر فرآیندهای سیل تأثیر می‌گذارد. علاوه بر شرایط اولیه حوزه، میزان سیل‌ها به‌شدت بارندگی، عمق، زمان و توزیع مکانی بستگی دارد. دما و باد بر ذوب برف تأثیر می‌گذارد

داده‌های آب و هواشناسی، تجزیه و تحلیل داده‌های دریافتی از سازمان هواشناسی و سایر سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار در سطح منطقه، مطالعه و اجرای سیستم هشدار سیل در حوضه‌های اولویت‌دار، به‌روزرسانی دستورالعمل بهره‌برداری تجهیزات در زمان سیل، رعایت حداقل و حداکثر ترازهای بهره‌برداری سدها در فصول سیلابی، براساس پیش‌بینی‌های بلندمدت و با تأکید بر تأمین مصارف، تهیه و تدوین پیش‌نویس دستورالعمل‌ها، قوانین و آیین‌نامه‌های بیمه سیل، و مانند آن‌ها هنوز اقدام اثربخشی صورت نگرفته و خروجی مناسبی حاصل نشده است. در نتیجه چارچوب حاکمیتی برای مدیریت سیل و اجرای قوانین وضع شده در پیش‌گیری از بروز خسارات سیل از طریق تدابیر خط‌مشی‌ها، تعریف نقش‌ها و مسئولیت‌ها، نظارت پیوسته بر اجرای درست قوانین ساخت و ساز شهری و حفظ حریم رودخانه، نظارت متعهدانه بر نحوه اجرای مصوبات تنظیم شده بدون اعمال گمانه‌های جاه‌طلبانه، ایجاد کمیته‌های بازرسی غیر درون سازمانی ناظر بر عملکرد نحوه اجرای وظایف شهرداری و مجموعه‌های ذی‌ربط، انتصاب سازمان‌های متولی مدیریت بحران ضروری می‌باشد. علاوه بر اعمال تدابیر پیش‌گیرانه و عدم سازوکارهای تشدیدکننده، می‌توان با مدیریت سنجیده و تدابیر و زیرساخت‌های عمرانی، بحران را به فرصت تبدیل نمود و حتی خطر سیل را به نیرویی برای سازندگی و تولید برق و ذخایر زیرزمینی تبدیل نمود و ضمن تغییر نگرش از مهار سیل به مدیریت سیل، راهکارها و زیرساخت‌های اجرایی تنظیم شود و می‌توان برای هر حوزه رودخانه، یک برنامه مدیریت سیل تدوین شود. در تنظیم چنین طرحی باید به جنبه هم‌بستگی در حوزه رودخانه توجه شود، که تا حد امکان از انتقال مشکلات در یک منطقه جغرافیایی به منطقه دیگر جلوگیری شود. این طرح باید مبتنی بر یک رویکرد یکپارچه باشد که تمام جنبه‌های مرتبط مدیریت آب، برنامه ریزی فیزیکی، کاربری اراضی، کشاورزی، حمل و نقل و توسعه شهری، حفاظت از طبیعت، در تمام سطوح (ملی، منطقه‌ای و محلی) را پوشش دهد. در تدوین برنامه مدیریت سیل، تصمیم‌گیران در همه سطوح (محلی، منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی) و نیز ذی‌نفعان و افراد جامعه باید مشارکت داشته باشند (Taheri & Mosaedi, 2023).

که نیاز به ترکیب متعادلی از رویکردهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای را تقویت می‌کند. بیانیه درباره مدیریت زمین و آب برای تطبیق با تغییرات اقلیمی مجموعه‌ای از اصول راهنمایی را پیشنهاد می‌کند که شامل توسعه پایدار، تاب‌آوری، حکمرانی، و اقتصاد و تأمین مالی می‌شود ( Dialogue on Climate Change Adaptation for Land and Water Management, 2009).

### مدیریت جامع سیل در ایران

در ایران، در حال حاضر قانون مرتبط با کنترل و مدیریت سیل و تعیین و حفاظت بستر و حریم رودخانه‌ها، قانون توزیع عادلانه آب است. مکمل این قانون، آیین‌نامه مربوط به بستر و حریم رودخانه‌ها، نهرها، مسیل‌ها، مرداب‌ها، برکه‌های طبیعی و شبکه‌های آبرسانی، آبیاری و زهکشی است. ضوابط مربوط به سازمان مدیریت بحران از دیگر قوانین وضع شده می‌باشد که مدیریت سیل نیازمند جزئیاتی بیش از مدیریت بحران (به‌صورت عام) خواهد بود. در قوانین مختلف برای دستگاه‌های اجرایی کشور، وظایفی در رابطه با مدیریت سیل در نظر گرفته شده است؛ اما این شرح وظایف فاقد انسجام و همگرایی لازم است. تنها ضابطه یکپارچه برای مدیریت سیل نظام‌نامه سیل در وزارت نیرو است که در سال ۱۳۹۵ تهیه و به زیر مجموعه‌های این وزارتخانه ابلاغ شده است. این نظام‌نامه تبیین نسبتاً جامعی از اقدامات لازم برای کلیه مراحل مدیریت سیل را در بردارد. در عین حال این نظام‌نامه صرفاً در وزارت نیرو بوده و در آن وظایف و ارتباطات این وزارت با سایر دستگاه‌های مرتبط با سیل (به‌ویژه سازمان مدیریت بحران) مشخص نشده است. همچنین این سند، یک سند بالادستی است و برای عملیاتی شدن نیازمند دستورالعمل‌های جزئی‌تر (مانند برنامه‌های پاسخ به بحران) است. در سطح ضوابط، نظام‌نامه مدیریت سیل در وزارت نیرو به اقدامات و فعالیت‌های پیش از وقوع سیل، هنگام رخداد و پس از وقوع سیل می‌پردازد. از ۱۰۰ اقدام ارائه شده در این نظام‌نامه، ۴۸ اقدام مربوط به مرحله پیش از وقوع سیل است. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد در رابطه با برخی اقدامات مهم که در نظام‌نامه به آن‌ها اشاره شده است، مانند استقرار و بهره‌برداری از سامانه منطقه‌ای پیش و مدل‌سازی زمان واقعی

در بخش بعدی، تاریخچه مدیریت جامع سیل در ایران نیز به تشریح بیان می‌گردد.

### تاریخچه مدیریت جامع سیل در ایران

سوابق مدیریت جامع سیل در ایران در دوره‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد که قبل از سال ۱۳۶۹ گروه مخصوصی مسئول تخصیص پرداخت خسارات به قربانیان و بازسازی صدمات بودند. سال ۱۳۷۰ قانون «کمیته ملی کاهش بلایای طبیعی» و «کمیته کنترل سیل» به تصویب مجلس شورای اسلامی رسید. در سال ۱۳۷۴ دفتر مهندسی رودخانه و کنترل سیل در سطح ملی در وزارت نیرو و در سال ۱۳۷۶ دفاتر مهندسی رودخانه و کنترل سیل در استان‌ها تشکیل شد. تصویب قانون کارگروه مدیریت بحران در سال ۱۳۸۲ صورت گرفته و سازمان مدیریت بحران در سال ۱۳۸۷ تشکیل گردید. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در حال حاضر از نظر ساختار کلاس سازمانی در وضعیتی نسبتاً مطلوب و از نظر مسائل حقوقی نیز در وضعیت متوسطی قرار داریم. تا سال ۱۳۷۱ تنها اقدامات سازه‌ای کنترل سیل شامل احداث دیواره‌های سیل‌گیر و بازسازی صدمات و خسارات وارده مورد توجه بود. دوره ۱۳۷۱ تا ۱۳۷۴ آغاز روی آوردن به اقدامات غیر سازه‌ای کنترل سیل از جمله تهیه استانداردهای عملیات مهندسی رودخانه و نیز تأسیس کمیته مهندسی رودخانه جهت تهیه استانداردهای مذکور بود. در دوره ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۹ اقداماتی از قبیل مطالعه و اجرای پروژه‌های مهندسی رودخانه (پروژه‌های پایلوت)، استفاده از سازه‌های کنترلی مختلف به همراه لایروبی رودخانه و کنترل سیل و نیز تهیه استانداردها و دستورالعمل‌های عملیات مهندسی رودخانه مطرح گردید و همچنین اقدامات غیر سازه‌ای شامل مطالعات اولیه سیستم‌های هشدار سیل (۴ پروژه) و تعیین حد بستر و حریم رودخانه و تهیه نقشه‌های پهنه بندی سیل آغاز شد. در دوره بعد (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴) علاوه بر موارد فوق، مطالعه و اجرای بیش از ۱۰۰ طرح کنترل سیل و مهندسی رودخانه و کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی انجام گرفت. تهیه و انتشار نقشه‌های بستر و حریم رودخانه‌ها و لزوم تهیه نظام‌نامه سیل از جمله اقدامات غیر سازه‌ای بودند که در این دوره شکل گرفتند. در حال حاضر علاوه بر فعالیت‌های فوق کاربرد GIS و سنجش از

دور و نیز مطالعه و اجرای سیستم‌های هشدار سیل از نوع سیستم‌های هواشناسی، سیستم‌های هشدار هیدرولوژیکی (در حوزه‌های آبخیز کوچک) و سیستم‌های هشدار هیدرولوژیکی و هیدرولیکی (برای رودخانه‌های بزرگ) و هماهنگی با معاونت بهره‌برداری از سدها و تهیه نظام‌نامه سیل به صورت پروژه‌های موردی (پایلوت) در دست انجام می‌باشد (Vatan Fada et al., 2010).

### چالش‌های مدیریت جامع سیل در ایران

به‌طور کلی مدیریت سیل با چالش‌های متعددی رو به رو است، که باید به آن‌ها پرداخته شود. از جمله الزامات باز، مشکلات مربوط به تأسیسات، و عدم قطعیت‌های مربوط به تغییرات اقلیمی. با رویکرد مدیریت جامع سیل، هر یک از این چالش‌ها در نظر گرفته می‌شود و نیاز به اقدامات جدید و نوآورانه و همچنین اعمال سیاست‌های مناسب احساس می‌شود. مدیریت سیل به‌طور فزاینده‌ای با اجرای اقدامات غیر سازه‌ای هم‌چون پشتیبانی از پاسخ‌های سیل که در آن تصمیمات عمومی گرفته می‌شود، شفافیت و اطلاع‌رسانی عمومی در حال تغییر است. رویکردهای جدید باید به تغییرات فصلی و تغییرات اقلیمی که باعث عدم قطعیت در آینده می‌شود، پاسخ دهند (Anguillari & Dimitrijević, 2018).

در بسیاری از موارد، تنها پس از وقوع سیل‌های بزرگ و مخاطرات مرتبط است، مدیریت سیل در دستور کار سیاسی دولت‌ها و ادارات محلی قرار می‌گیرد. با این حال، خطرات و پیامدهای سیل‌ها می‌توانند از طریق مدیریت مناسب سیل که اصول مدیریت جامع سیل ارائه شده در این مقاله را دنبال می‌کند، کاهش یابد، که بدون شک در آینده بهبود و توسعه خواهند یافت. به‌طور کلی ۹۰ درصد از جمعیت جهان در کشورهای زندگی می‌کنند، که حوزه‌های رودخانه‌ای آن‌ها بین‌المللی است. این امر شایع است، زیرا رودخانه‌ها همواره مرزهای طبیعی بین کشورها و مناطق بوده‌اند. بنابراین، هماهنگی بین کشورها در مقیاس حوزه لازم است.

در عمل، کمیسیون‌های بین‌المللی برای هماهنگی سیاست‌ها، استراتژی‌ها و اجرای مدیریت جامع سیل در سطح حوزه تشکیل شده‌اند. به‌عنوان مثال، کمیسیون بین‌المللی حوزه رودخانه ساوا تلاش می‌کند تا رژیم

رخدادی است که به شرط داشتن اطلاعات کافی در دو سطح قابل پیش بینی است (به‌استثنای سیل‌های ناگهانی که روش‌های متداول ممکن است پاسخ‌گوی نیاز به زمان کافی پیش هشدار نباشد) (Taheri & Mosaedi, 2023). در حین اجرای اقدامات مدیریت جامع سیل پذیرفته‌شده، نظارت، ارزیابی و دانش به‌دست‌آمده بخش بسیار مهمی از فرآیند است. تصمیمات مبتنی بر دانش و تجربه به‌عنوان ابزاری برای مقابله با عدم قطعیت‌های مرتبط با مدیریت سیل و ارزیابی ریسک عمل می‌کند. این "مدیریت تطبیقی" بهبود عمل جاری را هر زمان که دانش و داده‌های جدید به‌دست‌آمده باشد، تقویت می‌کند. یادگیری از تفاوت‌های بین نتایج مورد انتظار و واقعی، برنامه‌ها و اقدامات را به‌طور مناسب تغییر می‌دهد (Mall & Srivastava, 2012).

### نتیجه‌گیری

سیل بخشی از چرخه هیدرولوژیکی است. با این حال، فراوانی وقوع آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، که نیازمند رویکردهای جدید و جامع برای مدیریت این پدیده طبیعی است (Mall & Srivastava, 2012). از این رو مدیریت جامع سیل، همانند مدیریت جامع منابع آب، باید مشارکت کاربران، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را در همه سطوح تشویق کند. این رویکرد باید باز، شفاف، جامع و ارتباطی باشد؛ نیاز به تمرکز زدایی از تصمیم‌گیری داشته باشد؛ و شامل مشورت عمومی و مشارکت ذی‌نفعان در برنامه‌ریزی و اجرا باشد. نمایندگان همه ذی‌نفعان بالا و پایین‌دست باید در این فرآیند دخیل باشند. اجرای مؤثر هر دو مدیریت جامع سیلاب و مدیریت جامع منابع آب نیاز به محیطی مساعد از لحاظ سیاست، قوانین و اطلاعات، نقش‌ها و وظایف نهادی روشن، و ابزارهای مدیریتی برای تنظیم، پایش و اجرای مؤثر دارد. این نیازها به شرایط خاص اقلیمی، هیدرولوژیکی و فیزیکی حوزه آبخیز همراه با تعاملات فرهنگی، سیاسی و اجتماعی-اقتصادی و همچنین برنامه‌های توسعه موجود برای منطقه بستگی دارد (APFM, 2009).

بنابراین در برنامه‌ریزی مدیریت جامع سیل، دستیابی به هدف مشترک توسعه پایدار نیاز به هماهنگی فرآیندهای تصمیم‌گیری هر تعداد از مقامات توسعه جداگانه دارد. هر

بین‌المللی ناوبری، مدیریت پایدار منابع آب و جلوگیری یا محدودیت خطرات (خشکسالی‌ها، سیل‌ها) را در حوزه رودخانه ساوا برقرار کند. کمیسیون بین‌المللی حفاظت از رودخانه دانوب یک نهاد فرا کشوری است که به حفاظت از منابع رودخانه دانوب برای نسل‌های آینده، حفظ و نگهداری سیستم رودخانه‌ای سالم (بدون آلودگی) و پایدار، و ایجاد سیل‌های بدون خسارت هدف دارد (APFM, 2009).

در کشور ایران نیز به‌منظور ادغام و هماهنگی در بخش‌های مختلف، مشارکت کامل نهادهای مبتنی بر جامعه ضروری است. در چنین فرایندی، بسیار مهم است که یک استراتژی مشترک مدیریت جامع سیل در سطح حوزه آبخیز با مشارکت کامل، تصمیم‌گیری و اجرای نهادهای محلی توسعه یابد. از سوی دیگر، ساخت ظرفیت‌های محلی و اجتماعی برای رفع نیازهای مدیریت جامع سیل ضروری است.

از طرف دیگر به اشتراک‌گذاری و مدیریت اطلاعات هم‌چنین پیش‌نیاز یک رویکرد مؤثر مدیریت جامع سیل است (Mall & Srivastava, 2012). برای مثال، تبادل داده‌های سیلابی بین‌مرزی در حوزه‌های مختلف آبخیز برای اجرای یک برنامه آمادگی سیل برای مناطق پایین‌دست ضروری است. با این وجود استراتژی مؤثر مدیریت جامع سیل می‌تواند به‌دست‌آید، اگر بخش‌های مختلف در فرآیند تصمیم‌گیری درگیر شوند. یک رویکرد چندرشته‌ای شامل همکاری تمام طرف‌های ذی‌نفع با تمرکز بر دستیابی به نتایج چندبعدی (یعنی نتایجی که تمام شرکت‌کنندگان را راضی کند) از فرآیند تصمیم‌گیری است. این به‌طور نخست ادغام برنامه‌ریزی، طراحی منظر و مدیریت سیل را در بر می‌گیرد (Egeberg, 2010; McBain et al., 2010; Ran & Nedovic-Budic, 2016; Sayers, 2013; World Bank, 2013).

