



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

## Assessment of Surface Water Quality of Telvar River Using Hydrochemical Diagrams

Sahar Mousavian<sup>1</sup>,  Mehdi Vafakhah<sup>2\*</sup>,  Vahid Moosavi<sup>3</sup>, 

1. M.Sc. Student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: [s.mousavian@modares.ac.ir](mailto:s.mousavian@modares.ac.ir)

2. Professor, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: [vafakhah@modares.ac.ir](mailto:vafakhah@modares.ac.ir)

3. Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: [v.moosavi@modares.ac.ir](mailto:v.moosavi@modares.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 29 December 2025

Revised 08 February 2026

Accepted 14 March 2026

Available online 21 March 2026

#### Keywords:

Anions,

Physicochemical Water

Parameters,

Cations,

Water Quality,

Stiff Diagram,

Piper Diagram,

Gibbs Diagram

### ABSTRACT

This study investigates the chemical quality of surface waters at three stations in a semi-arid watershed using major ion analysis alongside Piper, Durov, Gibbs, Stiff, and USSL diagrams. The results indicate a clear dominance of sodium and potassium cations, as well as chloride and sulfate anions, while calcium and bicarbonate are present only in specific locations. These findings highlight the significant influence of ion exchange and carbonate dissolution processes on water composition. Durov and Gibbs diagrams further demonstrate that evaporation, increasing salinity, ion exchange, and dissolution of evaporite and carbonate minerals are the main factors controlling the evolution of water chemistry, leading to a shift from Ca-HCO<sub>3</sub> to Na-Cl/Na-SO<sub>4</sub> water types. Based on the USSL diagram and agricultural indices, most water samples fall into medium to high salinity classes (C3-C4) and high sodium hazard classes (S2-S3), limiting their direct use for irrigation without proper soil management. Overall, water quality in this semi-arid watershed is primarily controlled by evaporation, mixing with saline sources, and ion exchange, underscoring the importance of careful management to prevent soil salinization and sodicity.

**Cite this article:** Mousavian, A., Vafakhah, M., Moosavi, V (2026). Assesment of surface water Quality of Telvar river using hydrochemical diagrams. *Journal of ECOHYDROLOGY*, 13(1), 1145-1162. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.408169.1899>



© Sahar Mousavian, Mehdi Vafakhah, Vahid Moosavi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.408169.1899>



## **Extended Abstract**

### **Background**

Surface water quality is a critical determinant of agricultural sustainability, particularly in semi-arid regions where water scarcity and high salinity levels pose significant challenges. The chemical composition of surface waters influences soil health, crop productivity, and long-term agricultural viability. Understanding the hydrochemical processes that govern water composition is essential for devising effective water management strategies and mitigating soil degradation. Despite its importance, there is a scarcity of comprehensive studies that combine hydrochemical characterization with practical assessments of irrigation suitability in semi-arid basins.

### **Objective**

This study aims to evaluate the chemical characteristics of surface waters at three stations—Mehrabad, Chamshur Shadiabad, and Chamshur Delbaran—identify the dominant hydrochemical processes, and assess the suitability of these waters for irrigation. The study also seeks to provide actionable insights for sustainable water resource management and soil conservation in semi-arid agricultural areas.

### **Methods**

Surface water samples were collected from the three stations and analyzed for major ions, including sodium, potassium, calcium, chloride, sulfate, and bicarbonate. Hydrochemical data were interpreted using Piper, Durfor, Gibbs, Stiff, and USSL diagrams. Agricultural indices were applied to assess irrigation suitability, and ion ratios along with chemical evolution patterns were examined to identify the key processes controlling water composition.

### **Results**

The analysis revealed a dominance of sodium and potassium cations and chloride and sulfate anions, whereas calcium and bicarbonate were detected only at limited locations. These results highlight the substantial influence of ion exchange and carbonate dissolution on water chemistry. Durfor and Gibbs diagrams demonstrated that evaporation, salinity increase, ion exchange, and dissolution of evaporite and carbonate minerals drive the evolution from Ca–HCO<sub>3</sub> to Na–Cl/Na–SO<sub>4</sub> water types. Based on the USSL diagram and agricultural indices, most water samples fall within medium to high salinity classes (C3–C4) and high sodium hazard classes (S2–S3), suggesting limited direct applicability for irrigation without soil management interventions.

### **Conclusions**

Water quality in this semi-arid basin is predominantly controlled by natural geochemical processes and interactions with saline sources. These findings underscore the necessity of integrated water management strategies to prevent soil salinization and sodicity, ensuring long-term agricultural productivity.

### **Implications**

By linking detailed hydrochemical assessment with practical irrigation suitability, this study provides valuable guidance for policymakers, water resource managers, and agricultural planners. Implementing the study's recommendations can optimize water use, safeguard soil health, and promote sustainable agricultural practices in semi-arid environments.

## ارزیابی کیفیت آب سطحی رودخانه تلوار با استفاده از نمودارهای هیدروشیمی

سحر موسویان<sup>۱</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۲</sup>، وحید موسوی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [s.mousavian@modares.ac.ir](mailto:s.mousavian@modares.ac.ir)
۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [vafakhah@modares.ac.ir](mailto:vafakhah@modares.ac.ir)
۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [v.moosavi@modares.ac.ir](mailto:v.moosavi@modares.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
این پژوهش، کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی در سه ایستگاه مهرآباد، چم‌شور - شادی‌آباد و چم‌شور - دلبران را با استفاده از نمودارهای Durov, Piper, Stiff, Gibbs, USSL و تحلیل یون‌های اصلی بررسی کرد. مقادیر هدایت الکتریکی (EC) بین ۲۲۵۲ تا ۴۰۴۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، مواد جامد محلول (TDS) بین ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و نسبت جذب سدیم (SAR) بین ۲/۶ تا ۱۴/۸ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده غلبه کاتیون‌های سدیم و پتاسیم و آنیون‌های کلراید و سولفات بود، در حالی که کلسیم و بی‌کربنات تنها در برخی نقاط مشاهده شد. نمودارهای Durov و Gibbs تأیید کردند که فرایندهای تبخیر، تبادل یونی و انحلال کانی‌های تبخیری و کربناتی، عوامل اصلی کنترل ترکیب آب هستند و تحول از $\text{Ca-HCO}_3$ به $\text{Na-Cl/Na-SO}_4$ را موجب شدند. بر پایه شاخص‌های کشاورزی و نمودار USSL، بیشتر نمونه‌ها در رده‌های شوری $\text{C}_3\text{-C}_4$ و سدیم $\text{S}_2\text{-S}_3$ قرار گرفتند که استفاده مستقیم از آن‌ها برای آبیاری را بدون مدیریت خاک محدود می‌کند. در مجموع، کیفیت آب در این حوضه نیمه‌خشک عمدتاً تحت تأثیر تبخیر، اختلاط با منابع شور و تبادل یونی است و مدیریت آن برای پیشگیری از شور و سدیمی شدن خاک ضروری است.	<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۳</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:            آنیون‌ها،            پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب،            کاتیون‌ها،            کیفیت آب،            نمودار استیف،            نمودار پایپر،            نمودار گیبس</p>
	<p>استناد: موسویان، سحر؛ وفاخواه، مهدی؛ موسوی، وحید (۱۴۰۵). ارزیابی کیفیت آب سطحی رودخانه تلوار با استفاده از نمودارهای هیدروشیمی. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱(۱)، ۱۱۴۵ - ۱۱۶۲. <a href="https://doi.org/10.22059/ije.2026.408169.1899">https://doi.org/10.22059/ije.2026.408169.1899</a></p> <p>ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © سحر موسویان، مهدی وفاخواه، وحید موسوی.</p>



## مقدمه

کیفیت منابع آب سطحی یکی از چالش‌های مهم در مدیریت و تخصیص بهینه آب به مصارف مختلف است و این منابع همواره تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارند. عوامل طبیعی شامل اقلیم، میزان و الگوی بارش، خشکسالی، سیلاب‌ها، فرسایش خاک، ویژگی‌های زمین‌شناسی و فرایندهای شیمیایی طبیعی هستند که می‌توانند کیفیت آب را کاهش دهند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۲۱؛ حسون، سولانکی و مالیک، ۲۰۱۸؛ علی، رحمان و شاهید، ۲۰۱۶)، در حالی که فعالیت‌های انسانی مانند بهره‌برداری کشاورزی، تخلیه فاضلاب و توسعه شهری نیز می‌توانند تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی و فیزیکی آب ایجاد کنند. تحلیل جامع کیفیت آب نیازمند جمع‌آوری و بررسی داده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است، اما حجم بالای داده‌ها و پیچیدگی روابط بین پارامترها فرایند تحلیل را دشوار می‌کند. در این زمینه، شاخص کیفیت آب<sup>۱</sup> (WQI) ابزاری کارآمد است که با تبدیل اطلاعات پیچیده به یک عدد ساده، امکان ارزیابی سریع و تصمیم‌گیری مؤثر را فراهم می‌آورد (لی، ژانگ و چن، ۲۰۲۳؛ فام، نگون و تران، ۲۰۲۲؛ ژانگ، لی و وانگ، ۲۰۱۹). مدل WQI نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ توسط هورتون ارائه شد و سپس با حمایت بنیاد ملی علوم آمریکا نسخه استاندارد آن توسعه یافت (براون، مک‌کلند، دینینگر و توزر، ۱۹۷۰؛ هورتون، ۱۹۶۵). این شاخص در آب شرب، آبیاری و پرورش آبزیان مورد استفاده قرار گرفته و با کمک روش‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان کاهش تعداد پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل کیفیت آب فراهم شده است (سویر، مک‌کارتی و پارکین، ۲۰۰۳؛ ژانگ، لی و وانگ، ۲۰۱۹؛ بنیاد ملی علوم آمریکا، ۱۹۷۰). علاوه بر شاخص‌های عددی، نمودارهای هیدروشیمیایی ابزار قدرتمندی برای شناسایی فرایندهای کنترل‌کننده ترکیب آب هستند؛ نمودار گیس منشأ غالب ترکیبات شیمیایی آب را نشان می‌دهد (گیس، ۱۹۷۰)، نمودار پایپر<sup>۲</sup> امکان دسته‌بندی آب‌ها و شناسایی الگوهای مشابه را فراهم می‌آورد (پایپر، ۱۹۴۴)، نمودار دوروف<sup>۳</sup> فرایندهای اختلاط و تبادل یونی را آشکار می‌کند (دوروف، ۱۹۴۸) و نمودار استیف<sup>۴</sup> تغییرات مکانی و زمانی ترکیب شیمیایی آب را به صورت بصری نمایش می‌دهد (استیف، ۱۹۵۱). اطلاعات حاصل از WQI و نمودارهای هیدروشیمیایی امکان تحلیل جامع کیفیت آب سطحی را فراهم می‌آورد؛ در حالی که WQI یک شاخص خلاصه ارائه می‌کند، نمودارها داده‌های دقیق‌تری درباره منشأ شیمیایی، فرایندهای کنترل‌کننده و تغییرات مکانی - زمانی ترکیب آب ارائه می‌دهند. این رویکرد برای برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت پایدار و پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی اهمیت ویژه‌ای دارد (کارکنان آزمایشگاه شوری ایالات متحده، ۱۹۵۴؛ آپرز و وستکات، ۱۹۸۵؛ رودز، کنديا و مشعلی، ۱۹۹۲). با توجه به اهمیت منابع آب سطحی در مناطق نیمه‌خشک و خشک، شناخت دقیق کیفیت این منابع و شناسایی فرایندهای کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی برای پیشگیری از مشکلات سدیمی و شوری خاک و مدیریت پایدار آب ضروری است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کیفیت آب سطحی در حوضه آبخیز تلور، با استفاده از نمودارهای گیس، پایپر و دوروف و شناسایی فرایندهای کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی، تصویری جامع از وضعیت کیفی منابع آب ارائه می‌دهد و می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان در طراحی و اجرای برنامه‌های مدیریت پایدار کمک کند. انجام این پژوهش با تکیه بر داده‌های هیدروشیمیایی اندازه‌گیری‌شده و تحلیل آن‌ها از طریق نمودارهای Piper, Gibbs و Durov امکان تعیین تیپ هیدروشیمیایی آب، منشأ یون‌های غالب و فرایندهای ژئوشیمیایی کنترل‌کننده را فراهم کرده است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها مبنای ارزیابی کیفیت آب سطحی حوضه آبخیز تلوار و ارائه پیشنهادها برای مدیریت در زمینه حفاظت منابع آب، مدیریت آبیاری و کاهش پیامدهای احتمالی تغییرات اقلیمی قرار گرفته است.

