FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 2, Summer, (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Assessment of Groundwater Quality in the Ardabil Plain Using Multivariate Statistical Analyses and the IRWQIGT Index

Amirreza Nemati Mansour[1*]

[*]1. M.Sc. in Water Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[*]Email Address: amirreza.nemati@ut.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/05/09
Revised Date:
2025/07/05
Accepted Date:
2025/07/08
Published Date:
2025/08/09

Keywords:
Iranian Groundwater Quality Index,
Ardabil Plain aquifer,
Principal Component Analysis,
Hierarchical Cluster Analysis

ABSTRACT

This study aims to comprehensively assess the groundwater quality of the Ardabil Plain and identify the factors influencing it. For this purpose, quality data from 26 exploitation wells collected in 2024 were used. The research methodology included multivariate statistical analyses such as Hierarchical Cluster Analysis (HCA) and Principal Component Analysis (PCA), along with the calculation of the Iranian Groundwater Quality Index (IRWQIGT). Key findings indicated that groundwater quality in the Ardabil Plain is variable. HCA classified the wells into three main groups with different qualities, where wells in the northern and central regions exhibited better quality compared to those in the southern regions. PCA revealed that natural processes of salinization and mineralization (PC1) are the dominant factors controlling water quality. Furthermore, the second component (PC2) indicated the impact of anthropogenic activities, particularly agriculture and the introduction of heavy metals. The IRWQIGT map also showed that approximately 50% of the aquifer falls into the 'poor' quality category and 27% into the very poor category, predominantly concentrated in the southern and southeastern areas. Conversely, 19% of the aquifer exhibited 'good' quality and only 4% 'excellent' quality, primarily located in the northern part. The main results of the study indicate that the groundwater quality of the Ardabil Plain is influenced by a combination of natural factors and anthropogenic activities. While natural processes play the primary role, the increasing impact of human activities, especially regarding heavy metal contamination, is concerning and necessitates integrated management and continuous monitoring of the groundwater resources in this region.

Cite this article: Amirreza Nemati Mansour (2025). Assessment of Groundwater Quality in the Ardabil Plain Using Multivariate Statistical Analyses and the IRWQIGT Index**,** Journal of Environmental Sciences Studies, 10 (2), Pages 10363- 10376.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Groundwater is a vital freshwater source, particularly in arid and semi-arid regions like the Ardabil Plain in northwestern Iran, supporting drinking, agricultural, and industrial needs. However, increasing population, developmental activities, and climate change exert significant pressure on these resources. Groundwater quality is influenced by natural factors (e.g., geology, climate) and anthropogenic factors (e.g., pollutant infiltration, over-extraction). Changes in groundwater quality can adversely affect human health, agriculture, and ecosystems, making continuous aquifer quality assessment essential. This research aims to comprehensively evaluate the groundwater quality of the Ardabil Plain and identify influential factors using multivariate statistical analyses (Hierarchical Cluster Analysis - HCA, Principal Component Analysis - PCA) and the Iranian Groundwater Quality Index (IRWQIGT).

Materials and methods

The Ardabil Plain, 1500 km² in northwestern Iran, comprises Quaternary alluvial deposits hosting significant aquifers. The semi-arid climate features hot, dry summers and cold, wet winters. Agriculture (grains, potatoes, orchards) and animal husbandry are major economic activities. Groundwater quality data from 26 exploitation wells, monitored by the Ardabil Regional Water Organization, were utilized from spring 2024 sampling, following national standard protocols. Analyzed parameters included EC, sulfate, pH, TDS, calcium, magnesium, nitrate, lead, cadmium, arsenic, bicarbonate, sodium, potassium, and chloride. Python was used for data analysis. Descriptive statistics summarized the data. HCA (Ward's method, Euclidean distance) grouped wells with similar water quality. PCA identified main factors affecting water quality variations. The IRWQIGT assessed groundwater suitability for drinking, based on weighted parameters and rating curves.

Results and discussion

Groundwater quality in the Ardabil Plain was variable. HCA classified wells into three main clusters. Wells in northern and central regions (Cluster 1) generally exhibited better quality with lower salinity (lower EC, TDS, SO_4, Na, Cl) compared to southern region wells (Clusters 2 and 3), which showed higher concentrations, indicating greater mineralization and salinity. PCA identified two principal components (PC1, PC2) explaining 75% of total data variance. PC1, with high positive loadings for EC, TDS, SO_4, Na, Cl, Ca, Mg, HCO_3, and Pb, represented dominant natural salinization and mineralization processes. This suggests mineral dissolution from geological formations and evaporative salt concentration are primary controls on regional water quality. PC2 showed high positive loadings for K, Cd, and As, and high negative loading for pH, indicating secondary, likely anthropogenic, influences. Elevated potassium and nitrate in agricultural areas point to chemical fertilizer impacts, while heavy metals like cadmium and arsenic suggest potential contamination from industrial activities, waste disposal, or leaching from mineralized zones. The IRWQIGT map revealed significant spatial variations. Approximately 50% of the aquifer was 'poor' quality and 27% 'very poor', predominantly in southern and southeastern areas. Conversely, 19% showed 'good' quality and only 4% 'excellent', mainly in the north. These findings indicate serious quality challenges, particularly in southern regions where high salinity and heavy metal concentrations (notably lead) exceed drinking water standards.

Conclusion

Ardabil Plain's groundwater quality is influenced by combined natural hydrogeochemical processes (primarily salinization and mineralization) and anthropogenic activities. While natural processes are primary drivers, increasing human impacts, especially from agriculture (elevated nitrate, potassium) and potential industrial/urban pollution (heavy metal contamination), are significant concerns. A substantial portion of the aquifer, especially in southern/southeastern areas, has poor to very poor water quality, posing health risks if used untreated for drinking and limiting agricultural suitability. Given growing water demand and limited surface water, protecting the Ardabil Plain aquifer is crucial. Integrated water resource management, continuous monitoring, and a thorough understanding of hydrogeochemical processes are essential for sustainable groundwater utilization.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰، شماره ۲
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از تحلیل‌های آماری چندمتغیره و شاخص IRWQIGT

امیررضا نعمتی منصور[1*]

*۱- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*ایمیل نویسنده مسئول: amirreza.nemati@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۲/۱۹
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۴/۱۷
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۰۵/۱۸

کلید واژه ها:
شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT)، آبخوان دشت اردبیل، تحلیل مولفه‌های اصلی(PCA)، تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی(HCA)

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل و شناسایی عوامل مؤثر بر آن انجام شده است. بدین منظور، از داده‌های کیفی ۲۶ حلقه چاه بهره‌برداری در بهار ۱۴۰۱ استفاده گردید. روش‌شناسی پژوهش شامل تحلیل‌های آماری چندمتغیره نظیر تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی(HCA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی(PCA) به همراه محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT) بوده است. یافته‌های کلیدی نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در دشت اردبیل متغیر است. تحلیل خوشه‌ای، چاه‌ها را به سه گروه اصلی با کیفیت متفاوت تقسیم‌بندی کرد که چاه‌های مناطق شمالی و مرکزی کیفیت مطلوب‌تری نسبت به چاه‌های مناطق جنوبی داشتند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی مشخص کرد که فرآیندهای طبیعی شورزایی و کانی‌شدگی(PC1) عامل غالب کنترل‌کننده کیفیت آب هستند. همچنین، مؤلفه دوم(PC2) تأثیر فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و ورود فلزات سنگین را نشان داد. نقشه شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران نیز نشان داد که حدود ۵۰٪ آبخوان در رده کیفی بد و ۲۷٪ در رده بسیار بد قرار دارد که عمدتاً در نواحی جنوبی و جنوب شرقی متمرکز شده‌اند. در مقابل، ۱۹٪ آبخوان کیفیت خوب و تنها ۴٪ کیفیت بسیار خوب داشته که عمدتاً در شمال واقع شده‌اند. نتایج اصلی پژوهش بیانگر آن است که کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. در حالی که فرآیندهای طبیعی نقش اصلی را ایفا می‌کنند، تأثیر فزاینده فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در آلودگی به فلزات سنگین، نگران‌کننده است و نیازمند مدیریت یکپارچه و پایش مستمر منابع آب زیرزمینی این منطقه می‌باشد.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2025.522292.2373