در شرایط کنونی سطح برنامه‌ها و ضوابط مربوط به مدیریت سیل در ایران به‌هیچ‌وجه در سطح مطلوبی قرار ندارد. حتی در تفکیک مراحل مدیریت (پیشگیری، آمادگی، مقابله، بازسازی و بازتوانی)، برای سیل (که تا حد قابل قبولی از طرق مختلف قابل پیش‌بینی است) تفکیک متناسب با پدیده زلزله (که غیر قابل پیش‌بینی است) لحاظ نشده است. در حالی که سیل (به‌ویژه رودخانه‌ای)

شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌ها مناطقی را که در معرض خطر هستند تحت تأثیر قرار می‌دهد. برنامه‌ریزی شهری جامع در کنار برنامه‌ریزی مدیریت خطر سیل ضروری است، تا از خطرات جدید در مناطق جدید توسعه‌ای دوری کند. علاوه بر این، برنامه‌ریزی زیرساخت آینده ممکن است فرصت‌هایی برای بهبود مدیریت خطر سیل ارائه دهد. به‌عنوان مثال، یک پروژه تجدید نظر شهری که بهبود فضاهای عمومی و قابلیت زندگی را هدف قرار می‌دهد، باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بیشینه پتانسیل مدیریت سیل را فراهم آورد (Asian Development Bank, 2022).

### پیشنهادات

برنامه‌های مدیریت سیل باید مدیریت خشک‌سالی را نیز در برگیرد و اقداماتی برای به حداکثر رساندن جنبه‌های مثبت سیل، مانند نگهداری بخشی از جریان‌های سیلابی برای استفاده در تولید محصولات کشاورزی انجام دهند.

دشت‌های سیلابی آبرفتی به‌ویژه فرصت‌هایی برای ذخیره آب‌های سیلابی در منابع زیرزمینی فراهم می‌کنند. مدیریت جامع سیل باید آب‌های زیرزمینی و سطحی را به‌عنوان منابع مرتبط در نظر گیرد و نقش ظرفیت‌های نگهداری دشت‌های سیلابی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی را مد نظر داشته باشد.

برنامه‌های مدیریت سیل باید رویکردی جامع داشته باشد و امکان تسریع تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی تحت شرایط زمین‌شناسی معین را بررسی کنند. با این حال، مداخلاتی که رژیم رواناب‌ها را تغییر می‌دهد، باید اثرات منفی احتمالی را نیز در نظر گیرد. اقداماتی که در فصل بارانی برای کاهش رواناب‌ها انجام می‌شود، ممکن است در صورتی که این اقدامات رواناب‌ها را در زمان‌های دیگر سال نیز کاهش دهند، اثر معکوس داشته باشند.

در مدیریت جامع سیل باید همه انواع سیل‌ها شناسایی شوند، نه فقط آن‌هایی که مطابق با استانداردهای طراحی و حفاظت هستند.

### منابع

Abanyie, S. K., Apea, O. B., Abagale, S. A., Amuah, E. E. Y. & Sunkari, E. D. (2023). Sources and factors influencing groundwater quality and

تصمیمی که بر پاسخ هیدرولوژیکی حوزه تأثیر می‌گذارد باید هر تصمیم مشابه دیگری را نیز در نظر بگیرد. متأسفانه، مرزهای جغرافیایی یک حوزه رودخانه به‌ندرت با مرزهای نهادی که در مدیریت آن حوزه دخیل هستند، هم‌خوانی دارند. ادغام اصول مدیریت جامع سیل در چارچوب‌های گسترده‌تر برای بهره‌برداری و حفاظت از آبراه‌های بین‌المللی در مقیاس حوزه بین‌المللی ضروری است. برخی از ۴۰ درصد جمعیت جهان در حوزه‌های رودخانه و دریاچه‌های زندگی می‌کنند، که شامل دو یا چند کشور می‌شود و شاید مهم‌تر این است که بیش از ۹۰ درصد در کشورهایی زندگی می‌کنند، که حوزه‌های بین‌المللی دارند. مدیریت جامع سیل به‌دنبال دست‌یابی به هم‌افزایی متقابل مفید بین منافع ملی برای ارتقای رفاه منطقه‌ای و بهبود وضعیت رفاهی مردم از طریق بهترین استفاده ممکن از منابع طبیعی منطقه است (APFM, 2009).

لزوم در نظر گرفتن آسیب‌پذیری در مدیریت خطرات نیازمند رویکردی چندرشته‌ای با همکاری و هماهنگی نزدیک بین وزارتخانه‌های توسعه، بخش‌ها و نهادهای مختلف در سطوح مختلف مدیریت است. تصمیم‌گیری دیگر یک‌بعدی و متمرکز بر کارایی اقتصادی نیست، بلکه به‌طور فزاینده‌ای چندبعدی شده و به‌دنبال دست‌یابی به اهداف متعدد، که اغلب با هم در تضاد هستند، است. درگیری ذی‌نفعان مختلف در تصمیم‌گیری‌های بهتر نقش مرکزی دارد. تنوع روزافزون در ارزش‌ها و نظرات عمومی ارزیابی و توجیه یک پروژه را با یک روش واحد دشوار کرده است. به‌دست آوردن این ارزش‌ها و نظرات متنوع نیازمند مشارکت عمومی در فرآیند برنامه‌ریزی است. تعداد قابل توجهی از کشورها قوانینی را تصویب کرده‌اند که نیاز به مشارکت عمومی در فرآیند تصمیم‌گیری دارد، و مدیریت جامع سیل نیازمند مشارکت تمامی ذی‌نفعان، از جمله جامعه مدنی و جوامعی است، که مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌گیرند (APFM, 2009).

نقشه مدیریت سیل باید به وضعیت آینده احتمالی، هم‌چنین وضعیت فعلی هم توجه کند. تغییرات اقلیمی که بر شدت بارش و افزایش سطح آب دریا تأثیر می‌گذارد، به‌طور پیوسته بر ویژگی‌های آینده سیل تأثیر خواهد داشت، در حالی‌که تغییرات استفاده از زمین از جمله

- of Flood Victims Using Location-Allocation Model and Disaster Management in Malaysia. *Journal of Governance and Integrity*, 6(1), 493-503.
- Integrated flood management plan of the country. (2015). Specialized committee on flood and river flooding, Ministry of Power (In Persian).
- Lyu, H. M., Sun, W. J., Shen, S. L., & Arulrajah, A. (2018). Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach. *Science of the Total Environment*, 626, 1012-1025.
- Mall, R. K., & Srivastava, R. K. (2012). Sustainable flood management in changing climate. *FLOOD*.
- McBain, W., Wilkes, D., & Retter, M. (2010). *Flood resilience and resistance for critical infrastructure*. Ciria.
- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., & Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges, and solutions. *Water*, 13(4), 490.
- Mitchell, C. (2023). The growing strength of the 'Journal of Flood Risk Management community. *Journal of Flood Risk Management*, 16(2), e12914.
- Munich Re. Flood Losses on the Rise. Available online: <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters/floods.html> (accessed on 7 April 2024).
- Oyebode, O. J. (2018). Strategy for tackling flood and water scarcity for adequate water supply and public health in Nigeria. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 5(8), 656-664.
- Ojan, Mohammad. (2018). Integrated flood management. PhD seminar. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. P. 1\_25 (In Persian).
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2002) Johannesburg Plan of Implementation. United Nations Publications.
- US Federal Emergency Management Agency. Intergovernmental Collaboration. Available online: <https://www.fema.gov/floodplain-management/intergovernmental> (accessed on 7 April 2024).
- Parry, M. L. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation, and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.
- Rodell, M., & Li, B. (2023). Changing the intensity of hydroclimatic extreme events revealed by associated health implications: A review. *Emerging Contaminants*, 100207.
- Aerts, J., Botzen, W.J., Clarke, K.C., Cutter, S.L., Hall, J.W., Merz, B., Michel-Kerjan, E., Mysiak, J., Surminski, S., Kunreuther, H. (2018). Integrating human behavior dynamics into flood disaster risk assessment. *Nature Climate Change*, 8 (3), 193–199.
- Anguillari, E., & Dimitrijević, B. (2018). Integrated Urban Planning: Directions, Resources, and Territories. Asian Development Bank. (2022). *Strengthening Integrated Flood Risk Management: A Practical Guide to Integrated Flood Risk Management*. Technical Assistance Consultant's Report.
- Associated Programme on Flood Management (APFM). (2004). *Integrated flood management concept paper*. Geneva: Associated Programme on Flood Management, World Meteorological Organization.
- Associated Programme on Flood Management (APFM). (2009). *Integrated flood management: Concept paper* (No. 1047). World Meteorological Organization.
- Associated Programme on Flood Management (APFM). About Us. Available online: <https://www.floodmanagement.info/about-apfm/> (accessed on 7 April 2024).
- Bates, B.C., Z.W.Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. (2008). Climate change and water. *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, IPCC Secretariat.
- Da Silva, L.B.L., Alencar, M.H., de Almeida, A.T. (2020). Multidimensional flood risk management under climate changes: bibliometric analysis, trends and strategic guidelines for decision-making in urban dynamics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 50, 101865.
- Dordi, T., Henstra, D., & Thistlethwaite, J. (2022). Flood risk management and governance: A bibliometric review of the literature. *Journal of Flood Risk Management*, 15(2), e12797.
- Egeberg, M. (2010). The European Commission. *European Union Politics*, 3, 125-40.
- Evers, M. (2006). The complexity of integrated flood management: decision support Systems. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 305, 187-196.
- Hashim, N. M., Bakar, N. A. A., Kamaruzzaman, Z. A., Shariff, S. R., & Burhanuddin, S. N. Z. A. (2023). Flood Governance: A Review on Allocation



GRACE and GRACE-FO. *Nature Water*, 1(3), 241-248.

Ran, J., & Nedovic-Budic, Z. (2016). Integrating spatial planning and flood risk management: A new conceptual framework for the spatially integrated policy infrastructure. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57, 68-79.

Sayers, P. (2013). *Strategic Water Management: International Experience and Practices–Vol. III–Flood Risk Management*. UNESCO.

Taheri, S. M., Mosaedi, A. (2023). An overview of flood risk management strategies and legal and practical challenges. *Water and Sustainable Development*, 10(3), 35-50. (In Persian).

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modeling: A review of methods, recent advances, and uncertainty analysis. *Environmental Modeling & Software*, 90, 201-216.

World Bank Publications. (2013). *The World Bank Annual Report 2013*. World Bank Publications.

Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1218.

Van Alphen, J., & Lodder, Q. (2006). Integrated flood management: experiences of 13 countries with their implementation and day-to-day management. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 55(S1), S159-S171.

-Vatan Fada, J. (2003). *Investigation of the country's flood status: problems and solutions*, The first Seminar on mitigate and prevent flooding, Gorgan, Iran (In Persian).

Vatan Fada, J. Avrideh, F. and Samimi, M. (2010). *Experiences of Integrated Flood Management in Iran*, 8th International River Engineering Conference, Ahva, Iran (In Persian).

Wheater, H., & Gober, P. (2013). Water security in the Canadian Prairies: science and management challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002), 20120409.

World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Integrated Flood Management (concept paper)*. CH-1211 Geneva 2, Switzerland. ISBN 978-92-63-11047-3.



# Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 203-216

10.22077/jaaq.2024.7950.1074

## A Review of The Effects of Sewage Sludge and Suspended Solids of Treated Wastewater on Soil Physical and Hydraulic Properties

Hossein Bagheri <sup>1✉</sup> |

1. PhD Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

✉Corresponding Author: [bagheri.hossein@live.com](mailto:bagheri.hossein@live.com)

Received:  
23 July 2024

Accepted:  
01 October 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Porosity,  
Bulk density,  
Soil structure,  
Permeability,  
Hydraulic conductivity*

### Extended abstract

#### Introduction

The lack of water resources in arid and semi-arid climates has caused treated wastewater to be used as a leading option for agricultural stability and crop production in farmland irrigation. In addition, the low quality of agricultural soil in these climates also requires using fertilizers and modifiers; in this regard, sewage sludge can be an easily accessible option. Despite meeting the land's water and fertilizer needs with the two options, it is necessary to study their consequences on the soil bed of the land for sustainable agriculture. Although treated wastewater and sewage sludge can affect a wide range of soil and crop properties, their effects on soil physical and hydraulic parameters were followed in this study. Since the degree of influence of these resources on soil properties depends on climate type, soil type and texture, and amount of irrigation, different results have been presented by researchers in this regard. For example, Mathan (1994) reported higher porosity and hydraulic conductivity and lower bulk density in loamy sand soil irrigated by wastewater for 15 years, while Zadhosh and Fardad (1996) concluded no change in bulk density and moisture content in field capacity for clay soil in 1 year and a decrease in soil infiltration during 9 years. Dawes et al. (2004) also stated a decrease in soil pore volumes and saturated hydraulic conductivity and an increase in soil water retention as affected by wastewater irrigation during 5 years.

**Cite this article:** Bagheri, H. (2024). A review of the effects of sewage sludge and suspended solids of treated wastewater on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 203-216. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2024.8149.1077>.



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Sewage sludge as a soil fertilizer and amendment has high amounts of phosphorous, nitrogen, carbon, and micronutrients (Page and Chang, 1994), which can affect soil physical parameters including bulk density, porosity, the capacity of water storage, and stability of aggregates (Ojeda et al., 2006; Ramulu, 2002). Therefore, this study aims to review the effects of suspended particles of treated wastewater and sewage sludge on the physical and hydraulic properties of soil including bulk density, porosity, hydraulic conductivity, permeability, soil structure, stability of aggregates, and characteristic curve..

### Results and Discussion

The results of some studies showed an increase in porosity and a decrease in bulk density (Mojiri, 2011; Abedi-Koupai et al., 2006; Rohani Shahraki et al., 2005) and a decrease in porosity and an increase in bulk density (Mollahoseini, 2013; Abedi-Koupai et al., 2006). Bhardwaj et al., (2007) concluded higher soil compaction is due to the increase in the number of pores filled by suspended particles of wastewater. These results can be related to the different roles of organic and inorganic particles in the soil. The inorganic particles placed through soil pores, resulting in higher soil bulk density and lower soil porosity (Mollahoseini, 2013; Mathan, 1994), while injection of organic particles through the soil can sponge it due to the formation of soil aggregates and large pores between them (Mojiri, 2011; Rohani Shahraki et al., 2005). These findings also were the reasons for the increase or decrease in soil hydraulic conductivity and permeability. In this regard, some researchers concluded lower hydraulic conductivity and permeability (Mollahoseini et al., 2013; Vivani and Lovino, 2004), while others stated higher amounts for them affected by soil irrigated by wastewater (Abedi-Koupai et al., 2006; Mathan, 1994). In addition to changes in soil structure and physical blockage of soil pores, biological blockage by fungi and microbes and gas blockage also were effective parameters on the change in hydraulic conditions in soil (Kristiansen, 1981; Vandevivere and Baveye, 1992; Baveye et al., 1998; Magesan et al., 2000). The Irrigation with treated wastewater increased soil water content and retention (Rohani Shahraki et al., 2005; Islamian et al., 2007) due to the increase in soil carbon content, number of fine particles specific surface area of particles, and the change in soil structure. The application of sewage sludge in the soil also changed soil properties. In this regard, Taqvaian et al. (2007) and Lindesky and Logan (1998) reported that the use of 300 tons/hac of sewage sludge increased soil porosity by 10% and decreased bulk density by 13%. Bahremand et al. (2003) stated that the application of 100-ton/hac sewage sludge enhanced the stability of soil aggregate, hydraulic conductivity, and permeability by five, four, and eight times, respectively. Improvement of the soil water retention curve including a greater increase in moisture contents in field capacity and less increase in permanent wilting point was reported by some researchers (Alcañiz, 2010; Ojeda et al., 2006; Bahremand et al., 2003). These findings occurred due to the injection of high amounts of organic carbon in the soil which accelerated the formation of soil aggregate and large pores, resulting in higher porosity and water storage capacity and an improvement in water movement through the soil (Saadat et al., 2013; RahimiAlashti et al., 2012; Asghari, 2011). Moreover, an increase in the specific surface area of media particles due to the presence of organic particles enhanced the moisture content at the wilting point.