## پیشینه پژوهش

کیفیت آب‌های سطحی یکی از مؤلفه‌های اساسی در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به شمار می‌رود؛ زیرا این منابع همواره تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارند. شرایط اقلیمی، الگوی بارش،

1 Water Quality Index

2 Piper Diagram

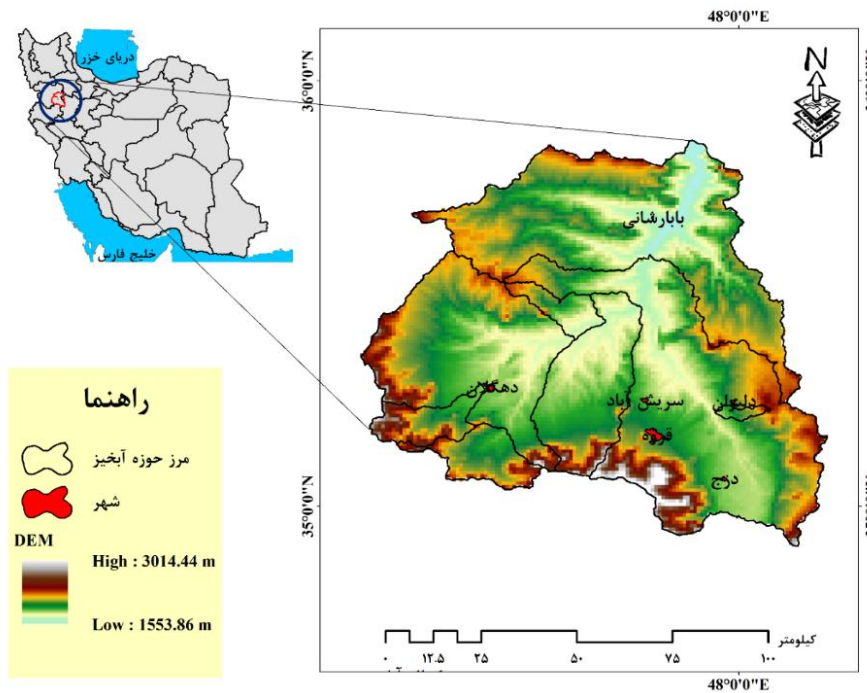
3 Durov Diagram

4 Stiff Diagram

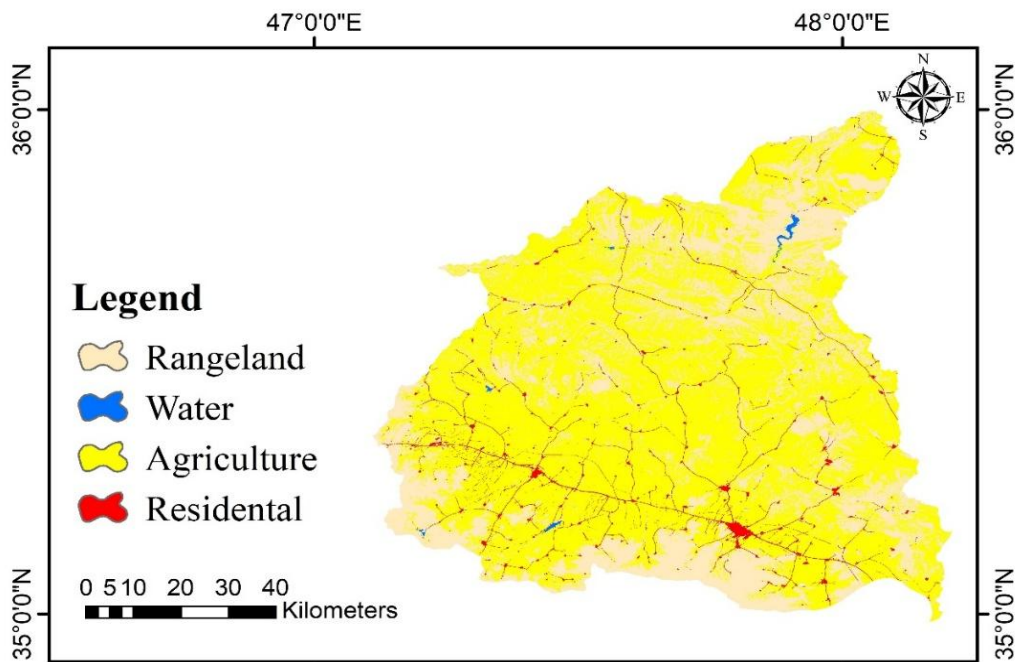
خشکسالی‌های پیایی، فرسایش خاک و ویژگی‌های زمین‌شناسی می‌توانند به طور مستقیم بر غلظت املاح و عناصر محلول اثر گذاشته و ترکیب شیمیایی آب را تغییر دهند (گزارش IPCC، ۲۰۲۳؛ مالک، سولانکی و حسن، ۲۰۲۲). در کنار این عوامل، توسعه شهری، تخلیه فاضلاب، بهره‌برداری کشاورزی و ورود آلاینده‌های ناشی از کاربری‌های مختلف زمین نیز باعث افزایش بار آلودگی و تغییرات محسوس در کیفیت آب می‌شود (فام، نگوین و تران، ۲۰۲۲؛ خان، چهاربا، یادو و کیم، ۲۰۲۳). ارزیابی دقیق کیفیت آب نیازمند تحلیل داده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است؛ با این حال پیچیدگی روابط میان متغیرها و حجم زیاد داده‌ها، فرایند تحلیل را دشوار می‌سازد. شاخص کیفیت آب (WQI) ابزاری کارآمد برای تبدیل داده‌های پیچیده به یک مقدار عددی ساده است که امکان طبقه‌بندی و مقایسه کیفیت آب در مقیاس مکانی و زمانی را فراهم می‌کند (ژانگ، لی و چن، ۲۰۲۳؛ رابندر، مور و سینگ، ۲۰۲۴). در سال‌های اخیر، تلفیق این شاخص با روش‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین به شناخت دقیق‌تر تغییرات کیفیت آب و کاهش تعداد پارامترهای مورد نیاز کمک کرده است (فام، نگوین و تران، ۲۰۲۲). در کنار شاخص‌های کمی مانند WQI، نمودارهای هیدروشیمیایی نقش مهمی در شناسایی فرایندهای کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب دارند. نمودار گیبس منشأ غالب املاح و نقش تبخیر، هوازدگی سنگ‌ها یا بارش را در کنترل کیفیت آب نشان می‌دهد؛ نمودار پاپیر امکان طبقه‌بندی آب‌ها و شناسایی تیپ‌های شیمیایی را فراهم می‌آورد؛ و نمودار دوروف با ترکیب ویژگی‌های کاتیونی و آنیونی، فرایندهای اختلاط، تبادل یونی و روندهای هیدروشیمیایی را برجسته می‌کند (لی، وانگ و سون، ۲۰۲۳؛ احمد، رحمان و شاهد، ۲۰۲۲؛ رحمان، اسلام و حسن، ۲۰۲۳). نتایج حاصل از این نمودارها، در کنار شاخص کیفیت آب، تصویری جامع از وضعیت هیدروشیمیایی ارائه می‌دهد و به تحلیل منشأ املاح، تأثیر عوامل اقلیمی و نقش فعالیت‌های انسانی کمک می‌کند (سینگ و کومار، ۲۰۲۴). با توجه به حساسیت بالای اکوسیستم‌های مناطق نیمه‌خشک و نقش حیاتی آب‌های سطحی در کشاورزی، آبرسانی و مدیریت منابع طبیعی، شناخت دقیق کیفیت آب و فرایندهای کنترل‌کننده آن ضرورتی انکارناپذیر است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی وضعیت کیفی آب‌های سطحی حوضه آبخیز تلور، با استفاده از شاخص WQI و نمودارهای گیبس، پاپیر و دوروف، تلاش می‌کند تصویری روشن از وضعیت هیدروشیمیایی منطقه ارائه دهد و بستر لازم را برای مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی مؤثر منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی فراهم سازد. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی در حوضه آبخیز تلوار چم‌شور با استفاده از نمودارهای هیدروشیمیایی مانند Piper، Durov، Gibbs، Stiff و USSL و تحلیل پراکندگی یون‌های اصلی صورت پذیرفته است.