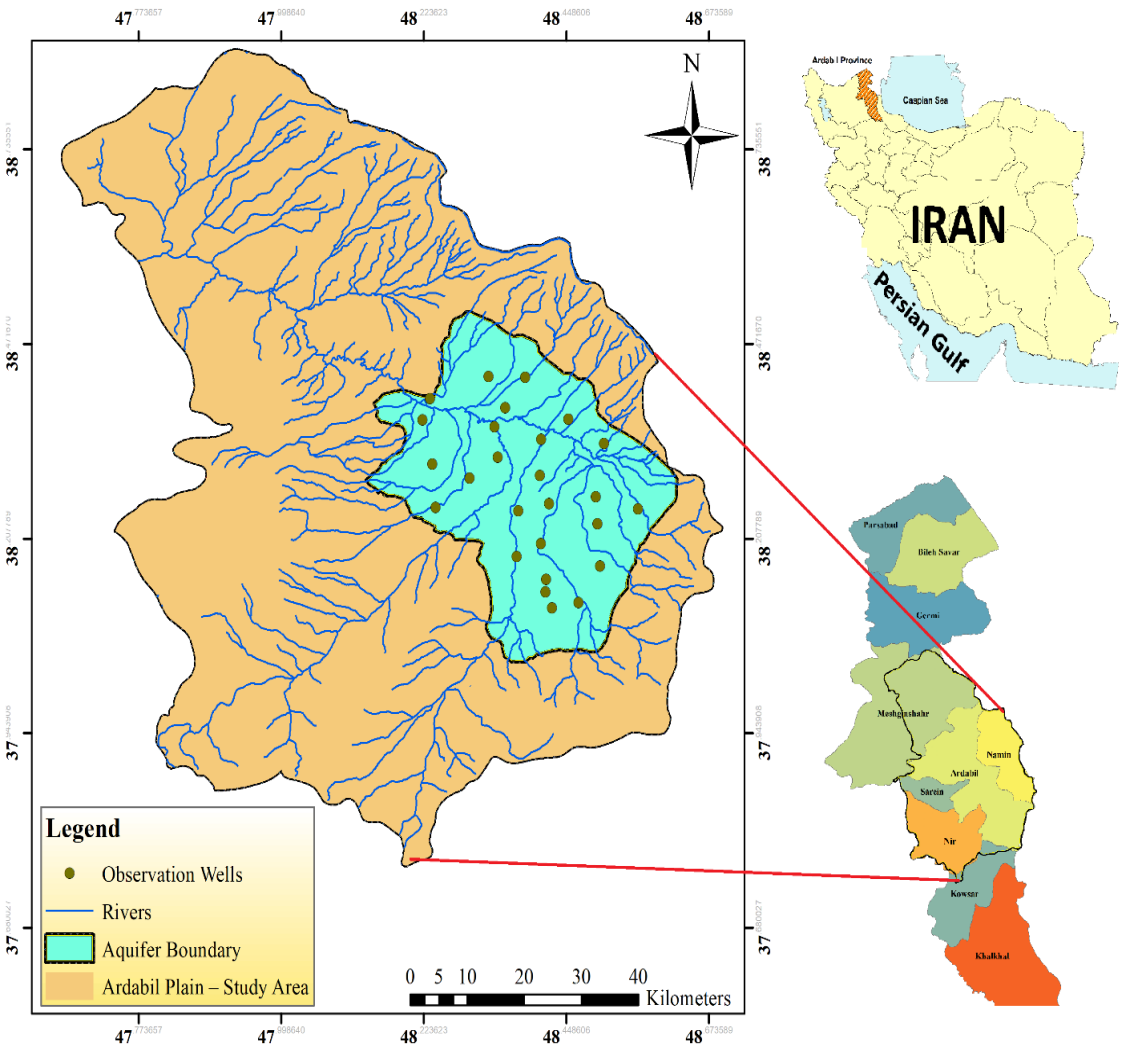
۱- مقدمه

آب زیرزمینی به عنوان منبع اصلی آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند دشت اردبیل در شمال غرب ایران، نقش حیاتی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت ایفا می‌کند. با این حال، افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌ها و تغییرات اقلیمی فشار فزاینده‌ای بر کمیت و کیفیت این منابع وارد می‌آورند. کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر عوامل طبیعی (زمین‌شناسی، بارندگی، تبخیر) و عوامل انسانی نظیر نفوذ آلاینده‌ها و برداشت بی‌رویه قرار دارد. تغییر کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان، کشاورزی و اکوسیستم‌ها داشته باشد. بنابراین ضروری است که کیفیت آبخوان‌ها به صورت مداوم مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف ایران با تهدیدهای قابل توجهی مواجه است. به عنوان مثال، در دشت‌های مرکزی و جنوبی مانند حوضه بهشت‌آباد، آلودگی‌های فصلی، به‌ویژه در فصل بارندگی، کیفیت آب آشامیدنی را تهدید می‌کند، که تأثیر شستشوی آلاینده‌های سطحی به سفره‌های زیرزمینی را برجسته می‌سازد. در استان اردبیل نیز، شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) پایین و سطوح بالای پارامترهایی نظیر TDS، کلر و سولفات، نگرانی‌هایی را برای ایمنی آب آشامیدنی ایجاد کرده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات در دشت‌های مرکزی، اصفهان و رفسنجان هم‌راستا است که افزایش شوری و غلظت سدیم را به عنوان عوامل کلیدی نامناسب بودن آب برای مصارف شرب و کشاورزی معرفی کرده‌اند. از منظر هیدروژئوشیمی، تحلیل‌های ترکیب یونی مانند نمودارهای پایپر، فرآیندهای طبیعی کنترل‌کننده کیفیت آب، نظیر هوازدگی سنگ‌ها و غالبیت یون‌هایی چون Na-SO4 را در مناطقی مانند شمال اصفهان آشکار ساخته‌اند. همچنین، تلفیق شاخص‌های کیفیت آب (WQI) با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و منطقه‌بندی کیفیت آب، به‌ویژه برای مصارف کشاورزی، در مناطقی چون کویر اصفهان به کار رفته است، که نشان‌دهنده محدودیت‌های کیفی گسترده در این مناطق است، به‌طوری‌که بیش از ۶۶ درصد از زمین‌های کشاورزی در کویر اصفهان با محدودیت‌های کیفی مواجه بوده‌اند. کیفیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل پیچیده قرار دارد که به‌طور کلی در دو دسته‌ی اصلی منابع انسانی (انسان‌زا) و منابع طبیعی طبقه‌بندی می‌شوند. شناسایی و درک این منابع برای توسعه‌ی استراتژی‌های مؤثر در زمینه‌ی مدیریت، پایش و اصلاح آلودگی‌های آب زیرزمینی اهمیت اساسی دارد. در حوزه‌ی منابع آلودگی انسان‌زا، فعالیت‌های کشاورزی در رتبه‌ی نخست قرار دارند. استفاده‌ی گسترده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها موجب ورود ترکیباتی نظیر نیترات، فسفات و مواد آلی آلاینده به سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. همچنین، تخلیه‌ی پساب‌های صنعتی به محیط، یکی دیگر از منابع مهم آلودگی به شمار می‌رود. در این زمینه، فلزات سنگین مانند آرسنیک و کادمیوم، به‌همراه ترکیبات آلی فرّار، از جمله آلاینده‌های رایج حاصل از فرایندهای صنعتی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، مدیریت نادرست پسماندهای شهری و دفن زباله، در نتیجه‌ی نفوذ شیرابه و آلودگی‌های میکروبی، موجب کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی می‌گردد. از سوی دیگر، عوامل طبیعی نیز می‌توانند به‌صورت قابل‌توجهی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی اثرگذار باشند. برای نمونه، ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند وجود ذخایر طبیعی گچ، نمک و سایر مواد معدنی می‌توانند به مرور در آب زیرزمینی حل شده و منجر به افزایش سختی یا شوری آن شوند. در مناطق ساحلی، پدیده‌ی نفوذ آب دریا به سفره‌های آب شیرین، یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود که منجر به افزایش شوری و کاهش کیفیت آب می‌گردد. در مجموع، اگرچه فعالیت‌های انسانی سهم غالب‌تری در آلودگی آب زیرزمینی دارند، نقش فرآیندهای طبیعی نیز نباید مغفول واقع شود. این هم‌پوشانی میان منابع آلودگی انسانی و طبیعی، پیچیدگی مدیریت منابع آب زیرزمینی را مضاعف ساخته و لزوم اتخاذ رویکردی جامع برای ارزیابی کیفیت این منابع را مبرهن می‌سازد. در همین راستا و با هدف ارائه پاسخی کارآمد به این چالش، پژوهش حاضر نوآوری خود را در به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های آماری چندمتغیره، شامل تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به همراه شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران برای ارائه یک ارزیابی جامع و دقیق از وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل متمرکز نموده است. این رویکرد یکپارچه، نه تنها شناسایی الگوهای مکانی تغییرات کیفیت آب و تعیین عوامل اصلی هیدروژئوشیمیایی کنترل‌کننده آن را امکان‌پذیر می‌سازد، بلکه به درک عمیق‌تری از فرآیندهای مؤثر بر سلامت این منابع حیاتی نیز منجر خواهد شد.