## مروری بر اثرات لجن و مواد معلق پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

حسین باقری<sup>✉</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان،

ایران.

✉ نویسنده مسئول: [bagheri.hossein@live.com](mailto:bagheri.hossein@live.com)

### چکیده

کمبود منابع آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک سبب شده تا پساب فاضلاب به‌عنوان یک گزینه پیش‌رو جهت ثبات کشاورزی و تولید محصول در آبیاری اراضی مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، کیفیت پایین اراضی کشاورزی در این اقلیم‌ها نیز مستلزم استفاده از کودها و اصلاح‌کننده‌ها بوده که در این راستا لجن فاضلاب می‌تواند یک گزینه سهل‌الوصول باشد. به‌رغم رفع نیاز آبی و کودی اراضی با دو گزینه مذکور، مطالعه پیامدهای آن‌ها بر بستر خاک اراضی جهت کشاورزی پایدار ضروری است. لذا، هدف این مطالعه بررسی مروری اثرات مواد معلق پساب فاضلاب و لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از قبیل چگالی ظاهری، تخلخل، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، ساختمان خاک، پایداری خاکدانه و منحنی رطوبتی است. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داد که آبیاری با پساب فاضلاب موجب افزایش چگالی ظاهری، کاهش تخلخل و هدایت هیدرولیکی، تخریب ساختمان خاک و خاکدانه‌ها شده اما وضعیت رطوبتی خاک را بهبود بخشید. اثرات لجن فاضلاب روی خصوصیات خاک، گواه این موضوع است که این ماده می‌تواند موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش قطر خاکدانه‌ها و تسریع در فرآیند تشکیل آن‌ها شده و از این طریق شرایط کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری را ایجاد نموده و موجب افزایش رطوبت قابل استفاده در خاک گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

تخلخل،

چگالی ظاهری،

ساختمان خاک،

نفوذپذیری،

هدایت هیدرولیکی.

## مقدمه

آب و خاک از جمله مولفه‌های حیاتی کشاورزی بوده که کمبود یا ضعف در هر کدام تأثیر عمیقی در تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی دارد (Safari, 2023). روند افزایشی جمعیت جهان، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و خشکالی‌های پی در پی در عمده اقلیم‌ها به‌ویژه اقلیم‌های خشک و نیمه خشک سبب افزایش تقاضای مصرف آب و افت کمیت و کیفیت منابع آب شده است. در این راستا، در ایران، ۹۰٪ آب مصرفی متعلق به بخش کشاورزی است (Ehsani et al., 2015). جهت جلوگیری از کاهش تولید محصول ناشی از کم‌آبی، بخش کشاورزی این قابلیت را داشته تا آب‌های با کیفیت پایین و نامتعارف از جمله منابع آب شور و پساب فاضلاب در آن مورد استفاده قرار گیرد. لذا، با توجه به جمع‌آوری فاضلاب‌های خانگی و تصفیه آن، یکی از راهبردهای پیش‌رو استفاده مدیریت‌شده از پساب فاضلاب در کشاورزی است. علاوه بر بخش سیال فاضلاب، بخش جامد آن یعنی لجن فاضلاب نیز به‌عنوان یک کود آلی و اصلاح‌کننده در اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته تا مشکل حاصلخیزی پایین خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز مرتفع گردد (Shirani et al., 2002; Mullins et al., 1990; Gupta et al., 1977). به‌رغم این دست‌آوردها، کاربرد پساب و لجن فاضلاب در کشاورزی به‌دلیل اثرگذاری بر آلودگی خاک و منابع آب سطحی و زیرزمینی، عدم اطمینان از سلامت محصولات کشاورزی، گسترش افقی آلودگی در مناطق تحت کشت؛ محققان، مدیران و کشاورزان را با تردیدهایی روبه‌رو کرده است (Afkhami et al., 2021; Pal et al., 2023). در این میان، خاک به‌عنوان بستر تولید نیاز به ثبات و حفظ کیفیت پایدار داشته و یکی از جنبه‌های مهم آن اثرپذیری ویژگی‌های فیزیکی آن از پساب فاضلاب و لجن است. ضمناً، از آنجایی که عوامل مختلفی از پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌تواند اثرگذار باشد در این مطالعه نقش بار معلق آن بر چگالی ظاهری، تخلخل، خاکدانه، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری و منحنی رطوبتی بررسی شده است. مواد معلق موجود در پساب عمدتاً بار معدنی، آلی و موجودات ذره‌بینی میکروب‌ها و

تخم انگل می‌باشند. که هر کدام از جنبه‌ای می‌تواند سبب بهبود یا زوال فیزیک ساختمان خاک شود. پیامدهای زوال ویژگی‌های فیزیکی مذکور شامل کاهش نرخ هوادهی خاک، مقاومت خاک در مقابل رشد و توسعه ریشه، کمبود اکسیژن در محیط ریشه، کاهش جمعیت میکروب‌های هوازی و ماندآبی است. در این زمینه مطالعات گوناگونی با اهداف مختلف صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، متهن (Mathan, 1994) افزایش خلل و فرج، کاهش چگالی ظاهری و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک را در اثر کاربرد فاضلاب در مدت ده تا پانزده سال برای خاک لومی شنی گزارش کرد. نتایج زاده‌هوش و فرداد (Zadhosh and Fardad, 1996) نشان داد که کاربرد فاضلاب در یک خاک رسی به‌مدت یکسال، میانگین جرم مخصوص ظاهری و درصد رطوبت ظرفیت مزرعه را دچار تغییرات خاصی نکرده، اما زمین‌های آبیاری شده با فاضلاب طی ۹ سال، جرم مخصوص ظاهری کمتر، درصد رطوبت بیشتر و نفوذ نهایی کمتری داشتند. بررسی داده‌های ۱۲ منبع مطالعاتی مختلف، ۲۱ نوع خاک، ۷ نوع فاضلاب و ۸ نوع گیاه، نشان از افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و کاهش چگالی ظاهری داشت (Khaleel et al., 1981). حسن اقلی و همکاران (Hassanoghli et al., 2002) افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها را پس از اجرای عملیات کشت جعفری، هویج و گوجه‌فرنگی و آبیاری با فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده و آب چاه در خاک‌های لومی رسی طی دو سال گزارش کردند. بیشترین افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در کاربرد فاضلاب خام و پس از آن در فاضلاب تصفیه شده و آب چاه بود. داوز و همکاران (Dawes et al., 2004) در زمینه تأثیر فاضلاب بر خصوصیات فیزیکی خاک بیان کردند که کاربرد فاضلاب، نگهداری آب خاک‌های لومی رسی، لوم‌رسی‌شنی، لوم و لومی شنی را در مدت ۵ سال افزایش و حجم خلل فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش داد. اسلامیان و همکاران (Islamian et al., 2007) گزارش کردند که تأثیر فاضلاب تصفیه شده و خام در طی یک فصل زراعی، باعث افزایش مواد آلی، بهبود ساختمان و افزایش قابلیت نگهداشت آب خاک شد. آئلو و همکاران (Aiello et al., 2007) با کاربرد فاضلاب تصفیه شده در یک خاک شنی، کاهش هدایت هیدرولیکی، خلل و فرج و ظرفیت

بررسی اثرات پساب فاضلاب بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک در قالب مطالعات کوتاه‌مدت ( Rohani Shahraki et al., 2005; Abedi-Koupai et al., 2006; Zadhosh and Fardad, 1996; Mollahoseini, 2013; ) (Magesan, 2001) انجام گرفته است. در این راستا، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل ( Mojiri, 2011; Magesan, 2001; Zadhosh and Fardad, 1996; Rohani Shahraki et al., 2005; Abedi-Koupai et al., 2006; Mahida, 1981; Mathan, 1994) و بالعکس افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل (Mollahoseini, 2013; Abedi-Koupai et al., 2006) گزارش شده که ناشی از نقش دوگانه ذرات معلق آلی و غیر آلی پساب است. نتایج برخی مطالعات نشان‌دهنده کاهش چگالی ناشی از اسفنجی شدن خاک متأثر از مواد آلی پساب ( Mojiri, 2011; Rohani Shahraki et al., 2005; Mahida, 1981; Mathan, 1994) بوده در حالی که نتایج برخی مطالعات طولانی‌مدت، مبین انسداد و پر شدن حفرات خاک ناشی از مواد معلق موجود در پساب می‌باشد ( Mollahoseini, 1994; Mathan, 2013). به‌علاوه، نتایج مگ‌سان (Magesan, 2001) نشان داد که انسداد حفرات خاک در لایه‌های بالایی به‌علت فرو ریختگی خاکدانه ناشی از ترکیبات شیمیایی پساب رخ داده و پیامد آن تراکم خاک، کاهش هوادهی و افزایش چگالی ظاهری خاک است. با این وجود، طبق برخی مطالعات، اثر غیر معنی‌دار پساب بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک استنتاج شده است ( Taqvaian et al., 2007; Masoudiashtiani et al., 2011).

علاوه بر پساب فاضلاب در آبیاری، کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان یک کود آلی اثرات قابل ملاحظه‌ای بر چگالی ظاهری و تخلخل داشته که در عمده مطالعات انجام شده، بهبود وضعیت چگالی ظاهری و تخلخل گزارش شده است ( Boeira and de Souza, 2007; Taqvaian et al., 2007; ) (Mays et al., 1973; Giusquiani et al., 1995; Logon and Billite, 1998; Marinari et al., 2000). نتایج مطالعه تقوائیان و همکاران (Taqvaian et al., 2007) نشان داد که استفاده ۳۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب موجب افزایش ۱۰ درصدی تخلخل شد. لیندسکی و لوگان (Lindesky and Logan, 1998) مشاهده کردند که استفاده از همین مقدار لجن، کاهش ۱۳ درصدی چگالی

نگهداشت آب و خاک و افزایش چگالی ظاهری در لایه ۰-۳۰ سانتیمتری را نسبت به مقدار اولیه گزارش کردند. در مطالعه‌ای دیگر آبیاری با فاضلاب شدت نفوذ نهایی زمین تحت کشت گیاه گوجه فرنگی را کاهش داد ( Xanthoulis and Wallender, 1991).

لجن فاضلاب که از تصفیه فاضلاب بوجود می‌آید یک ماده اصلاح‌کننده‌ی خصوصیات خاک می‌باشد. در حقیقت، این ماده حاوی مقادیر بالای فسفر، نیتروژن، کربن و ریزمغذی‌های بوده که می‌تواند برای خاک مفید واقع شود (Page and Chang, 1994). به دلیل پیشرفت‌ها در تحقیقات و تکنولوژی، این ماده می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده و یک انتخاب پایدار و همیشگی برای بهبود خاک‌های غیر حاصلخیز و دارای مشکلات رطوبتی به کار رود (Schaefer, 1999). ماده آلی که به شکل لجن فاضلاب به خاک اضافه می‌گردد، موجب بهبود چندین خصوصیت فیزیکی خاک، از جمله چگالی ظاهری، تخلخل، ظرفیت نگهداشت آب خاک (Ramulu, 2002) و پایداری خاکدانه و تسریع در فرایند تشکیل آن می‌شود (Ojeda et al., 2003; Ojeda et al., 2006). بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی اثرات لجن فاضلاب و مواد معلق موجود در پساب بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک از قبیل، چگالی ظاهری، تخلخل، ساختمان خاک، پایداری خاکدانه، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، منحنی رطوبتی و رطوبت قابل استفاده گیاه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

جهت انجام این مطالعه، کلمات کلیدی پساب فاضلاب، بار معلق، لجن فاضلاب و خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک، در موتور جست‌وجوی Google و ابزارهای جست‌وجوی مجلات داخلی و خارجی مرتبط با موضوعات آب، خاک و محیط‌زیست، مورد بررسی قرار گرفتند. در این زمینه مطالعات زیادی صورت گرفته بود، که از این میان تعداد ۱۱۷ مقاله برای رسیدن به این مهم انتخاب گردید.

## نتایج و بحث

### چگالی ظاهری و تخلخل

وضعیت ساختمانی خاک مورد استفاده قرار گرفته که نتیجه آن ارتقا سطح فیزیکی خاک بود (Nicolas et al., 2014; Glauser et al., 1998; Epstein, 1975; Tester, 1990; Abusharar, 1993; Kladvik and Nelson, 1993; Pagliai et al., 1979). نتایج شیرانی و همکاران (Shirani et al., 2010) نشان می‌دهد که هر چه میزان لجن اضافه شده به خاک افزایش یابد، پایداری خاکدانه‌ها بیشتر می‌گردد. بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al., 2003) اظهار داشتند که اعمال ۱۰۰ تن در هکتار لجن به خاک، پایداری خاکدانه را پنج برابر کرد. در بسیاری از مطالعات بیان شده که، میزان مواد آلی، سهم بیشتری از مواد تشکیل دهنده‌ی لجن فاضلاب را شامل می‌شود (Vaseghi et al., 2005; Saadat et al., 2013; Shirani et al., 2010; Fu et al., 2002; Bouzaiane et al., 2007; Nyamangara et al., 2001; Angers and Mehuys, 1989; Bear et al., 1994; Gollany et al., 1991) بیان‌کننده نقش اساسی مواد آلی در پایداری ساختمان خاک و تولید خاکدانه است. بیر و همکاران (Bear et al., 1994) گزارش کردند خاکدانه‌های با قطر ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر نیاز به حفاظت و نگهداری توسط عوامل کربن آلی داشته تا در مقابل عملیات خاک‌ورزی سنگین، فشرده و تخریب نشوند. ساز و کار اثر ماده‌ی آلی بر پایداری خاکدانه‌ها نه تنها به مقدار و نوع ماده‌ی آلی بستگی دارد بلکه بیش از آن به آرایش و نحوه‌ی پیوندهای آن با اجزای معدنی خاک وابسته است (Aringhieri and Sequi, 1979). معادلات مختلف و گاهاً متناقضی که تاکنون در خصوص اثر مواد آلی بر پایداری خاکدانه‌ها ارائه شده، محقق را از ساده انگاری بر حذر داشته و جمع بندی نهایی نتایج را دشوار می‌سازد. زیرا، مواد آلی از سویی می‌توانند با افزایش بارهای سطحی منفی و کاهش تخلخل رس بر مقدار پراکنش رس افزوده و از سویی دیگر عامل پیوند دهنده‌ی ذرات خاک به شمار آیند (Koutika et al., 1997). با تکیه بر این موضوع و وجود برخی کاتیون‌ها نظیر سدیم، کلسیم و... در لجن فاضلاب، در مطالعاتی اثر منفی لجن فاضلاب روی وضعیت ساختمانی، پایداری و میزان خاکدانه نیز ارائه شده است (Macedo et al., 2006; Filizola et al., 2006). همچنین، اصغری و همکاران (Asghari et al., 2011) بیان کردند که استفاده از لجن فاضلاب نتوانست میانگین قطر خاکدانه‌ها

ظاهری را سبب شد. در همین راستا، کاهش ۱۰ درصدی چگالی ظاهری و افزایش ۱۸ درصدی تخلخل پس از کاربرد لجن فاضلاب گزارش شده است (Rostagno and Sosebee, 2001; Sort and Alcañiz, 1999). پاگلیایی و همکاران (Pagliai et al., 1981) به این نتیجه رسیدند که لجن فاضلاب می‌تواند بیشتر از کود حیوانی با افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری به بهبود ساختمان خاک کمک کند. دلیل اصلی این نتایج وابسته به وجود ماده آلی در ترکیبات لجن فاضلاب است. در این راستا، برخی مطالعات، وجود ۲۰ تا ۵۹ درصدی مواد آلی در ترکیبات لجن فاضلاب را نشان داد (Fathololomi, Asghari, 2018; Shahbazi et al., 2015). لذا، وجود مواد آلی زیاد در لجن فاضلاب، به دلیل افزایش کربن آلی و اسفنجی و سبک شدن ساختمان خاک، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل را موجب شده است (Saadat et al., 2013; RahimiAlashti et al., 2012; Asghari, 2011; Sort and Alcañiz, 1999; Taqvaian et al., 2007). نتیجه کلی نشان‌دهنده انسداد حفرات، افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل خاک ناشی از نفوذ بار معلق پساب به درون خاک بوده در حالی که لجن فاضلاب موجب بهبود این ویژگی‌ها در خاک شده است.