### منطقه مطالعه شده

آبخیز رودخانه تلوار در استان کردستان با مساحت ۲۴۹۰ کیلومتر مربع و محدوده جغرافیایی  $37^{\circ}06' - 37^{\circ}58'$  طول شرقی و  $35^{\circ}03' - 35^{\circ}26'$  عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۲۸۰ تا ۲۸۸۰ متر و میانگین آن ۱۹۲۷ متر است. زمین‌شناسی شامل سنگ‌های رسوبی، آهکی، ماسه‌سنگ و واحدهای آتشفشانی است و اقلیم کوهستانی با بارش سالانه ۷۰۰-۱۱۰۰ میلی‌متر، عمدتاً برف، گزارش شده است. کاربری اراضی شامل زمین‌های زراعت آبی و دیم، مرتع، مسکن و سطوح آبی است که بر هیدرولوژی و کیفیت آب سطحی تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز تلوار در ایران



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز تلوار

### روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، پارامترهای فیزیکی - شیمیایی شامل EC، TDS، pH، سختی کل و یون‌های اصلی  $(Cl^- + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ + HCO_3^- + CO_3^{2-} + SO_4^{2-})$  از سه ایستگاه هیدرومتری تلوار مهرآباد، چم‌شور - شادی‌آباد و چم‌شور - دلبران از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد (جدول ۱). برای تحلیل روند تغییرات این داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار ProUCL و از طریق آزمون ناپارامتریک من-کندال که از سوی سازمان جهانی هواشناسی (WMO) به عنوان ابزار مناسب برای تحلیل تغییرات اقلیمی معرفی شده، مورد ارزیابی قرار گرفتند. ریشه این آزمون به سال ۱۹۴۵ بازمی‌گردد که ابتدا توسط من پیشنهاد شد

و در همان سال توسط کندهال توسعه یافت. این آزمون یکی از ابزارهای پرکاربرد در تحلیل روند داده‌های مرتبط با منابع آب و پارامترهای اقلیمی محسوب می‌شود. ویژگی بارز آن نسبت به سایر روش‌های تحلیل روند، اتکا به ترتیب داده‌ها در سری زمانی است، بدون آنکه به مقدار دقیق متغیرها وابسته باشد. همین موضوع باعث می‌شود این آزمون در مواجهه با داده‌هایی که دارای چولگی هستند نیز عملکرد مناسبی داشته باشد و نیازی به نرمال بودن یا تبعیت داده‌ها از توزیع خاصی وجود نداشته باشد (۹). از دیگر قوت‌های این روش، توانایی آن در مقابله با وجود داده‌های پرت یا مقادیر حدی در سری زمانی است. در ساختار این آزمون، فرضیه صفر ( $H_0$ ) بیانگر نبود روند مشخص و تصادفی بودن داده‌هاست، در حالی که پذیرش فرضیه جایگزین ( $H_1$ ) به معنای شناسایی وجود روند در سری زمانی بررسی شده خواهد بود.

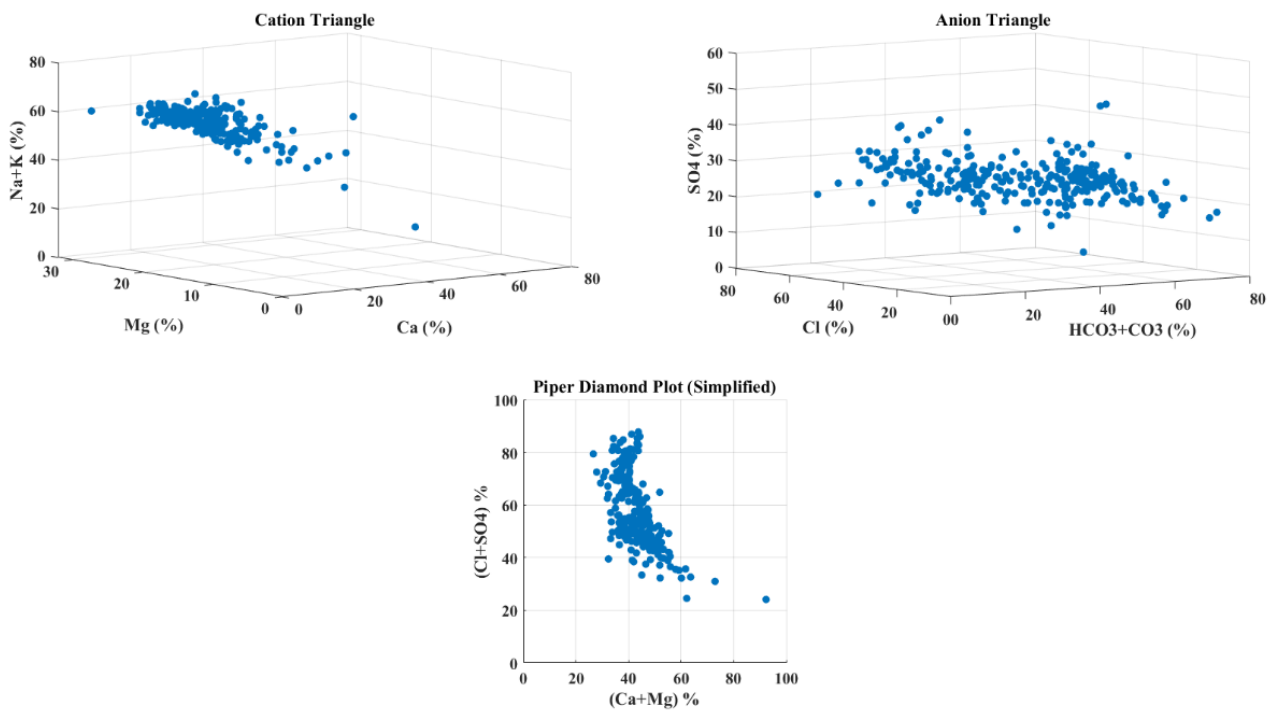
جدول ۱. تعداد نمونه مورد استفاده در آنالیز کیفی آب در ایستگاه‌های حوضه آبخیز قروه - دهگلان

رده	رودخانه	ایستگاه	تعداد نمونه	وضعیت کمی آمار	سال آماری
۱	پایاب تلوار	مهرآباد	۲۲۳۷	متوسط	۱۳۴۶-۱۳۹۶
۲	چمشور	دلبران	۸۲۶	کم	۱۳۶۷-۱۳۹۷
۳	چمشور	شادی‌آباد	۱۰۴۵	متوسط	۱۳۶۶-۱۳۹۱

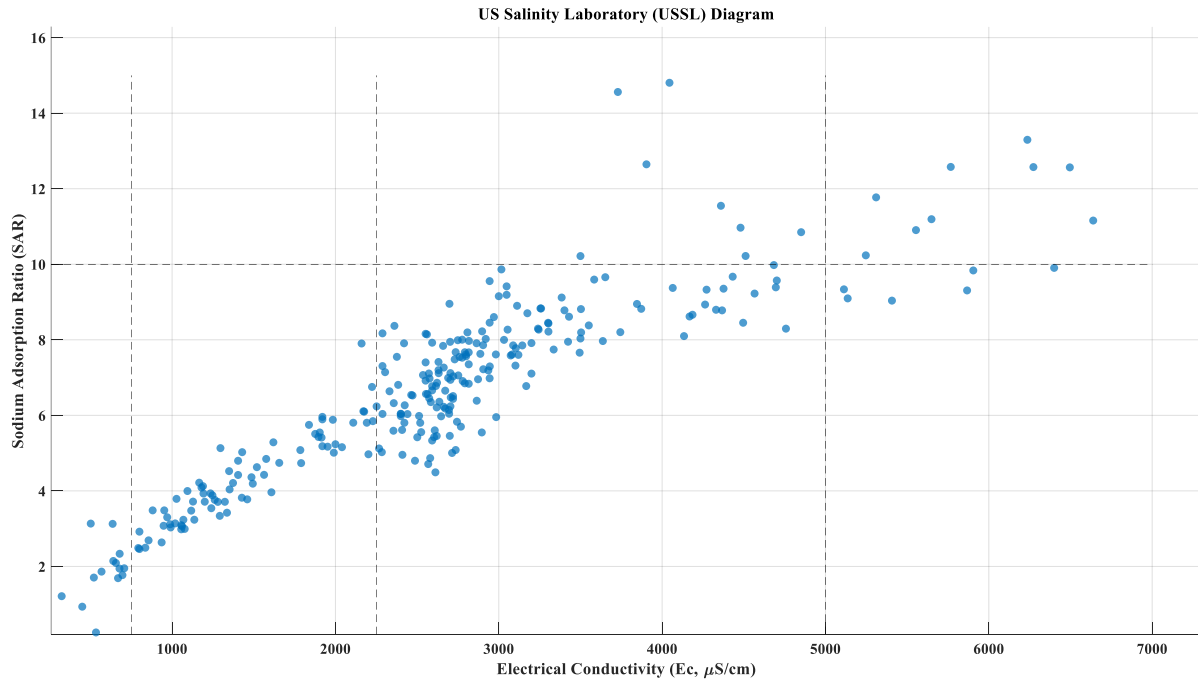
تعادل یونی نمونه‌ها با استفاده از شاخص IBE بررسی شد تا دقت داده‌ها تضمین شود. شاخص‌های هیدروشیمیایی پیشرفته شامل، Residual Sodium، Magnesium Hazard (MH)، Kelly's Ratio (KR)، Permeability Index (PI)، Carbonate (RSC)، سختی غیرکربناته، پتانسیل اشباع، نسبت کلر به بی‌کربنات و شاخص پتانسیل شوری، به همراه SAR و Adj. SAR برای ارزیابی وضعیت سدیمی محاسبه شدند. غلظت یونی کل و نیروی یونی محلول‌ها نیز بر اساس مجموع بارهای مثبت و منفی یون‌ها تعیین شد. بر اساس درصد نرمالیزه کاتیون‌ها و آنیون‌ها و یون‌های شاخص، آب‌ها به تیپ‌های  $Na-Cl$ ،  $Ca-HCO_3$  و  $Mg-SO_4$  تقسیم شدند که بیانگر فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم، از جمله تبادل یونی و تبخیر، هستند. با توجه به سختی کل، نمونه‌ها در چهار گروه نرم، نسبتاً سخت، سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی شدند. نمودارهای Stiff، Gibbs، Durov، Piper و نمودارهای پراکندگی یون به یون نیز به منظور شناسایی منشأ آب‌ها، کنترل‌کننده‌های شیمیایی و بررسی فرایندهای محیطی و ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی به کار گرفته شدند. نمودار پایپر برای تعیین تیپ شیمیایی غالب آب و روند کلی تکامل کیفی (پایپر، ۱۹۴۴)، نمودار گیبس برای تشخیص مکانیسم‌های کنترل‌کننده اصلی (مانند تبخیر، واکنش سنگ بستر) (گیبس، ۱۹۷۰)، نمودار استیف برای مقایسه بصری و سریع ترکیب یونی بین نمونه‌های مختلف (استیف، ۱۹۵۱)، نمودار دوروف برای شناسایی فرایندهای پیچیده مانند اختلاط منابع آب یا تبادلات یونی پیشرفته (دوروف، ۱۹۴۸) و نمودارهای پراکندگی یون به یون برای بررسی روابط جفتی یون‌های شاخص و شناسایی فرایندهای ژئوشیمیایی و نمودارهای پراکندگی (هم، ۱۹۸۵) استفاده شد.

