

Determination of Sources of Groundwater Pollution in the Southern Plain of Arak by Contamination Indices and Fractal Geometry Methods

Feridon Ghadimi ^{1*}, Pegah Javadi Sharif ²

¹ Associate Professor, Department of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

² M.A Graduated, Arak University of Technology, Arak, Iran

Abstract

The southern plain of Arak with 47 wells is used to provide part of Arak drinking water. The assessment of the quality of water in terms of chemical constituents and toxic metals and their origin are important issues in this plain. About 52% of wells have Ca-HCO₃, 26% Ca-Cl and 20% Na-Cl type. The maximum concentration of some of the compounds, including NO₃, Na, Ca, Mg, PO₄, HCO₃, SO₄ and Cl, indicates that they are higher than Iranian drinking water standard and WHO standard. On the other hand, by determining the pollution indices in heavy metals, it was found that the waters have good drinking quality. Since the region's waters are desirable compared to drinking water standards, but the fractal threshold examination showed that the concentration of chemical constituents in most waters is higher than normal and is at the threshold of contamination. This study showed that chemical compounds are the result of two natural contaminants (weathering, and chemical dissolution of carbonate rocks and saline water penetration) along with human contamination. The high concentrations of Ca, HCO₃ and Mg in the Arak plain are due to the dissolution of calcareous and dolomitic rocks of southern highlands. The high concentrations of Na, SO₄ in the Aman-abad plain are due to the influence of saline water in the Mighan wetland of Arak. Also, the landfill of Amanabad plain, the wastewaters of the industrial park and the city in Arak plain are the source of toxic metals such as Cu, Zn, As and Pb in the regional waters.

Key words: Groundwater, Chemical Compositions, Fractal, Pollution Index, Arak Plain.

* ghadimi@arakut.ac.ir

تعیین منابع آلاینده شیمیایی آب زیرزمینی دشت جنوبی اراک به روش‌های شاخص آلودگی و هندسه فراکتال

فریدون قدیمی^{*}، دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
پگاه جوادی شریف، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

وصول: ۱۳۹۸/۰۳/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳، صص ۵۴-۳۵

چکیده

دشت جنوبی اراک با ۴۷ حلقه چاه برای تأمین بخشی از آب شرب شهر استفاده می‌شود. ارزیابی کیفی آب از نظر ترکیبات شیمیایی و فلزات مسمومیت‌زا و تعیین منشأ آنها از مسائل جالب توجه در این دشت است. ۵۲ درصد از آب این چاه‌ها تیپ Ca-HCO_3 ، ۲۶ درصد Ca-Cl و ۲۰ درصد Na-Cl دارند. غلظت حداکثر بعضی ترکیبات از جمله NO_3 ، Ca ، Mg ، PO_4 ، HCO_3 ، SO_4 و Cl حاکی از زیادبودن آنها نسبت به استاندارد آب شرب ایران و استاندارد WHO است. از سویی با تعیین شاخص‌های آلودگی در فلزات سنگین مشخص شد آب‌ها کیفیت مناسب شرب دارند. آب‌های منطقه در مقایسه با استانداردهای آب شرب در حد مطلوب‌اند؛ اما بررسی حد آستانه به روش فراکتالی نشان داد غلظت ترکیبات شیمیایی بیشتر آب‌ها از حد طبیعی بیشتر است و در آستانه آلودگی قرار دارند. این بررسی نشان داد ترکیبات شیمیایی، نتیجه دو آلودگی طبیعی (هوازگی، انحلال شیمیایی سنگ‌های کربناته و نفوذ آب شور) و انسانی‌اند. زیادبودن ترکیباتی چون Ca ، HCO_3 و Mg در آب‌های دشت اراک ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی و دولومیتی ارتفاعات جنوبی و زیادبودن ترکیباتی چون Na و SO_4 در آب‌های دشت امان‌آباد ناشی از نفوذ آب شور تالاب میقان اراک است. همچنین دفن زباله دشت امان‌آباد، پساب شهرک صنعتی و فاضلاب شهری در دشت اراک، منشأ فلزات مسمومیت‌زایی چون Cu ، Zn ، As و Pb در آب‌های منطقه است.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، ترکیبات شیمیایی، فراکتال، شاخص آلودگی، دشت اراک.

مقدمه

توجه به نوع منابع آلاینده متفاوت است (2017: 1055). همچنین با ورود انسان به طبیعت بسیاری از منابع آلوده‌کننده طبیعی از جمله نفوذ آب شور مناطق ساحلی دریایی و تالاب‌ها نیز تشدید شده است. شناسایی منشأ آلاینده‌ها به‌ویژه از نظر فلزات سنگین، کاهش آنها به روش‌های مختلف و استاندارد کردن آب‌ها از مسائل جالب توجه است (Chowdhury et al., 2016: 476). بسیاری از آب‌ها ممکن است با توجه به ترکیب شیمیایی از نظر شرب مطلوب باشند، اما در حد غلظت طبیعی نباشند. زیادبودن ترکیبات شیمیایی در آب‌ها نیز ممکن است ناشی از دخالت طبیعت (نظیر بی‌هنجاری‌های معدنی) (Boylan & Cho, 2011: 249) یا دخالت انسان (نظیر پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری) باشد. برای تفکیک انواع آلودگی‌ها به‌ویژه جداسازی مقدار آستانه آلودگی طبیعی و انسانی، روش‌های مختلفی بر پایه توزیع فراوانی و احتمالات (Deng et al., 2010: 95) و روش‌های فراکتال^۱ وجود دارد (Afzal et al., 2011: 220). استفاده از روش‌های فراکتالی در تفکیک ترکیبات شیمیایی طبیعی (زمینه)^۲ از آلودگی‌های طبیعی و انسانی کمتر در کانون توجه بوده است و در این زمینه می‌توان به نمونه‌هایی از قبیل تفکیک مرز آلودگی‌ها اشاره کرد (Puente et al., 2001: 357; Datte et al., 2016: 2435)؛ بنابراین این پژوهش بر استفاده از روش‌های فراکتالی در تشخیص انواع آلودگی‌ها تأکید دارد.

هدف پژوهش حاضر، ارزیابی آب‌های زیرزمینی دشت اراک از نظر ترکیب شیمیایی در مقایسه با

آب‌های زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت‌اند. با رشد روزافزون جمعیت، بهره‌برداری از آنها به دلیل فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی در کانون توجه است (Tanjung et al., 2019: 87). ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی با مؤلفه‌هایی چون ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها و آبرفت‌های منطقه و فرایندهای شیمیایی در درون آبخوان کنترل می‌شود (Andre et al., 2005: 40). مجموعه فرایندهای موجود در سفره‌های آب زیرزمینی و واکنش آنها با کانی‌های تشکیل‌دهنده بر ترکیب شیمیایی و کیفیت آب مؤثر است (Helstrup et al., 2007: 977)؛ بنابراین کیفیت آب زیرزمینی به ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های اطراف و نیز فعالیت‌های انسانی بستگی دارد.

تغییر در شیمی آب زیرزمینی، تابعی از واکنش آب زیرزمینی و ترکیب کانی‌شناسی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان است (Monjerezi et al., 2011: 1399). فرایندهای شیمیایی نظیر انحلال، رسوب‌گذاری و هوازگی در طول جریان آب، نقش مهمی در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دارند (Wang, 2013: 72). با توسعه شهری، آب زیرزمینی بسیاری از دشت‌ها که مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب است، از نظر کیفی در معرض خطر قرار گرفته است. امروزه پساب صنایع، پسماندهای شهری، سموم و آفات کشاورزی و فاضلاب‌های شهری، مهم‌ترین منابع تغییر کیفی آب زیرزمینی از نظر آلودگی‌های شیمیایی و میکروبی انسانی هستند؛ به علاوه روش‌های متفاوتی برای ارزیابی کیفی منابع آبی تعریف شده که اهمیت آنها با

¹ Fractal method

² Background

سینق^{۱۱}، ۲۰۱۰ و هاکنسون^{۱۲}، ۱۹۸۰ این مسئله را ارزیابی کرده‌اند.

از جمله پژوهش‌های فراکتالی درباره مرزهای آلودگی، پژوهش‌های داتا و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۶؛ قدیمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ کومار و دوآ^{۱۴}، ۲۰۰۹ و پیونته و همکاران^{۱۵}، ۲۰۰۱ است.

روش‌شناسی پژوهش

نمونه برداری و تجزیه شیمیایی

تعداد ۴۷ حلقه چاه آب شرب از دشت اراک انتخاب (شکل ۱) و از هر چاه ۲۵۰ میلی‌لیتر آب در ظرف‌های پلی‌اتیلن گردآوری و به آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب شهری استان مرکزی برای تجزیه شیمیایی انتقال داده شد. برای همه نمونه‌ها، هدایت الکتریکی (EC) در صحرا اندازه‌گیری و به کمک دستگاه WTW Universal Conductivity Meter Multi Line P₄ set تعیین شد. سپس غلظت ترکیباتی چون Ca، Mg، K، Na، Cl، SO₄، F، NO₃ و PO₄ به روش کروماتوگرافی، HCO₃ به روش تیتراسیون و عناصر سنگین از قبیل Cu، Zn، As، Ni، Co و Pb به روش اسپکتروفتومتر جذب اتمی (Perkin-Elmer Analyst 700) مشخص شد.

شاخص‌های سنجش کمی و کیفی آلودگی آب

درجه آلودگی (C_d): شاخص درجه آلودگی^{۱۶} آثار ترکیبی چند متغیر را بر کیفیت آب شرب نشان

استاندارد ایران و بین‌الملل (WHO)، ارزیابی شاخص کیفی و شاخص‌های آلودگی آب از نظر فلزات سنگین، ارزیابی آستانه آلودگی‌های طبیعی و انسانی آب نسبت به حد طبیعی براساس روش فراکتالی و تعیین منشأ آلاینده‌های شیمیایی است.

پیشینه پژوهش

درباره ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است؛ از جمله مونجرزی و همکاران^۱، ۲۰۱۱؛ قدیمی و قمی^۲، ۲۰۱۲ و قدیمی و همکاران^۳، ۲۰۱۵ این موضوع را بررسی کرده‌اند.

در بررسی‌های مختلف به اثبات رسیده سنگ‌های حوضه بالادست در ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی نقش اساسی داشته‌اند؛ از جمله در بررسی‌های تانجانگ و همکاران^۴، ۲۰۱۹؛ پان و همکاران^۵، ۲۰۱۷ و وانگ و همکاران^۶، ۲۰۱۳.

همچنین ارزیابی استاندارد آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب شرب، موضوع پژوهش بسیاری از پژوهشگران و سازمان‌ها بوده است؛ مانند ترابیان و شهاوی^۷، ۲۰۱۷ و استاندارد بین‌المللی آب^۸، ۲۰۱۷.

پژوهش‌های مختلفی نیز در زمینه ارزیابی شاخص‌های آلودگی صورت گرفته است؛ جلالی^۹، ۲۰۰۹؛ قدیمی، ۲۰۱۵؛ نصرآبادی^{۱۰}، ۲۰۱۵؛ رضا و

¹ Monjerezi et al

² Ghadimi & Ghomi

³ Ghadimi

⁴ Tanjung et al

⁵ Pan et al

⁶ Wangret al

⁷ Torabian & Shahav

⁸ WHO

⁹ Jalali

¹⁰ Nasrabadi

¹¹ Reza & Singh

¹² Hakanson

¹³ Datta et al

¹⁴ Kumar & Dua

¹⁵ Puente et al

¹⁶ Degree of contamination

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

شاخص کیفیت آب (WQI): شاخص کیفیت آب^۲ با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود که در آن W، ضریب وزنی است و q_n نیز از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$WQI = Antilog \left[\sum_{n=1}^n W_n \log_{10} q_n \right] \quad (5)$$

$$q_{ni} = \left\{ \left[\frac{V_{actual} - V_{ideal}}{V_{standard} - V_{ideal}} \right] * 100 \right\} \quad (6)$$

V_{actual} مقادیر اندازه‌گیری شده کیفیت آب، V_{ideal} مقدار ایده‌آل مؤلفه‌های کیفی (در $PH=7$ برابر صفر) و $V_{standard}$ مقدار استاندارد مؤلفه‌های کیفی است که برای آب غیرقابل شرب ۹۱-۱۰۰، برای آب بسیار بد ۷۱-۹۰، برای آب بد ۵۱-۷۰، برای آب خوب ۲۶-۵۰ و برای آب عالی ۰-۲۵ است (Kumar & Dua, 2009: 49).

روش فراکتال

در برداشت‌های هیدروژئوشیمیایی، توزیع فراوانی داده‌ها به علت چولگی زیاد بیشتر لوگ نرمال است و مقادیر بزرگ تابع، توزیع آلودگی‌ها را تشکیل می‌دهد. این مقادیر که از بقیه مقادیر امکان تفکیک دارد، مناطق دارای آلودگی هیدروژئوشیمیایی را مشخص می‌کند. روش‌های آماری متفاوتی برای جداسازی آلودگی از مقادیر طبیعی وجود دارد؛ اما روش‌های فراکتالی به‌مثابه روش‌هایی کارآمد برای جدایش دقیق مرزهای آلودگی بسیار مناسب است (Datta et al., 2016: 2435). یکی از کاربردهای عمده هندسه فراکتال در

می‌دهد (Backman et al., 1997: 55). این شاخص با توجه به روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{f_i} \quad (1)$$

$$A_{f_i} = \frac{C_{A_i}}{C_{N_i}} \quad (2)$$

در این روابط C_{N_i} و C_{A_i} به ترتیب مؤلفه‌های آلودگی، غلظت عنصر و مقدار استاندارد غلظت عنصر را بیان می‌دارد. درجه کمی و کیفی شاخص آلودگی؛ شامل: $C_d < 1$ کم، $C_d = 1-3$ متوسط و $C_d > 3$ زیاد (Nasrabadi, 2015: 385).

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI): شاخص فلزات سنگین^۱ برای امتیاز مجموع فلزات سنگین در آب استفاده می‌شود. در محاسبه HPI، محاسبه وزن‌های مؤلفه نام و کیفیت هریک از فلزات سنگین براساس شاخص هاکنسون $Zn=1, Cu=Ni=5, Pb=10, As=10$ است (Hakanson, 1980: 975). کیفیت هر فلز با استفاده از رابطه ۳ امتیازدهی می‌شود. در این رابطه، Q_i زیرشاخص‌های مؤلفه نام، W_i ارزش مؤلفه‌ها، M_i غلظت هر فلز و S_i حد مجاز مؤلفه‌ها یا میزان استاندارد آن عنصر را بیان می‌کند (Reza & Singh, 2010: 785).

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{S_i} * 100 \quad (3)$$

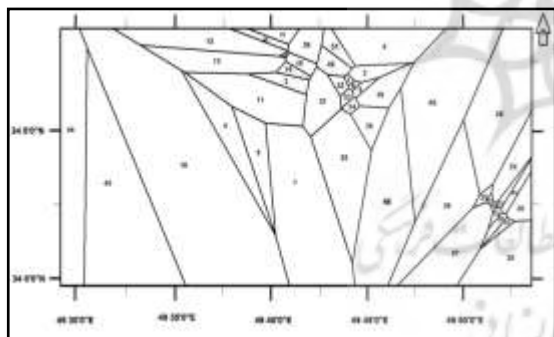
درنهایت شاخص آلودگی فلزات سنگین با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. بر این اساس، رتبه هر نمونه آب از نظر کیفی عبارت است از: $120 <$ رتبه کم، $120-240$ رتبه متوسط و $240 >$ رتبه زیاد.

² Water Quality Index

¹ Heavy Metal Index

پلیگون‌های تیسن

پلیگون‌های تیسن با عنوان پلیگون‌های دیریکلت^۱ یا ورونی^۲ در اصل نوعی طبقه‌بندی فضایی نقشه براساس اختصاص هر نقطه به نزدیک‌ترین نقطه داده‌ای است. چنانچه نقاط داده‌ای در سلول‌های با فاصله منظم قرار داشته باشند، پلیگون‌های حاصل نیز منظم خواهند بود و بالعکس. پلیگون‌های تیسن غالباً برای تبدیل سریع داده‌های نقطه‌ای به ناحیه‌ای در سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شوند. مزیت مهم پلیگون‌های تیسن، سادگی و آسانی تبدیل داده‌های کیفی مانند کاربری به نقشه ناحیه‌ای است (Mohamed & AlmasPoor, 2003: 125). با توجه به روش انتخابی غلظت - مساحت برای انجام فراکتال، نمودار تیسن داده‌های چاه‌های آب دشت جنوبی اراک به شرح شکل (۱) است.



شکل ۱. پلیگون‌های تیسن بر داده‌های چاه‌های آب دشت جنوبی اراک

موقعیت محدوده پژوهش

منطقه پژوهش در استان مرکزی و شهر اراک با جمعیتی بیش از ۴۰۰۰۰۰ نفر شاغل در صنعت، با ارتفاع متوسط ۱۹۰۰ متر، بارندگی سالیانه ۲۸۰

تخمین حد آستانه و در نتیجه جداسازی جامعه آلوده از زمینه براساس اختلاف بعد فراکتال آنهاست. الگوریتم‌های مختلفی برای محاسبه بعد فراکتال الگوهای هیدروژئوشیمیایی وجود دارد و الگوریتم غلظت- مساحت، متداول‌ترین آنهاست. در روش غلظت- مساحت، رابطه بین خطوط هم‌غلظت و مساحت از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$A(\mu \geq X_0) = FX_0^{-a} \quad (7)$$

در آن $A(\mu \geq X_0)$ مساحت تجمعی محصورشده با خطوط هم‌غلظتی است که غلظت آنها بزرگ‌تر و مساوی X است و حد آستانه‌ای در نمودار تمام‌لگاریتمی غلظت- مساحت به دست می‌آید. a مؤلفه مرتبط با بعد خط هم‌غلظت است. چنانچه $A(\rho)$ مساحت مقادیر غلظت بزرگ‌تر از ρ در یک نقشه منحنی میزان از داده‌های خاص باشد، بنابراین $A(\rho)$ باید یک توزیع افزایشی از ρ باشد. اگر θ نماینده مقادیر آستانه‌ای باشد، روابط ۸ و ۹ بر داده‌ها حاکم است.

$$(\rho \leq \theta) \propto \rho^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

$$A(\rho > \theta) \propto \rho^{\frac{\beta}{\epsilon}} \quad (9)$$

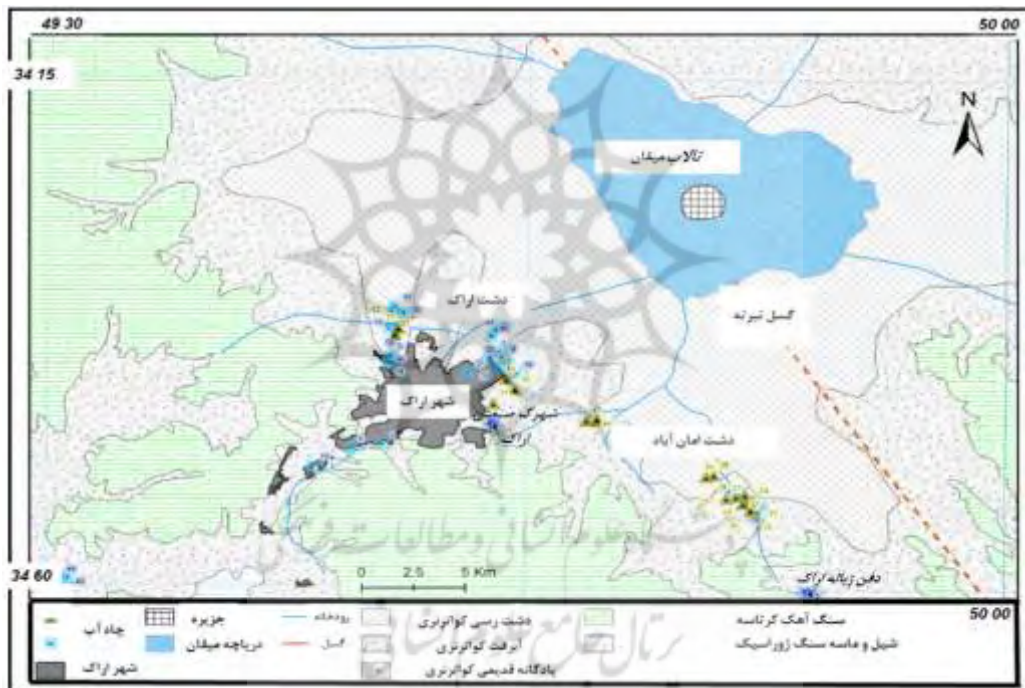
چنانچه نمودار $A(\rho > \theta)$ در مقابل τ (در مختصات تمام‌لگاریتمی) خطی باشد، داده‌ها متعلق به یک جامعه و توزیع فراکتالی ساده خواهد بود. در صورتی که نمودار از چند بخش خطوط مستقیم تشکیل شده باشد، توزیع مولتی‌فراکتالی است و نقاط شکست بین بخش‌های خطوط راست، حد آستانه‌ای هستند که جوامع را جدا می‌کنند (Ghadimi et al., 2015: 77).

¹ Dirichlet

² Voroni

امان‌آباد و قره‌کهریز تغذیه می‌شود (جوادی شریف، ۱۳۹۶: ۴۷). تالاب میقان در شمال آبرفت جنوبی اراک با مساحت ۱۱۰ کیلومترمربع آب شور دارد. روی دشت جنوبی اراک چاه‌های زیادی به عمق ۷۰ تا ۱۵۰ متر حفر شده است که برای تأمین آب شرب و کشاورزی استفاده می‌شوند. اراک به‌منزله چهارمین قطب صنعت کشور شهرک‌های صنعتی متفاوتی دارد که یکی از این شهرک‌های صنعتی در آبرفت جنوبی اراک واقع شده است.

میلی‌متر، درجه‌حرارت متوسط ۱۸ سانتی‌گراد در اقلیم نیمه‌خشک واقع شده است. آبخوان اراک متشکل از رسوبات ریز تا متوسط‌دانه و با سن پلیستوسن به‌صورت فروفادگی بین کوه‌های آشتیان در شمال و کوه‌های اراک در جنوب و بر پی‌سنگ آهکی کرتاسه قرار گرفته است (شکل ۲). سنگ‌های ارتفاعات تغذیه‌کننده دشت جنوبی اراک شامل شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک، اسلیت‌های آهکی، سنگ‌های آهکی و دولومیتی کرتاسه است. آبخوان جنوبی اراک با دو دشت امان‌آباد و دشت اراک با دو رودخانه



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی چاه‌ها و زمین‌شناسی آبخوان اراک

استاندارد غلظت ترکیبات شیمیایی در ایران تقریباً مشابه با استاندارد WHO است. میانگین غلظت ترکیباتی چون F ، Ni ، Cu ، Zn ، As ، Pb ، Na ، Ca ، Mg ، PO_4 ، HCO_3 ، SO_4 و Cl از حد استاندارد شرب کمتر است. ضمناً برای ترکیباتی چون Co و K استاندارد استانداردی تعریف نشده است. همچنین استاندارد

یافته‌های پژوهش

ترکیب شیمیایی آب

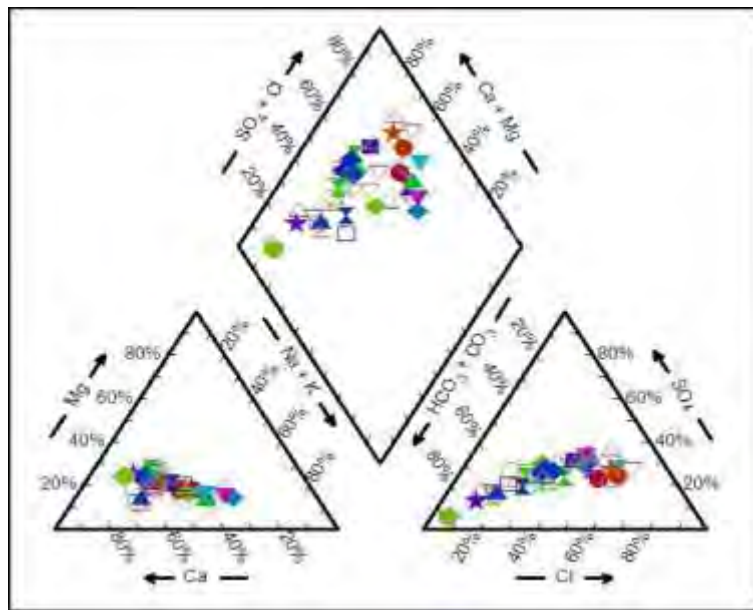
جدول (۱)، خلاصه آمار و مقدار استاندارد هریک از ترکیبات شیمیایی را با توجه به استاندارد ایران (Torabian & shahavi 2017: 3) و استاندارد WHO (WHO, 2017: 631) برای آب شرب نشان می‌دهد.

Ca-Cl، ۲ درصد تیپ Na-HCO₃ و ۲۰ درصد تیپ Na-Cl دارند (شکل ۳). همچنین بیشتر آب‌ها براساس نمودار شولر در وضعیت خوب تا قابل قبول قرار دارند (شکل ۴). لازم به توضیح است تیپ آب‌های شرب کلسیم و بی‌کربنات (Ca-HCO₃) غالب در دشت جنوبی اراک از ارتفاعات آهکی کرتاسه در جنوب اراک سرچشمه گرفته است (شکل ۱)؛ (Ghadimi & Ghomi, 2012a: 14). تیپ Na-Cl مربوط به آب‌هایی بوده که منشأ آنها، آب شور ناشی از تالاب میقان است که در شمال دشت اراک و دشت امان‌آباد قرار دارد (شکل ۱). تیپ Ca-Cl مربوط به چاه‌هایی است که در منطقه مخلوط آب شیرین و آب شور قرار دارد (Ghadimi & Ghomi, 2012a: 14).

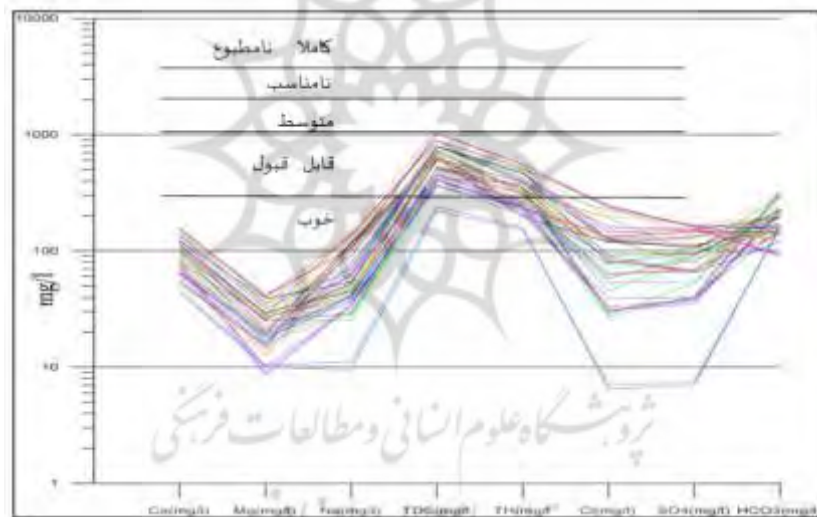
بعضی ترکیبات در ایران (Ni) و بعضی در WHO (HCO₃) تعریف شده است. بررسی غلظت حداکثر بعضی ترکیبات از جمله NO₃، Ca، Mg، PO₄، HCO₃، SO₄ و Cl حاکی از زیاده‌بودن نسبت به استاندارد ایران و استاندارد WHO است. غلظت NO₃ در ۲۶ درصد، Na در ۵ درصد، Ca در ۳ درصد، Mg در ۱۸ درصد، PO₄ در ۷ درصد، HCO₃ در ۳۱ درصد، SO₄ در ۵ درصد و Cl در ۹ درصد از نمونه‌ها بیش از استاندارد آب شرب ایران است. لازم به توضیح است همه منابع آبی از نظر فلزات سنگین (Pb، As، Zn، Cu، Ni) در حد استاندارد ایران هستند. بررسی تیپ آب به روش نمودار پایپر نشان داد ۵۲ درصد از آب‌ها تیپ Ca-HCO₃، ۲۶ درصد تیپ

جدول ۱. غلظت ترکیبات شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت جنوبی اراک

متغیر	واحد	میانگین	میان	حداقل	حداکثر	استاندارد ایران	WHO
F	mg/L	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۷۹	۱/۵۰	۱/۵۰
NO ₃	mg/L	۳۵	۲۶	۱۲	۱۰۲	۵۰	۵۰
Co	μg/L	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۳۶	-	-
Ni	μg/L	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۰۳	۱	۷۰	-
Cu	μg/L	۱۴	۱۲	۴	۵۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
Zn	μg/L	۱۶	۱۴	۴	۵۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰
As	μg/L	۲/۲۰	۲/۰۰	۱	۵/۷۰	۱۰	۱۰
Pb	μg/L	۶/۵۱	۷/۰۰	۲	۹	۱۰	۱۰
K	mg/L	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۳۰	۱/۹۰	-	-
Na	mg/L	۷۸	۵۸	۹/۵	۳۶۱	۲۰۰	۲۰۰
Ca	mg/L	۹۸	۸۹	۴۴	۴۰۸	۳۰۰	۳۰۰
Mg	mg/L	۲۴	۲۱	۸/۵	۱۱۲	۳۰	۳۰
PO ₄	mg/L	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۲۰
HCO ₃	mg/L	۱۹۶	۱۷۰	۹۰	۶۱۶	-	۲۰۰
SO ₄	mg/L	۹۷	۹۵	۷	۳۰۰	۲۵۰	۲۵۰
Cl	mg/L	۱۳۹	۸۶	۶/۵۰	۱۴۳۵	۲۰۰	۲۵۰



شکل ۳. نمودار پایپر به منظور تعیین تیپ آب برای چاه‌های دشت جنوبی اراک



شکل ۴. نمودار شولر به منظور تعیین وضعیت شرب بودن آب برای چاه‌های دشت جنوبی اراک

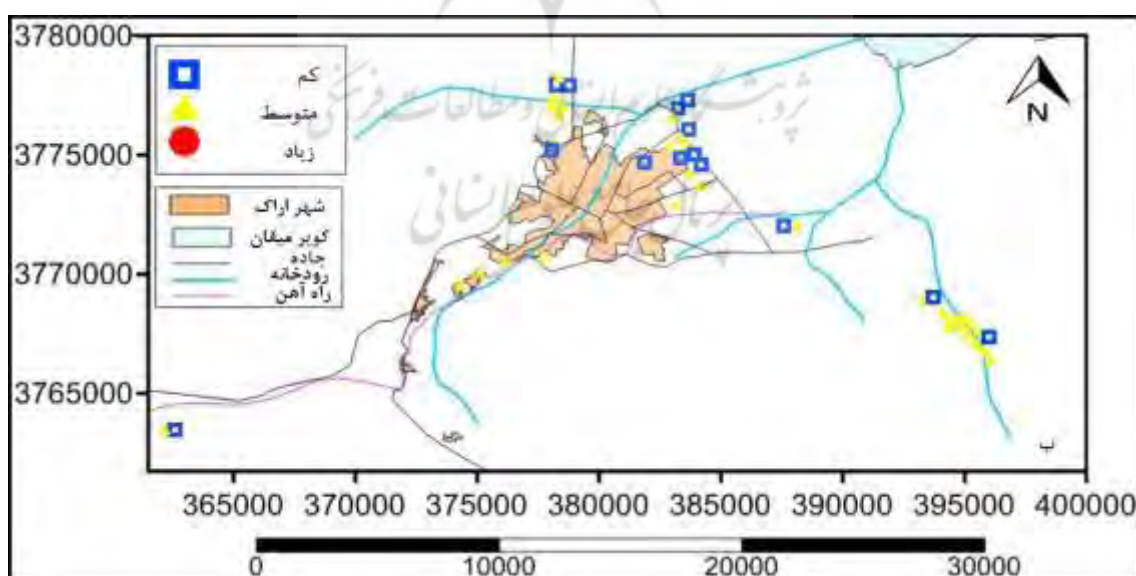
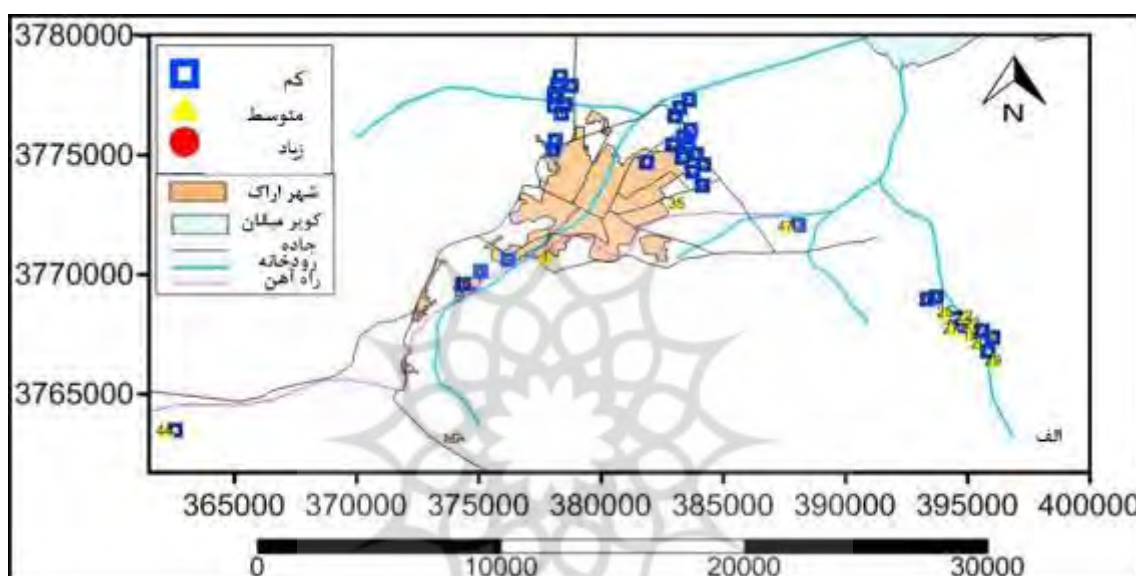
چاه‌های دشت امان‌آباد در جنوب شرق اراک درجهٔ آلودگی متوسط دارند. شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) اثر فلزات سنگین را بر سلامت انسان نشان می‌دهد. میزان شاخص آلودگی با استفاده از عناصر Pb ، Zn ، Cu ، Ni و As نشان داد ۳۰ درصد از چاه‌های منطقه در کلاس کم (چاه‌های ۲، ۶، ۹، ۱۱، ۲۸، ۳۰، ۳۱، ۳۳، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۳ و ۴۶) و

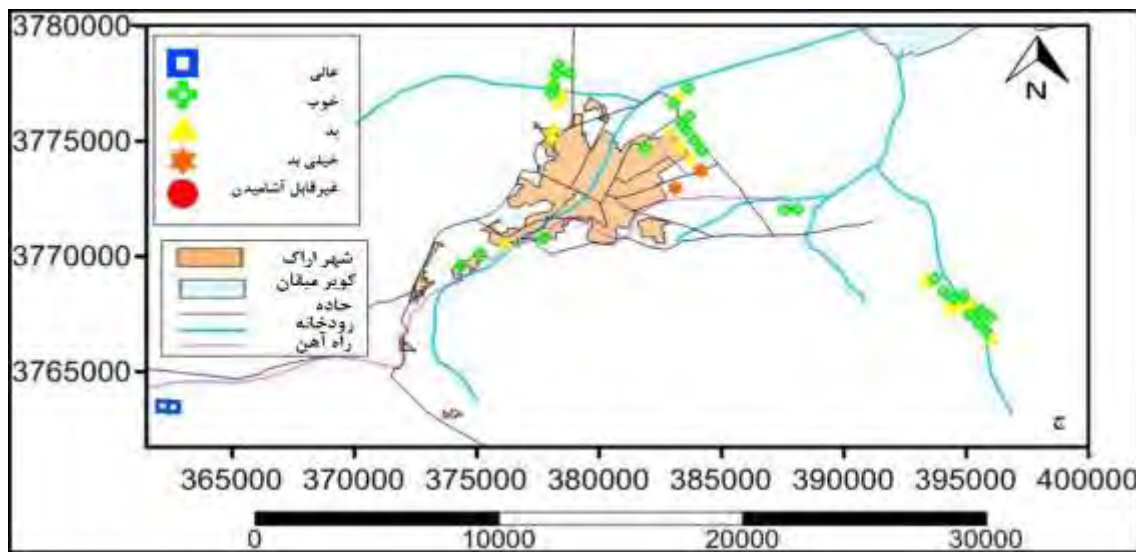
شاخص‌های آلودگی آب‌ها

شاخص درجهٔ آلودگی (C_d): شاخص درجهٔ آلودگی در ۲۲ درصد از چاه‌های منطقه (چاه‌های ۱، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹، ۳۵ و ۴۶) متوسط است و بقیهٔ چاه‌ها (۷۸ درصد) در ردهٔ کم قرار دارند. با توجه به شکل ۵ الف چاه‌هایی که در محدودهٔ دشت اراک واقع شده‌اند، عمدتاً درجهٔ آلودگی کم، اما بیشتر

آبرفت اراک و آبرفت امان‌آباد واقع شده‌اند (شکل ۵). این بررسی نشان داد بیشتر چاه‌های با کیفیت عالی و خوب، کم‌عمق (کمتر از ۱۰۰ متر) و چاه‌های با کیفیت بد از نوع عمیق (عمق بیش از ۱۰۰ متر) هستند. لازم به توضیح است وجود لایه‌های شور در عمق بیش از ۱۰۰ متر کیفیت بد آب چاه‌های مدنظر را فراهم کرده است (Ghadimi et al., 2016: 100).

۷۰ درصد در کلاس متوسط قرار دارند (شکل ۵ ب). شاخص کیفی WQI آب با توجه به غلظت Cl ، NO_3 ، SO_4 ، Mg ، Ca ، Na و میزان مواد جامد محلول در آب (TDS) نشان داد ۴ درصد نمونه‌ها شاخص کیفی عالی، ۵۹ درصد خوب، ۳۳ درصد بد و ۴ درصد بسیار بد هستند. آب با کیفیت عالی در دره بالادست آبرفت دشت اراک و چاه‌های با کیفیت خوب در





شکل ۵. شاخص‌های آلودگی آب داده‌های چاه‌های آب دشت جنوبی اراک

الف- شاخص درجه آلودگی، ب- شاخص آلودگی فلزات سنگین و ج- شاخص کیفیت آب

تعیین آستانه آلودگی‌ها

برای تعیین آستانه آلودگی (مرز طبیعی و آلودگی ترکیبات شیمیایی) از نقطه شکست روش فراکتالی استفاده شد (شکل ۶). با توجه به شکل (۶) بدیهی است نخستین نقطه شکست خط، آستانه آلودگی و حد زمینه و آلودگی را چه از نظر طبیعی و چه از نظر انسانی نشان می‌دهد. آلودگی‌های طبیعی ناشی از وجود سنگ‌های منشا، غلظت عناصر شیمیایی را افزایش می‌دهد. از سویی، خطوط مختلف شکستگی درجه آلودگی از کم، متوسط تا زیاد را بیان می‌دارد (شکل ۶ و جدول ۲)؛ (جوادی شریف، ۱۳۹۶: ۴۷).

ترکیباتی نظیر Ca ، Mg و HCO_3 حاکی از وجود سنگ‌های آهکی و دولومیتی است (Ghadimi et al., 2016: 100). لازم به توضیح است بخش جنوبی دشت اراک را آهک‌های کرتاسه تشکیل می‌دهند که از جنس اسلیت آهکی، آهک مارنی و دولومیت‌اند (Ghadimi & Ghomi, 2012a: 14; 2012b: 203). به همین ترتیب، آلودگی زیاد ترکیباتی چون F ، Na ، K ، SO_4 و Cl به

لایه‌های شوری برمی‌گردد که از تالاب میقان اراک حاصل شده‌اند (Ghadimi & Ghomi, 2012a: 14). زیاده‌بودن ترکیباتی چون عناصر سنگین (Cu ، Ni ، Co)، Zn ، Pb و As و همچنین NO_3 ناشی از فعالیت‌های انسانی است (Ghadimi et al., 2016: 100).

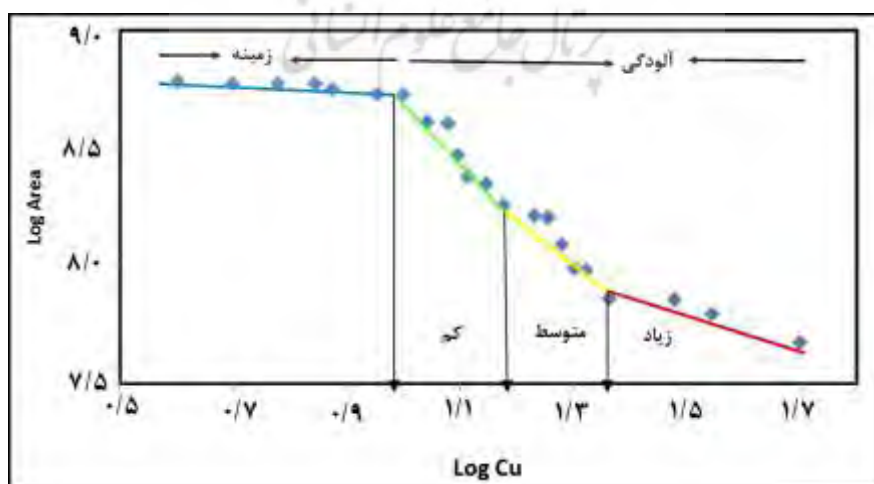
نتایج آلودگی‌های حاصل در دو منطقه جنوب شرقی شهر اراک و دشت امان‌آباد امکان بررسی دارد. بیشترین تراکم از مساحت آلودگی‌ها در جنوب شرقی شهر اراک مربوط به ترکیبات Pb ، Cl ، Cu ، Mg ، Ca ، Na ، Zn ، SO_4 و K است (اشکال ۷ تا ۱۰)؛ در حالی که آلودگی ترکیباتی چون Co ، F ، HCO_3 ، NO_3 ، Ni و PO_4 خاص شمال شرق شهر اراک است. به بیانی غلظت ترکیباتی چون F ، NO_3 ، Ni ، Co و HCO_3 عمدتاً در چاه‌های بخش غربی منطقه (دشت اراک) زیاد است (Ghadimi et al., 2016: 100). ترکیباتی چون Cl ، SO_4 ، Ca ، Na و Mg روند مشابهی دارد و بیشترین غلظت آنها مربوط به چاه‌های نیمه جنوب شرقی منطقه (دشت امان‌آباد) است. بررسی توزیع

همچنین فاضلاب شهر اراک در بالادست دشت اراک انجام می‌شود، بنابراین فلزات سنگین از کانون‌های آلودگی نام‌برده‌اند (Ghadimi, 2015: 77). عناصری چون Co و Ni عمدتاً در چاه‌های نیمه‌شمالی دشت اراک تمرکز خاصی ندارند.

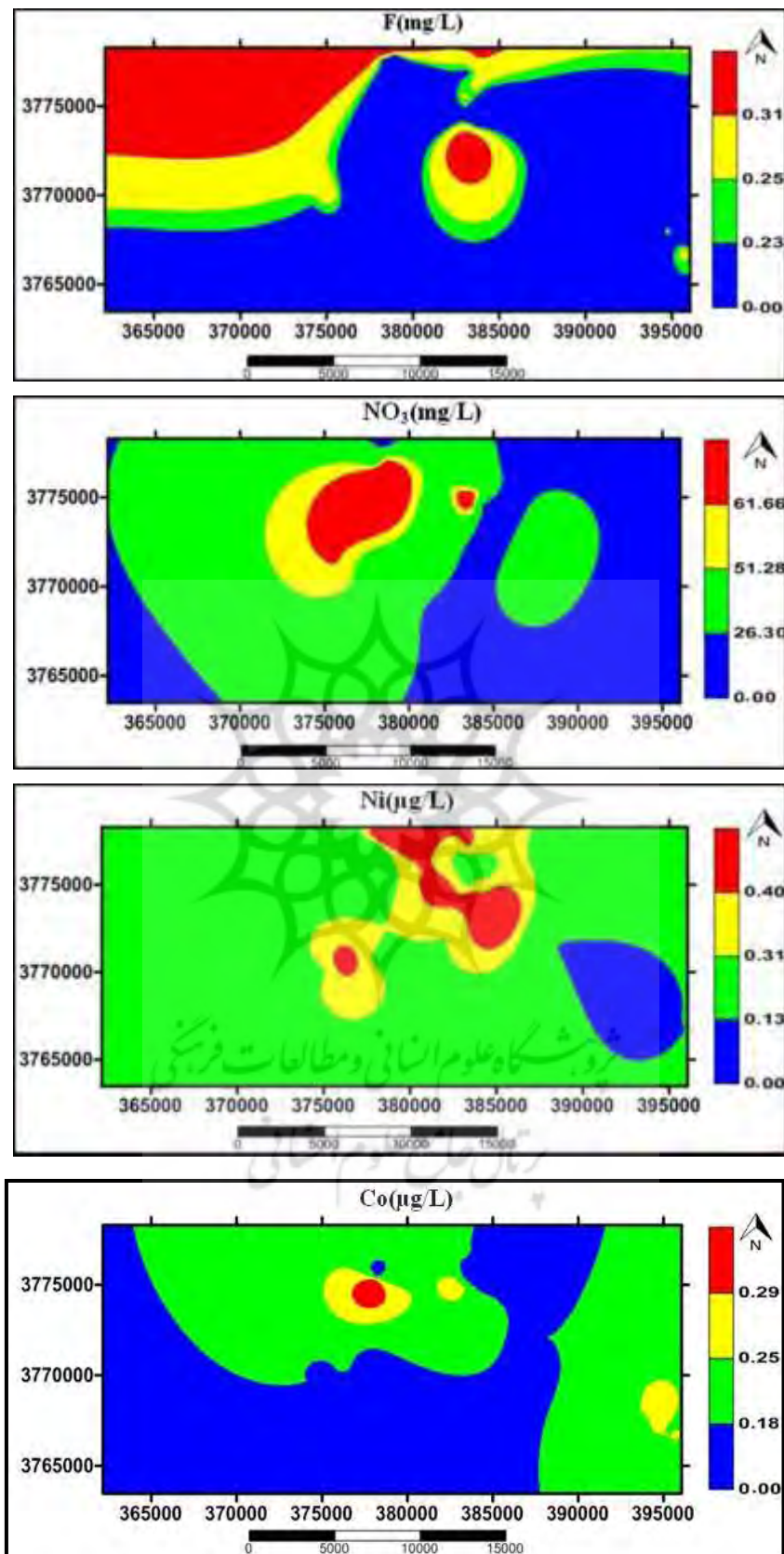
فلزات سنگین نشان داد روند عنصری چون Cu, Zn, As و Pb مشابه و عمدتاً محدود به چاه‌های بخش جنوبی دشت اراک و چاه‌های دشت امان‌آباد است (شکل ۸). از آنجایی که دفن زباله شهر اراک در بالادست دشت امان‌آباد و شهرک صنعتی اراک و

جدول ۲. حد زمینه و آلودگی ترکیبات مختلف شیمیایی براساس هندسه فراکتال (جوادی شریف، ۱۳۹۶: ۴۷)

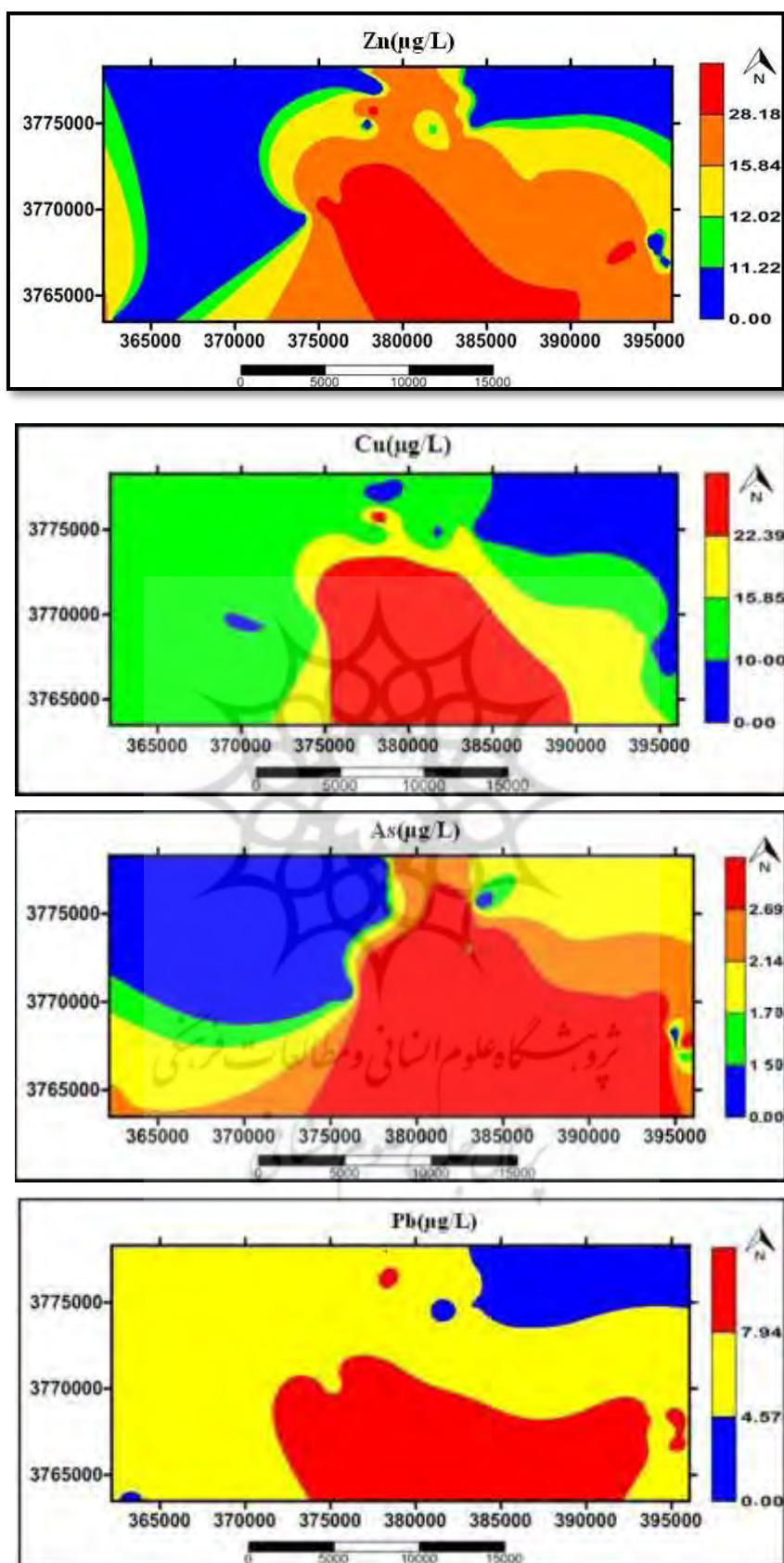
متغیر	زمینه	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی زیاد
F	< ۰/۲۳	۰/۲۳ - ۰/۲۵	۰/۲۵ - ۰/۳۱	< ۰/۳۱
NO ₃	< 26	۲۶ - ۵۱	۵۱ - ۶۲	< ۶۲
Co	< ۰/۱۸	۰/۱۸ - ۰/۲۵	۰/۲۵ - ۰/۲۹	< ۰/۲۹
Ni	< ۰/۱۳	۰/۱۳ - ۰/۳۱	۰/۳۱ - ۰/۴	< ۰/۴
Cu	< ۱۰	۱۶	۱۶ - ۲۲	> ۳۹
Zn	< ۱۱	۱۱ - ۱۵	۱۵ - ۲۸	< ۲۸
As	< ۱/۵۱	۱/۵۱ - ۱/۷	۱/۷ - ۲/۱۴	< ۲/۱۴
Pb	< ۴/۵۷	۴/۵۷ - ۷/۹۴	-	< ۷/۹۴
K	< ۰/۷۹	۰/۷۹ - ۱/۱	۱/۱ - ۱/۵	< ۱/۵
Na	< ۳۰	۳۰ - ۴۲	۴۲ - ۱۱۷	< ۱۱۷
Ca	< ۱۰۰	۱۰۰ - ۱۲۵	۱۲۵ - ۱۵۸	< ۱۵۸
Mg	< ۱۵	۱۵ - ۲۳	۲۳ - ۳۲	< ۳۲
PO ₄	< ۰/۱۴	۰/۱۴ - ۰/۱۷	-	< ۰/۱۷
HCO ₃	< ۱۵۸	۱۵۸ - ۲۰۴	۲۰۴ - ۳۱۶	< ۳۱۶
SO ₄	< ۴۰	۴۰ - ۶۵	۶۵ - ۱۳۱	< ۱۳۱
Cl	< ۳۱	۳۱ - ۶۲	۶۲ - ۱۲۶	< ۱۲۶



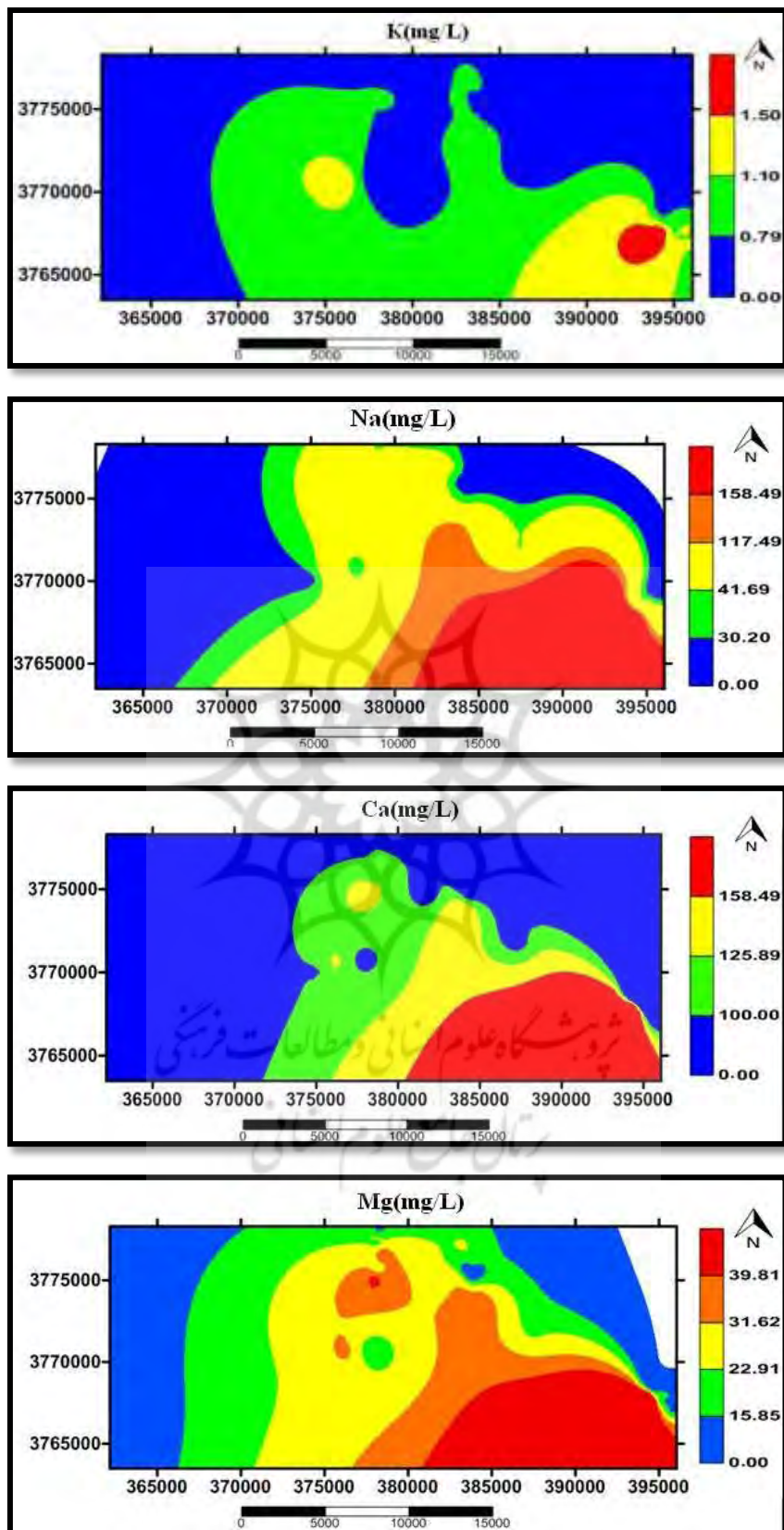
شکل ۶. نمونه نمودار تمام لگاریتمی غلظت - مساحت فراکتالی Cu



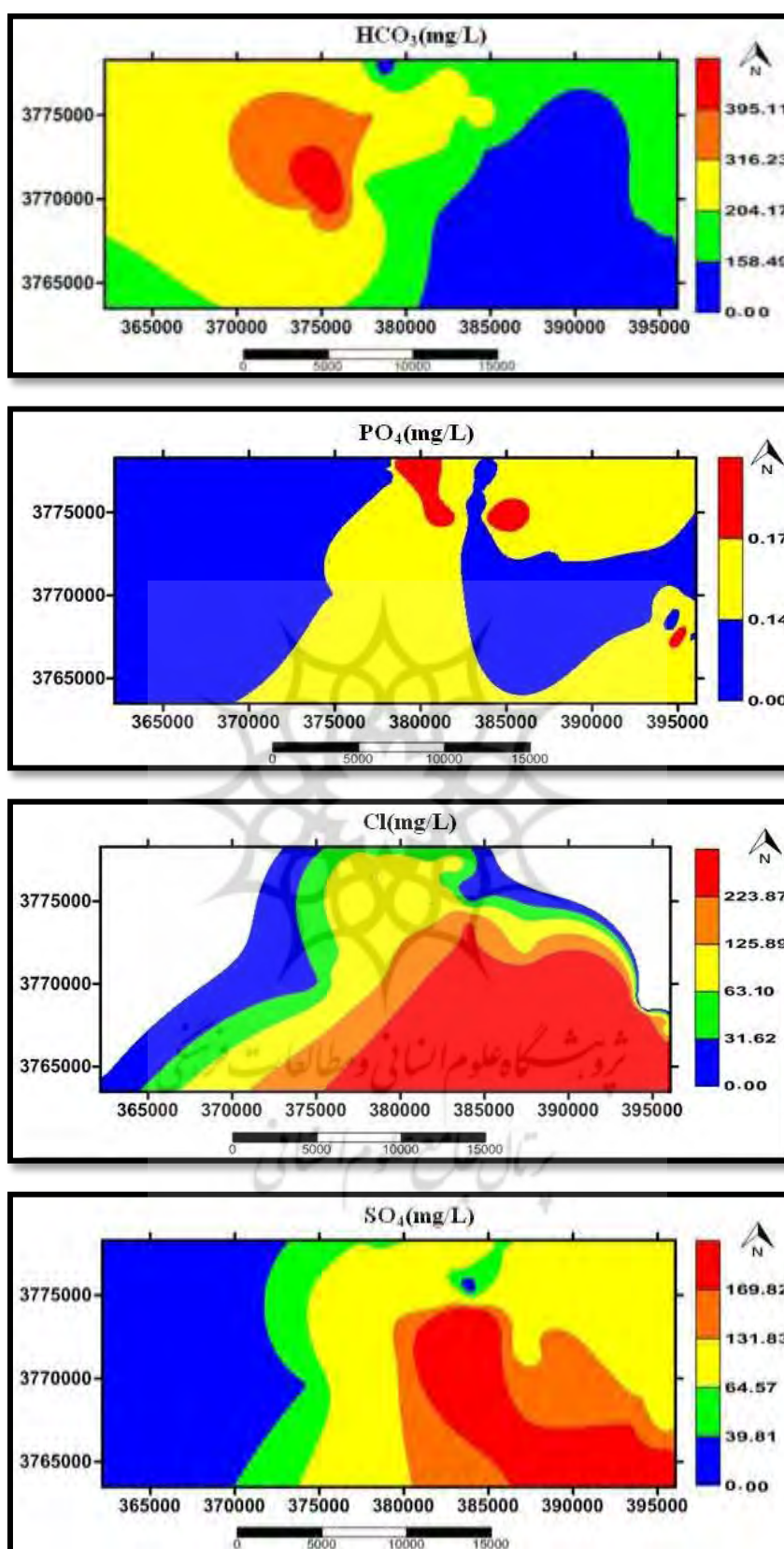
شکل ۷. نقشه آلودگی حاصل از مدل غلظت - مساحت فراکتالی ترکیباتی چون F، NO₃، Ni و Co



شکل ۸. نقشه آلودگی حاصل از مدل غلظت- مساحت فراکتالی ترکیباتی چون Zn، Cu، As و Pb



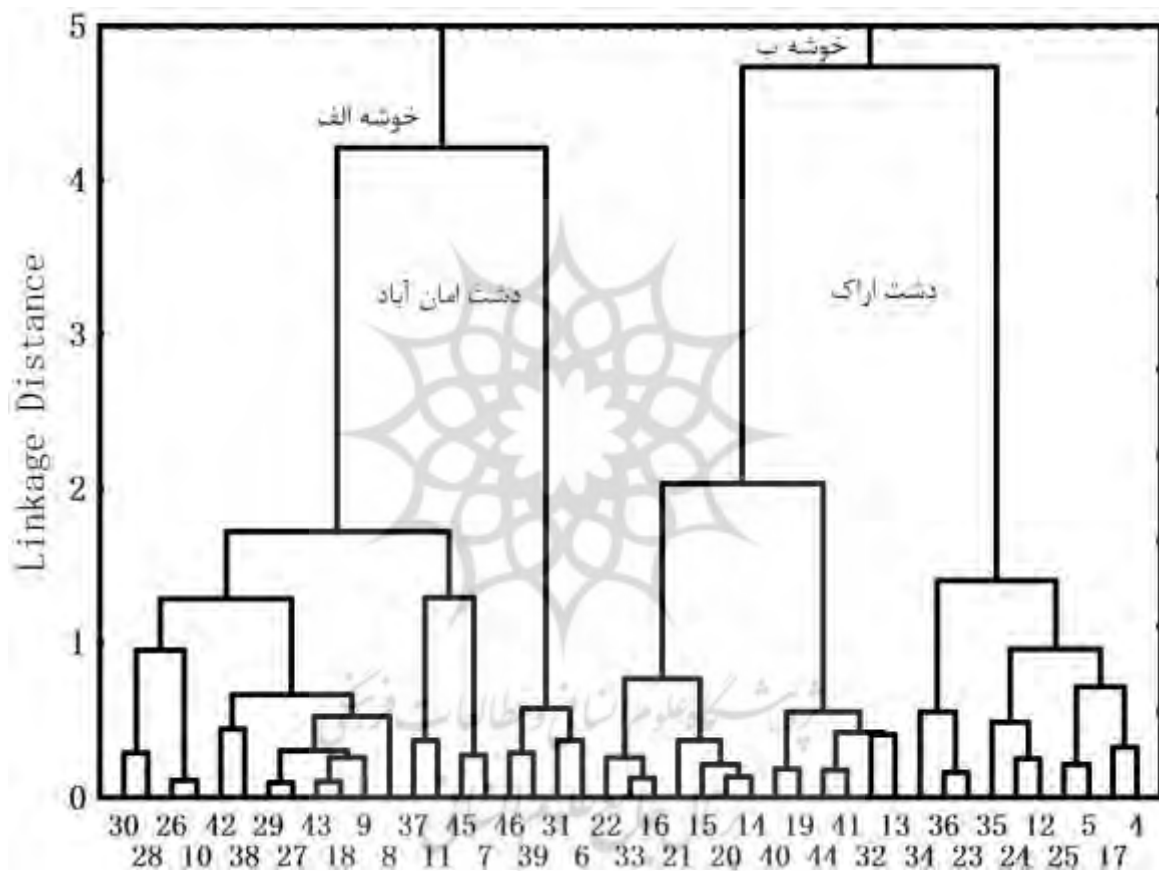
شکل ۹. نقشه آلودگی حاصل از مدل غلظت - مساحت فراکتالی ترکیباتی چون K، Na، Ca و Mg



شکل ۱۰. نقشه آلودگی حاصل از مدل غلظت - مساحت فراکتالی ترکیباتی چون HCO_3 , PO_4 , Cl و SO_4

الکتریکی در دشت امان‌آباد ۱۲۹۰ و در دشت اراک ۷۰۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. از سویی، مقدار HCO_3 در دشت اراک (۲۲۶ میلی‌گرم در لیتر) بیشتر از دشت امان‌آباد است (۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر)؛ بنابراین چاه‌های دشت اراک که ۶۰ درصد (۲۸ حلقه) چاه‌ها را تشکیل می‌دهند نسبت به چاه‌های دشت امان‌آباد کیفیت بهتری دارند.

برای ارزیابی تأثیر انواع ترکیبات شیمیایی، نمودار خوشه‌ای نشان داد (شکل ۱۱) در خوشه الف مربوط به دشت امان‌آباد، مهم‌ترین ترکیبات شیمیایی Cl ، Na ، SO_4 و هدایت الکتریکی است که میانگین غلظت Cl ، SO_4 ، Na به ترتیب ۲۵۱، ۱۴۲ و ۱۲۶ میلی‌گرم در لیتر و در دشت اراک (خوشه ب) ۵۷، ۶۳ و ۴۲ میلی‌گرم در لیتر است. همچنین مقدار هدایت



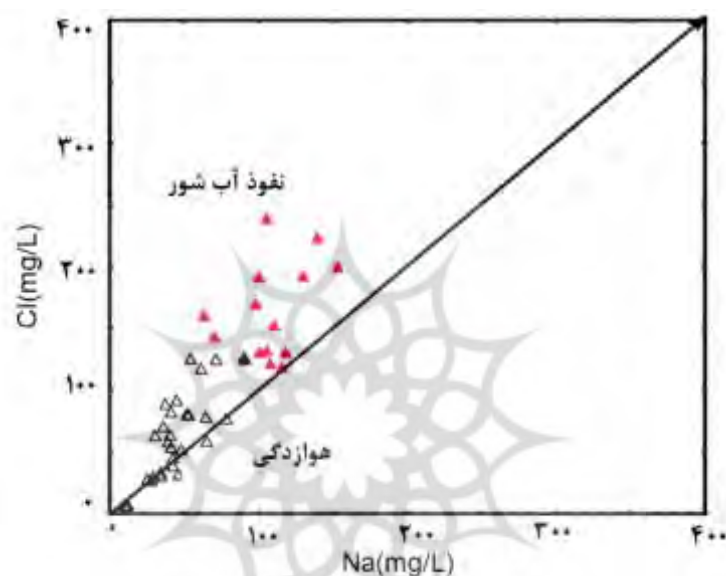
شکل ۱۱. نمودار خوشه‌ای چاه‌های اراک در دو دشت اراک و امان‌آباد

(Ghadimi & Ghomi, 2012b: 203). به علاوه هوازدگی کانی‌های کربناته سبب شده است آب‌های دشت اراک از تیپ Ca-HCO_3 باشند. در نمودار Na-HCO_3 در مقابل Na-Ca بیشتر نمونه‌های دشت امان‌آباد در محدوده هوازدگی و دو نمونه در محدوده انحلال کانی‌های تبخیری قرار دارند

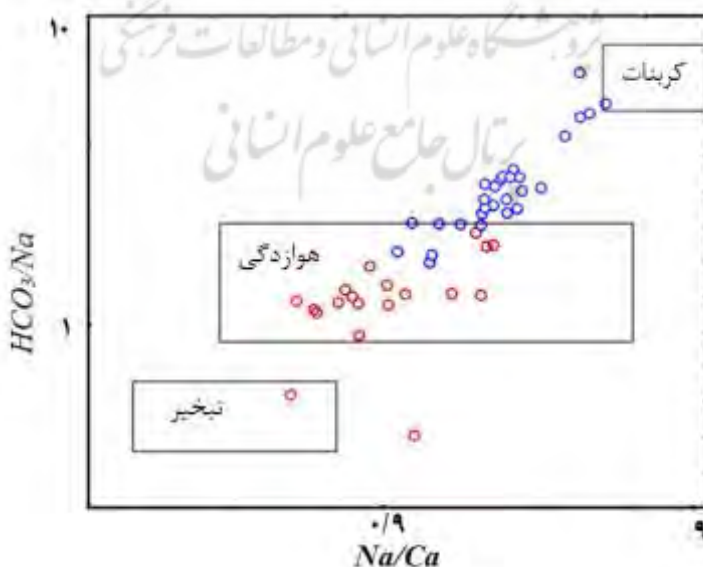
نمودار Cl در مقابل Na نشان می‌دهد چاه‌های دشت امان‌آباد (خوشه الف) به دلیل نفوذ آب شور عمدتاً در اطراف خط ۱:۱ هستند و همچنین به سمت Cl کشیده شده‌اند (شکل ۱۲). پراکندگی چاه‌های آب دشت اراک به سمت منطقه هوازدگی حاکی از اهمیت HCO_3 در نتیجه هوازدگی کانی‌های کربناته است

در چاه‌های دشت امان‌آباد، بعضی نمونه‌ها در منطقه تبخیر و بعضی دیگر در منطقه هوازگی قرار می‌گیرند (شکل ۱۴)؛ بنابراین علاوه بر فرایندهای هوازگی شیمیایی، نفوذ آب از خاک‌های زیرسطحی نیز فرایندهای هیدروژئوشیمیایی را در منطقه کنترل می‌کنند (Jalali, 2009: 1479). نمودار گیبس برای نمونه‌های دشت اراک حاکی از وجود فرایند هیدروژئوشیمیایی هوازگی است.

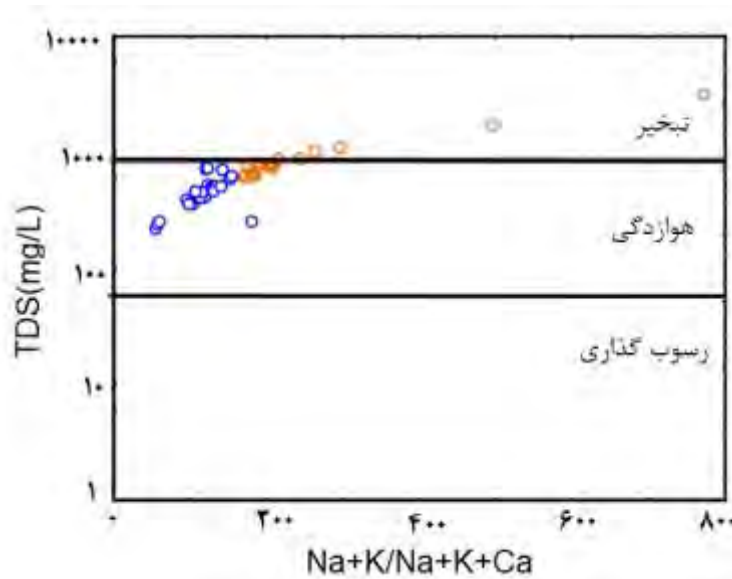
(شکل ۱۳). در دشت اراک بیشتر نمونه‌ها در محدوده هوازگی از جمله کربنات‌ها قرار دارند. نمودارهای گیبس با توجه به اثر متقابل مواد جامد کل (TDS) و Na-K-Ca برای ارتباط ترکیب شیمیایی با ویژگی‌های سنگ‌شناختی آبخوان، محدوده‌هایی از قبیل رسوب‌گذاری، تبخیر و هوازگی را نشان می‌دهد (Gibbs, 1970: 1088).



شکل ۱۲. نمودار Na-Cl، تعیین‌کننده ترکیبات شیمیایی غالب



شکل ۱۳. نمودار HCO_3/Na در مقابل Ca/Na ، تعیین‌کننده ترکیبات شیمیایی غالب



شکل ۱۴. نمودار TDS در مقابل Na+K/Na+k+Ca (نمودار گیبس)

نتیجه‌گیری

سویی اقدامات حفاظتی و کنترلی به‌ویژه در کاهش عوامل انسانی تغییردهنده ترکیب شیمیایی آب چاه‌ها از جمله NO_3 ، PO_4 ، HCO_3 و عناصر سنگین مؤثر است.

بخش عمده‌ای از منابع آب شرب شهری اراک را چاه‌هایی تشکیل می‌دهند که در داخل و حاشیه شهر متمرکز شده‌اند. سنگ‌های آهکی ارتفاعات جنوبی اراک و دریاچه شور تالاب میقان اراک در بخش شمالی اراک به‌مثابه عوامل طبیعی و شیرابه دفن زباله اراک، پساب شهرک صنعتی اراک و فاضلاب شهری به‌مثابه عوامل انسانی، نقش مهمی در تغییر ترکیب شیمیایی آب این چاه‌ها دارند. مجموعه عوامل طبیعی و انسانی سبب شده است غلظت بیشتر ترکیبات شیمیایی نظیر Ca ، Mg ، K ، Na ، Cl ، SO_4 ، F ، NO_3 ، PO_4 ، HCO_3 و عناصر سنگین از قبیل Cu ، Zn ، As ، Ni و Pb در بعضی چاه‌ها نسبت به حد طبیعی افزایش یابد و در آستانه آلودگی قرار گیرد. ادامه روند افزایشی ترکیبات شیمیایی در آینده ممکن است کیفیت آب بسیاری از چاه‌ها را از نظر شرب نامطلوب کند؛ بنابراین باید اقدامات پایشی در شناخت هرچه بیشتر ترکیبات شیمیایی این چاه‌ها صورت گیرد. از

منابع

جوادی شریف، پگاه، (۱۳۹۶). استفاده از شاخص‌ها و روش‌های آماری چندمتغیره جهت تعیین منشأ آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت اراک، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش اکتشاف، استاد راهنما: قدیمی، فریدون، دانشگاه صنعتی اراک، گروه مهندسی معدن.

Afzal, P., Fadakar., Y., Khakzad., A., Moarefvand, P., Rashidnejad, N., (2011). **Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling**, Journal of Geochemical Exploration, Vol 108, Pp 220–32.

Andre, L., Franceschi, M., Pouchan, P., Atteia, O., (2005). **Using geochemical data and**

- Ghadimi, F., Ghomi, M., (2012a). **Statistical analysis of the hydrochemical evolution of groundwater in alluvial aquifer of Arak Mighan Markazi provinc, Iran**, Journal of Water Sciences Research, Vol 1, Pp 12-35.
- Ghadimi, F., Ghomi, M., (2012b). **Evaluation of geochemical controlling parameters of groundwater in Arak using factor analysis**, Environmental Technolog, Green Pages.
- Ghadimi, F., (2015). **Prediction of heavy metals contamination in the groundwater of Arak region using artificial neural network and multiple linear regression**, Journal of Tethys, Vol 3 (3), Pp 203-215.
- Gibbs, R.J., (1970). **Mechanism controlling world water chemistry**, Science 17, Pp 1088– 1090.
- Hakanson, L., (1980). **An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach**, Water Research, Vol 14, Pp 975-1001.
- Helstrup, T., Jorgensen, N.O., Banoeng-Yakubo, B., (2007). **Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from Cretaceous–Eocene limestone aquifers in southern Ghana and Togo using hierarchical cluster analysis**, Hydrogeology, Vol 15, Pp 977–989.
- Jalali, M., (2009). **Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran**, Environmental Geology, Vol 56, Pp 1479– 1488.
- Kumar, A., Dua, A., (2009). **Water quality index for assessment of water quality of river Ravi at Madhopur (India)**, Journal of Environmental Science, Vol 8 (1), Pp 49-57.
- Mohamed, A., AlmasPoor, F., (2003). **The application of geographical information system to analyze the spatial distribution and locate network pharmacies (case study: the 6th district of Tehran)**, Geographical Research Quarterly, Vol 67, Pp 102-108.
- modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France, Journal of Hydrology, Vol 305, Pp 40–62.
- Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S., Tarvainen, T., (1997). **Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia**, Environmental Geology, Vol 36, Pp 55–64.
- Boylan, G.L., Cho, B.R., (2011). **The normal probability plot as a tool for understanding data: a shape analysis from the perspective of skewness, kurtosis and variability**, Quality Reliability Engineering International, Vol 28 (3), Pp 255-268.
- Chowdhury, S., Mazumder, M.A., Alattas, O., Husain, T., (2016). **Heavy metals in drinking water: occurrences, implications, and future needs in developing countries**, Science Total Environment, Vol 569-570, Pp 476-488.
- Datta, B., Amir abdollahian, M., Zuo, R., Prakash, O.M., (2016). **Groundwater contamination plume delineation using local singularity mapping technique**, International Journal of Geomate, Vol 11 (3), Pp 2435-2441.
- Deng, J., Wang., Q.F., Yang., L.Q., Wang., Y.R., Gong, Q.J., Liu, H., (2010). **Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan province, China**, Journal of Geochemical Exploration, Vol 105, Pp 95–105.
- Ghadimi, F., Ghomi, M., Aref Sedigh, M., (2015). **Identification of Ti- anomaly in stream sediment geochemistry by use of stepwise factor analysis and multifractal method in Delijan district, Iran**, International Journal of Mining Geo-Engineering, Vol 50 (1), Pp 77-95.
- Ghadimi, F., Ghomi, M., Azimi, R., (2016). **Sources of nitrate and bromide contaminants of groundwater in alluvial aquifer of Arak, Iran**, Journal of Tethys, Vol 4 (2), Pp 100-115.

- Reza, R., Singh, G., (2010). **Heavy metal contamination and its indexing approach for river water**, International Journal of Environmental Science Technology, Pp 785–792.
- Tanjung, R.H.R., Baigo, H., Alianto, B., (2019). **Assessment of water quality and pollution index in coastal waters of Mimika, Indonesia**, Journal of Ecological Engineering, Vol 20 (2), Pp 87-94.
- Torabian, A., Shahavi, Sh., (2017). **Studying Iranian drinking water quality guidelines compared to the Authentic World Standard**, Journal of Water and Wastewater Science and Engineering, Vol 2 (2), Pp 3-13.
- Wang, P., J., Yu, Zhang Y., Liu, C., (2013). **Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China**, Journal of Hydrology, Vol 476, Pp 72–86.
- WHO, (2017). **Guidelines for Drinking-water Quality**, fourth ed. incorporating the first addendum, Geneva.
- Monjerezi, M., Vogt, M.R., Aagaard, P., Saka, J.D.K., (2011). **Hydro-geochemical processes in an area with saline groundwater in lower Shire River valley, Malawi: An integrated application of hierarchical cluster and principal component analyses**, Applied Geochemistry, Vol 26, Pp 1399–1413.
- Nasrabadi, T., (2015). **An index approach to metallic pollution in river waters**, International Journal of Environment Research, Vol 9 (1), Pp 385-394.
- Pan, L., Wang, Y., Ma, J., Hu, Y., Su, B., Fang, G., Wang, L., Xiang, B., (2017). **A review of heavy metal pollution levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities**, Environmental Science Pollution Research, Vol 25, Pp 1055-1069.
- Puente, C.E., Robayo, O., Díaz, M.C., Sivakumar, B., (2001). **A fractal-multifractal approach to groundwater contamination**, Modeling conservative tracers at the Borden site, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol 15 (5), Pp 357–371.