#### ساختمان خاک و پایداری خاکدانه

اگرچه مطالعات قابل توجهی در زمینه اثر ترکیبات مختلف پساب بر خواص ساختمانی خاک انجام گرفته (Halliwell et al., 2001; Levy and Mamedov, 2002; Levy et al., 2007; Bhardwaj et al., 2006; Levy et al., 2003)، اما مطالعات معدودی در خصوص اثر مواد معلق پساب بر این ویژگی‌ها وجود دارد (Glinski et al., 2011). وجود ذرات معلق زیاد در پساب می‌تواند با پر کردن حفرات باعث تراکم ساختمان خاک شده (Bhardwaj et al., 2007) در حالی که وجود ذرات آلی با قرارگرفتن در بین حفرات با تشکیل ترکیبات هیومیکی موجب هم‌بستگی ذرات خاک و تشکیل خاکدانه در طولانی‌مدت می‌شود. با این وجود، نتایج تراچیتزکی و همکاران (Tarchitzky et al., 1993) مبین انتشارپذیری ذرات رس خاک متأثر از حضور مواد هیومیکی پساب ناشی از نوع بار الکتریکی آن‌ها است. لجن فاضلاب به دلیل دارا بودن ترکیبات حاصلخیزکننده و اصلاح‌کننده، با هدف افزایش پایداری خاکدانه و بهبود



پروسه می‌باشد. لوی و همکاران (Levy et al., 1999) اثر اندازه اجزای جامد معلق در پساب را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که مقادیر بالای ماده آلی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود، اما با فیلتر کردن ذرات معلق بزرگ‌تر از ۵/۰ میکرون، ماده آلی موجود در پساب، موجب بهبود هدایت هیدرولیکی می‌شود. در همین مورد ایرز و وستکات (Ayers and Westcot, 1985) گزارش کردند که میزان مواد معلق که در گرفتگی خاک نقش دارند نباید از ۱۰ میلی گرم در لیتر بیشتر باشند و پیشنهاد نمودند که با شخم زدن و طولانی کردن فواصل آبیاری، هوادهی خاک بیشتر صورت گرفته و مواد جامدانه سریع‌تر تجزیه می‌شوند.

در زمینه اثرات پساب روی نفوذ نیز مطالعات زیادی انجام شده است که در اغلب آنها استفاده از پساب موجب کاهش نفوذپذیری نهایی شده است (Siegrist, 1987; Xanthoulis and Wallender, 1991; Rohani Shahraki et al., 2005; Zadhosh and Fardad, 1996). دلایل و عوامل مختلفی ممکن است در کاهش نفوذپذیری نهایی شرکت داشته باشند (مگ‌سان و همکاران، ۱۹۹۹). بعضی از این مکانیسم‌ها که در مورد هدایت هیدرولیکی نیز صدق می‌کند، شامل قطع یا انسداد فضاهای ارتباطی درون خاک به وسیله مواد معلق از قبیل رس‌های کلوئیدی و سلول‌های جلبکی (Bouwer and Chaney, 1974; Berend, 1967) تشکیل لایه یا پوسته بیولوژیکی (Kristiansen, 1981; Balks et al., 1997) گرفتگی بیولوژیکی خارج سلولی میکروبی (Thomas et al., 1966; McAuliffe et al., 1982) تخریب ساختمان خاک به دلیل تجزیه مواد آلی (Vandevivere and Baveye, 1992; Lieffering and McLay, 1996; Nevo and Mitchell, 1967) و بارگذاری زیاد مواد معلق پساب در طول کاربری زمانی اراضی است (Magesan et al., 2000).

چندین محقق نشان دادند که استفاده از لجن فاضلاب در اراضی می‌تواند موجب بهبود هدایت هیدرولیکی (Morel and Guckert, 1983; Shirani et al., 2010; Epstein, 1975) و نفوذپذیری خاک گردد (Shirani et al., 2010; Martens and Frankenberg, 1992; Clapp et al., 1986). بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al., 2003) گزارش کردند که اضافه کردن ۱۰۰ تن-هکتار از این ماده به خاک، موجب افزایش چهار برابری و هشت برابری

را به طور معنی داری تحت تأثیر قرار دهد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که وجود ذرات معدنی در پساب موجب افزایش تراکم ساختمان خاک شده در حالی که لجن فاضلاب و ذرات آلی معلق پساب، پایداری و افزایش قطر خاکدانه و ثبات ساختمان متخلخل خاک را به همراه دارد.

### هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری

مطالعات متعددی اثر مواد معلق موجود در پساب و فاضلاب را روی هدایت هیدرولیکی بررسی نموده که در بیشتر آنها کاهش هدایت هیدرولیکی (Mollahoseini et al., 2013; Vivani and Lovino, 2004; Yeates, 1995; Magesan et al., 2000) و در مطالعات محدودی افزایش آن به دست آمده است (Abedi-Koupai et al., 2006; Mathan, 1994). ون‌تن و همکاران (Vinten et al., 1983) مشاهده کردند که ماده آلی حل شده در پساب حتی در درصد سدیم قابل تبادل پایین نیز موجب کاهش هدایت هیدرولیکی شده است، که به دلیل باقی ماندن مواد آلی در طی نفوذ و تغییرات اندازه و توزیع خلل و فرج ناشی از انبساط و پراکندگی ذرات خاک اتفاق می‌افتد. لوی و همکاران (Levy et al., 1999) اثرات مضر آبیاری با پساب فاضلاب را در نتیجه اثر مقادیر بالای ذرات معلق آن بر هدایت هیدرولیکی خاک دانستند، که به بافت خاک بستگی داشته و هر چه بافت خاک ریزتر باشد، کاهش هدایت هیدرولیکی آن بیشتر می‌گردد. تغییرات مشاهده شده در هدایت هیدرولیکی را می‌توان در سه عامل انسداد بیولوژیکی توسط قارچ‌ها و میکروب‌ها (McCalla, 1950; Gupta and Swartzendruber, 1962; Frankenberg et al., 1979; Kristiansen, 1981; Vandevivere and Baveye, 1992)، انسداد گازی (ناشی از فعالیت ریز جانداران و گاز تولید شده از تجزیه) و تغییر ساختمان ناشی از دو عامل فوق‌الذکر و انسداد فیزیکی جست و جو کرد (Baveye et al., 1998). مگ‌سان و همکاران (Magesan et al., 2000) و یِتس (Yeates, 1995) بیان کردند که استفاده از پساب موجب افزایش جمعیت نماتدها در اراضی کشاورزی می‌شود و در دسترس قرار گرفتن کربن، رشد آنها را چندین برابر خواهد کرد که به سرعت این خصوصیات خاک را تضعیف خواهند کرد. اندازه ذرات مواد معلق در پساب نیز عامل دیگری در این

به دلیل کوچک بودن اندازه‌شان باعث افزایش تخلخل میکرو (Sort and Alcañiz, 1999) و به علت داشتن سطح ویژه زیادتر نسبت به ذرات خاک موجب نگهداشت و جذب سطحی بیشتر رطوبت می‌شوند. با این وجود، انسداد منافذ خاک متأثر از این ذرات، باعث کاهش ارتباط بین حفرات و انتقال آب و ذخیره بیشتر آن در حفرات ریز خاک می‌شود (Frankenberger et al., 1979; Gupta and Swartzendruber, 1962; Magesan et al., 2000). وجود این شرایط دال بر نیاز به مکش بیشتر برای خارج کردن رطوبت خاک در تعیین منحنی رطوبتی می‌باشد. بنابراین آبیاری با پساب نگهداشت رطوبت باقی‌مانده در شرایط مکش‌های بیشتر را افزایش می‌دهد.

طبق برخی مطالعات، نگهداشت رطوبت خاک با اضافه شدن لجن فاضلاب به خاک افزایش یافت (Kumar et al., 1985; Illera et al., 1999; Tsadilas et al., 2005; Aggelides and Londra, 2000; Ojeda et al., 2006; Ojeda and Alcañiz 2010; De Jong, 1983). بهرمنند و همکاران (Bahremand et al., 2003) بیان داشتند که کاربرد لجن فاضلاب در خاک موجب افزایش نگهداشت رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی می‌شود که میزان افزایش در ظرفیت زراعی خیلی بیشتر از نقطه پژمردگی دائم بوده و نتیجه آن افزایش نزدیک به ۴ درصد به رطوبت قابل استفاده متأثر از اضافه کردن ۱۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب است. در این راستا، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، لجن فاضلاب به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی (Ojeda et al., 2006; Catroux et al., 1981) سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، تغییر در اندازه خاکدانه‌ها و حفرات خاک شده که از دیگر دلایل بهبود منحنی رطوبتی و افزایش آب در دسترس گیاه است (Bahremand et al., 2003; Catroux et al., 1981; Epstein, 1975). به‌طور کلی می‌توان بیان داشت که ذرات معلق پساب سبب افزایش نگهداشت رطوبت خاک در مکش‌های بالا شده در حالی که لجن فاضلاب علاوه بر این نتیجه افزایش ذخیره رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی را نیز موجب شده است.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی اثرات لجن فاضلاب و مواد معلق پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک شده است که میزان بهبودی این ویژگی‌ها به میزان لجن افزوده شده به خاک بستگی دارد. در اکثر مطالعات مشاهده شده که بخش زیادی از مواد تشکیل دهنده لجن فاضلاب، کربن آلی می‌باشد و به همین دلیل لجن فاضلاب جز اصلاح‌کننده‌های آلی به شمار می‌آید، که با اضافه شدن آن به خاک میزان ماده آلی خاک افزایش می‌یابد (Vaseghi et al., 2005; Saadat et al., 2013; Shirani et al., 2010; Fu et al., 2002; Bouzaiane et al., 2007). اضافه شدن مواد آلی به خاک موجب افزایش قطر خاکدانه، پایداری و اسفنجی شدن ساختمان خاک، کاهش چگالی ظاهری (Dexter et al., 2003; Nakano and Miyazaki, 2005; Wysocka et al., 2007; Islam et al., 2008; Ahn and Jo, 2009) و افزایش خلل و فرج شده که ظرفیت انتقال را افزایش داده (Staub et al., 2009; Carman, 1937; Scheidegger, 1960) و موجب بهبود وضعیت سرعت نفوذ نهایی و هدایت هیدرولیکی می‌شود. با این وجود، با گذشت زمان و تجزیه مواد آلی، پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد که عامل کاهش سرعت نفوذ نهایی و هدایت هیدرولیکی است. برآیند نتایج نشان می‌دهد که وجود ذرات معلق در پساب و جانمایی آن‌ها درون حفرات خاک سبب کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری شده در حالی که کاربرد لجن فاضلاب به‌واسطه اثرات مثبت بر ساختمان خاک سبب افزایش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی گردیده است.

### منحنی رطوبتی و آب قابل استفاده

مطالعات انجام گرفته در مورد اثرات پساب و فاضلاب بر منحنی رطوبتی و نگهداشت رطوبت خاک نسبت به دیگر ویژگی‌های فیزیکی کمتر بوده که عمدتاً مبین افزایش سطح نقاط رطوبتی و بهبود وضعیت نگهداشت رطوبت خاک می‌باشند (Saber, 1986; Zadhosh and Fardad, 1996; Rohani Shahraki et al., 2005; Islamian et al., 2007). در این راستا، عمده این نتایج متأثر از وجود کسر زیادی از مواد آلی در پساب است (Rohani Shahraki et al., 2011; Masoudiashtiani et al., 2005). اما با صرف نظر از وجود سطح ویژه زیاد و قابلیت بالای جذب آب ذرات آلی، تغییر شکل ساختمان خاک متأثر از ذرات معدنی نیز می‌تواند یک دلیل اثرگذار باشد. مواد معلق ریز

compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 44, 144-150.

Aiello, R., Cirelli, G.L. & Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Journal of Agricultural Water Management*, 93, 65-72.

Angers, D.A., & Mehuys, G.R. (1989). Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(2), 373-380.

Aringhieri, R. & Sequi, P. 1979. The arrangement of organic matter in a soil crumb. In: W.W. Emperson, R. D. Bond. and A. R. Dexter (Ede.) *Modification of Soil Structure*. Wiley, NewYork, 435p.

Asghari, S. (2011). Effects of Tabriz Petrochemical Sewage Sludge on Organic Carbon, Aggregate Stability Indices and Consistency Limits of a Semi-arid Soil. *Water and Soil*, 25(3), 530-539. [In Persian]

Ayers, R. S. & Westcot, D. W. (1985). *Water-Quality for Agriculture*. Rev. I, F.A.O., Rome. 174p.

Bahreman, M. R., M. Afyuni, M. A. Hajabbassi, Y. Rezaeinejad. (2003). Effect of Sewage Sludge on Soil Physical Properties. *Journal of Crop Production and Processing*, 6(4), 1-9. [In Persian]

Balks, M.R., McLay, C.D.A. & Harfoot, C.G. (1997). Determination of the progression in soil microbial response, and changes in soil permeability, following application of meat processing effluent to soil. *Applied Soil Ecology*, 6, 109-116.

Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L, DeLeo, P.C. & deLozada, D.S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical Review. Environmental Science and Technology*, 28, 123-191.

Bear, M.H., Hendrix, P. F., & Coleman, D.C. (1994). Water stable aggregates and organic carbon fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science of Society American Journal*, 58(3), 777-786.

Berend, J.E. (1967). An analytical approach to the clogging effect of suspended matter. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 12, 42-55.

Bhangoo, M.S., Day, K.S., Sudangunta, V.R. & Petrucci, V.E. (1988). Application of poultry manure influences Thompson seedless grape production and soil properties. *Horticultural Science*, 23, 1010-1012.

Bhardwaj, A.K., Mandal, U.K., Bar-Tal, A., Gilboa, G. & Levy, G.J. (2007). Replacing saline-sodic irrigation water with treated wastewater: effects on saturated hydraulic conductivity, slaking, and swelling. *Irrigation Science*, 26, 139-146.

خاک به صورت مروری انجام گرفت. طبق نتایج، کاربرد پساب فاضلاب در طولانی مدت به دلایل افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری نامناسب ارزیابی می‌گردد. با این وجود، بهبود وضعیت نقاط رطوبتی و حجم آب در دسترس گیاه از مزایای کاربرد پساب است. مطالعات انجام شده در زمینه لجن فاضلاب نشان از بهبود وضعیت فیزیکی و هیدرولیکی خاک شامل افزایش قطر خاکدانه، تسریع در فرایند خاکدانه‌سازی، کاهش چگالی ظاهری، افزایش خلل و فرج، بهبود هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری ارتقا سطوح جاذب رطوبت و افزایش رطوبت در دسترس گیاه داشت. اگرچه این مطالعه با هدف بررسی مواد معلق پساب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی انجام گرفته اما، پساب‌ها بسته به منشأ آن‌ها دارای ترکیبات ناشناخته سمی، میکروبی نیز بوده که بررسی آن‌ها به جهت اثرگذاری بر سلامت خاک، محیط‌زیست و منابع آب زیرزمینی و سطحی الزام‌آور است. به علاوه، لجن فاضلاب نیز به رغم اثرات مثبت در تغذیه و اصلاح خاک، دارای ترکیبات آلی و غیر آلی زیادی بوده که احتمال آلودگی محصولات کشاورزی و منابع آب و خاک را افزایش می‌دهد. لذا، پیشنهاد می‌شود جنبه‌های مختلف اثرگذاری پساب و لجن فاضلاب بر خصوصیات شیمیایی و جمعیت میکروبی خاک نیز مورد بررسی واقع گردد.

## منابع

Abedi-Koupai, J., Mostafazadeh-Fard, B., Afyuni, M. & Bagheri, M.R. (2006). Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. *Plant, Soil and Environment*, 52(8), 335-344.

Abusharar, T. M. (1993). Effects of sewage sludge treatments on aggregate slaking, clay dispersion and hydraulic conductivity of semi-arid soil sample. *Geoderma*, 59(1-4), 327-343.