۲- روش انجام تحقیق

- **محدوده مورد مطالعه**

دشت اردبیل با وسعتی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران و در استان اردبیل واقع شده است. این دشت از نظر زمین‌شناسی شامل رسوبات آبرفتی کواترنری است که سفره‌های آب زیرزمینی مهمی را در خود جای داده است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب می‌باشد. فعالیت‌های عمده اقتصادی در این دشت شامل کشاورزی (به ویژه کشت غلات، سیب‌زمینی و محصولات باغی) و دامداری است. شکل۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده در دشت اردبیل

- **جمع‌آوری داده‌ها**

برای انجام این پژوهش، از داده‌های موجود پایش کیفیت آب زیرزمینی در دشت اردبیل استفاده شد. این داده‌ها شامل نتایج تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب برداشت شده از ۲۶ حلقه چاه بهره‌برداری منتخب از شبکه پایش سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل می‌باشد. لازم به ذکر است که این نمونه‌برداری در بهار ۱۴۰۱ توسط کارشناسان آن سازمان و بر اساس پروتکل‌های استاندارد ملی(موارد مندرج در سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵) صورت پذیرفته بود. پارامترهای کیفی آب زیرزمینی که در این مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت، شامل شامل EC، سولفات، pH، TDS، کلسیم، منیزیم، نیترات، سرب، کادمیم، آرسنیک، بی‌کربنات، سدیم، پتاسیم، و کلرید می‌باشند. لازم به ذکر است که به‌منظور اطمینان از صحت داده‌های کیفی آب، آزمون تعادل یونی برای تمامی چاه‌های منتخب بهره‌برداری انجام شد. چاه‌هایی که مقدار خطای تعادل یونی آن‌ها بیش از ±۵ درصد بود، به دلیل عدم انطباق نتایج آنالیز با معیارهای قابل قبول، از روند تحلیل حذف گردیدند. در نهایت، ۲۶ حلقه چاه که نتایج آن‌ها در محدوده مجاز قرار داشت، برای بررسی‌های بعدی انتخاب شدند.

جدول ۱. مشخصات چاه‌های نمونه‌برداری شده در دشت اردبیل

شماره چاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	عمق چاه (متر)	نوع چاه
Well_1	280892	4238104	85	بهره‌برداری
Well_2	280991	4234044	65	بهره‌برداری
Well_3	281201	4227644	120	بهره‌برداری
Well_4	257316	4250381	55	بهره‌برداری
Well_5	267194	4249043	90	بهره‌برداری
Well_6	267484	4244429	70	بهره‌برداری
Well_7	273588	4246965	110	بهره‌برداری
Well_8	263521	4241389	45	بهره‌برداری
Well_9	258711	4237136	135	بهره‌برداری
Well_10	270117	4231367	60	بهره‌برداری
Well_11	273082	4231267	100	بهره‌برداری
Well_12	274378	4237231	78	بهره‌برداری
Well_13	273648	4225855	52	بهره‌برداری
Well_14	278047	4222244	140	بهره‌برداری
Well_15	258472	4243678	95	بهره‌برداری
Well_16	258434	4253510	105	بهره‌برداری
Well_17	266574	4256618	40	بهره‌برداری
Well_18	273531	4223968	125	بهره‌برداری
Well_19	282223	4246116	88	بهره‌برداری
Well_20	273238	4241540	72	بهره‌برداری
Well_21	274370	4221560	115	بهره‌برداری
Well_22	286657	4236131	48	بهره‌برداری
Well_23	271653	4256361	130	بهره‌برداری
Well_24	269710	4229429	68	بهره‌برداری
Well_25	268756	4251880	98	بهره‌برداری
Well_26	277430	4249869	58	بهره‌برداری

جدول۲. مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی چاه‌های بهره‌برداری منتخب در دشت اردبیل

شماره چاه	Cl	K	Na	HCO3	As	Cd	Pb	NO3	Mg	Ca	TDS	Ph	SO4	EC
1	66.19	6.65	76.96	112.92	3.22	0.6	0.93	19.33	22.25	48.39	509.18	7.16	65.47	899.34
2	51.54	6.63	91.77	147.62	2.01	1.27	2.48	12.37	30.34	54.04	301.24	7.81	111.27	772.35
3	47.67	7.61	85.62	20.35	-0.12	0.61	1.78	4.04	24.69	68.86	478.03	8.02	81.98	929.54
4	63.66	5.04	67.55	109.02	1.65	0.73	2.71	13.28	32.37	51.75	535.71	7.97	91.25	1104.61
5	63.67	6.36	75.84	139.9	0.97	0.69	2.47	5.13	25.4	52.58	647.79	7.08	81.95	753.17
6	52.4	4.38	70.14	100.09	2.18	0.63	1.93	13.94	37.75	49.26	448.17	7.35	155.57	753.17
7	52.93	5.65	68.21	215.3	0.87	0.44	1.15	15.79	26.08	30.81	419.15	7.67	99.6	1115.84
8	63.48	4.74	96.99	92.79	1.41	0.65	0.49	5.9	28.39	49.73	449.82	7.99	68.27	953.49
9	43.93	6.24	98.93	150.2	2.5	0.47	2.33	17.78	40.69	60.72	737.31	7.61	182.9	859.16
10	44.67	7.49	72.68	175.88	2.87	0.63	4.28	14.48	26.38	89.56	649.31	7.73	101.17	1162.77
11	57.07	3.95	112.49	234.86	0.8	0.55	3.32	16.93	36.59	57.69	520.54	7.36	158.35	860.97
12	66.16	11.23	97.68	105.39	1.67	0.72	1.13	23.38	44.15	63.62	676.99	7.32	71.61	860.28
13	75.6	3.48	110.32	222.34	1.53	1.39	3.26	10.53	23.75	59.58	614.56	8.13	96.87	1072.59
14	96.56	2.96	105.74	170.46	1.35	0.14	3.58	7.48	36.29	45.98	745.3	8.34	157.87	426.02
15	85.44	8.9	69.28	125.83	3.77	0.91	1.67	6.66	36.82	73.71	494.69	7.77	179.54	482.52
16	67.12	7.98	76	190.79	2.4	0.22	3.23	7.11	40.47	69.02	550.85	8.2	156.85	831.31
17	79.62	8.87	122.42	199.95	0.99	0.71	4.12	14.46	28.87	81.87	721.58	8.22	243.06	1094.87
18	59.95	8.89	118.31	159.99	3.6	1.34	1.71	17.39	28.12	56.36	507.3	7.61	231.93	1625.7
19	79.63	6.96	99.37	193.49	5.05	0.93	4.72	16.94	44.7	91.04	859.22	8.22	161.29	1136.79
20	74.23	4.31	103.52	170.73	3.74	0.47	5.12	20.79	42.67	48.97	852.21	8.92	206.81	935.08
21	86.45	7.23	138.33	195.68	0.68	0.61	6.17	15.09	42.25	78.8	801.02	7.98	222.36	2086.26
22	63.46	4.97	82.25	223.11	1.92	1.17	6.11	25.17	43.12	102.86	753.08	8.94	313.43	1409.69
23	90.39	9.93	116.41	269.3	4.02	0.61	1.24	13.15	33.88	55.14	516.93	6.43	270.62	1527.01
24	110.65	6.56	93.93	128.11	1.65	0.99	2.12	34.04	42.09	61.51	715.87	8.49	144.22	930.1
25	77.82	4.52	93.47	296.65	3.03	0.92	5.03	19.38	42.64	71.49	731.46	8.05	269.45	1282.25
26	88.03	6.04	132.96	92.4	3.43	0.64	5.03	9	33.57	62.45	639.54	7.82	226.9	1544.37