## یافته‌های پژوهش

شکل‌های ۳ تا ۹ به عنوان نمونه تجزیه و تحلیل متغیرهای کیفیت آب سطحی را در ایستگاه هیدرومتری چمشور - دلبران نشان می‌دهند. نمودار پایپر نشان داد آب‌های منطقه عمدتاً از نوع  $Na^+ + K^+ - Cl^- / SO_4^{2-}$  هستند؛ کاهش  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  بیانگر تبادل یونی و غلبه  $Cl^-$  و  $SO_4^{2-}$  نشان‌دهنده تبخیر و انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت و گچ است. لوزی مرکزی، رخساره غالب  $Na-Cl$  را تأیید کرد و مسیر تحول  $Ca-HCO_3 \rightarrow Na-Cl$  نمایانگر بلوغ شیمیایی و تأثیر قوی شرایط اقلیمی و زمین‌شیمیایی بر آب‌های زیرزمینی است. ورود پساب‌های کشاورزی حاوی باقی‌مانده کودها (به‌ویژه کودهای پتاسیمی و نیتروژنه) و سموم، باعث افزایش بار آلودگی و تغذیه یون‌های خاصی مانند پتاسیم ( $K^+$ )، نترات ( $NO_3^-$ )، سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) و کلر ( $Cl^-$ ) در آب‌های سطحی می‌شود. همچنین، آبیاری با راندمان پایین و مدیریت نادرست زهکشی، موجب تشدید تجمع املاح و هدایت آن‌ها به سمت منابع آب می‌شود. فرایندهای طبیعی کنترل‌کننده شامل تبخیر شدید ناشی از اقلیم خشک، تبادل یونی سدیم - کلسیم و انحلال کانی‌های ( $Ca-HCO_3$ ) تبخیری (مانند گچ) و کربناته هستند. این فرایندها مسیر تکامل شیمیایی آب را از نوع کلسیم - بی‌کربناته پیش برده و به شوری متوسط تا زیاد، بلوغ شیمیایی و غلبه یون‌های غیرکربناته ( $Na-Cl$ ) به سدیم-کلروره منجر شده‌اند.



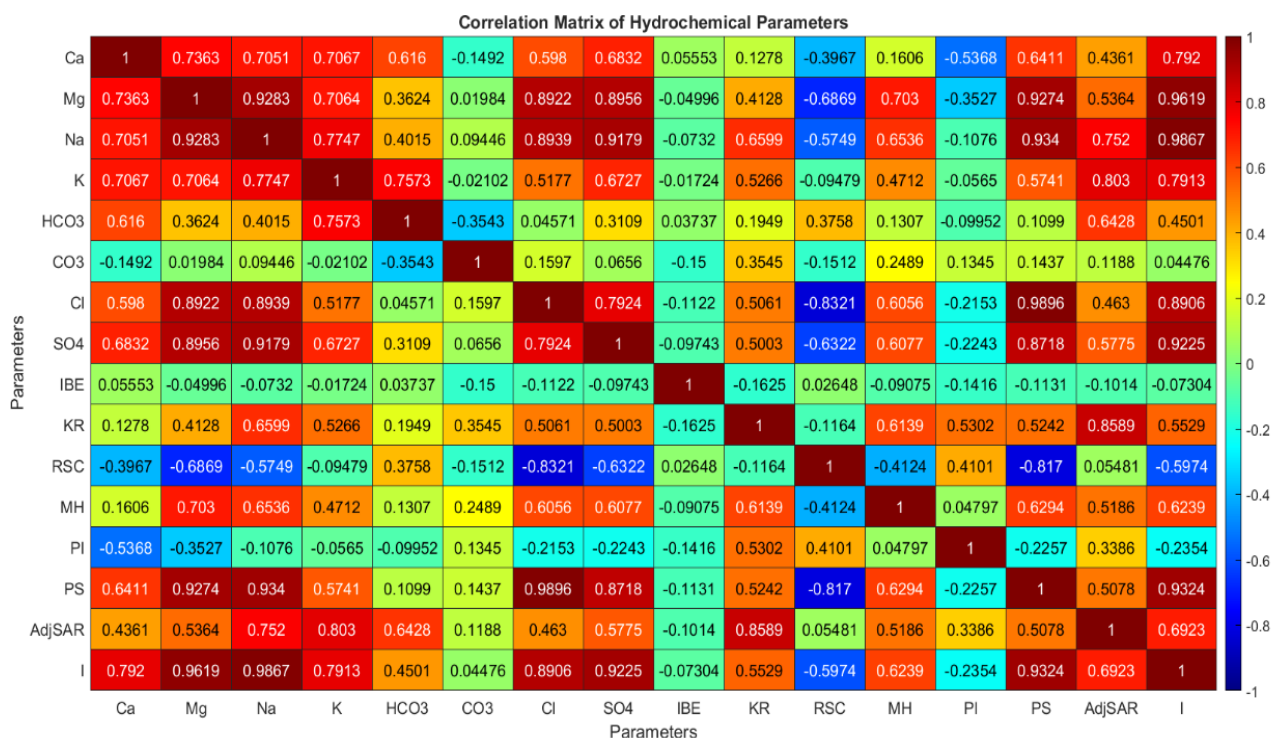
شکل ۳. نمودار وضعیت آنیون‌ها، کاتیون‌ها نسبت به همدیگر و پایپر در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور - دلبران



شکل ۴. نمودار ویلکوکس در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور - دلبران

تحلیل نمودار USSL نشان داد اکثر نمونه‌ها در محدوده C4-S3/S4 قرار دارند و بیانگر شوری بسیار بالا و سدیمی شدن شدید هستند، که رشد گیاه و نفوذپذیری خاک را محدود می‌کند. آب‌های با این مشخصات برای آبیاری بدون مدیریت مناسب خاک

نامناسب‌اند و تنها با اقدامات اصلاحی مانند شست‌وشوی نمک‌ها و افزودن گچ کشاورزی قابل استفاده‌اند. نمونه‌های با شوری کمتر (C3-S2) با مدیریت زهکشی می‌توانند در کشاورزی کاربرد داشته باشند.



شکل ۵. ماتریس همبستگی متغیرهای کیفیت آب در ایستگاه هیدرومتری چشم‌شور - دلبران

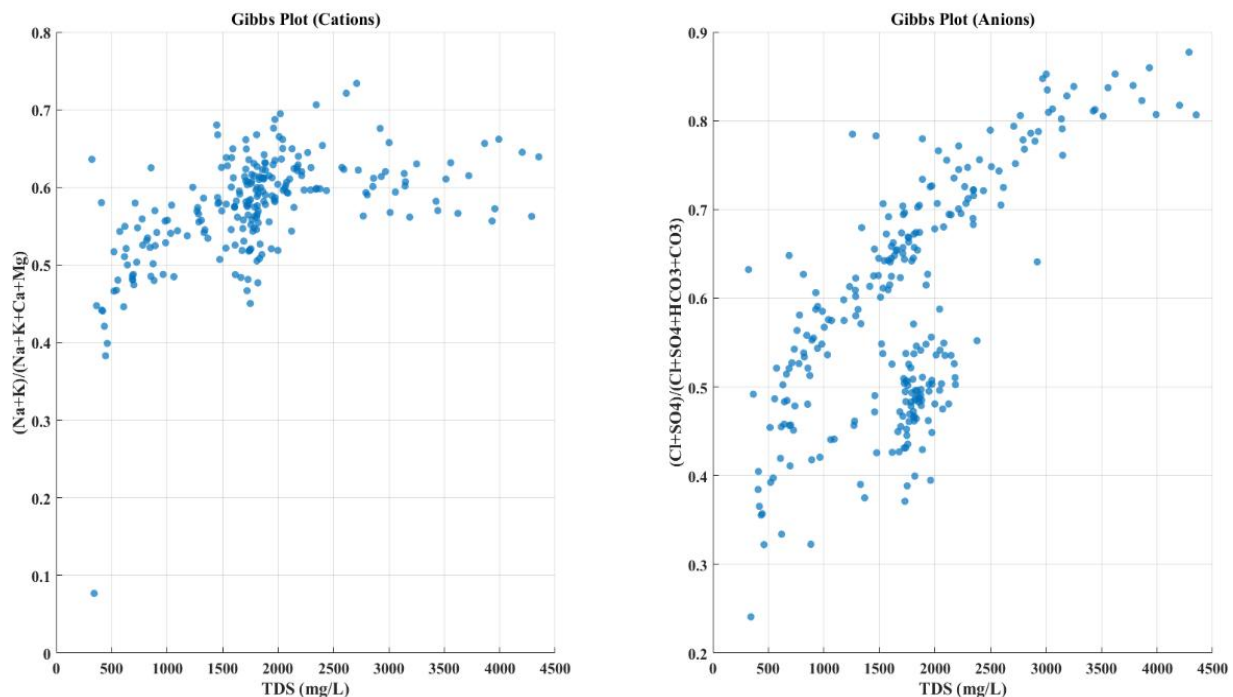
این نمودار ماتریس همبستگی متغیرهای کیفیت آب در ایستگاه هیدرومتری چشم‌شور دلبران را نشان می‌دهد در آن  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  با اکثر پارامترها همبستگی مثبت قوی دارند.

$\text{K}^{+}$  و  $\text{Na}^{+}$  همبستگی مثبت قابل توجه با  $\text{Cl}^{-}$  و  $\text{SO}_4^{2-}$  دارند، که نشان‌دهنده تأثیر و تمرکز یون‌های غیرکربناته است. در شرایط عادی و در یک محیط بسته، تبخیر باید همه یون‌ها را به یک نسبت تغلیظ کند و انتظار می‌رود همه پارامترها همبستگی مثبت قوی با یکدیگر داشته باشند. اما در طبیعت، انحلال و رسوب هم‌زمان کانی‌ها، تبادل یونی، فرایندهای بیوشیمیایی و میکروبی، منابع متفاوت یون‌ها باعث می‌شود این همبستگی‌ها متفاوت دیده شوند.

SAR، KR و RSC همبستگی مثبت با  $\text{Na}^{+}$  و  $\text{K}^{+}$  و همبستگی منفی یا ضعیف با  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  دارند. این نتیجه تأیید می‌کند که سدیمی شدن و خطر کاهش نفوذپذیری خاک بیشتر تحت تأثیر یون‌های سدیم و پتاسیم است.

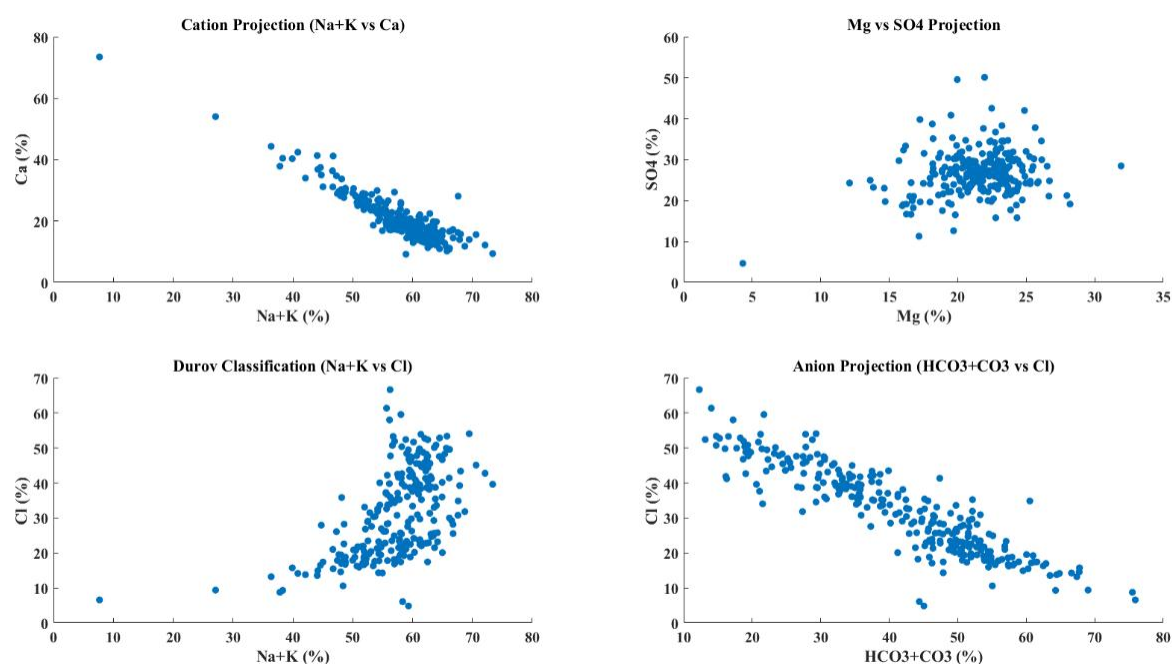
$\text{CO}_3^{2-}$  و  $\text{HCO}_3^{-}$  همبستگی مثبت با  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  دارند، که نشان می‌دهد نمونه‌هایی با سهم بالاتر کلسیم و بی‌کربنات عمدتاً تحت کنترل انحلال کربنات‌ها هستند. با استفاده از مدل PHREEQC محاسبه شاخص‌های اشباع (SI) برای کانی‌های کربناته، مشخص شد که انحلال کربناته در بیشتر نمونه‌ها تحت کنترل دولومیت ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) و تا حد کمتری کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) قرار دارد. مقادیر SI نشان می‌دهد آب در تماس با سنگ‌های منطقه به سمت اشباع یا اشباع نسبی با این کانی‌ها حرکت می‌کند و بنابراین، ترکیب یون‌های  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  عمدتاً ناشی از انحلال دولومیت است. علاوه بر این، نمودارهای باینری بین یون‌های  $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  و  $\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^{-}$  برای ارزیابی کنترل کانی‌ها و تشخیص فاز غالب استفاده شد. این نمودارها امکان شناسایی اثرات انحلال کربناته و روند سدیمی شدن آب را به صورت تصویری فراهم می‌کنند. شاخص‌های اشباع (SI) محاسبه‌شده با استفاده از PHREEQC نشان می‌دهند که انحلال کربناته در نمونه‌های آب تحت کنترل عمده دولومیت و تا حدی کلسیت قرار دارد.

نمودارهای باینری بین  $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  و  $\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$  که در این مطالعه رسم شدند، نشان می‌دهند تمرکز یون‌های غیرکربناته و اثر تبخیر نقش مهمی در سدیمی شدن آب و خاک ایفا می‌کند. این نتایج همچنین با بررسی شاخص‌های SAR، KR، RSC، MH و PI همخوانی دارد، و نشان می‌دهد افزایش  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$  بیشترین تأثیر را در کاهش نفوذپذیری خاک و محدودیت‌های آبیاری دارد، مشابه آنچه در مطالعات مرجع مشاهده شده است. شاخص‌های MH و PI همبستگی قوی با  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$  دارند، نشان‌دهنده خطر سدیمی شدن خاک و محدودیت استفاده در آبیاری را دارند. AdjSAR نیز به عنوان نسخه تعدیل شده SAR، الگوی مشابهی با SAR دارد و می‌تواند معیار بهتری برای برنامه‌ریزی آبیاری ارائه دهد.



شکل ۶ نمودار گیبس در ایستگاه هیدرومتری چم شور - دلبران

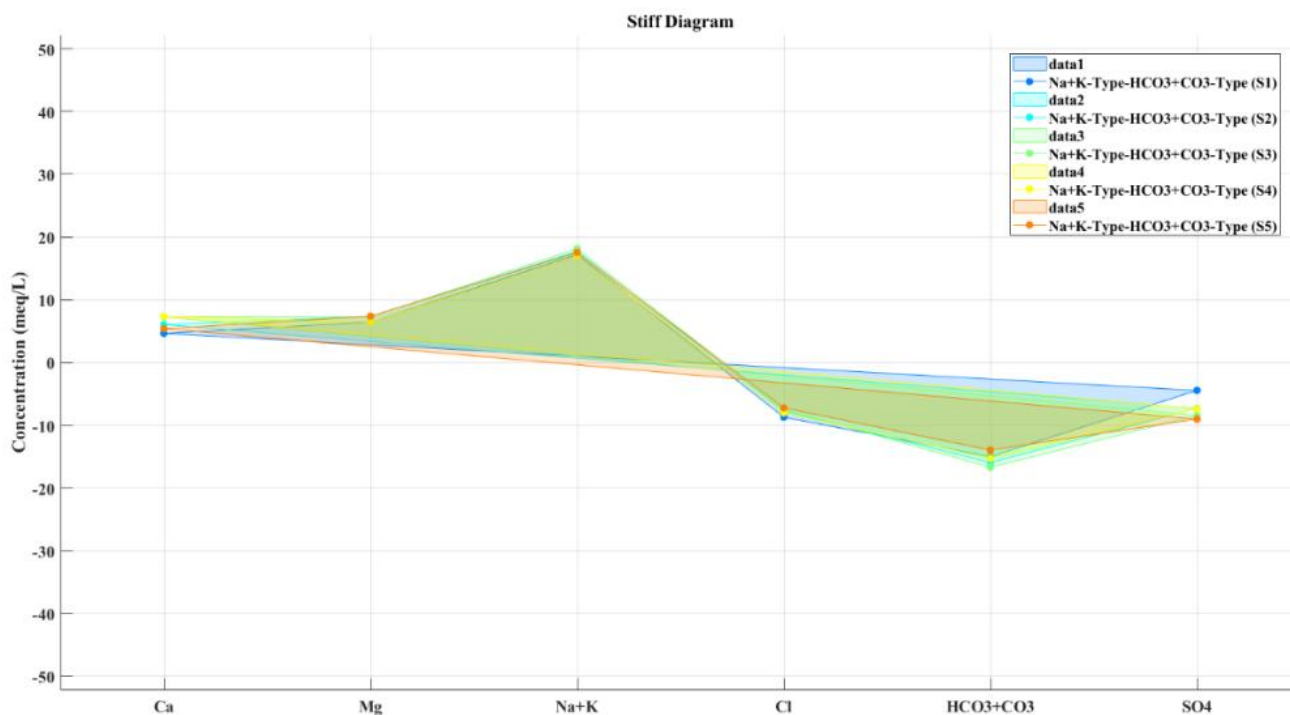
تحلیل نمودار گیبس نشان داد کیفیت آب‌های سطحی تحت تأثیر انحلال کانی‌ها، واکنش‌های زمین‌زاد و تبخیر قرار دارد. آب‌های ورودی پایین، در مسیر جریان با تماس با سنگ‌ها و خاک غنی شده و با تبخیر و تغلیظ، غلظت  $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$ ،  $\text{Cl}^-$  افزایش می‌دهد. در نمونه‌ها نشان‌دهنده تأثیر فرایند تبخیر در تکامل شیمی آب است (Gibbs, 1970; Appelo and Postma, 2005). نمونه‌های با TDS بالا در ناحیه تبخیری نمودار قرار می‌گیرند که بیانگر نقش غالب تبخیر در شکل‌دهی رخساره‌های شور است، در حالی که نمونه‌های با TDS پایین‌تر بیشتر تحت تأثیر انحلال کانی‌ها قرار دارند. بررسی مقادیر پارامترهای کیفی آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد هدایت الکتریکی (EC) در محدوده ۲۲۵۲ تا ۴۰۴۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر قرار دارد که بیانگر شوری متوسط تا زیاد در منطقه است. مقدار مواد جامد محلول (TDS) نیز بین ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. نسبت جذب سدیم (SAR) در دامنه ۲/۶ تا ۱۴/۸ (میلی‌اکیوالان بر لیتر)<sup>5.0</sup> اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده خطر سدیمی متوسط تا نسبتاً زیاد در برخی نمونه‌هاست. بررسی نسبت‌های یونی نشان می‌دهد نسبت  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$  در بازه ۰/۵ تا ۰/۹ قرار دارد. همچنین نسبت  $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$  در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹۵ متغیر است که غلبه یون‌های سدیم و کلرید بر سایر یون‌ها و تمایل آب به تیپ شور کلروره را تأیید می‌کند.



شکل ۷. نمودار دوروف در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور - دلبران

نمودار دوروف نشان می‌دهد نمونه‌ها در سه الگوی اصلی شامل میدان مرکزی، نواحی نزدیک گوشه‌های یونی و امتداد روندهای خطی توزیع شده‌اند. حضور نقاط در بخش مرکزی بیانگر اختلاط بین دو عضو انتهایی هیدروشیمیایی با ترکیب متفاوت است. تمرکز نمونه‌ها در نزدیکی گوشه‌های سولفات یا کلروره بیانگر غلبه فرایندهایی مانند انحلال تبخیری یا شوری‌زایی ناشی از تبخیر است. جابه‌جایی از میدان Ca-Mg به سمت Na نشان‌دهنده وقوع تبادل یونی در محیط آبخوان است. همچنین، روندهای خطی بین خوشه‌ها مؤید اختلاط تدریجی بین منابع آبی با امضای ژئوشیمیایی متفاوت است. بر اساس داده‌های هشت نمونه، درصد یون‌ها در محدوده‌های زیر قرار دارد Na+K بین ۳۵ تا ۷۸ درصد، Ca بین ۸ تا ۲۵ درصد، Mg بین ۱۴ تا ۴۰ درصد،  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  بین ۸ تا ۴۵ درصد و  $\text{Cl} + \text{SO}_4$  بین ۵۵ تا ۹۲ درصد. نمونه‌های ابتدایی (با Na+K بالای ۴۵ درصد و  $\text{HCO}_3$  زیر ۱۵ درصد) دارای تیپ Na-Cl هستند که نشان‌دهنده غلبه فرایند تبخیر و انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت و گچ است. نمونه‌های انتهایی (با Na+K حدود ۳۵-۳۸ درصد، Ca+Mg بالای ۶۰ درصد و  $\text{HCO}_3$  بالای ۳۵ درصد) به تیپ Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  نزدیک می‌شوند که ناشی از انحلال سنگ‌های کربناته (کلسیت و دولومیت) است. روند کاهش سدیم و افزایش کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات از نمونه‌های ابتدایی به انتهایی، بیانگر تحول هیدروشیمیایی از آب‌های شور تبخیری به سمت آب‌های کربناته در مسیر جریان است. به طور کلی، فرایندهای تبخیر، تبادل یونی و انحلال کانی‌های تبخیری و کربناتی نقش اصلی در کنترل ترکیب شیمیایی آب‌های منطقه دارند و غلبه با یون‌های سدیم و کلرید است که بیانگر شوری متوسط تا زیاد آب‌ها است. در نمودارهای مثلثی (Sources/End-members)، هر گوشه نمایانگر یک منبع آب با ترکیب یونی مشخص و غالب است که معمولاً شامل کاتیون‌ها یا آنیون‌های اصلی است. نمونه‌هایی که در نزدیکی گوشه‌ها قرار می‌گیرند، عمدتاً تحت تأثیر یک منبع غالب (مانند آب باران، سنگ میزبان خاص یا یک تیپ مشخص آب زیرزمینی) هستند. در مقابل، نمونه‌های واقع در مرکز مثلث Mixed Water بیانگر اختلاط چند منبع مختلف بوده و ترکیب شیمیایی آن‌ها حاصل فرایند اختلاط آب‌هاست. در اغلب نمودارها، نمونه‌ها بیشتر در امتداد خطوط اختلاط بین دو منبع اصلی پراکنده شده‌اند تا در نزدیکی گوشه‌ها، این الگو نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی آب‌ها غالباً حاصل اختلاط دو منبع با ویژگی‌های یونی متفاوت است. در نمودار  $\text{Mg}^{2+}$  در برابر  $\text{SO}_4^{2-}$  پراکندگی نمونه‌ها به صورت خوشه‌ای و بدون روند خطی مشخص مشاهده می‌شود که بیانگر کنترل فرایندهای متفاوت یا چندگانه بر این یون‌هاست. همچنین، در نمودار  $\text{Ca}^{2+}$  در برابر  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ ، اغلب نمونه‌ها روندی شیب‌دار از بالا - چپ به پایین - راست تشکیل می‌دهند؛ به

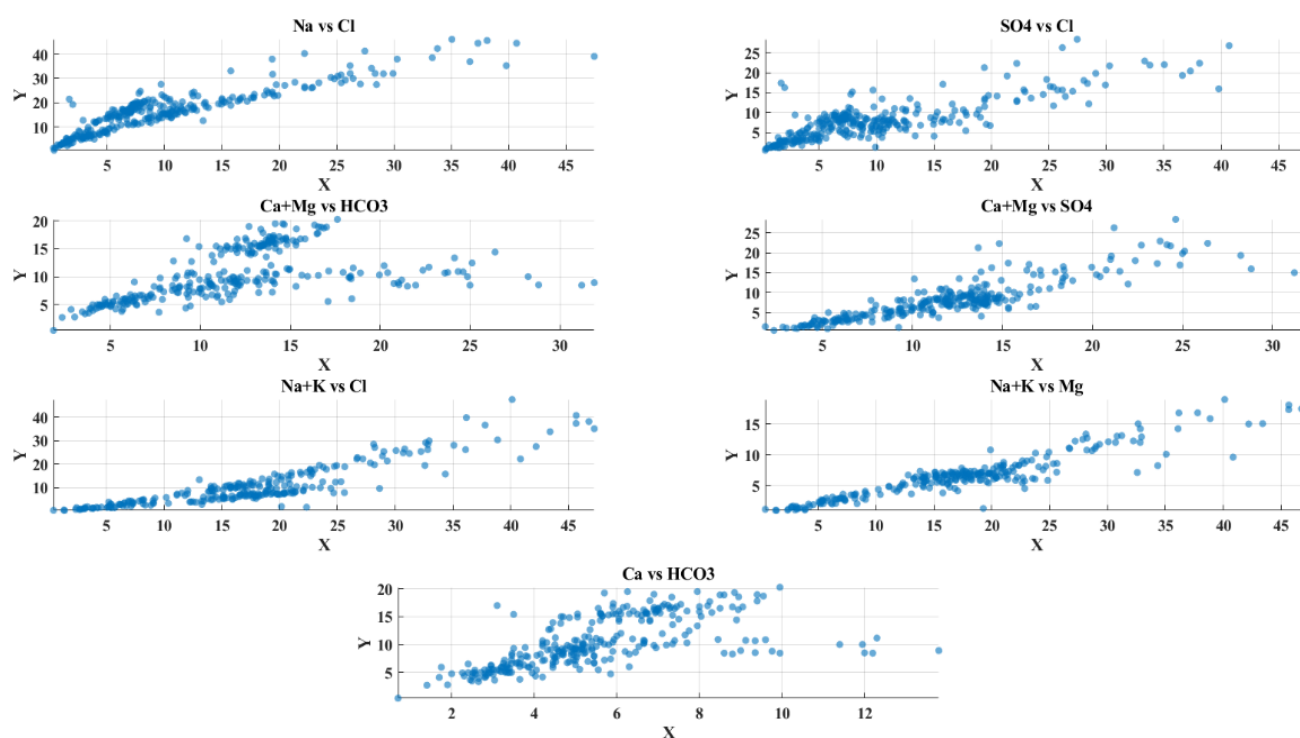
طوری که نمونه‌های واقع در بالا - چپ Ca و بالا و Na+K پایین معرف آب‌هایی با منشأ غنی از کلسیم، مانند آب‌های مرتبط با سنگ‌های آهکی هستند. در مقابل، نمونه‌های پایین - راست Ca پایین و Na+K بالا نشان‌دهنده آب‌های غنی از سدیم و پتاسیم‌اند که احتمالاً تحت تأثیر فرایند تبادل کاتیونی با خاک‌های رسی یا سنگ‌های سیلیکاته قرار گرفته‌اند. نمونه‌های واقع بین این دو ناحیه بیانگر آب‌های مخلوط حاصل از ترکیب دو منبع با ترکیب کاتیونی متفاوت هستند. وجود شیب خطی مشخص از بالا - چپ به پایین - راست، نشان‌دهنده فرایند اختلاط بین دو منبع آب با ترکیب کاتیونی متمایز است.



شکل ۸. نمودار استیف در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور - دلبران

تحلیل نمودار استیف نشان داد نمونه‌های دارای شاخه‌های کشیده  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$ ، تیپ غالب  $\text{Na-Cl}$  را نشان می‌دهند و نقش فرایندهای تبخیر و تغلیظ در شکل‌گیری ترکیب شیمیایی آب‌های سطحی را تأیید می‌کند. نمونه‌های با چندضلعی‌های کوچک و متقارن، غلبه  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{HCO}_3^-$  را نشان می‌دهند و بیانگر آب‌های تازه‌تر با تأثیر کمتر تبخیر هستند. همچنین، نمونه‌هایی که در محدوده  $\text{Ca-HCO}_3$  قرار دارند لزوماً آب‌های تازه نیستند. علاوه بر فرایند اختلاط، ترکیب شیمیایی آب‌ها می‌تواند تحت تأثیر فرایندهای هیدروژئوشیمیایی دیگری نظیر جریان زیرسطحی و سامانه‌های کارستی و چشمه‌های کربناته قرار گیرد. آب‌های زیرزمینی که در مسیر جریان خود از سازندهای کربناته عبور می‌کنند، معمولاً دارای مقادیر بالای  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{HCO}_3^-$  هستند که ناشی از انحلال کلسیت و دولومیت در سنگ‌های میزبان است. در این شرایط، تیپ هیدروشیمیایی غالب،  $\text{Ca-HCO}_3$  است و این ترکیب لزوماً بیانگر ورود مستقیم آب بارانی تازه نیست، بلکه می‌تواند حاصل برهم‌کنش آب با سنگ‌ها در محیط زیرسطحی باشد. چشمه‌های خروجی از سیستم‌های کارستی نیز غالباً ترکیب  $\text{Ca-HCO}_3$  را نشان می‌دهند و به دلیل غلظت پایین  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$  ممکن است از نظر شیمیایی مشابه آب‌های بارانی تازه به نظر برسند، در حالی که منشأ آن‌ها زیرسطحی است. برای تفکیک منشأ آب‌های  $\text{Ca-HCO}_3$ ، استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  ضروری است. آب‌های بارانی تازه معمولاً در امتداد خط جهانی آب‌های متعارف (GMWL) یا خط محلی بارش (LMWL) قرار می‌گیرند، در حالی که آب‌های تبخیرشده یا آب‌های زیرسطحی عمیق‌تر معمولاً انحراف ایزوتوپی مشخصی نشان می‌دهند. بنابراین، نمونه‌های با تیپ  $\text{Ca-HCO}_3$  می‌توانند منشأهای متفاوتی شامل آب بارانی، آب زیرسطحی در حال گردش یا چشمه‌های کارستی داشته باشند و تعیین دقیق منشأ آن‌ها مستلزم تلفیق داده‌های شیمیایی، هیدروژئولوژیکی و ایزوتوپی است.

نمودار استیف امکان شناسایی سریع رخساره‌ها و ارزیابی اثر فرایندهای هیدروشیمیایی را فراهم می‌آورد و با نتایج نمودارهای پایپر و دوروف همخوانی دارد. غالب بودن یون‌های سدیم و کلر در نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً ناشی از فرایند انحلال نمک‌های محلول است. با این حال، بررسی تنها ترکیب Na-Cl برای تعیین منشأ دقیق یون‌ها کافی نبوده و نیاز به تحلیل نسبت‌های یونی وجود دارد. در این راستا، دو نسبت کلیدی می‌توانند به تفکیک اثرات انحلال مستقیم هالیت و تبخیر و تغلیظ آب‌ها کمک کنند. نسبت Na/Cl نزدیک به یک، نشان‌دهنده انحلال مستقیم هالیت است، در حالی که نسبت کمتر از یک بیانگر تأثیر فرایند تبخیر است (اپلو و پستما، ۲۰۰۵). علاوه بر این، نسبت  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  در شرایط تبخیر کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد، زیرا یون بی‌کربنات زودتر از محلول رسوب می‌کند و یون‌های سدیم و کلر تا مراحل پایانی تبخیر باقی می‌مانند. در نمونه‌های مورد مطالعه، کاهش معنادار نسبت  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  به همراه نسبت Na/Cl کمتر از یک نشان می‌دهد فرایند غالب در منطقه تبخیر و تغلیظ آب‌ها بوده و نقش انحلال مستقیم در درجه دوم اهمیت قرار دارد. این نتایج با اصول بنیادی هیدروشیمی و مشاهدات مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های تبخیری مشابه مطابقت دارد (گیس، ۱۹۷۰؛ هم، ۱۹۸۵).



شکل ۹. نمودارهای پراکندگی یون به یون در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور - دلبان

تحلیل نمودارهای پراکندگی یون‌ها نشان داد رابطه تقریباً خطی  $\text{Na}^+-\text{Cl}^-$ ، حکایت از انحلال هالیت و اثر تبخیر-تغلیظ بر شوری آب‌ها دارد. انحراف‌های جزئی Na نسبت به Cl، نشانه تبادل یونی یا ورود منابع سدیمی ثانویه است. همبستگی مثبت  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  با  $\text{SO}_4^{2-}$ ، انحلال کانی‌های سولفات مانند گچ را نشان می‌دهد و انحراف از خط تعادل ۱:۱ احتمال رسوب کربنات یا حذف کلسیم توسط تبادل یونی را بیان می‌کند. این نمودارها امکان شناسایی سریع فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب‌های سطحی را فراهم می‌آورند.

در ایستگاه هیدرومتری مهرآباد، نمودار پایپر نشان می‌دهد آب‌های زیرزمینی منطقه عمدتاً از نوع  $\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  هستند. در مثلث کاتیونی، سهم  $\text{Na}^++\text{K}^+$  غالب بر  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  است که نشان‌دهنده آب‌های قلیایی و تبادل یونی فعال است. در مثلث آنیونی، نمونه‌ها بین  $\text{Cl}^-$  و  $\text{SO}_4^{2-}$  توزیع شده‌اند و تبخیر و انحلال منابع سولفاتی نقش مهمی در ترکیب شیمیایی آب دارند. نقاط

در لوزی مرکزی نمودار در سمت راست بالای نمودار تجمع دارند و هیچ نمونه‌ای در محدوده آب نرم کربناته قرار ندارد، که با سختی کل بالا و نسبت  $Na/Ca+Mg$  همخوانی دارد. نمونه‌هایی مانند  $c4-s2$  و  $c4-s3$  با وجود سهم نسبتاً بیشتر  $Ca$  و  $Mg$  همچنان تحت تأثیر  $Na^{++}K^{+}$  غالب هستند. این ترکیب هیدروشیمیایی شامل شوری متوسط تا زیاد، نسبت سدیم بالا و سختی زیاد است و نشان می‌دهد آب‌ها ممکن است برای آبیاری مستقیم محدودیت داشته باشند. در نتیجه، مدیریت و تصفیه آب برای استفاده کشاورزی و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است.

تیپ غالب آب‌های زیرزمینی در ایستگاه هیدرومتری مهرآباد، که به صورت  $Na^{++}K^{+} - Cl^{-}/SO_4^{2-}$  شناخته می‌شود، عمدتاً ناشی از سه فرایند هیدروشیمیایی اصلی است. نخست، انحلال سنگ‌های تبخیری مانند گچ و هالیت که منابع یون‌های  $Ca^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Na^{+}$  و  $Cl^{-}$  را تأمین می‌کند. دوم، تبادل یونی در رسوبات که طی آن یون‌های  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  آب جایگزین سدیم جذب شده در رس‌ها می‌شوند و غلبه یون  $Na^{+}$  را تقویت می‌کنند. سوم، تبخیر شدید در اقلیم خشک که موجب تغلیظ یون‌ها و حذف بی‌کربنات به صورت رسوب کربناته شده و نسبت یون‌های  $Cl^{-}$  و  $SO_4^{2-}$  را افزایش می‌دهد. موقعیت نمونه‌ها در ناحیه بالایی-راست نمودار Piper، ارائه شده در بخش نتایج هیدروشیمیایی، تأییدکننده این روندها و نقش فرایندهای یادشده در کنترل ترکیب شیمیایی آب‌ها است.

نمودار USSL در ایستگاه هیدرومتری مهرآباد نشان می‌دهد مقدار EC بین ۲۲۵۲ تا  $4045 \mu S/cm$  و SAR بین  $6/2$  تا  $14/8$  است که نشان‌دهنده شوری متوسط تا زیاد و سدیم متوسط تا بالا است. بیشتر نمونه‌ها در محدوده‌های  $C_4S_2$  تا  $C_3S_1$  قرار دارند که بیانگر خطر تجمع سدیم در خاک و کاهش نفوذپذیری آن است. شاخص‌های مکمل مانند  $Kelly Ratio (>1)$  و  $Adj SAR$  نیز این وضعیت را تأیید می‌کنند. در نتیجه، آب‌های منطقه برای آبیاری محصولات حساس مناسب نیستند و نیاز به اصلاح شیمیایی یا استفاده از گیاهان مقاوم به شوری و سدیم دارند. نمودار USSL همراه با نمودار Piper دیدی جامع از کیفیت و ترکیب شیمیایی آب و اثرات احتمالی آن بر خاک ارائه می‌دهد.

نتایج حاصل از نمودار گیس نشان می‌دهد بیشتر نمونه‌های آب سطحی در محدوده تبخیر-سنگ غالب قرار دارند و ترکیب شیمیایی آن‌ها تحت تأثیر هم‌زمان انحلال کانی‌های تبخیری و فرآیند تبخیر شکل گرفته است. مقادیر بالای TDS (حدود ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) همراه با افزایش نسبت سدیم به کلسیم و منیزیم و همچنین غلبه کلرید و سولفات بر بیکربنات‌ها، بیانگر شوری متوسط تا زیاد و تأثیر چشمگیر تبادل یونی در آب‌های منطقه است. در برخی نمونه‌ها که نسبت‌های یونی پایین‌تر دارند، حضور فرایندهای انحلال کربنات‌ها و نفوذ آب‌های حاصل از بارندگی مشهود است. در مجموع، داده‌ها نشان می‌دهند رخساره شیمیایی غالب آب‌ها از نوع  $Na-Cl-SO_4$  است و ترکیب یونی آن با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، شاخص‌های کیفی مثبت RSC و سختی نسبتاً بالا همخوانی دارد.

تحلیل داده‌ها با نمودار دوروف نشان می‌دهد در بیشتر نمونه‌ها، کاتیون‌های  $Na+K$  بیش از ۵۰ درصد سهم دارند و  $Ca$  و  $Mg$  نقش کمتری دارند، که بیانگر غلبه سدیم و وقوع تبادل کاتیونی گسترده است. در بخش آنیونی،  $Cl$  و  $SO_4$  بر  $HCO_3+CO_3$  غالب هستند، به طوری که ترکیب  $Na+K$  و  $Cl/SO_4$ ، رخساره غالب آب‌ها را از نوع شور و قلیایی نشان می‌دهد. بیشتر نمونه‌ها در ربع‌های مرکزی مربع دوروف قرار دارند که آب‌های با شوری متوسط تا زیاد و غنی از سدیم را مشخص می‌کند، در حالی که نمونه‌هایی با  $Ca$  و  $HCO_3$  بالاتر، مانند  $C_4S_2$ ، آب‌های کربناته و کمتر تحت تأثیر تبخیر را نشان می‌دهند. روند تغییرات درصد  $Na+K$  و  $Cl/SO_4$  از نمونه‌های ورودی به خروجی، پیشرفت فرایندهای تبخیر و تبادل یونی در مسیر جریان را آشکار می‌سازد. علاوه بر این، نمونه‌هایی با  $Mg$  و  $Ca$  پایین، ممکن است ظرفیت جذب کاتیون خاک را کاهش دهند و نیازمند مدیریت مناسب برای آبیاری هستند. تحلیل نمودار دوروف نشان می‌دهد اکثر نمونه‌ها آب‌های شور و سدیم‌دار هستند و فرایندهای تبادل یونی و تبخیر نقش اصلی در تعیین ترکیب شیمیایی آب دارند. نمونه‌هایی با مقادیر بالاتر  $Ca$  و  $HCO_3$ ، آب‌های کربناته و کمتر شور را نشان می‌دهند که از نظر کشاورزی قابلیت پذیرش بهتری دارند. نمودار همچنین توزیع آب‌های مختلف در آبخوان و روند تغییرات شیمیایی را مشخص می‌کند و امکان مدیریت بهینه آبیاری و تصفیه آب را فراهم می‌سازد. در مجموع، داده‌ها بیانگر

شرایط یک سیستم نیمه‌خشک هستند که تبخیر، تبادل یونی و غلظت یون‌های غیر کربناته بر شیمی آب غالب است و تحلیل آن پایه علمی محکمی برای برنامه‌ریزی کشاورزی، صنعتی و شهری ارائه می‌کند. تحلیل نمودار Stiff نشان می‌دهد نمونه‌های  $C_4S_3$  و  $C_4S_4$ ، با قله‌های برجسته در شاخه‌های  $Na+K$  و  $Cl$  و سهم پایین  $Ca$  و  $Mg$ ، آب‌های شور و سدیم‌دار را نمایان می‌کنند که تحت تأثیر تبخیر شدید در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. نمونه  $C_4S_2$ ، با تعادل بیشتر کاتیون‌ها و آنیون‌ها و غلبه  $Ca$  و  $HCO_3$ ، آب‌های کربناته و کمتر شور را نشان می‌دهد که کنترل شیمی آن‌ها بیشتر ناشی از انحلال کربنات‌هاست. افزایش  $SO_4$  در نمونه‌های شور، اثر کانی‌های سولفات مانند گچ را نشان می‌دهد. همخوانی نتایج نمودار Stiff با شاخص‌هایی مانند SAR، Kelly Ratio و TH، پتانسیل شوری بالا و خطر برای خاک‌های حساس را در نمونه‌های شور و قابلیت آبیاری مناسب در نمونه‌های با  $Ca$  و  $HCO_3$  بیشتر تأیید می‌کند. علاوه بر این، نمودار امکان مقایسه سریع و بصری نمونه‌ها و بررسی تغییرات شیمیایی در طول مسیر جریان یا بین آبخوان‌ها را فراهم می‌آورد.

تحلیل نمودارهای پراکنش یون‌ها نشان می‌دهد رابطه تقریباً خطی  $Na$  vs  $Cl$  با شیب نزدیک به ۱ بیانگر منبع مشترک سدیم و کلر است و نمونه‌های  $C_4S_3$  و  $C_4S_4$  شدت شوری و تبادل یونی بالایی دارند. پراکندگی  $SO_4$  نسبت به  $Cl$ ، تأثیر منابع سولفات و تبخیر شدید در آبخوان‌ها را نشان می‌دهد. نمودار  $Ca+Mg$  vs  $HCO_3$  نمونه‌های  $C_4S_2$  را تحت تأثیر انحلال سنگ‌های کربناته مانند کلسیت و دولومیت قرار می‌دهد، در حالی که نمودار  $Ca+Mg$  vs  $SO_4$  بیانگر اثر گچ و منابع سولفات همراه با کاهش سختی کربناته در نمونه‌های شور است. نمودار  $Na+K$  vs  $Cl$  روند مشابهی با  $Na$  vs  $Cl$  دارد و غلظت نسبی یون‌های قلیایی و شوری آب را تأیید می‌کند، در حالی که  $Na+K$  vs  $Mg$  کاهش نسبی  $Mg$  نسبت به  $Na+K$  در نمونه‌های  $C_4S_3$  و  $C_4S_4$  را نشان می‌دهد که نشانه تبادل کاتیونی است. در نهایت، نمودار  $Ca$  vs  $HCO_3$ ، اشباع آب نسبت به کربنات‌ها را نشان می‌دهد و نمونه‌های  $C_4S_2$  ظرفیت حل شدن بالای کلسیم و سختی کربناته بیشتری دارند.

در ایستگاه هیدرومتری چم‌شور\_شادی‌آباد اکثر نمونه‌های آب سدیم-غنی ( $Na+K$ ) هستند و در برخی نمونه‌ها سهم کلسیم و منیزیم کمتر است، که نشان‌دهنده فرایندهای تبخیر و تبادل یونی سدیم-کلسیم است. آنیون‌ها بیشتر به سمت  $Cl$  و  $SO_4$  متمایل‌اند، ناشی از انحلال سولفات‌ها و کلریدها و اثر تبخیر. ترکیب  $Na+K$  با  $Cl$  و  $SO_4$  باعث شکل‌گیری آلودگی‌های  $Na-Cl$  و  $Na-SO_4$  می‌شود که در مناطق نیمه‌خشک تا خشک با شوری متوسط تا زیاد رایج است. نمونه‌های محدودی با سهم بالاتر  $Ca$  و  $HCO_3$  نزدیک آلودگی  $Ca-HCO_3$  هستند و کنترل سنگ میزبان و انحلال کربنات‌ها را نشان می‌دهند. شاخص‌های RSC و Permeability Index نیز تأثیر بالای سدیم بر کیفیت آب و کاهش نفوذپذیری خاک را تأیید می‌کنند.

آب‌های مورد بررسی دارای هدایت الکتریکی (EC) بالا بین ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر هستند که نشان‌دهنده شوری متوسط تا زیاد ( $C_3-C_4$ ) است. SAR بالای ۱۰ تا ۱۸ نشان می‌دهد سدیم غالب است و می‌تواند ساختار خاک و نفوذپذیری آن را کاهش دهد. ترکیب شوری و سدیم بالا بیشتر نمونه‌ها را در محدوده  $C_4-S_2$  و  $C_4-S_3$  قرار می‌دهد و استفاده مستقیم از آن‌ها در کشاورزی بدون مدیریت خاک، محدود است. شاخص‌های مکمل مانند Kelly Ratio و Adjusted SAR نیز نشان‌دهنده غلبه سدیم و تأثیر تبادل یونی بر خاک هستند. در مجموع، این آب‌ها نیازمند مدیریت خاک، تصفیه یا مخلوط کردن با آب کم‌شور و انتخاب گیاهان مقاوم به شوری هستند. آب‌های بررسی شده عمدتاً  $Na$  غنی با آنیون‌های  $Cl$  و  $SO_4$  هستند، نشان‌دهنده تبادل کاتیونی سدیم-کلسیم و تأثیر تبخیر و انحلال سولفات‌ها و کلریدها. نمونه‌هایی با  $Ca$  و  $HCO_3$  بالاتر مثل  $c_4-s_2$  آب‌های سبک‌تر و کمتر شور را نشان می‌دهند. نتایج با Piper، Stiff، RSC، Hazard، Mg و Kelly Ratio و TH همخوانی دارد و تأکید می‌کند که آب‌های سدیم غالب می‌توانند باعث قلیابیت خاک و کاهش نفوذپذیری آب در آبیاری شوند. اکثر آب‌ها  $Na$  غنی با آنیون‌های  $Cl$  و  $SO_4$  و  $Ca$  و  $Mg$  پایین هستند، نشان‌دهنده تبادل کاتیونی و تبخیر. نمونه‌های محدود با  $Ca$  و  $HCO_3$  بالاتر تحت کنترل انحلال کربنات و اثر سنگ میزبان‌اند. شوری متوسط تا زیاد و شاخص‌های SAR و Kelly Ratio نشان می‌دهند آب‌ها برای آبیاری بدون مدیریت خاک محدودند. فرایندهای اصلی کنترل‌کننده شیمی آب‌ها تبخیر، تبادل یونی و انحلال کانی‌ها هستند، و این ویژگی‌ها تأثیر مستقیم بر کیفیت آب و نفوذپذیری خاک دارند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آب‌های سطحی ایستگاه‌های چمشور شادی‌آباد، دلبران و مهرآباد عمدتاً دارای سدیم و پتاسیم بالا با کلر و سولفات غالب هستند و شوری متوسط تا زیاد دارند، که نشان‌دهنده تأثیر اقلیم خشک تا نیمه‌خشک و تمرکز یون‌های غیرکربناته است. تحلیل نمودارهای پایپر، استیف، دوروف و گیپس نشان می‌دهد تبخیر شدید، تبادل یونی سدیم-کلسیم و انحلال کانی‌های تبخیری و کربناته مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب هستند. نمونه‌هایی که سهم بالاتری از کلسیم و بی‌کربنات دارند، آب‌های تازه‌تر و کمتر تحت تأثیر تبخیر را نشان می‌دهند و بیشتر تحت کنترل انحلال کربنات‌ها قرار دارند. شاخص‌های SAR، Kelly Ratio و RSC خطر سدیمی شدن خاک و کاهش نفوذپذیری را در صورت استفاده بدون مدیریت آب و خاک تأیید می‌کنند. مسیر تحول شیمیایی غالب آب‌ها از  $\text{Ca-HCO}_3$  به  $\text{Na-Cl}$  بیانگر بلوغ شیمیایی و تأثیر فرایندهای تبخیر و تبادل یونی در طول مسیر جریان است. آب‌های شور و سدیم‌دار برای آبیاری مستقیم محدودیت دارند و نیازمند اصلاح شیمیایی و مدیریت خاک هستند. شست‌وشوی نمک‌های تجمع‌یافته در خاک و افزودن گچ می‌تواند اثرات سدیمی را کاهش داده و نفوذپذیری خاک را بهبود دهد. به‌کارگیری گیاهان مقاوم به شوری و سدیم همراه با مدیریت زهکشی و پایش مستمر کیفیت آب بهره‌وری کشاورزی را افزایش می‌دهد. اجرای این اقدامات باعث کنترل تجمع سدیم، حفظ ساختار خاک و بهبود شرایط آبیاری می‌شود. در مجموع، داده‌ها نشان می‌دهند شیمی آب‌های سطحی تحت تأثیر تبخیر، تبادل یونی و انحلال کانی‌ها است و مدیریت هوشمند منابع آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی ضروری است.

## منابع

- 1 Ahmadi, P., Arefi, H., & Kardan, N. (2020). Modeling the discharge of Karun River Using a New Method Based on the Joint LSTM and GRU Neural Networks. *Journal of Ecohydrology*, 7(3), 619-633. (In Persian)
- 2 Ansari Qujqar, M., Iraqinejad, Sh., Bazarafshan, J., Zahraei, B., & Parsi, E. (2021). Evaluating the effectiveness of GRU-LSTM hybrid model in forecasting dust storms (case study: Khuzestan province). *Iran Water Resources Research*, 17(1), 16-32. (In Persian)
- 3 Akbari Osmavandani, S., Sharafati, A., & Moghaddam, H. K. (2024). Assessing the effectiveness of artificial intelligence models in predicting Zayanderud dam inflow at different time scales. *Acta Geophysica*, 72(5), 3511-3527. (In Persian)
- 4 Anvari, S. (2018). Probabilistic Forecasts of Streamflow Scenarios Using ESP Approach (Case study: Halil River). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), 75-87. (In Persian)
- 5 Baharlu, R. (2009). Forecasting time series with long-term dependencies using NARX recurrent neural network. *The 12th Electrical Engineering Student Conference*, (In Persian)
- 6 Bakhshi Ostadkalayeh, F., Moradi, S., Asadi, A., Moghaddam Nia, A., & Taheri, S. (2023). Performance improvement of LSTM-based deep learning model for streamflow forecasting using Kalman filtering. *Water Resources Management*, 37(8), 3111-3127. (In Persian)
- 7 Chadha, G. S., Panambilly, A., Schwung, A., & Ding, S. X. (2020). Bidirectional deep recurrent neural networks for process fault classification. *ISA transactions*, 106, 330-342.
- 8 Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K., & Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. *arXiv preprint arXiv*, 1412-3555.
- 9 Cho, K., Van Merriënboer, B., Bahdanau, D., & Bengio, Y. (2014). On the properties of neural machine translation: Encoder-decoder approaches. *arXiv preprint arXiv*, 1259-1409.
- 10 Damle, C., & Yalcin, A. (2007). Flood prediction using time series data mining. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 305-316.
- 11 Day, G. N. (1985). Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 111(2), 157-170.
- 12 Fang, X., & Yuan, Z. (2019). Performance enhancing techniques for deep learning models in time series forecasting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 533-542.
- 13 Fathi, P., Mohammadi, Y., & Homai, M. (2009). Intelligent modeling of monthly time series of input to Vahdat Dam in Sanandaj. *Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 23(1), 209-220 (In Persian)
- 14 Frank, R. J., Davey, N., & Hunt, S. P. (2001). Time series prediction and neural networks. *Journal of intelligent and robotic systems*, 31(1), 91-103.
- 15 Ghose, D. K. (2018). Measuring discharge using back-propagation neural network: a case study on Brahmani river basin. *Intelligent Engineering Informatics: Proceedings of the 6th International Conference on FICTA*, 591-598.
- 16 Hajizadeh Tahan, M., Ghasemzadeh, M., & Rezaeian, M. (2020). An evolutionary attention-based deep long short-term memory for time series prediction. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 11(4), 15-28. (In Persian)
- 17 Hosseinikhah, M., Zainiwand, H., Haqizadeh, A., & Tahmasabipour, N. (2013). Validation of temperature and precipitation values of general circulation models in Kermanshah Ravansar and West Islamabad stations. *Ecohydrology*, 1(3), 195-206 (In Persian)

- 18 Khalili, R., & Moridi, A. (2023). A Review of Artificial Intelligence Applications in Modeling and Removal Processes of Pollutants Soluble in Water and Wastewater. *Iran-Water Resources Research*, 19(1), 136-166. (In Persian)
- 19 Momeneh, S. (2022). Performance comparison of artificial intelligence models with IHACRES model in streamflow modeling of the Gamasiab River catchment. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(3), 1-16. (In Persian)
- 20 Muhammad, A. U., Li, X., & Feng, J. (2019). Using LSTM GRU and hybrid models for streamflow forecasting. In *International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications*, 510-524.
- 21 Management and Planning Organization of Iran. (2005). Regional balance between water resources and uses in catchment basins current and future status of water resources. *Office of Water Affairs Agriculture and Natural Resources Studies of Comprehensive Climate Adaptation Program*. (In Persian)
- 22 Samadi M. and Fathabadi A. (2019). Application of time series, ANN, and SVM models in forecasting the Gorgan Dam inflow rate. *J. Environ. Water Eng*, 4(4), 299-309. (In Persian)
- 23 Shafa'i Bejestan, M. (1999). Hydraulic precipitation. *Publications of Shahid Chamran University of Ahvaz* 496. (In Persian)
- 24 SohrabiBidar, A., & Aminnejad, M. (2015). Investigating the displacements of Jiroft concrete dam foundations using dam extensometers. *Iran Engineering Geology Association Journal*, 7(3-4), 95-102 (In Persian)
- 25 Swagatika, S., Paul, J. C., Sahoo, B. B., Gupta, S. K., & Singh, P. K. (2024). Improving the forecasting accuracy of monthly runoff time series of the Brahmani River in India using a hybrid deep learning model. *Journal of Water and Climate Change*, 15(1), 139-156.
- 26 Valipour, M., Banihabib, M. E., & Behbahani, S. M. R. (2013). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *Journal of hydrology*, 476, 433-441.
- 27 Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T., & Qiu, L. (2009). A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of hydrology*, 374(3-4), 294-306.
- 28 Zaytar, M. A., & El Amrani, C. (2016). Sequence to sequence weather forecasting with long short-term memory recurrent neural networks. *International Journal of Computer Applications*, 143(11), 7-11.
- 29 Zhang, B., & Govindaraju, R. S. (2000). Prediction of watershed runoff using Bayesian concepts and modular neural networks. *Water Resources Research*, 36(3), 753-762.