Afkhami, M., Amiri, F. & Tabatabaie, T. (2021). Effect of irrigation with treated wastewater on lead and cadmium accumulations in soil and sweet pepper plant. *Iranian Journal of Health and Environment*, 14(1), 99-114. [In Persian]

Angeles, S.M. & Londra, P.A. (2000). Effect of compost produced from town wastes and sewage sludge on the Physical Properties of a Lomy and Clay soil. *Bioresource Technology*, 71, 235-259.

Ahn, H.-S. & Jo, H.Y. (2009). Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of

- Fathololomi, S., & Asghari, S. (2015). Effects of Ardabil Municipal Sewage Sludge on Some Physical and Hydraulic Properties of a Coarse-Textured Soil under Wheat Cultivation. *Water and Soil Science*, 24(4), 169-183.
- Filizola, H. F., de Souza, M. D., Gomes, M. A. F., & Boeira, R. C. (2006). Aspectos físicos de um solo tratado com lodo de esgoto: estabilidade de agregados e argila dispersa em água.
- Frankenberger, W.T., Troeh, F.R., & Dumenil, L.C. (1979). Bacterial effects on hydraulic conductivity of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 333-338.
- Frenkel, H., Goortzen, J. O. & Rhoades, J. D. (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 32-39.
- Fu, H., Wang, Y.M., Zhou, Z.Y., Zhang, H.R., Li, X.R. & Zou, X.J. (2002). Studies on effects of application of sewage sludge on alfalfa. I. Effects on physical and chemical characteristic, and element accumulation of the soil, *Acta Prataculturae Sinica*, 11, 57-61.
- Giusquiani, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D. & Benetti, A. (1995). Urban waste compost: Effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 24(1), 175-182.
- Glauser, R., Doner, H. E. & Poul, E. A. (1988). Soil aggregate stability as a function of particle size in sludge treated soils. *Soil Science*, 146(1), 37-43.
- Glinski, J., Horabik, J. & Lipiec, J. (2011). *Encyclopedia of Agrophysics*. Springer. pp.403-407.
- Gollany, H.T., Schumacher, T.E., Evenson, P.D. & Lindstrom, M.J. (1991). Aggregate stability of an eroded and resurfaced typic agriustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 811-816.
- Gupta, R.P. & Swartzendruber, D. (1962). Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 26, 6-10.
- Gupta, S.C., Dowday, R.H. & Larson, W.E. (1977). Hydraulic and thermal properties of soil influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 601-605.
- Halliwell, D.J., Barlow, K.M. & Nash, D.M. (2001). A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 1259-1267.
- HassanOghli, A., Mirabzadeh, M. & Liaqat, A.M. (2002). Use of domestic sewage and house sewage in irrigation of crops and artificial feeding of underground water tables. PhD Thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran. [In Persian]
- Boeira R.C. & de Souza M.D. (2007). Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de umlatossolo após três aplicações de lodos de esgoto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 31(3), 581-590.
- Bouwer, H., & Chaney, R.L. (1974). Land treatment of wastewater. *Advances in Agronomy*, 26, 133-176.
- Bouzaiane, O., Cherif, H., Saidi, N., Jedidi, N. & Hassen, A. (2007). Effects of municipal solid waste municipal solid waste application on the microbial biomass of cultivated and non-cultivated soil in a semi-arid zone. *Waste Management & Research*, 25, 334-342.
- Carman, PC. (1937). Fluid Flow Through Granular Beds. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 15, 150.
- Catroux, G., L'hermite, P., & Suess, E. (Eds.). (2012). *The Influence of Sewage Sludge Application on Physical and Biological Properties of Soils: Proceedings of a Seminar Organized Jointly by the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development and the Bayerische Landesanstalt Für Bodenkultur und Pflanzenbau, Munich, Federal Republic of Germany, Held in Munich, June 23-24, 1981*. Springer Science & Business Media.
- Chen, Y., & Avnimelech, Y. (1986). *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, first edition, Martinus Nijhoff, Netherlands, 320 p.
- Clapp, C.E., Stark, S.A., Clay, D.E. & Larson, W.E. (1986). Sewage sludge organic matter and soil properties. In: Chen, Y. & Avnimelech, Y. (Eds.), *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 209-253.
- Dawes, L., & Goonetilleke, A. (2004). Assessing changes in soil physical and chemical properties under long-term effluent disposal. In *On-Site Wastewater Treatment X, 21-24 March 2004* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- De Jong, R. (1983). Soil water desorption curves estimated from limited data. *Canadian Journal of Soil Science*, 63, 697-703.
- Dexter, A.R., Czyz, E.A. & Gate, O.P. (2004). Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil & Tillage Research*, 79, 185-189.
- Ehsani, M., Khalidi, H. & Rahimi, H. (2015). Improving agricultural water productivity to ensure the country's water and food security. *Quarterly Journal of the Academy of Sciences*, [In Persian]
- Epstein, E. (1975). Effect of sewage sludge on some soil physical properties. *Journal of Environmental Quality*, 4(2), 139-142.
- FAOSTAT. (2005). FAOSTAT statistical database. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at [www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org).

- aggregates and hydraulic conductivity of soil. *European Journal of Soil Science*, 47, 43–50.
- Lindsay, B. J., & Logan, T. J. (1998). *Field response of soil physical properties to sewage sludge* (Vol. 27, No. 3, pp. 534-542). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Logon, T.J. & Billite, J. (1998). Field response of soil physical properties to sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 27, 534-542.
- Macedo, J.R., Filizola, H.F., Souza, M.D. & Reichardt, K. (2006). Micromorfologia da camada superficial de solo tratado com lodo de esgoto. in *Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura*, Bettiol, W. & Camargo, O.A., Eds., pp. 149–164, Embrapa Meio Ambiente, Jaguari 'una, Brazil.
- Magesan, G.N. (2001). Changes in soil physical properties following irrigation of municipal wastewater on two forested soils. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 31, 188-195.
- Magesan, G.N., Williamson, J.C., Sparling, G.P., Schipper, L.A. & Lloyd-Jones, A.Rh. (1999). Decreased hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewater field and laboratory studies. *Australian Journal of Soil Research*, 37, 391-402.
- Magesan, G.N., Williamson, J.C., Yeates, G.W. and Lloyd-Jones, A.Rh. (2000). Wastewater C: N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. *Bioresource Technology*, 71: 21-27.
- Mahida, N.U. (1981). *Water Pollution and Disposal of Wastewater on Land*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 325 p.
- Marinari, S., Masciandaro, G., Ceccanti, B. & George, S. (2000). Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*, 72(1), 9-17.
- Martens, D.A. & Frankenberg, W.T. (1992). Effect of organic amendment on water infiltration and soil properties of n irrigated soil. *Agronomy Journal*, 82, 707-717.
- Masoudiashtiani, S., Parsinejad, M., & abbasi, F. (2011). Effect of Applying Urban Wastewater in Irrigation of Sorghum on Some Soil Physical Properties. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(3), 243-253. [In Persian]
- Mathan, K.K. (1994). Studies of the influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, 48(3), 275-276.
- Mays, D.A., Treman, G.L. & Duggan, J.C. (1973). Municipal compost: effect on yield and soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 2, 81-89.
- McAuliffe K.W., Scotter D.R., McGregor A.N. & Earl K.D. (1982): Casein whey wastewater effects on soil permeability. *Journal of Environmental Quality*, 11, 31–34.
- Illera, V., Walter, I., Cuevas, G., & Cala, V. (1999). Biosolid and municipal solid waste affect on physical and chemical properties of degraded soil. *Agrochimica* 43, 178–186.
- Islam, M.R., Alamgir, M., Mohiuddin, K.M. & Hasan, K.M.M. (2008). Investigation of physical properties of a selected soil to use as a compacted clay liner in a sanitary landfill. Proceedings of the National Seminar on Solid Waste Management – WasteSafe 2008, Khulna, Bangladesh, pp. 167-174.
- Islamian, S.S., Hajarzadeh, B., Gohri, S.A. & Zareian, M.J. (2007). The effect of using sewage effluent in agricultural soils of Najaf Abad city. 10th Congress of Soil Sciences of Iran, Karaj, January 2007.
- Khaleel, R., Reddy, K.R., & Overcash, M.R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: A review. *Journal of Environmental Quality*, 10(2), 133-141.
- Kladivko, E.J., & Nelson, D.W. (1979) Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 51, 325–332.
- Koutika, L.S., Bartoli, F., Andreux, F., Cerri, C. C., Burtin, G., Chone, Th. & Philippy, R. (1997). Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. *Geoderma*, 76, 87–112.
- Kristiansen, R. (1981). Sand-filter trenches for purification of septic tank e.uent: I. The clogging mechanism and soil physical environment. *Journal of Environmental Quality*, 10, 353-357.
- Kumar, S., Malik, R.S. & Dahiya, I.S. (1985). Influence of different organic wastes upon water retention, transmission, and contact characteristics of sandy soil. *Australian Journal of Soil Research*, 23, 131–136.
- Levy, G.J., & Mamedov, A.I. (2002). High-Energy-Moisture-Characteristics aggregate stability as a predictor for seal formation. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1603–1609.
- Levy, G. J., Goldstein, D., Trachitzky, J., & Chen, Y. (2006). Combined effects of irrigation with treated wastewater and tillage on soil structural stability. *Final report submitted to the Chief Scientist, Ministry of Agriculture, State of Israel (in Hebrew)*.
- Levy, G. J., Mamedov, A.I. & Goldstein, D. (2003). Sodcity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. *Soil Science*, 168, 552–562.
- Levy, G.J., Rosenthal, A., Shainberg, I., Tarchitzky, J., & Chen, Y. (1999). Soil hydraulic conductivity changes are caused by irrigation with reclaimed wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 28, 1658-1664.
- Lieffering R.E., McLay C.D.A. (1996): The effects of strong hydroxide solutions on the stability of

- C.E., Larson, W.E., & Dowdy, R.H., Eds. Sewage Sludge: *land utilization and the environment*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., *Soil Science Society of America*, Inc. Madison, WI. pp. 3–6.
- Pagliai, M., Guide, G., Marca, M., Giachetti, M., & Lucament, G. (1981). Effects of sewage sludge and compost on soil porosity and aggregation. *Journal of Environmental Quality*, 4 (1), 556-561.
- Pagliai, M. & Vittori Antisari, L., (1993). Influence of waste organic matter on soil micro- and macrostructure. *Bioresource Technology*. 43(3), 205-213.
- Pal, S., Patel, N., Malik, A., Sharma, A., Pal, U., Rosin, K.G., & Singh, D.K. (2023). Eco-friendly treatment of wastewater and its impact on soil and vegetables using flood and micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 275, 108025.
- Perfect, E., Kay, B.D., Vanloon, W.K.P., Sheard, R.W. & Pojasok, T. (1990). Factors influencing soil structural stability of moist aggregate. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 33-42.
- RahimiAlashti, S., Bahmanyar, M.A., Ghajarspanloo, M. (2012). The effects of sewage sludge application on pH, EC, O.C, Pb, and Cd in soil and lettuce and radish plants. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(3), 133-149. [In Persian]
- Ramulu, U.S.S. (2002) Reuse of Municipal Sewage and Sludge in Agriculture. Scientific Publishers, Jodhpur India, 342 p.
- Rohani Shahraki, F., Mahdavi, R., & Rezaee, M. (2005). Effect of Irrigation with Wastewater on Certain Soil Physical and Chemical Properties. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 16(1), 23-29. [In Persian]
- Rostagno, C.M. & Sosebee, R.E. (2001). Surface application of biosolids in the Chihuahuan Desert: Effects on soil physical properties. *Arid Land Research and Management*, 15, 233–244.
- Saadat, K., Barani Motlagh, M., Dordipour, A., & Ghasemnezhad, A. (2013). Influence of sewage sludge on some soil properties, yield, and concentration of lead and cadmium in roots and Shoots of Maize. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2(2), 27-48. [In Persian]
- Saber, M.S.M. (1986). Prolonged Effect of Land Disposal of Human Wastes on Soil Conditions. *Water Science and Technology*, 18, 371-374.
- Safari, Y. (2023). Review of food security indices in Iran and the forgotten role of soil. *Land Management Journal*, 11(1), 15-29. [In Persian]
- Schaefer, C. (1999). The application of sewage sludge for soil remediation. Restoration and reclamation review, *A Student on-line Journal*, 5(3), 1-7.
- Scheidegger, A.E. (1960). The Physics of Flow Through Porous Media. The Macmillan Company, NY, 372 p.
- McCalla, T.M. (1950). Studies on the effect of microorganisms on the rate of percolation of water through soils. *Soil Science Society of America, Proceeding*. 15, 182-186.
- Melo, V., Beutler, A.N., Souza, Z.M., Centurión, J.F. & Melo, W.J. (2004). Physical attributes of oxisols fertilized over five years with biosolids. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39, 67–72.
- Mojiri, A. (2011). Effects of Municipal Wastewater on Physical and Chemical Properties of Saline Soil. *Journal of Biological & Environmental Sciences*, 5(14), 71-76.
- Mollahoseini, H. (2013). Long-term effects of municipal wastewater irrigation on some properties of a semiarid region soil of Iran. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4 (5), 1023-1028.
- Morel, J.L., & Guckert, A. (1983). The Influence of Sludge Application on Physical and Biological Properties of Soils. 1st Ed., Dordrecht, Holland, 262 p.
- Mullins, C.E., Mcleod, D.A., Northcote, K.H., Tisdall, J.M. & Young, I.M. (1990). Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. *Advances in Soil Science*, 11, 37-108.
- Nakano, K. & Miyazaki, T. (2005). Predicting the saturated hydraulic conductivity of compacted subsoils using the non-similar media concept. *Soil & Tillage Research*, 84, 145–153.
- Nevo, Z., & Mitchell, K. (1967): Factors affecting biological clogging of sand associated with groundwater recharge. *Water Research*, 1, 231–236.
- Nicolas, C., Kennedy, J.N., Hernandez, T., Garcia, C. & Six, J. (2014). Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge-A field experiment. *Geoderma*, 219–220 (2014), 24–31.
- Nyamangara, J., Gotosa, J., & Mpofo, S.E. (2001). Cattle manure effects on structural stability and water retention capacity of a granitic sandy soil in Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, 62 (3-4), 157-162.
- Ojeda, G., Perfect, E., Alcañiz, J.M. & Ortiz, O. (2006). Fractal analysis of soil water hysteresis as influenced by sewage sludge application. *Geoderma*, 134, 386–401.
- Ojeda, G. & Alcañiz, J.M. (2010) Soil water retention under drying process in a soil amended with composted and thermally dried sewage sludges. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1–6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
- Ojeda, G., Alcañiz, J.M., & Ortiz, O., (2003). Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation & Development*, 14, 563–573.
- Page, A.L., & Chang, A.C. (1994). Overview of the Past 25 years: Technical Perspective. In Clapp,

- Chemical Properties. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 53, 15-22. [In Persian]
- Vinten, A.J.A., Minelgrin, U. & Yaron, B. (1983). The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 408-412.
- Vivani, G., & Lovino, M. (2004). Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(6), 476-484.
- Wysocka, A., Stępniewski, W. & Horn, R. (2007). Swelling-shrinkage properties and hydraulic conductivity of a compacted coal mine tailing rock likely to be used for landfill capping. *International Agrophysics*, 21, 405-408.
- Xanthoulis, D. & Wallender, W.W. (1991). Furrow Infiltration and Design with Cannery Wastewater. *Transactions of ASABE*, 34(6), 2390-2396.
- Yeates, G.W. (1995). Effect of sewage effluent on soil fauna in a Pinus-radiata plantation. *Australian Journal of Soil Research*, 33, 555-564.
- Zadhosh, A. & Fardad, H. (1996). Investigating the effects of irrigation with wastewater on soil and plants. Master's thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran. [In Persian]
- Zhang, S., Grip, H. & Lovdahl, L. (2006). Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil & Tillage Research*, 90, 117-125.
- Shahbazi, F., Ghasemi, S., Sodaeizadeh, H., Pourdara, H., & Ayaseh, K. (2018). The Effects of Sewage Sludge on Some Physical and Chemical Properties of Soil and Wheat Yield. *Water and Soil Science*, 28(2), 193-206. [In Persian]
- Shirani H., Hajabbasi M.A., Afyuni M., & Hemmat A. (2002). Effect of farmyard and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. *Soil & Tillage Research*, 68, 101-108.
- Shirani, H., HajAbbasi, M., Afyouni, M., & Dashti, H. (2010). Cumulative Effects of Sewage Sludge on Soil Physical and Chemical Characteristics. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 21(3), 28-36. [In Persian]
- Siegrist, R.L. (1987). Soil clogging during subsurface wastewater infiltration is affected by e.uent composition and loading rate. *Journal of Environmental Quality*, 16, 181-187.
- So, H.B., & Aylmore, L.A.G. (1993). How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Australian Journal of Soil Research*, 31, 761-777.
- Sort, X. & Alcañiz, J.M. (1999). Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development*, 10, 3-12.
- Staub, M., Laurent, J.P., Morra C. & Gourc, J.P. (2009). TDR calibration in MSW is affected by material effects and moisture distribution. LTHE, University of Grenoble, BP 53-38041 Grenoble Cedex, France, pp.1-10.
- Taqvaian, S., Alizadeh, A. & Danesh, Sh. (2007). The effect of using wastewater on the physical and chemical properties of soil. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1(1), 49-60. [In Persian]
- Tarchitzky, J., Chen, Y., & Banin, A. (1993). Humic substances and pH effects on sodium and calcium montmorillonite flocculation and dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1449-1452.
- Tester, C.F. (1990). Organic amendment effects on physical and chemical properties of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 54 (1), 827-831.
- Thomas R.E., Schwartz W.A. & Benedixen T.W. (1966). Soil chemical changes and infiltration rate reduction under sewerage spreading. *Soil Science Society of America. Proceeding*, 30, 641-646.
- Tsadilas, C.D., Mitsios, I.K. & Golia, E. (2005). Influence of biosolids application on some soil physical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 709-716.
- Vandevivere, P. & Baveye, P. (1992). Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1-13.
- Vaseghi, S., Afyuni, M., Shariatmadari, H. & Mobli, M. (2005). Effect of Sewage Sludge on Some Macronutrient Concentration and Soil





# Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 217-230

10.22077/jaaq.2025.8495.1081

## Analysis of Economic and Environmental Policies in Water Resource Management Using Water Accounting Systems

Maryam Mohammadrezaei<sup>1</sup>✉ | Abbas Rahdan<sup>2</sup>

1. PhD student in watershed management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. PhD student in watershed management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

✉Corresponding Author: [Mrezaei501@yahoo.com](mailto:Mrezaei501@yahoo.com)

Received:  
28 October 2024

Accepted:  
02 November 2024

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

*Freshwater, sustainable development, economic-environmental policies, water accounting system, water resource management.*

### Extended abstract

#### Introduction

Water scarcity has emerged as one of the most pressing global challenges of the 21st century, driven by climate change, severe droughts, and increasing environmental pollution. Effective water resource management necessitates an integrated approach considering economic and ecological factors. The System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA) has been established as a vital international framework, merging environmental and financial data to optimize water resource management. As a crucial resource that covers nearly three-quarters of the Earth's surface, water is essential for a wide range of human needs, including drinking, sanitation, agriculture, and industrial activities. However, rising global temperatures and ongoing environmental degradation have made access to quality water increasingly challenging. This underscores the urgent need for comprehensive accounting systems that promote the sustainable management of water resources from economic, ecological, and social perspectives.

#### Material and Methods

This review study delves into the SEEA framework and its applications through a systematic analysis of scientific literature published from 2009 to 2024.

**Cite this article:** Mohammadrezaei, M. & Rahdan, A. (2024). Analysis of economic and environmental policies in water resource management using water accounting systems, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 217-230. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8495.1081>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The research methodology involved an extensive literature review using targeted keywords such as "Water Resource Management, " "Water Accounting, " "SEEAW, " "Economic Policies, " and "Climate Change." Articles were selected based on citation indices and scientific credibility to ensure a focus on high-quality sources. The chosen materials were analyzed and categorized according to various water accounting frameworks, with particular emphasis on the components of SEEAW, including definitions and accounting measures adopted by UN member states. Additionally, the study investigated the framework's applications across multiple industries, particularly in the mineral sector. This methodological approach provided a comprehensive understanding of how SEEAW integrates environmental and economic factors in the management of water resources.

### **Results and Discussion**

The findings indicate that SEEAW provides a comprehensive and integrated framework for consistently and coherently organizing hydrological and economic information. The system has proven highly effective in reducing water consumption while enhancing productivity across various sectors. In water-intensive industries, such as mining, SEEAW facilitates consistent reporting of water usage and offers clear metrics for measuring water efficiency. However, implementing SEEAW encounters challenges, particularly distinguishing between treated and reused water and the necessity for context-specific definitions in different accounting scenarios. This study emphasizes the importance of monitoring water storage volumes in the industry and highlights the urgent need for science-based economic and environmental policies, especially in developing countries. SEEAW's capability to differentiate between treated and reused water establishes it as a valuable tool for comprehensive water resource management. By integrating economic and environmental dimensions, it provides a robust foundation for the development of sustainable water management policies and practices. By enabling informed decision-making through precise data, SEEAW has become an indispensable resource for policymakers and water managers worldwide, significantly advancing sustainable water management strategies.

## تحلیل سیاست‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در مدیریت منابع آبی با استفاده از سیستم‌های حسابداری آب

مریم محمدرضایی<sup>۱</sup> | عباس راهدان<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۲. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [Mrezaei501@yahoo.com](mailto:Mrezaei501@yahoo.com)

### چکیده

یکی از رویکردهای مؤثر در مدیریت منابع آب، سیستم‌های حسابداری آب هستند که با ترکیب اطلاعات اقتصادی و زیست‌محیطی، امکان بهینه‌سازی منابع آب را فراهم می‌کنند. چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های بین‌المللی، ابزار کارآمدی برای مدیریت منابع آب است. استفاده از این سیستم‌ها در کاهش مصرف آب، بهبود بهره‌وری و توسعه پایدار تأثیرگذار است. پژوهش حاضر به معرفی چارچوب SEEAW، تاریخچه و اصول آن پرداخته و عملکرد این سیستم در مدیریت منابع آب و اقتصاد را بررسی می‌کند. همچنین اجزای SEEAW شامل تعاریف و اقدامات حسابداری کشورهای عضو سازمان ملل و کاربرد آن در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت مواد معدنی، تحلیل می‌شود. چالش‌ها و فرصت‌های این سیستم در بهینه‌سازی مصرف آب و حفظ محیط‌زیست نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از SEEAW می‌تواند مصرف آب را کاهش دهد، بهره‌وری را بهبود بخشد و به توسعه پایدار منابع آبی کمک کند. علاوه بر این، نیاز به سیاست‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مبتنی بر داده‌های علمی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه احساس می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

سیستم حسابداری  
زیست‌محیطی-اقتصادی آب  
(SEEAW)،  
مدیریت منابع آب،  
حسابداری آب،  
توسعه پایدار،  
سیاست‌های زیست‌محیطی.

## مقدمه

آب یکی از عناصر اساسی جهان هستی است که تقریباً سه چهارم کره زمین را پوشانده و به عنوان یک منبع حیاتی، نقش به‌سزایی در تأمین نیازهای انسان‌ها دارد. این ماده حیاتی به‌طور مستقیم در مصارف آشامیدنی، بهداشت، تولید غذا و همچنین در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، دسترسی پایدار به منابع آبی سالم به‌عنوان یک پیش‌نیاز ضروری برای تأمین رفاه بشر در نسل‌های آینده به‌شمار می‌آید (حجازی و اسماعیلی کیا، ۲۰۱۳؛ نصراللهی و زارعی، ۲۰۱۸). اهمیت حیاتی آب بر کسی پوشیده نیست و با افزایش دما و گرم شدن کره زمین، وقوع خشکسالی‌های شدید، گسترش دوره‌های کم‌آبی و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کمبود آب با کیفیت مناسب به یک چالش جدی تبدیل شده است (ابوالحسنی و خلیلی، ۲۰۱۶). در این راستا، یکی از مهم‌ترین مسائل جهانی قرن بیست و یکم، اطمینان از پایداری اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی در زمینه کمبود آب با کیفیت مناسب است؛ به‌منظور بهینه‌سازی مدیریت منابع آبی، انجام اصلاحات در رویه‌ها و شیوه‌های مدیریتی و همچنین دسترسی به اطلاعات با کیفیت مرتبط با آب برای آگاه‌سازی تصمیم‌گیرندگان، اهمیت بیشتری پیدا کرده است (Schornagel et al., 2012; Candido et al., 2022).

با جدی‌تر شدن بحران آب، محققان و تصمیم‌گیرندگان در زمینه مدیریت منابع آبی به این نتیجه رسیده‌اند که حل این معضل و مدیریت پایدار منابع آب باید به‌صورت یکپارچه و جامع صورت پذیرد. در این راستا، اولین گام در مدیریت پایدار منابع آبی، ارزیابی وضعیت مدیریت موجود به‌گونه‌ای است که تمام سؤالات مرتبط با عرضه، تقاضا و تخصیص منابع از زوایای مختلف پاسخ داده شود. به‌همین دلیل، رویکرد حسابداری آب برای اولین بار مطرح و مورد بررسی قرار گرفت (Godfrey & Chalmers, 2012; Mohammad-Azari et al., 2021). سازمان‌های مختلف در تلاشند تا به شرکت‌ها و صنایع در زمینه استفاده صحیح و بهینه از آب و به‌طور کلی مدیریت پایدار آب کمک کنند در حسابداری آب، روش‌های متعددی وجود دارد که هدف اصلی آن‌ها سازمان‌دهی داده‌های مهم منابع آب و اقتصاد و ایجاد بستری مناسب برای استخراج

شاخص‌های تحلیلی است؛ یکی از مهم‌ترین این چارچوب‌ها، سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) است که توسط سازمان ملل توسعه یافته و ابزاری کارآمد برای مدیریت و گزارش‌دهی منابع آبی به‌ویژه در کشورهای صنعتی و در حال توسعه به‌شمار می‌آید؛ SEEAW با ارائه داده‌های دقیق در مورد جریان‌های آبی و تحلیل تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی، به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های بهتری در زمینه مدیریت آب اتخاذ کنند (Vardon et al., 2023).

برخی از پژوهش‌ها نیز به بررسی کاربردهای سیستم حسابداری آب پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، کوت و همکاران (Cote et al., 2009) چارچوبی برای حسابداری آب در صنعت معدن استرالیا توسعه دادند که گزارش‌دهی سازگار از مصرف آب را امکان‌پذیر می‌سازد. این چارچوب شامل تعریف اصطلاحات کلیدی، ارائه مجموعه‌ای از معیارها برای تراز آب، روش‌های محاسبه و پروتکل‌های گزارش‌دهی است. با استفاده از این چارچوب، معیارهای مصرف آب در چند سایت آزمایش شده و روش‌های آن برای محیط‌های مختلف معدنی و زیست‌فیزیکی قابل اعمال است (Cote et al., 2009). کنتراست و هونینک (Contreras & Hunink, 2015) در پروژه ASSET<sup>1</sup> به بررسی و ارزیابی تعاملات بین اقتصاد و سیستم هیدرولوژیکی در حوضه رودخانه سگورا پرداختند. آن‌ها از چارچوب حسابداری آب<sup>2</sup> SEEA استفاده کردند تا الگوهای دسترسی، استفاده و مصرف آب توسط بخش‌های مختلف را تحلیل کنند. همچنین، شاخص‌های مدیریت آب را برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۰ ارزیابی کردند و نشان دادند که وابستگی به منابع آب خارجی و منابع غیرمتعارف (مانند آب شیرین‌کن‌ها) در حال افزایش است (Contreras & Hunink, 2015). اسکریوا-بو و همکاران (Escriva-Bou et al., 2016) به بررسی حسابداری منابع آب در کالیفرنیا پرداختند و نشان دادند که برای مدیریت مؤثر منابع محدود آب در ایالت، به یک سیستم حسابداری

<sup>1</sup> Accounting System for the Segura River and Transfers (ASSET)

<sup>2</sup> System of Environmental-Economic Accounting (SEEA)

بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش ۱۰ درصدی بارش در دوره خشک باعث کاهش ۴ درصدی تبخیر طبیعی و افزایش ۲۴ درصدی تبخیر ناشی از فعالیت‌های کشاورزی شده است. علاوه بر این، برداشت آب‌های زیرزمینی و سطحی به ترتیب ۱۷ و ۱۸ درصد افزایش یافت که فشار بر منابع آبی منطقه را تشدید کرد (Delavar et al., 2022). د اولیورا و سوندر مان (Sondermann & de Oliveira, 2022) به بررسی نقش و محدودیت‌های شاخص WEI+ به عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب در حوضه‌های رودخانه‌ای با استفاده ترکیبی از آب‌های سطحی و زیرزمینی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که WEI+ می‌تواند به بهبود تحلیل کمبود آب کمک کند و در مقایسه با دیگر شاخص‌های متداول، عملکرد بهتری در سنجش تنش آبی ارائه می‌دهد. با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، این مطالعه توانایی WEI+3 را در پر کردن خلأهای اطلاعاتی در حسابداری آب و تجزیه و تحلیل وضعیت آب در حوضه رودخانه تاگوس نشان داد، جایی که در ماه‌های تابستان شرایط تنش آبی شدید مشاهده شد (Sondermann & de Oliveira, 2022). یونسی و همکاران (Younesi et al., 2024) به ارزیابی تأمین آب برای اهداف مختلف در میان خدمات اکوسیستم با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب مدل SWAT در چارچوب حسابداری اکوسیستم، بینش‌های ارزشمندی را برای تسهیل تصمیم‌گیری آگاهانه ارائه می‌دهد (Younesi et al., 2024). به‌طور کلی، بررسی‌های انجام‌شده در زمینه سیستم‌های حسابداری آب نشان‌دهنده اهمیت و ضرورت استفاده از چارچوب‌های جامع برای مدیریت بهینه منابع آب است. این مطالعات نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از اطلاعات دقیق و قابل اعتماد، می‌توان به بهبود کارایی مصرف آب و کاهش آسیب‌پذیری سیستم‌های آبی در برابر چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای اقتصادی دست یافت.

به‌منظور نشان دادن مدیریت مؤثر آب و ایجاد زیرساخت‌های مناسب، وجود اطلاعات آبی با کیفیت بالا برای آگاهی از تصمیم‌گیری و اعمال سیاست‌های مناسب

جامع نیاز است. آن‌ها بر پیچیدگی‌های موجود، از جمله زیرساخت‌های به‌هم‌پیوسته و سیستم‌های حکومتی مستقل، تأکید کردند و به ضرورت هماهنگ‌سازی و بهبود سیستم حسابداری آب برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع در سطوح ایالتی و حوضه‌های آبی اشاره کردند (Escriva-Bou et al., 2016). در مطالعه‌ای، حساب‌های آب بوتسوانا با استفاده از سیستم SEEA سازمان ملل به بررسی ارزش منابع آب و کارایی مصرف آن پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که برداشت و مصرف آب پایدار بوده و بخش‌های خودتأمین‌کننده بیش از ۵۰ درصد از آب برداشت‌شده را تشکیل می‌دهند. هم‌چنین، در حالی که کارایی مصرف آب افزایش یافته است، مصرف آب سرانه کاهش یافته که ممکن است به مشکلات تحویلی ناشی از اصلاحات در بخش آب اشاره داشته باشد (Setlhogile et al., 2017). باقری و بابائیان (Bagheri & Babaeian, 2020) به تحلیل امنیت آب در دشت رفسنجان پرداختند و آسیب‌پذیری سیستم منابع آب را نسبت به کمبود آب با استفاده از چارچوب SEEA نشان دادند. نتایج آن‌ها حاکی از وابستگی بیش از ۹۵ درصدی به آب‌های زیرزمینی و فشار بالای آب در این منطقه بود. علاوه بر این، گزینه‌های سیاستی برای کاهش آسیب‌پذیری و انتقال فعالیت‌های کشاورزی به صنعتی را پیشنهاد کردند (Bagheri & Babaeian, 2020). علاوه بر این، اسن و هین (Esen & Hein, 2020) از مدل هیدرولوژیکی SWAT<sup>1</sup> برای توسعه حساب‌های آب مطابق با سیستم SEEA در حوضه رودخانه Buyuk Menderes در ترکیه استفاده کردند. هدف آن‌ها تهیه جداول عرضه و مصرف آب و حساب‌های دارایی به‌منظور تطبیق مدل هیدرولوژیکی با اصول حسابداری آب SEEA بود. آن‌ها بررسی کردند که چگونه این حساب‌ها می‌توانند سیاست‌گذاری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب را بهبود بخشند (Esen & Hein, 2020). به‌طور مشابه، دلاور و همکاران (Delavar et al., 2022) با استفاده از مدل SWAT و چارچوب WA+<sup>2</sup>، منابع آب و تقاضای آن را در دوره‌های تر (۲۰۰۱-۱۹۸۵) و خشک (۲۰۱۵-۲۰۰۱) در حوضه رودخانه کرخه ایران

<sup>1</sup> Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

<sup>2</sup> Water Accounting Plus (WA+)

<sup>3</sup> Water Exploitation Index (WEI+)

جامع از SEEAW، درک بهتری از روابط پیچیده بین آب، اقتصاد و محیط‌زیست فراهم شود.