- **روش‌های آماری و شاخص کیفیت آب**

داده‌های کیفی آب جمع‌آوری شده با استفاده از زبان برنامه نویسی Python مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. روش‌های آماری توصیفی (میانگین، انحراف معیار، دامنه تغییرات) برای خلاصه کردن داده‌ها استفاده شد. به منظور شناسایی گروه‌هایی از چاه‌ها با کیفیت آب مشابه، تحلیل خوشه‌ای[1] با استفاده از روش وارد[2] و فاصله اقلیدسی انجام شد. همچنین، برای تعیین عوامل اصلی مؤثر بر تغییرات کیفیت آب، تحلیل مؤلفه‌های اصلی[3] به کار گرفته شد. به‌منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی ایران[4] محاسبه شد. این شاخص که به‌طور ویژه برای بررسی وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی کشور ایران توسعه یافته است، بر اساس سه مرحله محاسبه می‌شود: ۱) انتخاب پارامترها و تعیین وزن آن‌ها بر اساس جدول۳، ۲) استخراج مقادیر شاخص هر پارامتر از منحنی‌های رتبه‌بندی و ۳) محاسبه شاخص نهایی با استفاده از رابطه (۱).

$$IRWQIGT = \left(\prod_{i=1}^{n} I_i^{W_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} W_i}} \quad (۱)$$

که در آن Wi وزن پارامتر i ام، Ii مقدار شاخص پارامتر i ام استخراج‌شده از منحنی‌های رتبه‌بندی و n تعداد کل پارامترها است.

جدول ۳. پارامترهای شاخص IRWQIGT و وزن های آن‌ها

ردیف	پارامتر	وزن	توضیحات
1	نیترات	0.151	بر حسب میلی‌گرم بر لیتر
2	کلیفرم مدفوعی	0.134	بر حسب ml/100MPN
3	هدایت الکتریکی	0.129	بر حسب میکروزیمنس بر سانتیمتر
4	سختی کل	0.103	بر حسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم
5	SAR	0.089	-
6	BOD	0.088	بر حسب میلی‌گرم بر لیتر
7	فسفات	0.085	بر حسب میلی‌گرم بر لیتر
8	COD	0.08	بر حسب میلی‌گرم بر لیتر
9	pH	0.074	واحد استاندارد
10	اکسیژن محلول	0.067	بر حسب درصد اشباع

۳- نتایج

- **خلاصه آماری پارامترهای کیفیت آب**

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل در جدول ۴ ارائه شده است. این جدول شامل حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار برای هر یک از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و غلظت یون‌های اصلی و فلزات سنگین اندازه‌گیری شده می‌باشد.

جدول ۴. خلاصه آماری پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل

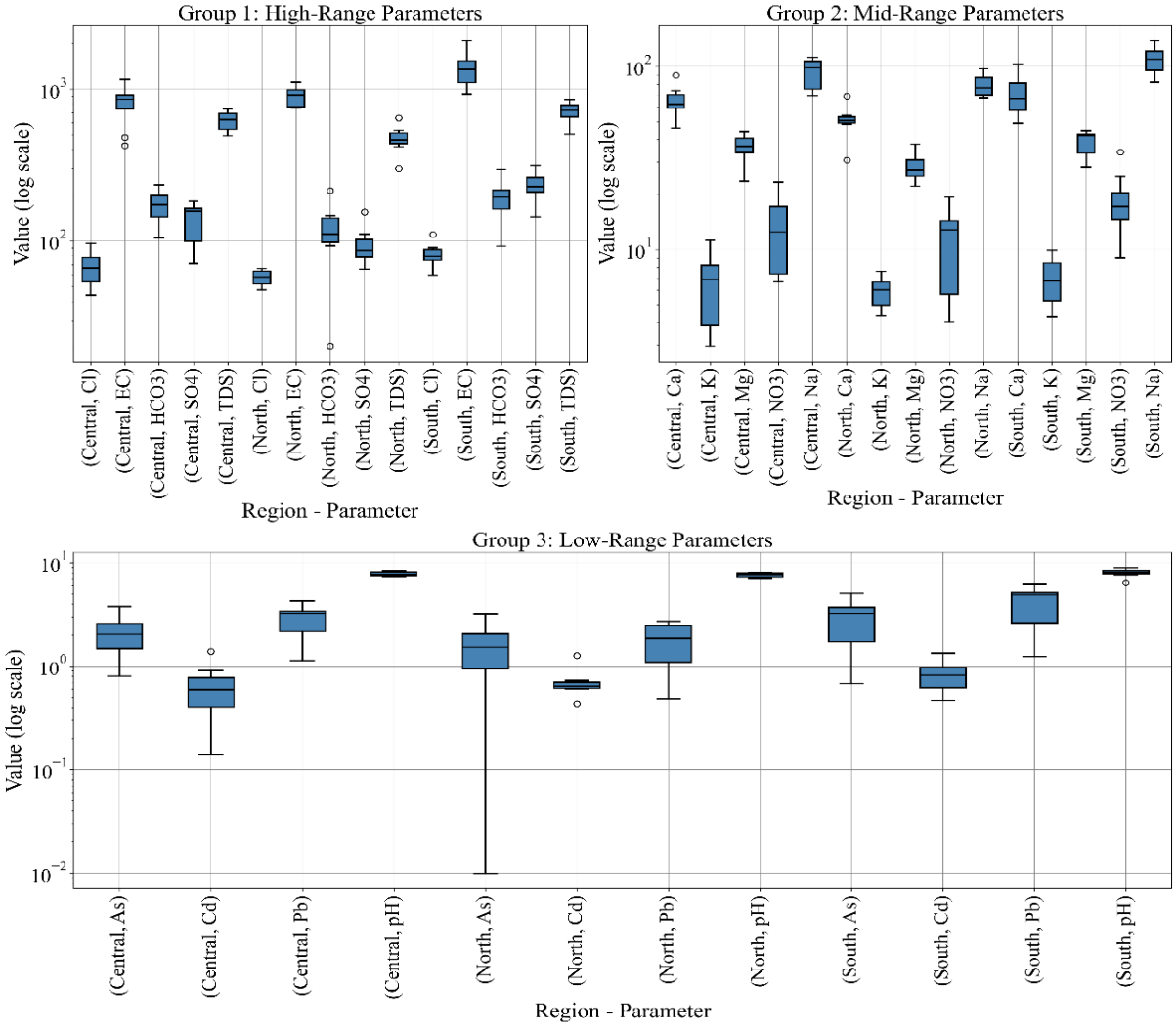
پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف از معیار
EC	426.02	2086.26	1054.2	362.49
SO4	65.47	313.43	159.64	71.31
pH	6.43	8.94	7.85	0.55
TDS	301.24	859.22	610.65	144.18
Ca	30.81	102.86	62.92	16.14
Mg	22.25	44.7	34.4	7.3
NO3	4.04	34.04	14.6	6.88
Pb	0.49	6.17	3	1.64
Cd	0.14	1.39	0.73	0.31
As	0.12	5.05	2.2	1.25
HCO3	20.35	296.65	163.2	61.68
Na	67.55	138.33	95.28	20.41
K	2.96	11.23	6.44	2.06
Cl	43.93	110.65	69.55	16.89

[1] Cluster Analysis
[2] Ward’s method
[3] Principal Component Analysis, PCA
[4] IRWQIGT

جدول ۴ نشان‌دهنده تنوع قابل توجهی در کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل است. پارامترهای کلیدی مرتبط با شوری نظیر هدایت الکتریکی (EC) و کل جامدات محلول (TDS) و همچنین سولفات(SO_4) ، دارای دامنه تغییرات وسیع و انحراف معیارهای بالایی هستند که نشان‌دهنده تفاوت زیاد در میزان املاح بین نمونه‌های مختلف آب است. غلظت نیترات (NO_3) و برخی فلزات سنگین نظیر سرب (Pb) و آرسنیک (As) نیز در برخی نقاط به مقادیر قابل توجهی می‌رسند که پتانسیل آلودگی را نشان می‌دهد. در مقابل، pH آب عمدتاً در محدوده خنثی تا کمی قلیایی (میانگین ۷٫۸۵) قرار دارد و تغییرات کمتری را نشان می‌دهد.

- **مقایسه منطقه‌ای پارامترهای کیفی آب**

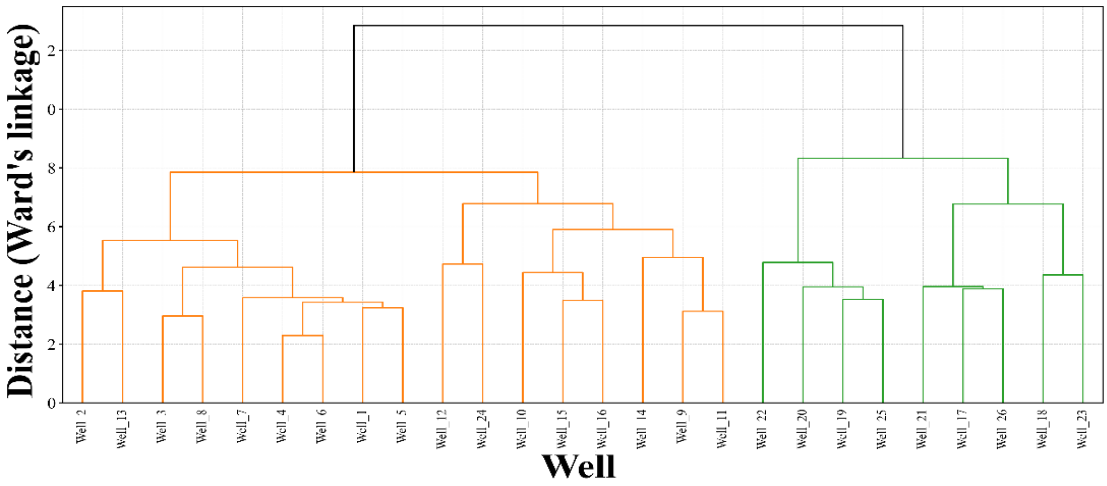
شکل ۲ توزیع غلظت پارامترهای کیفی آب زیرزمینی را در سه گروه (سطوح بالا، متوسط و پایین) و در سه منطقه جغرافیایی (مرکزی، شمالی و جنوبی) مقایسه می‌کند. این نمودارها با مقیاس لگاریتمی ترسیم شده‌اند تا امکان نمایش دقیق‌تر اختلافات بین مقادیر بسیار بزرگ و بسیار کوچک فراهم شود. در گروه نخست شامل پارامترهایی مانند TDS، EC، HCO_3 و SO_4، غلظت‌ها در منطقه جنوبی به‌طور معناداری بالاتر از مناطق مرکزی و شمالی است. این امر می‌تواند ناشی از افزایش بار املاح محلول در این ناحیه باشد که احتمالاً به شرایط زمین‌شناسی خاص یا فعالیت‌های انسانی نظیر آبیاری و استفاده از کودهای شیمیایی مرتبط است.در گروه دوم شامل Ca، Mg، NO_3 و K نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه برای نیترات که غلظت بالای آن در منطقه جنوبی می‌تواند بیانگر نفوذ آلاینده‌های کشاورزی به سفره‌های آب زیرزمینی باشد. در گروه سوم که شامل فلزات سنگین مانند Pb، Cd و As است، با وجود مقادیر پایین، تفاوت‌های منطقه‌ای مشهود است. به‌طور خاص، منطقه شمالی در برخی موارد مانند غلظت Cd دارای مقادیر بالاتری است که می‌تواند نشان‌دهنده احتمال وجود منابع آلودگی خاص در این ناحیه باشد.به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که منطقه جنوبی دشت، به‌ویژه از نظر املاح محلول و یون‌های اصلی، دارای بار کیفی بالاتری است که می‌تواند بر قابلیت بهره‌برداری و مدیریت منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد. اختلافات غلظتی میان مناطق مختلف می‌تواند مبنای مناسبی برای تدوین راهبردهای مدیریتی هدفمند در سطح منطقه‌ای باشد.



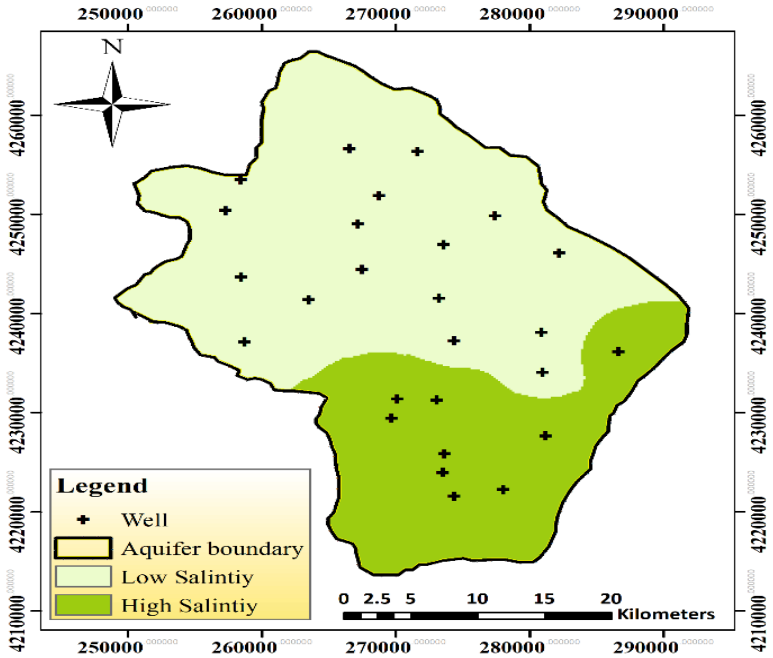
شکل ۲. نمودار جعبه‌ای مقایسه پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در مناطق مختلف دشت اردبیل

- **تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و پراکنش مکانی خوشه‌ها**

نتایج تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بر اساس ویژگی‌های شیمیایی آب چاه‌ها (شکل ۳) نشان داد که چاه‌های مورد بررسی به سه خوشه مجزا تقسیم می‌شوند. خوشه اول که بزرگ‌ترین گروه را تشکیل می‌دهد، شامل چاه‌های ۱ تا ۱۶ است و در دندروگرام با رنگ نارنجی مشخص شده است .خوشه‌های دوم و سوم که به‌ترتیب شامل چاه‌های ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۵ و ۱۷، ۱۸، ۲۱، ۲۳، ۲۶ هستند، با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. الگوی پراکنش مکانی خوشه‌ها (شکل ۴) نشان‌دهنده‌ی تفاوت مشخص کیفی در سطح دشت است. چاه‌های خوشه اول (کم‌املاح) عمدتاً در مناطق شمالی و مرکزی واقع شده‌اند و با رنگ سبز در نقشه پراکنش مشخص‌اند. این چاه‌ها دارای مقادیر پایین‌ترEC، TDS، SO_4، Na و Cl هستند که بیانگر کیفیت بهتر و شوری کمتر آب در این نواحی است. در مقابل، چاه‌های خوشه‌های دوم و سوم (پراملاح) در بخش جنوبی واقع شده و با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. این گروه‌ها غلظت بالاتری از پارامترهای شیمیایی فوق‌الذکر را نشان می‌دهند که حاکی از کانی‌شدگی بیشتر و افزایش شوری در این ناحیه است. علی‌رغم قرارگیری هر دو خوشه در منطقه جنوبی، تفاوت‌هایی در ترکیب شیمیایی آن‌ها مشاهده می‌شود که منجر به تفکیک آن‌ها در خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی شده است. به‌طور کلی، توزیع مکانی خوشه‌ها بیانگر همبستگی قوی بین کیفیت شیمیایی آب و موقعیت جغرافیایی چاه‌ها بوده و وجود زون‌بندی هیدروژئوشیمیایی مشخص در آبخوان مورد مطالعه را تأیید می‌کند.



شکل ۳. دندروگرام حاصل از تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی چاه‌های نمونه‌برداری شده



شکل۴. تقسیم‌بندی مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل بر اساس تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی

- **تحلیل مؤلفه‌های اصلی**

تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های کیفیت شیمیایی آب چاه‌ها(جدول ۵) منجر به استخراج دو مؤلفه اصلی (PC1 و PC2) شد که در مجموع حدود ۷۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمودند. تفسیر این مؤلفه‌ها، بینش ارزشمندی در خصوص فرایندهای اصلی کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه فراهم می‌آورد. مؤلفه اصلی اول(PC1) فرایند غالب شورزایی و کانی‌شدگی طبیعی در آبخوان را بازتاب می‌دهد. این مؤلفه با بارهای عاملی مثبت و بالا برای پارامترهای اصلی مرتبط با شوری و مجموع املاح محلول نظیر SO_4، TDS، EC، Na، Cl، Ca، Mg وHCO_3 مشخص می‌شود. این ترکیب شیمیایی نشانگر تأثیر فرایندهای طبیعی هیدروژئوشیمیایی شامل انحلال کانی‌ها از سنگ‌های سازند زمین‌شناسی و غلظت‌یابی املاح ناشی از تبخیر است که عامل اصلی کنترل‌کننده تفاوت‌های منطقه‌ای در شوری و کانی‌شدگی طبیعی آب در پهنه آبخوان محسوب می‌شود. حضور بار عاملی مثبت قابل توجهی برای سرب(Pb) نیز در این مؤلفه دیده شد که نیازمند بررسی دقیق‌تر ارتباط آن با منابع طبیعی یا عوامل دیگر در مناطق با شوری بالاتر است. مؤلفه اصلی دوم(PC2) الگویی متفاوت، مرتبط با تأثیرات ثانویه و احتمالا انسان‌ساخت را نشان می‌دهد. این مؤلفه با بارهای عاملی مثبت و بالای پتاسیم(K) و بارهای عاملی منفی و بالایpH ، به همراه بارهای عاملی مثبت کادمیم(Cd) و آرسنیک(As) مشخص می‌شود، در حالی که پارامترهای اصلی شوری سهم ناچیزی در آن دارند. این ترکیب شیمیایی کمتر با فرایندهای غالب طبیعی شورزایی ارتباط دارد و بیشتر نشانگر تأثیرات موضعی یا ثانویه است. به عنوان مثال، بار عاملی بالای K معمولاً با ورود آلاینده‌های مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی (مانند کودها) و حضور همزمان فلزات کمیاب مانند Cd و As با منابع آلودگی انسان‌ساخت دیگر (مانند پساب‌های صنعتی یا شهری) مرتبط است که می‌توانند الگوی شیمیایی آب را تغییر دهند. بنابراین، مؤلفه دوم نشانگر مجموعه‌ای از عوامل است که بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارند و به نظر می‌رسد بخشی از آن‌ها با فعالیت‌های سطحی یا منابع آلودگی انسان‌ساخت مرتبط بوده و باعث ایجاد تنوع در کیفیت آب، مستقل از فرایند غالب طبیعی، می‌شوند.

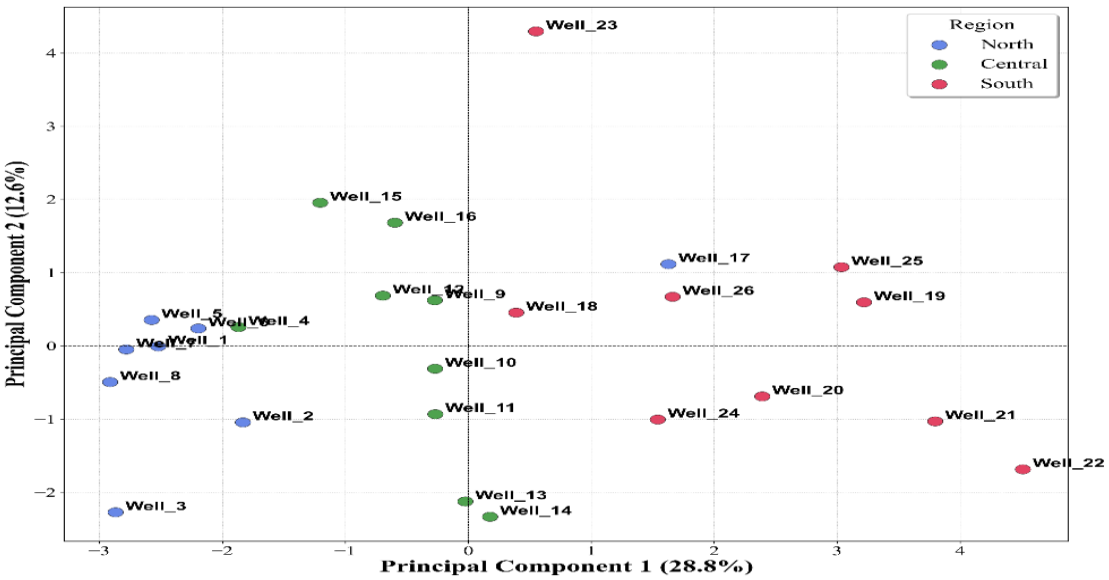
جدول ۵. ماتریس بار عاملی[5] برای مؤلفه‌های اصلی

پارامتر	PC1	PC2
EC	0.56	0.52
SO4	0.81	0.24
pH	0.51	-0.67
TDS	0.8	-0.31
Ca	0.64	0.07
Mg	0.68	-0.21
NO3	0.49	0.02
Pb	0.84	-0.3
Cd	0.2	0.37
As	0.34	0.38
HCO3	0.56	0.15
Na	0.54	0.32
K	-0.02	0.73
Cl	0.52	0.02

شکل ۵ نمودار پراکنش چاه‌های مورد مطالعه را بر اساس امتیازات حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PC1 در محور افقی و PC2 در محور عمودی) نشان می‌دهد. نمونه‌ها بر اساس منطقه جغرافیایی (شمالی: آبی، مرکزی: سبز، جنوبی: قرمز) رنگ‌بندی شده‌اند. این نمودار الگوهای مشخصی را در توزیع نمونه‌ها آشکار می‌سازد که مؤید نتایج تحلیل بارهای عاملی و خوشه‌بندی است. تفکیک اصلی در امتداد مؤلفه اول(PC1)، یک تمایز فضایی و هیدروژئوشیمیایی بسیار واضح را نمایان می‌سازد. چاه‌های مناطق شمالی و مرکزی (آبی و سبز) عمدتاً در سمت چپ نمودار(PC1 پایین) و چاه‌های منطقه جنوبی (قرمز) در سمت راست(PC1 بالا) متمرکز شده‌اند. این الگو به وضوح تأییدکننده نقش غالبPC1(مرتبط با پارامترهای شوری نظیر EC, TDS, SO_4, Na, Cl و Pb) در تفکیک چاه‌های کم‌املاح شمالی و مرکزی از چاه‌های پراملاح جنوبی است و با نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی و پراکندگی فضایی خوشه‌ها انطباق کامل دارد. در مقابل، پراکنش نمونه‌ها در امتداد مؤلفه دوم(PC2) به‌ویژه در میان چاه‌های منطقه جنوبی، تنوع بیشتری را نشان می‌دهد. این پراکنش بیانگر تأثیر عوامل ثانویه (مرتبط با پارامترهای K و pH با بارهای بالا و Cd و As با بارهای متوسط در PC2) است که باعث ایجاد تفاوت‌های ظریف‌تر در کیفیت آب، خصوصاً در منطقه پراملاح جنوبی شده و به تفکیک خوشه‌های داخلی این منطقه کمک می‌کند. به طور کلی، نمودار PCA به

[5] Factor Loading

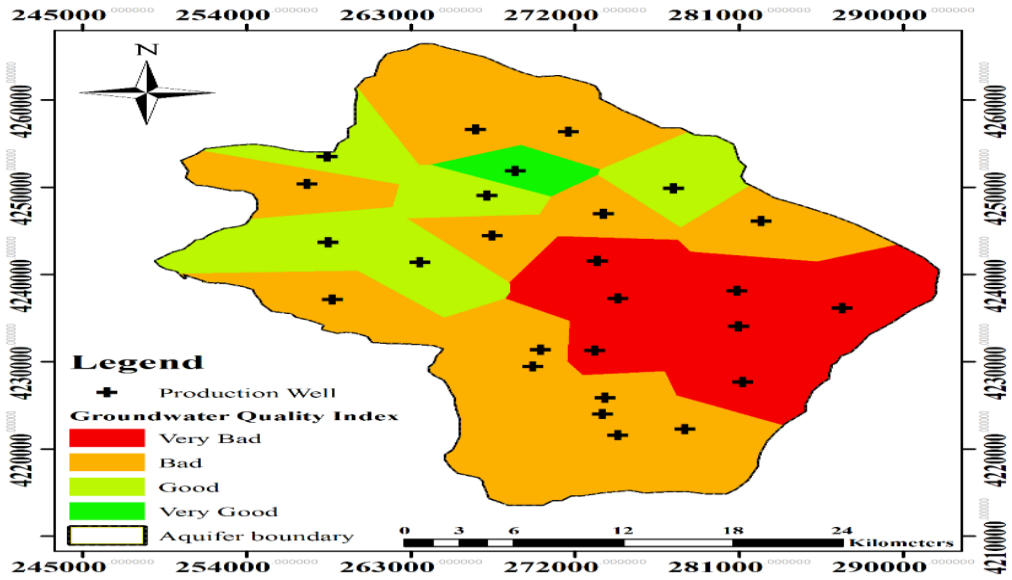
خوبی نمایش می‌دهد که چگونه دو عامل اصلی هیدروژئوشیمیایی، کیفیت شیمیایی آب را کنترل کرده و منجر به تشکیل گروه‌های متمایز از چاه‌ها با ویژگی‌های شیمیایی مشابه و پراکندگی مکانی مشخص شده‌اند. نزدیکی نقاط در این فضای کاهش‌یافته، نشان‌دهنده شباهت هیدروژئوشیمیایی میان چاه‌ها و اشتراک در منشأ یا فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب آن‌ها است و یک نمایش بصری قدرتمند از ساختار داده‌های کیفی آب منطقه ارائه می‌دهد.



شکل۵. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی چاه های بهره برداری در آبخوان دشت اردبیل

- **پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT)**

با توجه به شکل ۶ که پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT) دشت اردبیل را نشان می‌دهد، وضعیت کیفیت آب در مناطق مختلف دشت متفاوت است. متأسفانه، بخش قابل توجهی از آبخوان، معادل ۵۰ درصد، در رده کیفی بد قرار دارد که عمدتاً در نواحی جنوبی و بخش‌هایی از شمال دشت مشاهده می‌شود. در مقابل، ۱۹ درصد از آبخوان کیفیت خوب را داراست. وضعیت در نواحی جنوب شرقی دشت نگران‌کننده‌تر است، به طوری که ۲۷ درصد از آبخوان در رده بسیار بد طبقه‌بندی شده و محدودیت‌های جدی برای بهره‌برداری از آب در این مناطق ایجاد کرده است. تنها ۴ درصد از آبخوان، واقع در ناحیه شمالی، کیفیت بسیار خوب را نشان می‌دهد. به طور کلی، تحلیل نقشهIRWQIGT نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی و مرکزی دشت در وضعیت بهتری قرار دارد، در حالی که با حرکت به سمت جنوب و جنوب شرق، یک افت محسوس در کیفیت آب رخ داده و به رده‌های بد و بسیار بد می‌رسد. تمرکز چاه‌های با کیفیت پایین، مشخص شده با رنگ‌های نارنجی و قرمز، در نیمه جنوبی دشت قابل توجه است که احتمالاً تحت تأثیر عوامل طبیعی یا فعالیت‌های انسانی در این نواحی قرار دارد.



شکل ۶. نقشه توزیع مکانی شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT) در دشت اردبیل

۴- بحث

این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری، شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی(PCA) و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی(HCA) به بررسی جامع عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی و الگوهای مکانی آن در دشت اردبیل پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده، بینش عمیقی نسبت به فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی غالب و تأثیرات بالقوه فعالیت‌های انسانی در این آبخوان فراهم می‌آورد. نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نشان‌دهنده خوشه‌بندی هیدروژئوشیمیایی مشخص با سه خوشه متمایز در منطقه است. چاه‌های واقع در مناطق شمالی و مرکزی(خوشه اول) دارای کیفیت آب مطلوب‌تر با غلظت پایین‌تر املاح هستند، درحالی‌که چاه‌های جنوبی(خوشه‌های دوم و سوم) از نظر پارامترهایی همچون EC کل جامدات محلول، سولفات، سدیم و کلرید مقادیر به مراتب بالاتری را نشان می‌دهند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی آشکار ساخت که فرایند طبیعی شورزایی و کانی‌شدگی، عامل غالب در تعیین کیفیت آب زیرزمینی(PC1 با توان تبیین حدود ۷۵٪ از واریانس کل) است. این تفاوت مکانی آشکار در کیفیت آب را می‌توان با عوامل متعددی تبیین نمود. از جمله، ساختار زمین‌شناسی منطقه نقش مهمی دارد، نقشه‌های زمین‌شناسی بیانگر حضور رسوبات تبخیری و سازندهای حاوی املاح محلول در مناطق جنوبی دشت است که می‌تواند منشأ طبیعی یون‌های محلول باشد. همچنین، با توجه به جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب، آب‌های زیرزمینی در مناطق جنوبی زمان ماندگاری بیشتری داشته و فرصت طولانی‌تری برای واکنش با مواد زمین‌شناسی و انحلال املاح دارند که افزایش تدریجی غلظت یون‌ها در امتداد مسیر جریان را توجیه می‌کند. علاوه بر فرایندهای طبیعی، مؤلفه اصلی دوم(PC2) با بارهای عاملی مثبت و بالای پتاسیم بارهای عاملی منفی و بالای pH و بارهای عاملی مثبت و متوسط کادمیم و آرسنیک نشان‌دهنده تأثیرات ثانویه و احتمالاً انسان‌ساخت بر کیفیت آب زیرزمینی است. یکی از این تأثیرات به فعالیت‌های کشاورزی مربوط می‌شود. غلظت بالای پتاسیم و تا حدودی نیترات در مناطق با کاربری کشاورزی متمرکز، احتمالاً ناشی از کاربرد گسترده کودهای شیمیایی(به‌ویژه کودهای پتاسه و نیتراته) است. همچنین، حضور فلزات سنگین مانند کادمیم و آرسنیک با الگوی مکانی متفاوت از شوری کلی آب، به منابع آلاینده نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای، احتمالاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، دفع نامناسب پساب‌های شهری یا صنعتی، یا آبشویی از مناطق معدنی، اشاره دارد. نگران‌کننده‌تر اینکه در برخی نقاط، غلظت این فلزات سنگین از حدود مجاز استانداردهای ملی و بین‌المللی فراتر رفته است که مخاطرات بالقوه‌ای برای سلامت عمومی به همراه دارد. عامل دیگر، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است که به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی، منجر به افت سطح آب، تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی و ورود آب‌های با کیفیت نامطلوب از لایه‌های عمیق‌تر یا مناطق همجوار می‌شود. مطالعات فرونشست زمین در دشت اردبیل که گویای افت قابل ملاحظه سطح آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر است، این تأثیر منفی بر کیفیت آب را نیز تأیید می‌کند. نتایج شاخص کیفیت آب زیرزمینی ایران(IRWQIGT) حاکی از آن است که تقریباً ۵۰٪ آبخوان دشت اردبیل در رده کیفی بد، ۲۷٪ در رده بسیار بد(عمدتاً در جنوب و جنوب شرق)، ۱۹٪ در رده خوب و تنها ۴٪ در رده بسیار خوب(عمدتاً در شمال) قرار دارند. این یافته‌ها بیانگر چالش‌های کیفی جدی و محدودیت‌هایی برای مصارف مختلف است. مطابق استانداردهای ملی آب آشامیدنی(استاندارد ۱۰۵۳) و رهنمودهای سازمان بهداشت جهانی، بخش قابل توجهی از آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق جنوبی، برای مصرف شرب بدون تصفیه مناسب نیستند، زیرا غلظت بالای املاح محلول، فلزات سنگین(به‌طور خاص، غلظت سرب با میانگین ۳ میلی‌گرم بر لیتر که به مراتب بالاتر از حد مجاز ۰،۰۱ میلی‌گرم بر لیتر است) و یون‌های سدیم و کلرید می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد. در بخش کشاورزی نیز، شوری بالای آب در بخش‌های جنوبی(EC بالا) منجر به کاهش عملکرد محصولات حساس به شوری، تجمع نمک در خاک و تخریب تدریجی ساختار خاک می‌شود. از نظر پیامدهای اکولوژیکی، کیفیت نامطلوب آب زیرزمینی می‌تواند اثرات منفی بر اکوسیستم‌های وابسته به آن، از جمله چشمه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌های تغذیه‌شونده از آب زیرزمینی داشته باشد و افزایش غلظت فلزات سنگین و شوری می‌تواند تنوع زیستی این اکوسیستم‌ها را به مخاطره اندازد. با توجه به چالش‌های کیفی شناسایی‌شده، راهکارهای مدیریتی برای حفاظت و بهبود کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل پیشنهاد می‌شود. این راهکارها شامل اتخاذ رویکرد مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با هدف کاهش فشار بر آبخوان و جلوگیری از افت بیشتر سطح آب، استقرار شبکه پایش منظم و جامع کیفیت آب زیرزمینی با تمرکز ویژه بر مناطق بحرانی و آلاینده‌های کلیدی مانند فلزات سنگین، بهینه‌سازی الگوی کشت از طریق ترویج محصولات متناسب با کیفیت آب و اصلاح الگوی مصرف کودهای شیمیایی برای کاهش بار آلاینده‌های کشاورزی، ارتقای سیستم‌های تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی برای جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به آب زیرزمینی، و اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی هدفمند در مناطق با کیفیت مطلوب آب با هدف تعادل‌بخشی کمی و کیفی آبخوان است.

۵- محدودیت‌های این مطالعه

این مطالعه، علی‌رغم رویکرد جامع روش‌شناختی، با محدودیت‌هایی همراه بوده که می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. عدم وجود داده‌های سری زمانی، یعنی آنالیزها بر روی داده‌های بهار ۱۴۰۱ تنها تصویری مقطعی از وضعیت کیفی آب ارائه می‌دهد و بررسی تغییرات و روندهای زمانی نیازمند داده‌های سری زمانی است. همچنین، عدم قطعیت در منشأیابی دقیق آلاینده‌ها وجود دارد. اگرچه تحلیل‌های آماری چندمتغیره امکان شناسایی منابع احتمالی را فراهم آورد، منشأیابی دقیق نیازمند مطالعات ایزوتوپی و تکنیک‌های پیشرفته ردیابی آلودگی است. محدودیت دیگر، مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری شده است. برخی پارامترهای کیفی مهم مانند آلاینده‌های آلی، آفت‌کش‌ها و هیدروکربن‌ها در این مطالعه سنجش نشدند که می‌توانست تصویر جامع‌تری ارائه دهد. در نهایت، کمبود اطلاعات هیدروژئولوژیکی دقیق درباره ساختار آبخوان، لایه‌بندی، ضرایب هیدرودینامیکی و الگوهای جریان آب زیرزمینی، درک کامل فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب را با چالش مواجه می‌سازد.

۶- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی(زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه) و فعالیت‌های انسانی(کشاورزی، صنعت و برداشت بی‌رویه آب) قرار دارد. اگرچه فرایندهای طبیعی شورزایی عامل اصلی تعیین‌کننده کیفیت آب زیرزمینی این منطقه هستند، اما تأثیر فزاینده فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در ارتباط با افزایش غلظت برخی یون‌ها، نیازمند توجه جدی مدیریتی است. با توجه به روند رو به افزایش تقاضای آب و محدودیت منابع آب سطحی، اهمیت حفاظت کیفی و کمی از آبخوان دشت اردبیل به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب منطقه، بیش از پیش نمایان می‌شود. اتخاذ رویکردهای مدیریتی یکپارچه، مبتنی بر پایش مستمر و شناخت دقیق فرایندهای هیدروژئوشیمیایی، پیش‌نیاز اساسی برای دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی این دشت است.

منابع

- Amirahmadi, A., Maali Ahari, N. & Ahmadi, T. (2014). Identification of Potential Land Subsidence Areas in Ardabil Plain Using GIS. Journal of Geography and Planning, 17(46), 1–23. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_802.html
- Asadi, E., Isazadeh, M., Samadianfard, S., Ramli, M. F., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Hajnal, E. & Chau, K.-W. (2019). Groundwater quality assessment for sustainable drinking and irrigation. Sustainability, 12(1), 177.
- Azizi, N., Binalloo, R. S., Marasht, R. H., Soleymani, M. & Roudbari, A. (2017). Assessment and Spatial Distribution of Mineral Groundwater Quality in Ardabil Province, Iran. International Journal of Health Studies (Undergoing Change to Shahroud Journal of Medical Sciences).
- Basharat, U., Zhang, W., Baloch, M. Y. J., Abbasi, A., Ali, B., Khan, S. M., Khan, S. H., Niaz, A. & Irshad, M. (2023). Review Paper Presence and Dispersion of Organic and Inorganic Contaminants in Groundwater. Sustain. Environ, 8, 71.
- Danielopol, D. L., Griebler, C., Gunatilaka, A. & Notenboom, J. (2003). Present state and future prospects for groundwater ecosystems. Environmental Conservation, 30(2), 104–130.
- Gharahi, N. & Zamani-Ahmadmahmoodi, R. (2020). Evaluation of groundwater quality for drinking purposes: a case study from the Beheshtabad Basin, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. Environmental Earth Sciences, 79(4), 82.
- Ghorbani, Z., Khosravi, A., Maghsoudi, Y., Mojtahedi, F. F., Javadnia, E. & Nazari, A. (2022). Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. Scientific Reports, 12(1), 13998.
- Hosseininia, M. & Hassanzadeh, R. (2023). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydrochemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. Applied Water Science, 13(3), 84.
- Hou, L., Qi, Q., Zhou, Q., Lv, J., Zong, L., Chen, Z., Jiang, Y., Yang, H., Jia, Z., Mei, S. & others. (2024). Shallow Groundwater Quality Assessment and Pollution Source Apportionment: Case Study in Wujiang District, Suzhou City. Water (20734441), 16(21).
- Jibitha, J. B. & Joseph, S. (n.d.). Sources of Groundwater Contamination: A Review.
- Kayastha, V., Patel, J., Kathrani, N., Varjani, S., Bilal, M., Show, P. L., Kim, S.-H., Bontempi, E., Bhatia, S. K. & Bui, X.-T. (2022). New Insights in factors affecting ground water quality with focus on health risk assessment and remediation techniques. Environmental Research, 212, 113171.
- Khelfi, A. (2019). Sources of Groundwater Pollution. In Advanced Treatment Techniques for Industrial Wastewater (pp. 177–210). IGI Global.
- Kupa, E., Adanma, U. M., Ogunbiyi, E. O. & Solomon, N. O. (2024). Groundwater quality and

agricultural contamination: A multidisciplinary assessment of risk and mitigation strategies. World Journal of Advanced Research and Reviews, 22(2), 1772–1784.

- Lan, T., Wang, F., Bao, S., Miao, J., Bai, Y., Jia, S. & Cao, Y. (2023). The human health risk assessment and countermeasures study of groundwater quality. Environmental Geochemistry and Health, 45(6), 3215–3228.
- Pazand, K., Hezarkhani, A., Ghanbari, Y. & Aghavali, N. (2012). Groundwater geochemistry in the Meshkinshahr basin of Ardabil province in Iran. Environmental Earth Sciences, 65, 871–879.
- Rezaei, A. & Hassani, H. (2018). Hydrogeochemistry study and groundwater quality assessment in the north of Isfahan, Iran. Environmental Geochemistry and Health, 40, 583–608.
- Zamani, N., Javaheri-Tehrani, M., Feizi, M., Ostad-Ali-Askari, K., Eslamian, S. & Singh, V. P. (2018). Qualitative Assessment of Water Resources in Isfahan Desert Basin for Irrigation, Isfahan, Iran.