### معرفی چارچوب حسابداری زیست‌محیطی - اقتصادی برای آب (SEEAW)

چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) به‌عنوان ابزاری نوین و کارآمد برای مدیریت و ارزیابی منابع آبی معرفی شده است؛ این چارچوب بر پایه سیستم حساب‌های ملی<sup>۱</sup> (SNA) بنا شده و به منظور سازمان‌دهی اطلاعات هیدرولوژیکی و اقتصادی به‌صورت منسجم طراحی شده است. هدف اصلی SEEAW کمک به سیاست‌گذاران و مدیران در تخصیص بهینه منابع آبی، بهبود کارایی مصرف آب و ایجاد یک سیستم اطلاعاتی استاندارد برای هماهنگ‌سازی داده‌ها از منابع مختلف است (EC et al., 2009; UN et al., 2014). این چارچوب امکان مطالعه دقیق ارتباطات میان اقتصاد و محیط‌زیست را فراهم می‌آورد و ابزارهای لازم برای تجزیه و تحلیل یکپارچه و جامع از داده‌های مربوط به آب و اقتصاد را ارائه می‌دهد. در ادامه، تاریخچه، عملکرد و کاربرد این سیستم در صنایع مختلف بررسی خواهد شد.

### چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW)

سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی سازمان ملل متحد<sup>۲</sup> (UN-SEEA) بر اساس سیستم حساب‌های ملی (SNA) طراحی شده است. SEEAW یک نظام حسابداری است که با هدف شفاف‌سازی اطلاعات و مدیریت بهینه منابع آبی ارائه شده است. این چارچوب مفهومی امکان سازمان‌دهی اطلاعات هیدرولوژیکی و اقتصادی را به‌صورت منسجم و سازگار فراهم می‌آورد و به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تخصیص منابع کمیاب آب را به‌طور مؤثر انجام دهند. هم‌چنین، این سیستم بهبود کارایی مصرف آب و ایجاد یک سیستم اطلاعاتی استاندارد را که قادر به هماهنگ‌سازی داده‌ها از منابع مختلف است، ممکن می‌سازد. SEEAW به‌عنوان ابزاری برای مطالعه

بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت موضوع، نیاز است که اطلاعات منابع آبی و اقتصادی به شیوه‌ای منسجم و سازگار سازمان‌دهی شوند تا با بررسی اثرات متقابل میان اقتصاد و محیط‌زیست در سطوح مختلف، هدف یاد شده مرتفع گردد. مقاله حاضر با تمرکز بر تحلیل سیاست‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت منابع آب، به بررسی و تحلیل سیستم‌های حسابداری آب و به‌ویژه چارچوب SEEAW در صنعت مواد معدنی می‌پردازد. در این راستا، صنعت معدن به‌عنوان یکی از آب‌برترین صنایع و بخش مهمی از اقتصاد، نمونه مناسبی برای بررسی کاربرد SEEAW است. این صنعت به دلیل مصرف قابل توجه آب در فرآیندهای مختلف و هم‌چنین تأثیرات زیست‌محیطی آن بر منابع آبی، می‌تواند به خوبی اهمیت و کاربرد سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی آب را نشان دهد.

### روش انجام پژوهش

این مقاله به‌عنوان یک مطالعه مروری و توصیفی، با هدف بررسی سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) تدوین شده است و از روش‌های مرسوم برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مطالعات پیشین استفاده می‌کند. فرآیند پژوهش در چند مرحله اصلی انجام شده است. ابتدا با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر مدیریت منابع آب، حسابداری آب، SEEAW، سیاست‌های اقتصادی و تغییرات اقلیمی، منابع علمی (از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴) جستجو و گردآوری شدند. سپس مقالات معتبر بر اساس شاخص‌های استنادی و اعتبار علمی انتخاب شدند. در مرحله بعد، اطلاعات گردآوری‌شده بر اساس چارچوب‌های مختلف حسابداری آب تحلیل و طبقه‌بندی شدند. مقاله حاضر به معرفی چارچوب SEEAW، تاریخچه و اصول آن پرداخته و عملکرد این سیستم در مدیریت منابع آب و ارتباط آن با اقتصاد را بررسی می‌کند. هم‌چنین، اجزای SEEAW شامل تعاریف و اقدامات حسابداری کشورهای عضو سازمان ملل و کاربرد آن در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنعت مواد معدنی، تحلیل می‌شود. در نهایت، چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از این سیستم در بهینه‌سازی مصرف آب و حفظ محیط‌زیست مورد بررسی قرار گرفته و تلاش شده تا با ارائه تحلیل

<sup>۱</sup> System of National Accounts (SNA)

<sup>۲</sup> United Nations System of Environmental-Economic Accounting (UN-SEEA)

سیستم را داد و نسخه نهایی سیستم SEEAW در سال ۲۰۱۲ منتشر شد. از مزایای این سیستم، امکان ارائه اطلاعات به صورت فیزیکی و پولی به طور هم زمان است؛ با توجه به اهمیت آب در مباحث زیست محیطی، سیستم حسابداری زیست محیطی-اقتصادی (SEEAW) به عنوان یک دست نامه جداگانه برای بخش آب توسعه یافت. این دستورالعمل در سال ۲۰۰۵ به عنوان پیش نویس نهایی ارائه شد و نسخه نهایی آن پس از اصلاحات انجام شده در سال ۲۰۰۷ منتشر گردید. نسخه بازنگری شده و نهایی این سیستم نیز در سال ۲۰۱۲ ارائه شد (Accounting, 2012).

### عملکرد سیستم حسابداری زیست محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW)

سیستم حسابداری اقتصادی و زیست محیطی آب (SEEAW) شامل دو بخش اصلی است. بخش اول شامل تعاریف، مفاهیم و اقدامات حسابداری است که ابزارهای حسابداری آب را که به طور بین المللی پذیرفته شده اند، ارائه می دهد. این بخش شامل مجموعه ای از جداول استاندارد است که شامل جداول عرضه و مصرف فیزیکی و هیبریدی و حساب های دارایی می باشد. این جداول به طور دقیق چگونگی تدوین حساب های آب را توضیح می دهند و توسط کشورها در سطح عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته اند. بخش دوم به اقدامات حسابداری تجربی اختصاص دارد که شامل روش هایی برای گزارش دهی کیفیت آب، ارزیابی منابع آب و مطالعات موردی استفاده از چارچوب SEEAW است. این ماژول ها هنوز به طور کامل در سطح بین المللی پذیرفته نشده اند و بیش تر جنبه تجربی دارند. همچنین در این بخش نمونه هایی از کاربردهای حساب های آب ارائه شده است (Department of Economic and Social Affairs, 2012; UN, 2007b).

در نمودارهای SEEAW، جداول عرضه و مصرف آب فیزیکی با حساب های دارایی پیوند خورده اند. این چارچوب همانند SEEA است، اما به طور ویژه بر روی آب تمرکز دارد. جداول عرضه و مصرف فیزیکی جریان های آب ناشی از برداشت، استفاده و تأمین آب در اقتصاد و بازگشت به محیط زیست را توصیف می کنند. در عین حال، SEEA جداولی برای عرضه و مصرف آلاینده ها

روابط میان اقتصاد و محیط زیست به سیاست گذاران و محققان کمک می کند تا تحلیل های جامع تری ارائه دهند (UN, 2012).

این چارچوب به طور مشابه با سیستم حساب های ملی عمل می کند و علاوه بر جمع آوری اطلاعات مربوط به موجودی آب و تغییرات ذخایر آبی، جریان های ورودی و خروجی آب را در بخش های مختلف اقتصاد و ارزش افزوده ناشی از آن بررسی می کند. هدف اصلی از طراحی این سیستم، برقراری ارتباط بین اطلاعات اقتصادی و هیدرولوژیکی و فراهم کردن ابزاری برای تجزیه و تحلیل یکپارچه این داده ها است.

### تاریخچه سیستم حسابداری زیست محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW)

اولین نسخه سیستم حساب های ملی (SNA) در سال ۱۹۵۳ منتشر شد و ویرایش های بعدی آن در سال های ۱۹۶۸ و ۱۹۹۳ منتشر گردید. آخرین ویرایش این سیستم در سال ۲۰۰۸ منتشر شده است. یکی از مزیت های این سیستم، استحکام و انعطاف پذیری آن است که به ویژه در استفاده از حساب های اقماری آشکار می شود (Aspden, 2008; McCulla et al., 2015).

سیستم حسابداری زیست محیطی-اقتصادی (SEEA) یک چارچوب آماری جامع است که شامل مجموعه ای از جداول و حساب ها می باشد و امکان تهیه آمارهای سازگار و قابل مقایسه را فراهم می کند. این سیستم به تهیه نماگرهای ی برای سیاست گذاری ها، تحلیل ها و پژوهش ها کمک می کند و تحت حمایت سازمان ملل متحد، کمیسیون اروپا، سازمان همکاری اقتصادی و توسعه<sup>۱</sup> (OECD)، صندوق بین المللی پول<sup>۲</sup> (IMF) و بانک جهانی منتشر شده است (Accounting, 2012).

اولین نسخه این سیستم در سال ۱۹۹۳ منتشر شد و کاربردهای حسابداری زیست محیطی و اقتصادی را در سیاست گذاری ها روشن کرد. اگرچه این سیستم در سال ۲۰۰۳ منتشر شد، اما به دلیل برخی کمبودها به عنوان یک استاندارد بین المللی پذیرفته نشد. در سال ۲۰۰۷، کمیسیون آمار سازمان ملل دستور بازنگری و اصلاح

<sup>1</sup> Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)

اقتصادی است و در اینجا، واحدی که آب را تأمین می‌کند، تأمین‌کننده و واحدی که آن را دریافت می‌کند، مصرف‌کننده محسوب می‌شود؛ و در نهایت، جریان‌ها از اقتصاد به محیط‌زیست، که تخلیه آب توسط فعالیت‌های اقتصادی به محیط‌زیست را نشان می‌دهد و در جدول عرضه به‌عنوان عرضه یک واحد اقتصادی به محیط‌زیست توصیف شده است (UN, 2012).

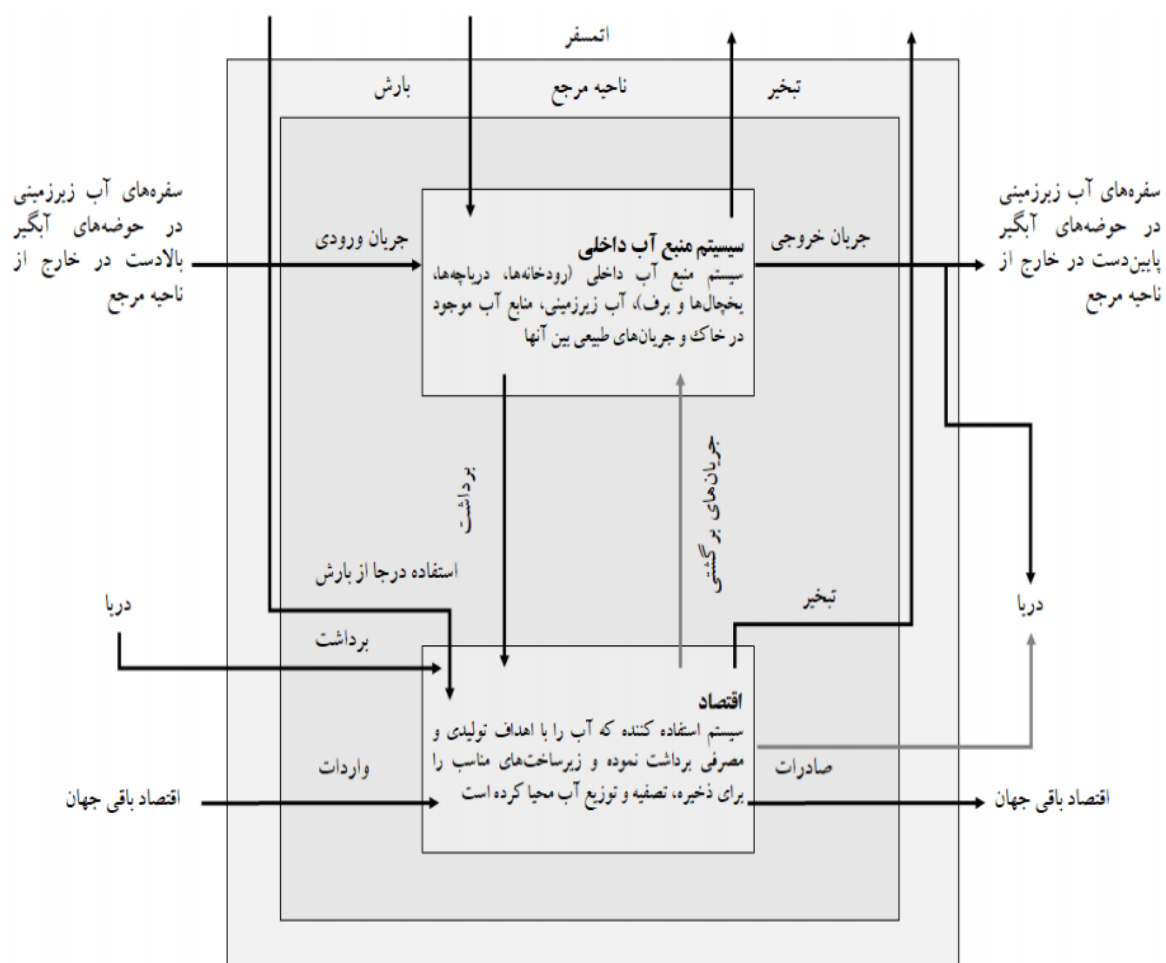
شکل ۲ نمایشی ساده از چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) است که به‌طور خاص بر روی آب تمرکز دارد و در آن، جداول عرضه و استفاده با حساب دارایی پیوند داده شده‌اند. کادرهای سفید در این شکل نمایانگر حساب‌های پولی هستند که بخشی از حساب‌های ملی (SNA) را تشکیل می‌دهند و شامل داده‌های مالی و اقتصادی مربوط به منابع آبی هستند. جعبه‌های خاکستری نیز حساب‌هایی را نشان می‌دهند که در چارچوب SEEA معرفی شده‌اند اما در SNA پوشش داده نمی‌شوند؛ این حساب‌ها به‌طور خاص به مدیریت منابع آب و تأثیرات زیست‌محیطی آن پرداخته و در واحدهای فیزیکی و پولی اندازه‌گیری می‌شوند. جداول تأمین و استفاده فیزیکی در این شکل جریان آب حاصل از برداشت، استفاده و تأمین در اقتصاد و بازگشت به محیط را توصیف می‌کنند و با جعبه‌های سایه‌دار نشان داده شده‌اند. این جداول به تحلیل دقیق جریان‌های آب در اقتصاد و تأثیر آن بر محیط‌زیست کمک کرده و به‌طور خاص، جریان‌های آب را که بخشی از حساب‌های اصلی ملی نیستند، توصیف می‌کنند.

هم‌چنین، SEEA جداول تأمین و استفاده از آلاینده‌ها را معرفی می‌کند که جریان آلاینده‌ها را از نظر فیزیکی و احتمالاً از نظر پولی، تولید شده توسط اقتصاد و تأمین شده برای محیط‌زیست توصیف می‌کند و این حساب‌ها به درک بهتر تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های اقتصادی کمک می‌کنند (UN, 2012).

(حساب‌های انتشار) نیز معرفی می‌کند که جریان آلاینده‌ها را از اقتصاد به محیط زیست توصیف می‌کنند (Department of Economic and Social Affairs, 2012). شکل ۱ نمایانگر جریان آب بین اقتصاد و محیط‌زیست است و به‌صورت نموداری ساده طراحی شده است. این نمودار شامل دو بخش اصلی است: اقتصاد و سیستم منابع آب داخلی یک ناحیه که به آن "ناحیه مرجع"<sup>۱</sup> گفته می‌شود و هر یک از این بخش‌ها در کادرهای جداگانه‌ای نمایش داده شده‌اند.

هم‌چنین، شکل ۱ تبادل آب با دریا و اتمسفر را به تصویر می‌کشد که خارج از سیستم منابع آب داخلی به شمار می‌آید و این تبادل نقش مهمی در چرخه آب ایفا کرده و بر جریان‌های آب در داخل ناحیه مرجع تأثیرگذار است. سیستم منابع آب داخلی شامل تمامی منابع آب داخلی از جمله آب‌های جاری، آب‌های زیرزمینی و آب موجود در خاک است که این منابع به‌عنوان پایه‌ای برای تأمین نیازهای اقتصادی در نظر گرفته می‌شوند. ناحیه اقتصاد، شامل مصرف‌کنندگان مقیم است که آب را برای اهداف تولیدی و مصرفی استفاده می‌کنند و زیرساخت‌های لازم برای ذخیره، تصفیه، توزیع و تخلیه آب نیز در این بخش فراهم شده است. سیستم منابع آب داخلی و اقتصاد یک ناحیه می‌تواند از طریق صادرات و واردات با مناطق دیگر تبادل آبی داشته باشد و این تبادل می‌تواند از طریق جریان ورودی به نواحی بالادستی و جریان خروجی از نواحی پایین‌دستی صورت گیرد. این سیستم شامل چهار نوع جریان آب است که به‌طور مختصر به آن‌ها اشاره می‌شود: جریان‌های درون محیط زیست، که شامل جریان‌های طبیعی بین آب‌های سطحی (رودها، دریاچه‌ها و یخچال‌ها) و آب‌های زیرزمینی (چاه‌ها و قنات‌ها) و آب خاک می‌باشد. جریان‌ها از محیط زیست به اقتصاد، که به برداشت آب از محیط‌زیست توسط واحدهای اقتصادی برای فعالیت‌های تولیدی و مصرفی اشاره دارد و آب از منابع داخلی (آب سطحی، آب زیرزمینی و آب خاک) برداشت می‌شود و ممکن است آب از دریا برای خنک‌سازی یا شیرین کردن نیز استفاده شود؛ جریان‌ها درون اقتصاد، که شامل نقل و انتقال آب بین واحدهای





شکل ۱. جریان آب بین اقتصاد و محیط زیست (برگرفته از سازمان ملل متحد، ۲۰۱۲).

Fig 1. Water flows between the economy and the environment (taken from United Nations, 2012).



شکل ۲. سیستم حسابداری اقتصادی - محیطی برای چارچوب آب (برگرفته از سازمان ملل متحد، ۲۰۱۲)

Fig. 2. Environmental-economic accounting system for the water framework (taken from United Nations, 2012)

## کاربرد چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) در صنایع

SEEAW آب را در رابطه با جامعه و اقتصاد در نظر می‌گیرد، به‌ویژه آبی که در اقتصاد استفاده می‌شود یا میان اقتصاد و محیط زیست جریان دارد. این سیستم بر اساس ساکنان یک منطقه تحلیل می‌شود و مرزهای سیستم بر اساس مرزهای سیاسی تعیین می‌گردد. در چارچوب SEEAW، استفاده از آب توسط صنایع به‌طور دقیق تحلیل می‌شود و این چارچوب ویژگی‌های زیر را برای حساب آب مشخص می‌کند: ذخایر و جریان منابع آب در محیط زیست، فشارهای اقتصادی بر محیط زیست از نظر میزان برداشت آب و انتشار آلاینده‌ها، تأمین و استفاده از آب در فرایندهای تولید و مصرف خانگی، استفاده مجدد از آب در اقتصاد، هزینه‌های مرتبط با جمع‌آوری، تصفیه و توزیع آب، تأمین مالی این هزینه‌ها، پرداخت مجوزهای برداشت آب و استفاده از آن به‌عنوان منابع دفع فاضلاب، و هم‌چنین سهم آب موجود و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های هیدرولیک در طول دوره حسابداری. در صنایع، به‌ویژه صنعت مواد معدنی، منابع آب ورودی به فرآیند تولید و استفاده مجدد از آب از اهمیت زیادی برخوردار است. SEEAW بین آب استفاده مجدد و بازیافتی تمایز قائل می‌شود. آب بازیافتی، آبی است که پس از استفاده برای استفاده بیشتر به یک کاربر جدید ارائه می‌شود و آب بازیافت شده در همان واحد صنعتی استفاده می‌گردد. این تعاریف با معیارهای GRI تفاوت دارند، اما SEEAW یک بستر قوی برای گزارش‌گری مداوم این مؤلفه‌ها ارائه می‌دهد (United Nations Statistics Commission, 2007c).

هم‌چنین، SEEAW مفهوم آب تصفیه‌شده را معرفی می‌کند که آب‌هایی هستند که پس از خروج از صنایع، مقررات ملی مربوط به کیفیت آب شیرین را رعایت می‌کنند. این امر باعث ایجاد چالش‌هایی می‌شود، زیرا هیچ تعریف کلی برای آب شیرین وجود ندارد و استانداردهای مختلفی در سطح جهانی، از جمله دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی، برای اطمینان از کیفیت آب مصرفی انسان منتشر شده است (Edition, 2011).

جدول ۱ خلاصه‌ای از اطلاعات منابع آب را که در چارچوب حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی برای آب (SEEAW) جمع‌آوری شده است، ارائه می‌دهد (Vardon et al., 2012; Gutiérrez-Martín et al., 2017). این جدول به بررسی جنبه‌های مختلف مدیریت منابع آب پرداخته و شامل اطلاعات مهمی در خصوص برداشت، تخلیه و استفاده مجدد از آب می‌باشد. طبق این اطلاعات، برداشت آب توسط انواع منابع سطحی، زیرزمینی و خاک انجام می‌شود و تخلیه نیز به آب‌های سطحی و زیرزمینی مربوط می‌شود. هم‌چنین، این جدول تمایز بین استفاده مجدد و بازیافت آب را مشخص می‌کند، به این معنا که آب مورد استفاده مجدد به کاربر جدید (با یا بدون تصفیه) منتقل می‌شود، در حالی که بازیافت به آب مورد استفاده در همان تأسیسات اشاره دارد. استفاده غیرمتعارف از آب، به‌ویژه در نیروگاه‌ها، نیز مورد تأکید قرار گرفته است. با این حال، اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازی آب در این چارچوب موجود نیست. این داده‌ها به مدیریت بهینه منابع آب و توسعه سیاست‌های پایدار کمک شایانی می‌کنند.

جدول ۱. خلاصه اطلاعات منابع آب در چارچوب حسابداری زیست‌محیطی - اقتصادی برای آب (SEEAW)

**Table 1. Summary of water resources information in the Sustainable Environmental-Economic Accounting for Water (SEEAW) framework**

اطلاعات منابع آب Information on water resources	چارچوب حسابداری زیست‌محیطی - اقتصادی برای آب SEEAW
برداشت توسط منبع Withdrawal by source	بله - انواع منبع آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و خاک هستند. There are three water sources: surface water, groundwater, and soil moisture.
تخلیه Discharge	بله - تخلیه به آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک Yes - Discharge to surface water, groundwater, and soil.
تمایز بین استفاده مجدد و بازیافت Distinction between reuse and	بله - براساس ماهیت جریان استفاده مجدد Yes, this is based on the nature of the reuse process.

<p>آبی که مورد استفاده قرار گرفته و در اختیار کاربر جدید (با یا بدون تصفیه) قرار می‌گیرد.</p> <p>Water that has been used and is available for reuse, with or without treatment.</p> <p>آب مورد استفاده مجدد در همان تأسیسات</p> <p>Water reconnected and reused within the same facility.</p> <p>بله - شامل نیروگاه برق، آب مورد استفاده برای خنک کننده است.</p> <p>Yes, this includes power plants and the water used for cooling.</p> <p>خیر</p> <p>No</p>	<p>recycling</p> <p>استفاده مجدد از آب</p> <p>Water Reuse</p> <p>بازیافت آب</p> <p>Water Recycling</p> <p>آب منحرف‌شده (استفاده غیر متعارف)</p> <p>Diverted Water (Unconventional Use)</p> <p>ذخیره‌سازی</p> <p>Storage</p>
---	---

اساس تحقیقات انجام‌شده، چارچوب SEEAW دارای شاخص‌های معتبری است که به کلیه سؤالات صنایع پاسخ می‌دهد و تنها چارچوبی است که بین آب تصفیه‌شده و آب مورد استفاده مجدد تمایز قائل می‌شود.

#### منابع

- Abolhasani, L. and Khalili, A. (2016). Investigation of water accounting implementation methods, introduction and implementation of the most efficient method, *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(1), 9-22. doi: 10.22067/jwsd.v3i1.59415. [In Persian].
- Accounting, S. E. E. (2012). *System of Environmental-Economic Accounting 2012*.
- Aspden, C. (2008). The revision of the 1993 System of National Accounts—what does it change? *Economic & Labour Market Review*, 2, 42-47. doi:10.1057/elmr.2008.26.
- Bagheri, A., & Babaeian, F. (2020). Assessing water security of Rafsanzan Plain, Iran—Adopting the SEEA framework of water accounting. *Ecological Indicators*, 111, 105959. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105959.
- Candido, L. A., Coêlho, G. A. G., de Moraes, M. M. G. A., & Florêncio, L. (2022). Review of decision support systems and allocation models for integrated water resources management focusing on joint water quantity quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(2), 03121001. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.000149.
- Contreras, S., & Hunink, J. E. (2015). Water Accounting at the Basin Scale: Water Use and Supply (2000–2010) in the Segura River Basin Using the SEEA Framework. *FutureWater: Cartagena, Spain*. doi:10.13140/RG.2.1.2242.5444
- Cote, C. M., Moran, C. J., Cummings, J., & Ringwood, K. (2009). Developing a water accounting framework for the Australian minerals industry. *Mining Technology*, 118(3-4), 162-176.

#### نتیجه‌گیری

در بررسی نیازهای اطلاعاتی مرتبط با آب از جنبه‌های مختلف، ایجاد یک مجموعه استاندارد برای جمع‌آوری و تجمیع داده‌های اقتصادی ضروری است. این مجموعه به ما این امکان را می‌دهد که اطلاعات را در چارچوبی منسجم برای تحلیل، تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری اقتصادی ارائه دهیم. حسابداری آب به اطلاعات صحیح و عادلانه بستگی دارد و این امر تصمیمات رسمی در حوزه آب را تسهیل می‌کند. در سطح بین‌المللی، چندین چارچوب برای ثبت و گزارش‌دهی اطلاعات آب توسعه یافته‌اند که هرچند همه تحت عنوان حسابداری آب شناخته می‌شوند، اما اهداف متفاوتی را دنبال می‌کنند.

چارچوب حساب‌های اقتصادی زیست‌محیطی برای آب (SEEAW) یک رویکرد یکپارچه برای نظارت بر منابع آبی است که دامنه وسیعی از آمار مربوط به آب را در بخش‌های مختلف در یک سیستم اطلاعاتی منسجم جمع‌آوری می‌کند. SEEAW نه تنها یک چارچوب مفهومی برای سازمان‌دهی اطلاعات هیدرولوژیکی و اقتصادی به شیوه‌ای منسجم و سازگار فراهم می‌کند، بلکه برخی از شاخص‌های آن به‌روشنی جریان‌های آبی که برای مصرف فرآورده نیستند را شناسایی می‌کند.

با این حال، در SEEAW به دلیل تمایز بین آب تصفیه‌شده و استفاده مجدد، تعریف مداوم آب به‌عنوان تصفیه‌شده یا مجدد استفاده‌شده چالش‌برانگیز است و باید با توجه به کاربرد و زمینه‌های حسابداری آب مشخص گردد. هم‌چنین، توجه به وضعیت ذخیره‌سازی حجم آب در صنایع از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌طور کلی، بر

- 10.22054/ijer.2017.827.  
doi:10.22111/ijbds.2021.6578 [In Persian].
- Setlhogile, T., Arntzen, J., & Pule, O. B. (2017). Economic accounting of water: The Botswana experience. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 287-295. doi:10.1016/j.pce.2016.10.007.
- Schornagel, J., Niele, F., Worrell, E., & Böggemann, M. (2012). Water accounting for (agro) industrial operations and its application to energy pathways. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 1-15. doi:10.1016/j.resconrec.2011.12.011.
- Sondermann, M. N., & de Oliveira, R. P. (2022). Using the WEI+ index to evaluate water scarcity at highly regulated river basins with conjunctive surface and groundwater resources uses—*Science of the Total Environment*, 836, 155754. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155754.
- United Nations Statistics Division. (2007b). System of environmental-economic accounting for water (SEEAW) [online]. Available from: <http://unstats.un.org/unsd/envAccounting/seeaw>.
- United Nations Statistics Commission. (2007c). System of environmental- accounting for water: Final draft [online]. Available from: [http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/EnvAcc\\_Brochure\\_FINALI.pdf](http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/EnvAcc_Brochure_FINALI.pdf)
- UN. (2012). SEEA-Waterater: System of Environmental-Economic Accounting for Water. United Nations, New York. 216 pp.
- UN, EU, FAO, IMF, OECD, WB. (2014). System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central framework. United Nations, New York. 378 pp.
- Vardon, M., Martínez-Lagunes, R., Gan, H., & Nagy, M. (2012). The system of environmental-economic accounting for water: development, implementation and use. *Water Accounting, International Approaches to Policy and Decision Making*. Edward Elgar, United Kingdom, 32-57. doi: 10.4337/9781849807500.
- Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S., & Grafton, R. Q. (2023). Water accounts and accounting—Global Commission on the Economics of Water: Paris, France.
- Younesi, M., Saadatpour, M., & Afshar, A. (2024). Integration of the system of environmental economic accounting-ecosystem accounting (SEEA-EA) framework with a semi-distributed hydrological and water quality simulation model. *Ecosystem Services*, 70, 101672. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101672>.
- doi:<https://doi.org/10.1179/174328610X12682159814948>.
- Delavar, M., Eini, M. R., Kuchak, V. S., Zaghiyan, M. R., Shahbazi, A., Nourmohammadi, F., & Motamedi, A. (2022). Model-based water accounting for integrated assessment of water resources systems at the basin scale. *Science of the Total Environment*, 830, 154810. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154810>
- Department of Economic and Social Affairs. (2012). International Recommendations for Water Statistics. United Nations Publications. doi: EC, IMF, OECD, UN, WB. (2009). System of National Accounts 2008. United Nations, New York. 664 pp.
- Edition, F. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO Chronicle*, 38(4), 104-8.
- Escriva-Bou, A., McCann, H., Hanak, E., Lund, J., & Gray, B. (2016). Accounting for California water. *California Journal of Politics and Policy*, 8(3). doi:10.5070/P2CJPP8331935.
- Esen, S. E., & Hein, L. (2020). Development of SEEA water accounts with a hydrological model—the science of the *Total Environment*, 737, 140168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140168>
- Godfrey, J. M., & Chalmers, K. (Eds.). (2012). *Water accounting: International approaches to policy and decision-making*. Edward Elgar Publishing.
- Gutiérrez-Martín, C., Borrego-Marín, M. M., & Berbel, J. (2017). The economic analysis of water use in the water framework directive based on the system of environmental-economic accounting for water: A case study of the Guadalquivir river basin: *water*, 9(3), 180. doi:<https://doi.org/10.3390/w9030180>.
- Hejazi, V., Esmaili Kia, Q. (2013). Water Accounting Systems. *Accounting and Social Benefits*, 11(3), 27-44. [In Persian].
- McCalla, S. H., Moses, K. E., & Moulton, B. R. (2015). The National Income and Product Accounts and the System of National Accounts 2008. *Surv. Curr. Bus*, 17, 1-17.
- Mohammad-Azari, S., Bozorg-Haddad, O., & Biswas, A. (2021). Water accounting. In *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources* (pp. 1-28). Elsevier.
- Nasrollahi, Z., Zarei, M. (2017). Prioritizing industrial activities in Yazd province with emphasis on the importance of water resources: Integrating input-output models and analytic hierarchy process. *Iranian Economic Research*, 22(71), 27-64. doi: