

## تعیین منشاء آلودگی آب زیرزمینی آبخوان اراک به کمک تحلیل عاملی مرحله‌ای

❖ فریدون قدیمی\*؛ دانشیار رسوب شناسی، دانشگاه صنعتی اراک

❖ پگاه جوادی شریف؛ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

### چکیده

در آبخوان‌های آبرفتی دنیا مخلوط شدگی آب‌های شور و شیرین، فعالیت‌های کشاورزی، پساب‌های صنعتی و شیرابه‌های زباله‌های شهری و روستایی مهم‌ترین منابع تهدید کننده آب‌های زیرزمینی هستند. در این تحقیق ۴۶ نمونه آب از چاه‌های دشت اراک برداشت و متغیرهای فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تعیین و مورد تحلیل آماری چند متغیره قرار گرفت. تحلیل عاملی بر روی متغیرهای فیزیکی، شیمیایی آب‌های زیرزمینی آبخوان اراک نقش مهمی در تفکیک انواع آلاینده‌ها در منطقه داشته است. تحلیل عاملی مرحله‌ای، پنج عامل را در متغیرهای هیدروشیمیایی آبخوان اراک مشخص نمود. در عامل اول متغیرهای EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na منشأ طبیعی داشته که مخلوط شدگی آب شور حاصل از پلایای میقان و آب شیرین آبخوان مسبب آن است. در عامل دوم HCO<sub>3</sub> منشأ طبیعی و ناشی از انحلال سنگ آهک‌های ارتفاعات جنوب اراک و HNO<sub>3</sub> منشأ انسانی و حاصل نفوذ چاه‌های جذبی شهری و فعالیت‌های کشاورزی است. منشأ عناصر در عامل سه و چهار یعنی Cu، Zn، Fe و Mn انسانی و ناشی از فعالیت‌های صنعتی و دفن زباله شهری و عامل پنجم یعنی F نیز ناشی از فعالیت‌های کشاورزی یعنی مصرف کودهای فسفاته است. این مطالعه همچنین نشان داد که تحلیل عاملی مرحله‌ای روشی مناسب برای تفکیک منشأ آلاینده‌ها است. بنابراین، بایستی اقدامات لازم در خصوص کنترل آلودگی‌های انسانی از منابعی چون فاضلاب شهری اراک، پساب کشاورزی و صنعتی توسط سازمان‌ها و شرکت‌های مربوطه صورت گیرد.

کلید واژگان: آمار چند متغیره، تحلیل عاملی مرحله‌ای، آلودگی آب زیرزمینی، آبخوان اراک

## ۱. مقدمه

خوشه‌های<sup>۴</sup> و تحلیل تطبیقی<sup>۵</sup> مهم‌ترین روش‌های بررسی متغیرهای کیفی در آب‌های زیرزمینی هستند [۵]. روش‌های آماری می‌توانند منجر به تفکیک منابع آلوده کننده طبیعی و انسانی شوند [۶]. تحلیل عاملی یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری چند متغیره است که داده‌های زیادی را مورد بررسی قرار می‌دهد. این روش عامل‌های مؤثری را در مجموعه‌ای از متغیرها که روابط آن‌ها مشخص نیست مورد بررسی قرار می‌دهد. تحلیل عاملی مجموعه متغیرها را به تعداد محدودی از عامل تقسیم می‌کند. فرض نرمال بودن داده‌ها و بررسی خارج از رده بودن داده‌ها که تحلیل عاملی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، لازم است [۷]. در تحلیل داده‌های هیدروژئوشیمیایی هدف از کاربرد تحلیل عاملی یعنی یافتن عامل‌ها و متغیرها در رابطه با آلودگی است. بنابراین، احتمال متغیرهای دیگر هم وجود دارد. این متغیرها می‌توانند متغیرهای غیر ضروری از متغیر تفکیک شده باشند که نتایج تحلیل عاملی از آن‌ها برای جداسازی آلودگی استفاده ننموده است [۸]. انتخاب متغیرهای اصلی در تحلیل عاملی بسیار مهم و نقش مهمی در کسب نتایج دارد. تغییر پذیری حتی کم می‌توان سبب تغییر مکان مناطق آلوده شود. جهت حل این مشکل روش‌های مختلفی از تحلیل عاملی از جمله تحلیل عاملی متوالی<sup>۶</sup> و تحلیل عاملی مرحله‌ای<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹، ۱۰، ۱۱]. تفکیک فرآیندهای طبیعی و انسانی مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان اراک، نقش تحلیل عاملی مرحله‌ای در تعیین متغیرهای اصلی آلاینده‌ها، تعیین موقعیت مکانی آلاینده‌ها و دلایل احتمالی منشأ آلاینده‌ها از اهداف این تحقیق است.

آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منابع آب شیرین برای بشر بوده و آبخوان‌های آبرفتی منابع عمده آب برای آشامیدن هستند. کیفیت آب زیرزمینی به فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد. واکنش‌پذیری آب و سنگ، انحلال کانی‌ها، زمان ماندگاری آب زیرزمینی، مسیرهای جریان، مخلوط شدگی توده‌های مختلف آب و بهره‌برداری انسان از آب مهم‌ترین فاکتورهایی هستند که کیفیت آب زیرزمینی را تعیین می‌کنند [۱]. ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی متأثر از انواع فعالیت‌های انسانی، نظیر شهری شدن، صنعتی و کشاورزی است. منابع عمده آلاینده‌های انسانی نظیر فاضلاب‌های شهری، روان‌آب کشاورزی و پساب‌های صنعتی ترکیبی از مواد غیر آلی بوده که کیفیت آب زیرزمینی یک منطقه را تغییر می‌دهند [۲]. منابع مورد نظر غنی از  $\text{NO}_3^-$ ، عناصر سنگین نظیر  $\text{Zn}$ ،  $\text{Cd}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Cr}$  و  $\text{Mn}$  هستند. منابع عمده  $\text{NO}_3^-$  در آب زیرزمینی را فاضلاب‌های کشاورزی و پساب‌های دامی تشکیل می‌دهند [۳]. تجزیه باکتریایی مواد آلی در فاضلاب‌ها و فضولات حیوانی منشأ عمده  $\text{NO}_3^-$  در آب است. عناصر سنگین  $\text{Cd}$ ،  $\text{Cr}$  و  $\text{Pb}$  به عنوان عناصر سرطان‌زا و عناصر  $\text{Zn}$ ،  $\text{Fe}$  و  $\text{Mn}$  به عنوان عناصر غیر سرطان‌زا در آب‌های زیرزمینی ناشی از گریس، پسماند‌های دترجنت، حلال‌های تمییزکننده، روغن و مواد داروخانه‌ای هستند که غلظت آن‌ها می‌تواند در آب‌های زیرزمینی کم عمق بالاتر از استاندارد شرب باشد [۴]. بنابراین، در ارزیابی متغیرهای کیفی آب‌های زیرزمینی با مجموعه‌ای از داده‌ها و روش‌ها مواجه هستیم. تحلیل‌های آماری چند متغیره<sup>۱</sup> نظیر تحلیل عاملی<sup>۲</sup>، تحلیل مؤلفه اصلی<sup>۳</sup>، تحلیل

<sup>1</sup> Multivariate statistical analysis

<sup>2</sup> Factor analysis

<sup>3</sup> Principle component analysis

<sup>4</sup> Cluster analysis

<sup>5</sup> Corresponding analysis

<sup>6</sup> Sequential factor analysis

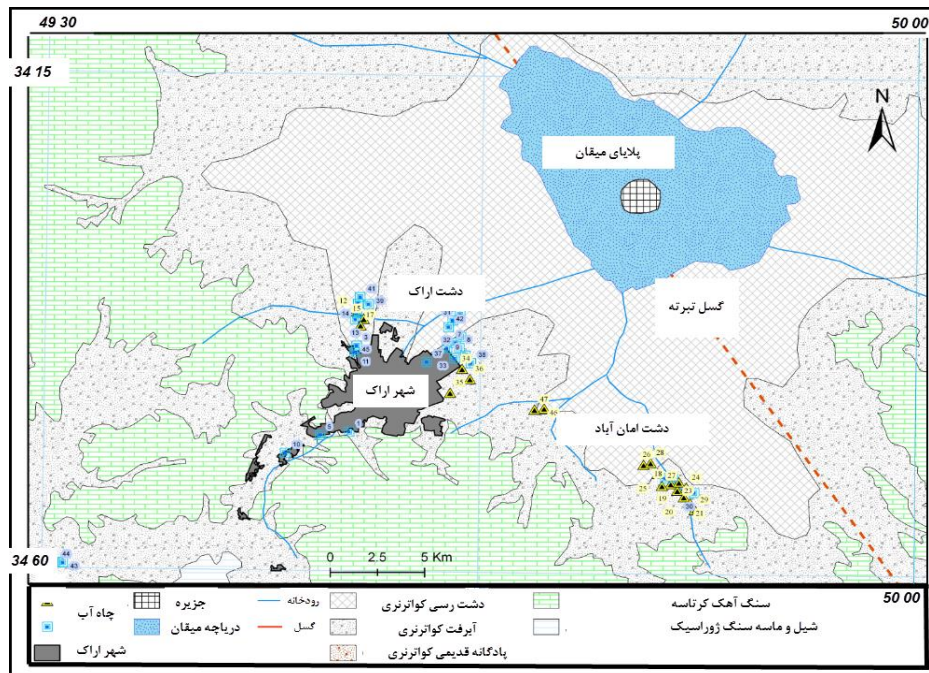
<sup>7</sup> Stage factor analysis

## ۲. روش شناسی

### ۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان مرکزی و به مرکزیت شهر اراک واقع شده که دارای آب و هوای نیمه خشک، بارش متوسط سالانه ۲۸۰ میلی‌متر و درجه حرارت ۱۸ درجه سانتی‌گراد است [۱۲]. آبخوان اراک بین کوه‌های اراک در جنوب و پلایای میقان در شمال اراک، توسط دو رودخانه قره کهریز و امان آباد در جنوب و شرق شهر اراک تغذیه می‌شود. این رودخانه‌ها در مسیر خود از اراضی کشاورزی و صنایع مختلف عبور می‌نمایند. رودخانه قره

کهریز در دشت اراک متأثر از ورود فاضلاب شهری و پساب صنایع است. رودخانه امان آباد نیز در دشت امان آباد در مسیر خود از محل دفن زباله اراک عبور می‌نماید. به لحاظ زمین شناسی، منطقه در زون سنندج- سیرجان قرار داشته که حاوی سنگ‌های با دگرگونی ضعیف از جمله شیل و ماسه سنگ ژوراسیک و اسلیت و هم چنین آهک‌های متبلور کرتاسه است. سنگ کف آبخوان از جنس آهک متبلور کرتاسه است (شکل ۱). دشت اراک بین کوه‌های اراک در جنوب و پلایای میقان در شمال دارای چاه‌های آب شربی بوده که تحت تأثیر ترکیب آهکی ارتفاعات و لایه‌های شور پلایای میقان قرار گرفته است [۱۲].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی آبخوان اراک

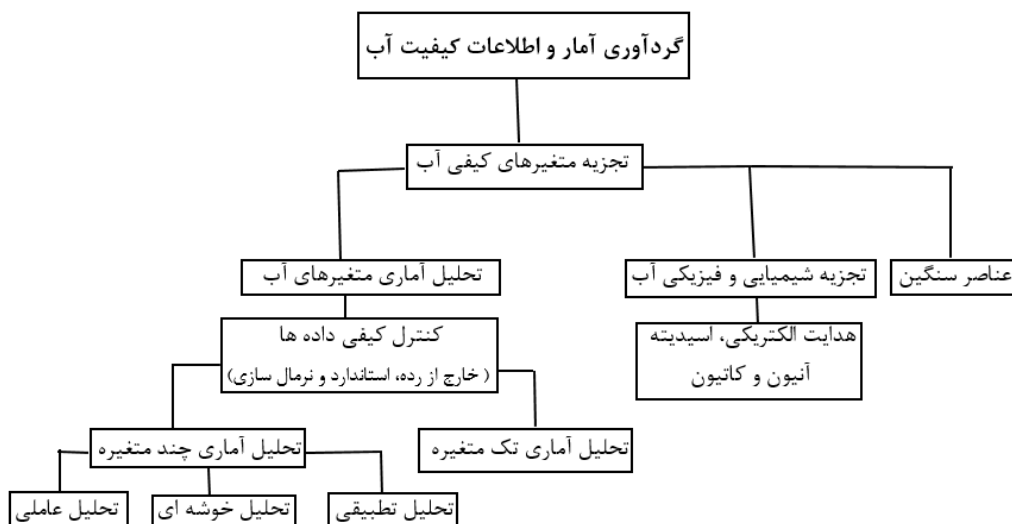
متغیرهای تجزیه شیمیایی در آزمایشگاه شامل کاتیون‌ها از جمله کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K)، سدیم (Na) و آنیون‌ها شامل کلرید (Cl)، سولفات (SO<sub>4</sub>)، فلوراید (F)، نیترات (NO<sub>3</sub>) و فسفات (PO<sub>4</sub>) بوده که به روش کروماتوگرافی یونی اندازه‌گیری شدند. غلظت یون بی‌کربنات در آب با استفاده از تیتراسیون و فلزات سنگین

### ۲.۲. تجزیه شیمیایی آب‌های زیرزمینی

جهت تعیین منشأ منابع آلاینده آبخوان اراک ۴۶ چاه شرب عمیق تا نیمه عمق با عمق متوسط ۱۰۰ متر انتخاب و تجزیه فیزیکی و شیمیایی آب‌ها در سازمان آب منطقه‌ای و شرکت آبفا مرکزی انجام گردید. تجزیه‌ها در محل شامل هدایت الکتریکی (EC) و pH بوده است.

پدرازش داده‌های کیفی و آماری آب طبق شکل (۲) در نرم‌افزارهای Excel، Statistica، و ArcGIS انجام گردید.

نیز با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی تعیین شدند. دقت تجزیه شیمیایی با محاسبه تعادل یونی با خطای کمتر از ۱۰٪ مورد بررسی قرار گرفت. عملیات



شکل ۲. فلوچارت مراحل ارزیابی داده‌های کیفی آب

در صد فراوانی تجمعی داده‌ها، مقدار تر سیمی<sup>۳</sup> آن‌ها بر روی کاغذ احتمال پیاده می‌شود (رابطه<sup>۱</sup> [۱۴]).

$$H_p = \frac{3*ACF-1}{3n+1} \quad (1)$$

در رابطه<sup>۱</sup> (۱)  $H_p$  درصد ترسیمی، ACF درصد فراوانی تجمعی مطلق و  $n$  تعداد نمونه‌ها است. با توجه به روش نمودار جعبه‌ای و نمودار تجمعی، متغیرهای  $K, Mn, As, Na, Mg, Ca, PO_4, HCO_3, SO_4, Cl, F, TH, TDS, EC, Co, Ni, Cu, Zn$  دارای مقادیر خارج از ردیف می‌باشند (جدول ۱ و شکل ۳).

#### ۴.۲. استاندارد سازی و نرمال بودن داده‌ها

استاندارد سازی در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به معنای بی‌مقیاس سازی است و امکان مقایسه داده‌ها با معیارهای سنجش متفاوت را میسر می‌کند.

#### ۳.۲. مقادیر خارج از ردیف<sup>۱</sup>

مقادیر خارج از ردیف به مقادیری گفته می‌شود که به نحو چشم‌گیری خارج از مقادیر داده‌ها در آخرین حد مقادیر کم یا زیاد قرار داشته باشند. لازم به ذکر است این مقادیر می‌توانند آلودگی محسوب شده و می‌توان آن‌ها را به مناطقی که دارای آلودگی هستند، منتسب کرد [۱۳]. برای تشخیص و تعیین مقادیر خارج از ردیف از روشی به نام نمودار جعبه‌ای<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. برای تصحیح مقادیر خارج از ردیف برای داده‌های با گسترش زیاد، یکی از روش‌های موجود، استفاده از نمودار تجمعی می‌باشد. در این روش قسمت‌های منحرف شده توزیع را می‌توان به نحوی تصحیح کرد که از همان روند خطی کل داده‌ها تبعیت کند. به دلیل نامحدود بودن دامنه مقادیر در توزیع نرمال و عدم توانایی در نشان دادن مقادیر متناظر با ۱۰۰ درصد فراوانی، به جای

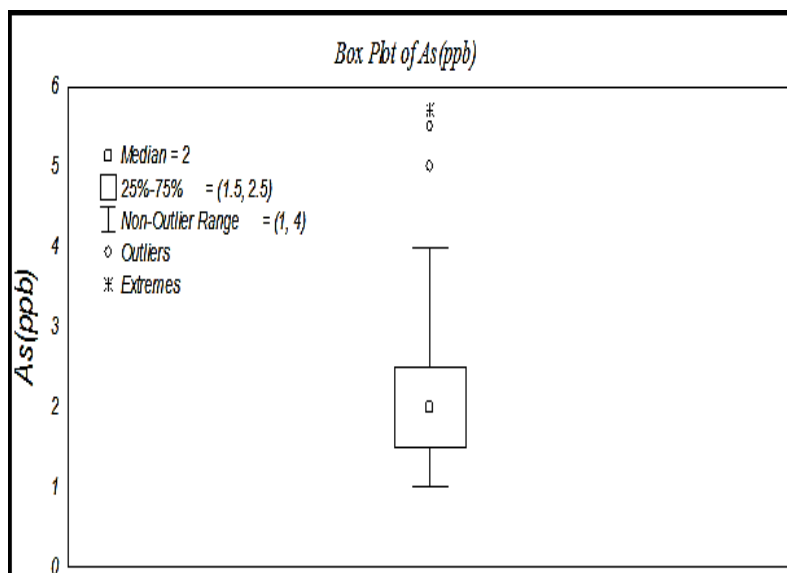
<sup>1</sup> Outlier

<sup>2</sup> Box-Plot

<sup>3</sup> Plotting percentage

جدول ۱. متغیرهای خارج از ردیف

متغیر	تعداد داده‌های خارج از ردیف	متغیر	تعداد داده‌های خارج از ردیف
EC	۲	Mg	۱
TDS	۲	Na	۲
TH	۱	K	۳
F	۲	Mn	۱
Cl	۲	As	۲
SO <sub>4</sub>	۲	Zn	۳
HCO <sub>3</sub>	۲	Cu	۳
PO <sub>4</sub>	۳	Ni	۲
Ca	۱	Co	۱



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای As

گویند. از خصوصیات یک توزیع نرمال می‌توان انطباق سه  
 آماره میانگین، میانه و مد و شکل زنگوله متقارن را نام برد  
 [۱۴]. جهت استاندارد سازی و نرمال کردن داده‌های اولیه  
 از تبدیلات لگاریتم نسبتی<sup>۱</sup> استفاده شد. سه نوع تبدیل از  
 قبیل تبدیل لگاریتم نسبتی مرکزی<sup>۲</sup>، تبدیل لگاریتم  
 نسبتی ایزومتریک<sup>۳</sup> و تبدیل لگاریتم نسبتی فزاینده<sup>۴</sup>  
 وجود دارند (روابط ۲ تا ۴) [۱۶]. در این تحقیق از رابطه<sup>۳</sup>

از جمله روش‌های استاندارد سازی داده‌ها تبدیل  
 داده‌ها به مجموعه جدیدی است که در آن همه مقادیر  
 بین صفر و یک قرار خواهند گرفت [۱۴]. به علاوه، اکثر  
 محاسبات و روش‌های آماری نیازمند داده‌های نرمال  
 هستند [۱۵]. چنانچه منحنی توزیع یک مجموعه از  
 داده‌ها مطابق با منحنی توزیع نرمال باشد، آن منحنی را  
 یک منحنی نرمال و آن مجموعه داده‌ها را داده‌های نرمال

<sup>1</sup> Logratio

<sup>2</sup> Central Logratio (clr)

<sup>3</sup> Isometric Logratio (ilr)

<sup>4</sup> Additive Logratio (alr)

بی‌ارتباط هستند، رابطه خاصی را تحت یک مدل فرضی برقرار می‌کند. بنابراین، از اهداف اصلی تحلیل عاملی، کاهش ابعاد داده‌ها است. فرض اساسی در به‌کارگیری این روش، وجود الگویی زیر بنایی یا مدلی خطی در تعیین مفاهیم پیچیده ارتباطی بین متغیرها است. این ارتباط در قالب یک عامل در این مدل فرضی ظاهر می‌شود. با اعمال تحلیل عاملی ابعاد داده‌ها از تعداد زیادی عنصر به تعداد کمتری عامل کاهش پیدا می‌کند [۱۸]. تحلیل عاملی مرحله‌ای روش تعدیل یافته تحلیل عاملی است که توسط یوسفی [۱۸] برای ایجاد نقشه‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا تحلیل عاملی بر روی کلیه داده‌ها انجام گرفت و مقدار حدی<sup>۲</sup> انتخاب شد. متغیرهایی که بار ویژه کمتر از مقدار حدی (در تمام عامل‌های انتخاب شده) دارند از لیست متغیرها حذف گردیدند. این فرآیند چندین بار ادامه یافته تا جایی که بار ویژه هر متغیر از مقدار حد انتخاب شده بیشتر باشد. در مرحله جدید عامل‌های تمییز<sup>۳</sup> انتخاب می‌شوند [۱۹]. در مرحله بعدی، عامل‌های خاص انتخاب و متغیرهای با بار ویژه بیشتر از بار حد برای تحلیل انتخاب گردیدند. در مرحله پایانی تحلیل عاملی بر روی متغیرهایی انجام گرفت که از مرحله قبل باقی مانده بودند. این روش ادامه یافت تا این که، حداقل باری بیشتر از حد آستانه<sup>۴</sup> انتخاب شد. تحلیل خوشه‌ای<sup>۵</sup> یکی از روش‌های چند متغیره بوده که هدف از آن، دست یافتن به ملاکی برای طبقه‌بندی هر چه مناسب‌تر متغیرها و یا نمونه‌ها بر اساس تشابه هر چه بیشتر درون گروهی و اختلاف هر چه بیشتر بین گروهی است. در این جا، ملاک شباهت ضریب همبستگی و الگوریتم خوشه‌بندی روش وارد و فاصله پیرسون<sup>۶</sup> بوده است [۱۴]. تحلیل تطبیقی<sup>۸</sup> رابطه هم‌زمان متغیرها و نمونه‌ها را با یکدیگر در

برای استاندارد و نرمال سازی داده‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان اراک استفاده شد.

$$\text{ilr}(x) = \sqrt{\frac{1}{2}} \ln \left( \frac{x_i}{x_j} \right) \quad (2)$$

$$\text{clr}(x) = \ln \frac{x_i}{x_j} \quad (3)$$

$$\text{alr}(x) = \ln \left( \frac{x}{x} \right) \quad (4)$$

x مقدار اولیه داده‌ها و  $x_j$  میانگین هندسی داده‌ها است.

## ۵.۲. بررسی‌های آماری

در ارزیابی کیفیت آب‌ها، مقایسه میانگین پارامترهای آب با استاندارد ملی و بین‌المللی آب مورد توجه است [۱۷]. بنابراین، پارامترهای آماری اولین گزینه‌های هستند که به عنوان مهم‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات آماری مورد بررسی قرار می‌گیرند. در آمار تک متغیره، این اطلاعات نحوه پراکندگی داده‌ها حول میانگین و تمایل به میانگین، میزان چولگی و کشیدگی جامعه مقدار نمونه‌ها و تشابه و تمایز آن با یک توزیع نرمال را به نمایش می‌گذارد. آماره میانگین، میزان و چگونگی تمایل به مرکز داده را نشان می‌دهد. آماره‌های انحراف معیار و واریانس معرف نحوه پراکندگی و پراکنش داده‌ها از میانگین می‌باشند. پارامترهای چولگی و کشیدگی به ترتیب میزان تقارن حول میانگین و تیزی منحنی توزیع را نشان می‌دهند. در آمار چند متغیره تحلیل عاملی مرحله‌ای<sup>۱</sup> به گروهی از روش‌های آماری چند متغیره اطلاق می‌شود که هدف اولیه آن تفسیر ساختار ماتریس واریانس-کوواریانس مجموعه‌ای از داده‌های چند متغیره است. تحلیل عاملی بین مجموعه‌ای متشکل از متغیرهای گوناگون که به ظاهر

<sup>1</sup> Stage factor Analysis

<sup>2</sup> Cutt-off

<sup>3</sup> Clean factor

<sup>4</sup> Threshold

<sup>5</sup> Cluster analysis

<sup>6</sup> Ward method

<sup>7</sup> Pearson r

<sup>8</sup> Corresponding analysis

میانگین ترکیباتی چون سختی کل (TH) و عناصر سنگین (Co, Ni, Cu, Zn, As و Pb) از حد مجاز بیشتر است. مقایسه مقادیر حداکثر متغیرها با حد مجاز متغیرها [۱۷] در آبخوان اراک نشان داد، مقادیر EC, TDS, TH, HNO<sub>3</sub>, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Na, Ca, Mg, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> و Cl در آب چاه‌ها از مقادیر حد مجاز بیشتر است (جدول ۲).

نمودار پراکندگی ارائه می‌دهد. این روش کاربرد موفقیت آمیزی در پروژه‌های زیست محیطی به خصوص تشخیص آلودگی‌های ژئوشیمیایی و محل گسترش آن‌ها دارد. تحلیل تطبیقی نظیر تحلیل خوشه‌ای می‌تواند تأییدی بر تعیین منشأ متغیرها در تحلیل عاملی باشند [۲۰].

### ۳. نتایج

#### ۱.۳. پارامترهای آماری

میانگین غلظت غالب پارامترهای شیمیایی و فیزیکی در آب اکثر چاه‌ها از حد مجاز کمتر است (جدول ۲).

#### ۲.۳. تحلیل‌های چند متغیره

پارامترهای آماری شامل مقادیر ویژه، واریانس و واریانس تجمعی هر عامل همراه با مقادیر مشارکت هر عامل در تحلیل عاملی مرحله اول برای داده‌های کیفی آب زیرزمینی آبخوان اراک محاسبه گردید (جدول ۳).

جدول ۲. پارامترهای آماری داده‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی اراک

(آنیون‌ها و کاتیون‌ها برحسب به میلی‌گرم در لیتر، عناصر سنگین به میلی‌گرم در لیتر، Fe به درصد و EC به میکروزیمنس به سانتی متر)

متغیر	میانگین	میان	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	حد مجاز
EC	۹۶۸	۸۷۱	۳۱۶	۴۵۷۰	۶۵۷	۴/۰۴	۲۰/۵۵	۱۵۰۰
pH	۷/۵۱	۷/۵۴	۷/۲۱	۷/۷۱	۰/۱۳	-۰/۵۳	-۰/۸۱	۶/۵-۸/۵
TDS	۶۹۰	۶۲۰	۲۲۱	۳۱۹۹	۴۵۶	۴/۰۴	۲۰/۷۳	۱۰۰۰
TH	۳۴۴	۳۱۰	۱۵۲	۱۵۲۳	۲۰۶	۴/۳۳	۲۴/۲۱	۲۰۰
SiO <sub>2</sub>	۱۷/۳۷	۱۷/۵۰	۱۰	۲۳	۳/۱۲	-۰/۴۴	-۰/۰۹	-
F	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۷۹	۰/۱۱	۳/۶۳	۱۸/۳۸	۱/۵
Fe	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰	۰/۰۵	-۱/۴۳	۰/۳۰
HNO <sub>3</sub>	۳۵/۰۴	۲۵/۵۰	۱۲	۱۰۲	۲۴/۴۸	۱/۱۲	۰/۴۶	۵۰
Co	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۳۶	۰/۰۵	-۰/۲۱	-۰/۱۰	۰/۱۰
Ni	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۰۳	۱/۰۰	۰/۲۲	۱/۹۳	۴/۵۲	۰/۰۷
Cu	۱۳/۸۴	۱۲/۲۵	۴/۰۰	۵۰	۹/۰۷	۲/۰۳	۵/۲۳	۴
Zn	۱۵/۸۴	۱۳/۵۰	۴/۰۰	۵۰	۹/۳۰	۱/۶۴	۳/۵۰	۰/۱۰
As	۲/۲۰	۲/۰۰	۱/۰۰	۵/۷	۱/۱۲	۱/۶۱	۲/۷۲	۰/۰۱
Pb	۶/۵۱	۷/۰۰	۲/۰۰	۹/۰۰	۱/۹۳	-۰/۴۶	-۰/۳۵	۰/۰۱
Mn	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۱	۵/۸۱	۳۷/۱۶	۰/۱۰
K	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۳۰	۱/۹۰	۰/۳۲	۱/۲۸	۲/۲۷	-
Na	۷۷/۹۷	۵۷/۵۰	۹/۵۰	۳۶۱	۶۸/۶۳	۲/۸۷	۹/۸۰	۲۰۰
Ca	۹۷/۹۲	۸۸/۵۰	۴۴/۵	۴۰۸	۵۴/۹۸	۴/۱۴	۲۲/۶۹	۳۰۰
Mg	۲۴/۱۳	۲۰/۷۵	۸/۵۰	۱۱۲/۵	۱۵/۸۷	۳/۹۹	۲۱/۴۷	۳۰
PO <sub>4</sub>	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۰۳	۲/۱۴	۴/۳۹	-
HCO <sub>3</sub>	۱۹۶	۱۷۰	۹۰	۶۱۶	۸۵/۹۸	۳/۰۲	۱۲/۵۰	۲۰۰
SO <sub>4</sub>	۹۷/۴۹	۹۵	۷/۰۰	۳۰۰	۵۶/۸۶	۱/۳۹	۳/۴۸	۲۰۰
Cl	۱۳۹	۸۶	۶/۵۰	۱۴۳۵	۲۲۳	۴/۹۲	۲۷/۰۱	۲۰۰

جدول ۳. تحلیل بار عاملی مرحله اول داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

متغیر	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴	عامل ۵	عامل ۶
EC	۰/۹۵	-۰/۰۶	۰/۱۰	-۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۱۶
TDS	۰/۹۴	-۰/۱۱	-۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۲
SiO <sub>2</sub>	۰/۴۹	۰/۰۰	-۰/۰۳	-۰/۴۹	-۰/۴۱	-۰/۰۰
F	-۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۱۳	-۰/۸۸	-۰/۰۶	۰/۰۵
Cl	۰/۸۹	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۳	-۰/۱۹
SO <sub>4</sub>	۰/۹۰	۰/۱۹	-۰/۰۳	۰/۱۰	-۰/۰۱	-۰/۰۱
HCO <sub>3</sub>	-۰/۰۹	-۰/۸۶	-۰/۰۴	-۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۵
PO <sub>4</sub>	۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۲۶	۰/۵۸	-۰/۲۶	۰/۳۰
Ca	۰/۷۸	-۰/۴۱	۰/۲۷	۰/۰۸	۰/۱۴	-۰/۰۱
Mg	۰/۷۸	-۰/۴۰	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۶
Na	۰/۸۲	۰/۴۰	-۰/۰۵	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۲۱
K	۰/۶۵	-۰/۱۴	۰/۰۷	-۰/۲۷	-۰/۱۵	-۰/۲۷
Fe	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۲۲	-۰/۷۷	-۰/۰۳
Mn	-۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۰۲	-۰/۱۵	-۰/۸۴	-۰/۲۲
As	۰/۲۳	۰/۴۵	۰/۵۹	-۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۷
Pb	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۶	-۰/۱۳	-۰/۷۵
Zn	۰/۰۴	-۰/۰۴	۰/۹۰	۰/۰۷	۰/۱۰	-۰/۱۳
Cu	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۹۲	۰/۰۸	-۰/۱۴	۰/۰۰
Ni	-۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۲۴	-۰/۰۰	-۰/۰۲	۰/۷۸
Co	۰/۵۰	-۰/۲۱	-۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۳۱	-۰/۰۶
HNO <sub>3</sub>	۰/۱۸	-۰/۸۶	۰/۰۳	-۰/۱۲	-۰/۰۶	۰/۰۶
مقدار ویژه	۶/۷۳	۳/۱۶	۲/۴۹	۱/۹۷	۱/۴۴	۱/۰۲
واریانس (/)	۳۲/۰۴	۱۵/۰۳	۱۱/۸۷	۹/۳۸	۶/۸۶	۴/۸۶
مقدار ویژه تجمعی	۶/۷۳	۹/۸۸	۱۲/۳۸	۱۴/۳۵	۱۵/۷۹	۱۶/۸۱
واریانس تجمعی (/)	۳۲/۰۴	۴۷/۰۷	۵۸/۹۴	۶۸/۳۲	۷۵/۱۸	۸۰/۰۴

متغیرهای EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na با مقادیر مثبت است. عامل دوم شامل متغیرهای HCO<sub>3</sub> و HNO<sub>3</sub> با مقادیر منفی، عامل سوم شامل عناصر Zn و Cu با مقادیر مثبت، عامل چهارم شامل متغیرهای F و SiO<sub>2</sub> با مقادیر منفی، عامل پنجم شامل متغیرهای Mn و Fe با مقادیر منفی، عامل ششم شامل متغیر Ni با مقدار مثبت و متغیر Pb با مقدار منفی است. از بین مقادیر انتخاب شده در مرحله اول تحلیل عاملی متغیرهای SiO<sub>2</sub>، PO<sub>4</sub>، K، As و Co با هیچ یک از عامل‌ها همبستگی نشان نداده و در مرحله دوم تحلیل عاملی حذف شدند.

بر اساس تحلیل مرحله دوم، تعداد ۵ عامل معرفی شد (جدول ۴). عامل‌های ارائه شده در مرحله دوم تحلیل

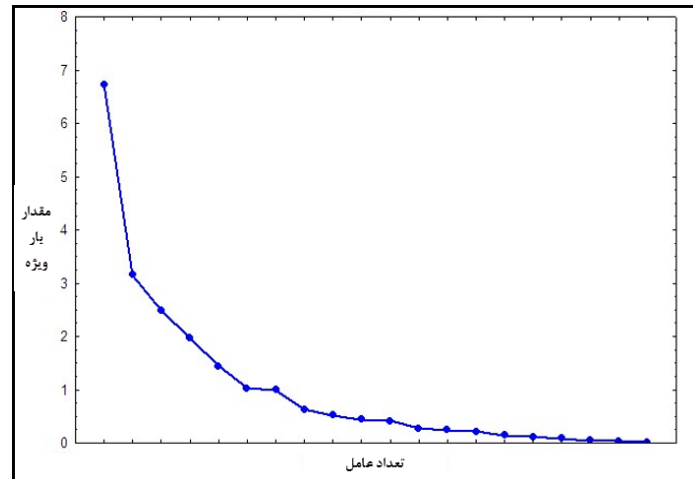
بیشترین مقدار ویژه در ارتباط با عامل اول و برابر ۶/۷۳ و کمترین مقدار مربوط به عامل هفتم و برابر ۱/۰۲ است (شکل ۴). واریانس تجمعی معیاری جهت تعیین عامل‌ها می‌باشد. با توجه به جدول ۳ تعداد ۴ عامل تقریباً ۶۸/۳۲ درصد کل تغییرپذیری را توجیه کردند. تعداد ۶ عامل در تحلیل عاملی مرحله اول برای داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک ارائه شد.

از بین ۷ عامل انتخاب شده در مرحله اول تحلیل عاملی مرحله‌ای، عامل اول بیشترین واریانس را دارا است. واریانس عامل اول ۳۱/۹۳ درصد، عامل دوم ۱۴/۵۱ درصد، عامل سوم ۱۱/۴۹ درصد و عامل چهارم ۱۰/۰۴ درصد کل تغییرپذیری را شامل می‌شوند (جدول ۳). عامل اول شامل



شامل متغیرهای F و Pb با مقدار مثبت، عامل پنجم شامل متغیرهای Fe و Mn با مقدار منفی است. متغیر Ni با هیچ یک از عامل‌ها در تحلیل مرحله دوم همبستگی نداشته و در مرحله سوم از میان داده‌ها حذف گردید.

عاملی ۷۷/۷۱ درصد کل مجموعه داده‌ها را شامل می‌شود. عامل اول شامل متغیرهای EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na با مقادیر مثبت، عامل دوم شامل متغیرهای HCO<sub>3</sub> و HNO<sub>3</sub> با مقادیر مثبت، عامل سوم شامل متغیرهای Zn و Cu با مقادیر مثبت، عامل چهارم



شکل ۴. نمودار پله‌ای تعیین تعداد عامل‌ها در مرحله اول داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

جدول ۴. تحلیل عاملی مرحله دوم بار عاملی داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

متغیر	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴	عامل ۵
EC	۰/۹۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۰	-۰/۰۷
TDS	۰/۹۴	-۰/۱۳	-۰/۰۴	۰/۰۶	-۰/۰۲
F	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۱۴	۰/۷۰	-۰/۰۵
Cl	۰/۹۲	-۰/۳۲	۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۵
SO <sub>4</sub>	۰/۹۰	-۰/۱۷	-۰/۰۰	-۰/۱۰	۰/۰۲
HCO <sub>3</sub>	-۰/۱۲	۰/۸۶	-۰/۰۶	۰/۰۶	-۰/۱۰
Ca	۰/۸۰	۰/۴۳	۰/۲۲	-۰/۰۲	-۰/۰۶
Mg	۰/۷۷	-۰/۴۶	۰/۱۳	-۰/۱۰	-۰/۰۸
Na	۰/۸۴	-۰/۴۴	-۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۱۰
Fe	۰/۱۶	-۰/۲۱	-۰/۱۱	-۰/۳۳	-۰/۸۲
Mn	-۰/۲۷	-۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۱	-۰/۸۶
Pb	۰/۳۴	-۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۷۳	۰/۵۰
Zn	۰/۰۷	-۰/۰۴	۰/۹۴	-۰/۰۹	۰/۱۴
Cu	۰/۰۸	-۰/۱۲	۰/۹۵	۰/۱۴	۰/۰۱
Ni	-۰/۱۲	-۰/۴۹	۰/۳۳	-۰/۱۹	-۰/۳۲
HNO <sub>3</sub>	۰/۱۲	۰/۸۶	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۷
مقدار ویژه	۵/۷۶	۳/۰۴	۲/۰۲	۱/۲۸	۱/۲۰
واریانس (%)	۳۶/۰۲	۱۸/۹۹	۱۲/۶۵	۷/۹۹	۷/۴۹
مقدار ویژه تجمعی	۵/۷۶	۸/۸۰	۸۳/۸۳	۱۲/۱۱	۱۳/۳۰
واریانس تجمعی (%)	۳۶/۰۳	۵۵/۰۲	۶۷/۶۷	۷۵/۶۶	۸۳/۱۵

شامل متغیرهای  $HCO_3$  و  $HNO_3$  با مقادیر منفی، عامل سوم شامل متغیرهای  $Zn$  و  $Cu$  با مقادیر مثبت، عامل چهارم شامل متغیرهای  $Fe$  و  $Mn$  با مقدار مثبت و عامل پنجم شامل متغیر  $F$  با مقدار مثبت است.

در مرحله سوم تعداد ۵ عامل ارائه شد (جدول ۵). پنج عامل در مرحله سوم ۸۵/۷۱ درصد کل مجموعه داده‌ها را شامل می‌شود. عامل اول شامل متغیرهای  $EC$ ،  $TDS$ ،  $Cl$ ،  $SO_4$ ،  $Ca$  و  $Mg$  دارای مقادیر مثبت، عامل دوم

جدول ۵. تحلیل عاملی مرحله سوم بار عاملی داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

متغیر	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴	عامل ۵
EC	۰/۹۷	-۰/۰۸	۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۲
TDS	۰/۹۴	-۰/۱۴	-۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۶
F	-۰/۰۲	۰/۰۳	-۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۸۵
Cl	۰/۹۳	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۰۱	-۰/۰۳
SO <sub>4</sub>	۰/۹۱	۰/۱۵	-۰/۰۱	-۰/۱۰	-۰/۰۲
HCO <sub>3</sub>	-۰/۱۶	-۰/۸۶	-۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۸
Pb	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۳۷	۰/۶۲
Ca	۰/۷۹	-۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۰۷
Mg	۰/۷۷	-۰/۴۸	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۵
Na	۰/۸۴	۰/۴۱	-۰/۰۱	-۰/۰۳	-۰/۰۲
Fe	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۸۵	-۰/۱۵
Mn	-۰/۳۲	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۹۰	۰/۱۱
Zn	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۹۴	۰/۱۲	-۰/۱۲
Cu	۰/۰۷	-۰/۱۲	۰/۹۵	-۰/۱۱	۰/۰۲
HNO <sub>3</sub>	۰/۰۹	-۰/۸۸	-۰/۰۶	-۰/۰۲	۰/۱۰
مقدار ویژه	۵/۷۵	۲/۶۹	۱/۹۹	۱/۲۳	۱/۱۹
واریانس (%)	۳۸/۳۶	۱۷/۹۱	۱۳/۲۵	۸/۲۳	۷/۹۶
مقدار ویژه تجمعی	۵/۷۵	۸/۴۴	۱۰/۴۳	۱۱/۶۶	۱۲/۸۶
واریانس تجمعی (%)	۳۸/۳۶	۵۶/۲۷	۶۹/۵۲	۷۷/۷۴	۸۵/۷۱

تحلیل عاملی با شناسایی ۵ منشأ به پایان رسید. نمودار پراکندگی متغیرها در عامل‌های اول، دوم و سوم در شکل (۵) ارائه شده است.

ارزیابی عوامل پنج گانه شناسایی شده در تلفیق با نقشه‌های عاملی صورت گرفت. با توجه به نمره عامل هر متغیر، نقشه‌های عاملی ارائه شد (جدول ۷). با توجه به این که طیف نمرات نمونه‌ها در عوامل متغیر بوده طبق رابطه فازی (۵) داده‌ها در یک طیف صفر تا یک تبدیل گردید و نقشه‌های فازی عامل‌ها در تحلیل عاملی ترسیم شد (شکل ۶).

متغیر  $Pb$  با هیچ یک از عامل‌ها در تحلیل مرحله سوم همبستگی نداشته و در مرحله چهارم از میان داده‌ها حذف گردید (جدول ۶). پنج عامل معرفی شده در مرحله چهارم تحلیل عاملی ۸۹/۰۹ درصد کل مجموعه داده‌ها را شامل می‌شوند. عامل اول شامل متغیرهای  $EC$ ،  $TDS$ ،  $Cl$ ،  $SO_4$ ،  $Ca$  و  $Mg$  با مقادیر مثبت، عامل دوم شامل متغیرهای  $HCO_3$  و  $HNO_3$  با مقادیر منفی، عامل سوم شامل متغیرهای  $Zn$  و  $Cu$  با مقادیر مثبت، عامل چهارم شامل متغیرهای  $Fe$  و  $Mn$  با مقدار مثبت و عامل پنجم شامل متغیر  $F$  با مقدار منفی است. در تحلیل عاملی مرحله چهارم تمامی متغیرها در ۵ عامل مشخص شد و

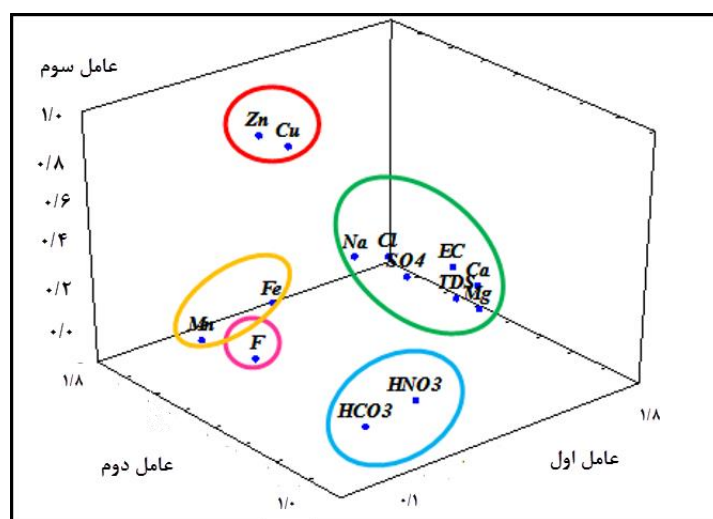
$$FFS = \frac{e^{FS}}{1+e^{FS}} \quad (5)$$

راهنمای نقشه داشته باشیم، مقدار FFS به صورت وزن فازی بر اساس حداقل، ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و حداکثر برای هر نمونه تهیه گردید.

FS نمره عامل<sup>۱</sup> هر نمونه در تحلیل عاملی و FFS وزن فازی<sup>۲</sup> هر نمونه است. جهت تعیین پهنه‌های آلودگی در آبخوان اراک و برای این که طیف مناسبی از اعداد را در

جدول ۶. تحلیل عاملی مرحله چهارم بار عاملی داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

متغیر	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴	عامل ۵
EC	۰/۹۷	-۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۲	-۰/۰۶
TDS	۰/۹۴	-۰/۱۵	-۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۰۱
F	-۰/۰۲	۰/۰۰	-۰/۰۷	-۰/۰۶	-۰/۹۹
Cl	۰/۹۲	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۵
SO <sub>4</sub>	۰/۹۱	۰/۱۵	-۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۰
HCO <sub>3</sub>	-۰/۱۶	-۰/۸۶	-۰/۰۰	-۰/۱۷	-۰/۱۲
Ca	۰/۷۹	-۰/۴۵	۰/۲۰	-۰/۰۸	۰/۱۱
Mg	۰/۷۷	-۰/۴۸	۰/۱۱	-۰/۰۵	۰/۰۸
Na	۰/۸۴	۰/۴۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۱
Fe	-۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۸۶	۰/۱۳
Mn	-۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۹۰	-۰/۰۶
Zn	-۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۹۵	۰/۱۲	-۰/۱۳
Cu	-۰/۰۷	-۰/۱۲	۰/۹۶	-۰/۰۲	-۰/۰۴
HNO <sub>3</sub>	۰/۰۹	-۰/۸۸	۰/۰۵	-۰/۱۱	۰/۰۹
مقدار ویژه	۵/۶۴	۲/۶۶	۱/۹۷	۱/۲۰	۱/۰۱
واریانس (/)	۴۰/۲۷	۱۸/۹۶	۱۴/۰۹	۸/۵۸	۷/۱۹
مقدار ویژه تجمعی	۵/۶۴	۸/۲۹	۱۰/۲۶	۱۱/۴۷	۱۲/۴۷
واریانس تجمعی (/)	۴۰/۲۷	۵۹/۲۳	۷۳/۳۲	۸۱/۹۰	۸۹/۰۹



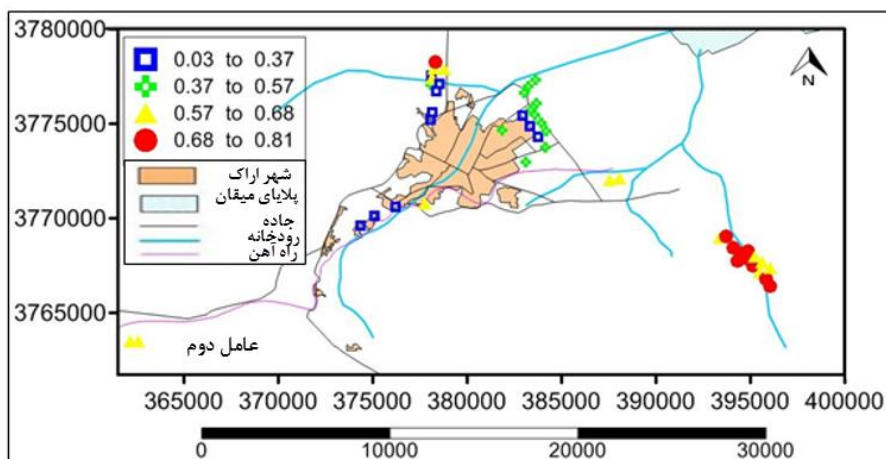
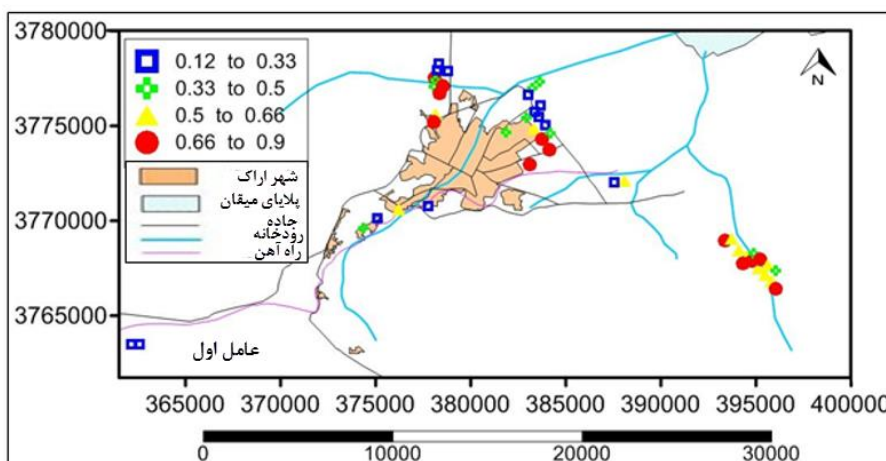
شکل ۵. اثر متقابل عامل‌های یک، دو و سه از تحلیل عاملی داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

<sup>1</sup> Factor score

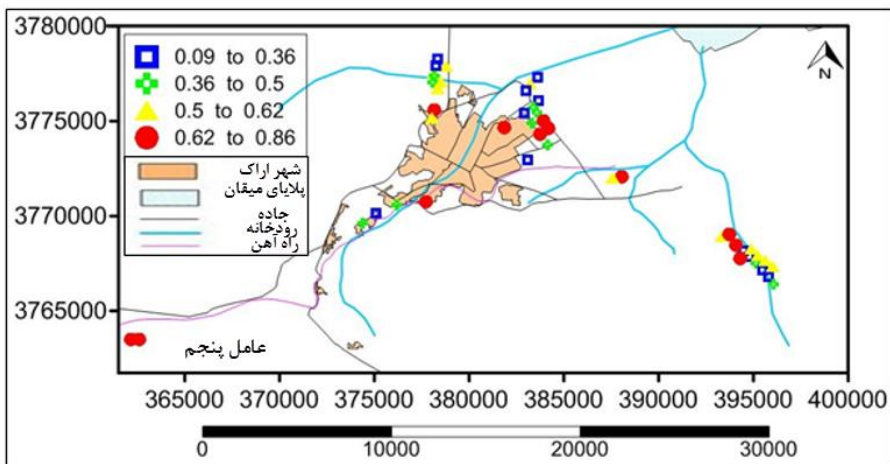
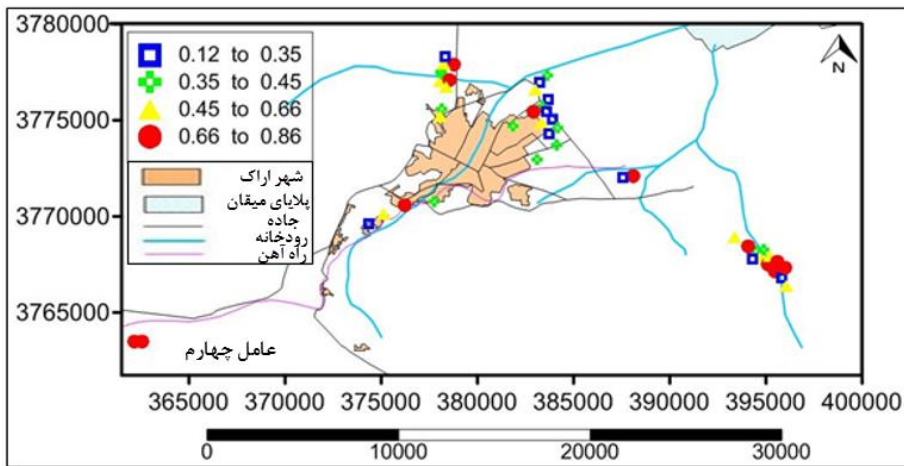
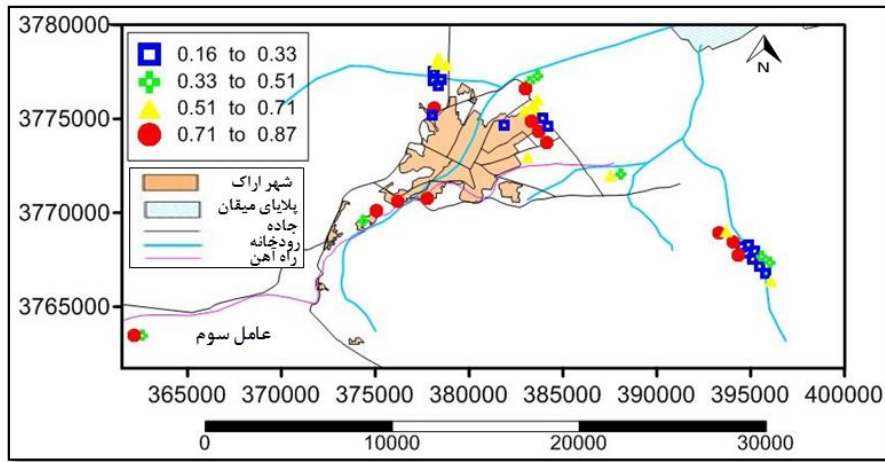
<sup>2</sup> Fuzzy factor score

جدول ۷. نمره عاملی تعدادی از داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک

شماره نمونه	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴	عامل ۵
۱	-۰/۹۱	۰/۴۰	۱/۹۰	-۰/۴۶	۱/۱۷
۲	-۱/۱۱	-۰/۰۱	۰/۲۶	-۰/۶۲	-۰/۹۴
۳	۰/۴۳	-۱/۲۶	۱/۵۸	-۰/۳۷	۰/۴۹
۴	-۰/۷۳	-۱/۵۸	۱/۷۳	۰/۲۵	-۱/۶۵
۵	۰/۵۱	-۲/۰۶	۱/۳۶	۱/۷۵	-۶/۰۶
۶	-۰/۴۳	-۰/۲۵	-۰/۱۲	-۰/۲۷	-۱/۳۲
۷	-۱/۱۵	-۰/۲۰	۰/۰۸	-۰/۵۰	-۰/۵۴
۸	-۱/۲۱	-۰/۴۴	۰/۱۵	-۱/۲۶	-۰/۴۵
۹	-۱/۱۴	-۰/۵۳	-۰/۷۵	-۱/۳۷	۱/۵۲
۱۰	۶۸	-۱/۵۴	-۰/۵۱	-۱/۴۴	-۰/۳۳
۱۱	-۰	-۲/۹۴	-۱/۳۳	-۰/۰۷	۰/۴۳
۱۲	۱/۱۴	-۰/۶۸	-۱/۱۷	-۰/۳۰	۰/۰۲
۱۳	۰/۸۴	-۰/۱۷	-۱/۴۰	-۰/۱۰	-۰/۱۴
۱۴	-۰/۴۰	۰/۴۹	-۱/۴۸	-۰/۶۱	-۰/۰۶
۱۵	-۰/۶۳	-۰/۹۵	-۱/۵۱	۱/۱۵	۰/۰۴



شکل ۶. توزیع مکانی وزن فازی عوامل مختلف داده‌های آب زیرزمینی آبخوان اراک



ادامه شکل ۶.

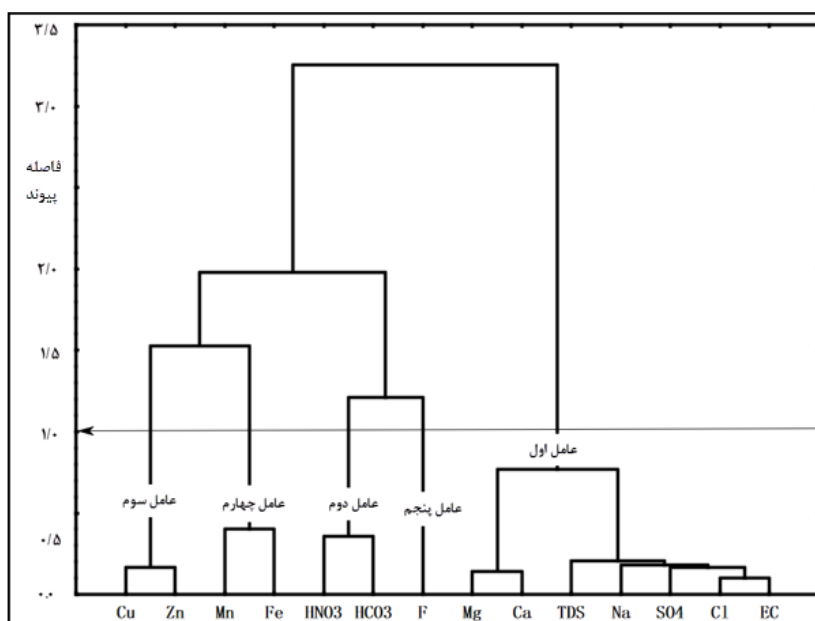
### - تحلیل خوشه‌ای

با استفاده از داده‌های مرحله چهارم از تحلیل عاملی دندروگرام تحلیل خوشه‌ای با فاصله پیوند<sup>۱</sup> یک ترسیم و ۵ خوشه شناسایی شد که تأییدی بر تحلیل عاملی است (شکل ۷). عامل اول شامل متغیرهای EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na، عامل دوم شامل متغیرهای HCO<sub>3</sub> و HNO<sub>3</sub>، عامل سوم شامل متغیرهای Zn و Cu، عامل چهارم شامل متغیرهای Fe و Mn و عامل پنجم شامل متغیر F است.

### - تحلیل تطبیقی

عناصر HCO<sub>3</sub> و HNO<sub>3</sub> در شکل (۸) در نزدیکی نمونه‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ و نمونه‌های ۸، ۹ و ۱۱ در قسمت‌های شمال شرقی شهر اراک واقع شده‌اند. بالابودن

HCO<sub>3</sub> در نمونه‌های اخیر ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی کرتاسه و هم‌چنین نمونه ۱۰ در قسمت جنوب غربی شهر اراک ناشی از فعالیت‌های انسانی یعنی کشاورزی و چاه‌های جذبی شهری است. ارتباط نزدیکی بین متغیرهای EC، Cl، SO<sub>4</sub> و Na با نمونه‌های ۱۸، ۲۷، ۲۲ و ۲۳ موجود در دشت امان آباد وجود دارد که می‌تواند ناشی از مخلوط شدگی آب شور پلایای میقان و آب شیرین دشت امان آباد باشد. نزدیکی متغیرهای Fe و Mn به نمونه‌های ۲۵ و ۳۰ واقع در دشت امان آباد می‌تواند ناشی از شیرابه دفن زباله اراک باشد. ارتباط نزدیک متغیر F با نمونه‌های ۸ و ۱۴ در بخش شمالی شهر اراک و نزدیکی به محدوده فعالیت‌های صنایع و شهری ناشی از فعالیت‌های انسانی است.



شکل ۷. دندوگرام داده شیمیایی چاه‌های آب زیر زمینی آبخوان اراک

<sup>1</sup> Linkage distance



#### ۴. بحث و نتیجه گیری

متغیرهای هیدروشیمیایی با توجه به تحلیل‌های عاملی و خوشه‌ای از پنج عامل یا منشأ برخوردارند. در عامل اول متغیرهای EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na حاکی از هم منشأیی و طبیعی بودن عناصر داشته که عمدتاً در محدوده اطراف شهر اراک و در دشت امان آباد گسترش دارند. وجود لایه‌های گچی و نمکی در عمق ناشی از پیشروی شوراب پلایای میقان در منطقه می‌تواند در افزایش ترکیبات مورد نظر در آب زیرزمینی مؤثر باشد [۲۱]. در همین منطقه بالا بودن یون‌های Cl و SO<sub>4</sub> ناشی از اختلاط آب شور و شیرین بوده که جبهه شور پلایای میقان به سمت آبخوان اراک در حال پیشروی است. در آب‌های زیرزمینی حوضه دانه‌هاگ شمال غرب چین [۲۲]، در آب‌های زیرزمینی دشت سواحل اقیانوس اطلس در اروپا [۲۳] و مطالعات آب‌های زیرزمینی منطقه پرایی در شمال آمریکا [۲۴] نشان داد که منشأ ترکیباتی چون EC، TDS، Cl، SO<sub>4</sub>، Ca، Mg و Na ناشی از مخلوط شدگی دو آب شیرین و شور است. در عامل دوم وجود متغیرهای HCO<sub>3</sub> و HNO<sub>3</sub> در آب‌های زیرزمینی می‌تواند منشأ طبیعی و انسانی داشته باشد. پراکندگی این ترکیبات در نواحی جنوب شرقی اراک می‌تواند ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی کرتاسه ارتفاعات جنوبی اراک در افزایش HCO<sub>3</sub> و هم‌چنین ورود فاضلاب ناشی از چاه‌های خانگی شهر اراک در افزایش HNO<sub>3</sub> باشد [۲۵]. نیترات نیز ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است [۲۶، ۲۷، ۲۸]. توزیع عامل‌های سوم و چهارم محتوی متغیرهای Fe، Cu، Zn، Mn در شمال شرقی شهر اراک و منطقه غربی دشت امان آباد را می‌توان وابسته به منشأ فعالیت‌های انسانی از جمله دفن زباله شهر اراک و پساب صنایع اشاره نمود. در منطقه صنعتی بناب زنجان نیز پساب صنایع عناصر Fe، Cu، Zn و Fe وارد آب زیرزمینی نموده‌اند [۲۹]. وجود Fe و Mn موجود در آب‌های

زیرزمینی مصر ناشی از هوازدگی Fe و Mn مواد معدنی و پساب صنعتی، زهکشی اسید معدن و پساب صنایع است [۳۰]. بالا بودن عناصر Fe، Mn و Cu در آب‌های زیرزمینی منطقه محمود بوتی از شهرستان لاهور در پاکستان ناشی از شیرابه‌های دفن زباله منطقه تشخیص داده شد [۳۱]. بالا بودن Fe در آب‌های زیرزمینی ناشی از پساب صنایع و دفن زباله در منطقه مانی پور هند نیز تأیید شده است [۳۲]. عنصر F در عامل پنجم از تحلیل عاملی، در دشت امان آباد (محل دفن زباله اراک) و در محدوده شهری اراک مقدار بالایی دارد. عوامل ایجاد کننده F می‌تواند ناشی از فعالیت انسانی باشد [۳۳]. فلئور می‌تواند منشأ طبیعی یعنی از هوازدگی و انحلال کانی‌های فلئوردار نظیر فلئورین، آپاتیت، میکا و رس‌ها [۳۴] داشته باشد. فلئور هم‌چنین می‌تواند ناشی از فعالیت‌های کشاورزی یعنی صنایع سوخت زغال، صنایع پخت آجر باشد [۳۵، ۳۶].

از بین روش‌های مختلف آمار چند متغیره، تحلیل عاملی مرحله‌ای روشی است که با انتخاب صحیح متغیرها به خوبی توانست منابع آلاینده‌های آب زیرزمینی را تفکیک نماید. آبخوان آبرفتی اراک که از دو دشت اراک و امان آباد تشکیل شده، یکی از منابع عمده آب شهر اراک بوده و به دلیل منابع آلاینده‌ای چون سموم و کودهای شیمیایی مصارف کشاورزی، فاضلاب شهری ناشی از چاه‌های جذبی، پساب صنایع متعدد در حاشیه شهر، دفن زباله در دشت امان آباد و هم‌چنین وجود پلایای شور میقان اراک و انحلال شیمیایی سنگ‌های آهکی ارتفاعات جنوبی اراک در معرض خطر چندین منبع آلودگی انسانی و طبیعی قرار دارد. منابع طبیعی آن در آلودگی‌های آنیونی Cl، SO<sub>4</sub>، HCO<sub>3</sub> و کاتیونی Ca، Mg و Na و منابع انسانی آن در افزایش عناصر Fe، Cu، Zn، Mn، HNO<sub>3</sub> و F مؤثر بوده است.



## References

- [1] Busico, G., Cuoco, E., Kazakis, N., Colombani, N., Mastrocicco, M., Tedesco, D. and Voudouris, K. (2018). Multivariate statistical analysis to characterize/discriminate between anthropogenic and geogenic trace elements occurrence in the Campania Plain, Southern Italy. *Environmental Pollution*, 234, 260-269.
- [2] Abdalla, F. and Khalil, R. (2018). Potential effects of groundwater and surface water contamination in an urban area, Qus City, Upper Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 141, 164-178.
- [3] Liu, A.G., Ming, J.H. and Ankumah, R.O. (2005). Nitrate contamination in private wells in rural Alabama, United States. *Science Total Environment*, 346, 112-120.
- [4] Gu, X., Evans, L.J. and Barabash, S.J. (2010). Modeling the adsorption of Cd (II), Cu (II), Ni (II), Pb (II) and Zn (II) onto montmorillonite. *Geochemical Cosmochimica Acta*, 4, 5718-5728.
- [5] Corniello, A. and Ducci, D. (2014). Hydrogeochemical characterization of the main aquifer of the "litorale domizio e Agro Aversano nips" (Campania - southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 137, 1-10.
- [6] Cuoco, E., Colombani, N., Darrah, T.H., Mastrocicco, M. and Tedesco, D. (2017). Geo-lithological and anthropogenic controls on the hydrochemistry of the Volturno river (Southern Italy). *Hydrology Process*, 31 (3), 627-638.
- [7] Reimann, C., Filzmoser, P., and Garrett, R. G. (2002). Factor analysis applied to regional 346 geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17, 185-206.
- [8] Hoseinzade, Z. and Mokhtari, A.R. (2017). A comparison study on detection of key geochemical variables and factors through three different types of factor analyses. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 557-563.
- [9] Yousefi, M. (2017). Recognition of an enhanced multi-element geochemical signature of 382 porphyry copper deposits for vectoring into mineralized zones and delimiting exploration 383 targets in Jiroft area, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, 83, 200-214.
- [10] Afzal, P., Tehrani, M. E., Ghaderi, M., and Hosseini, M. R. (2016). Delineation of supergene 283 enrichment, hypogene and oxidation zones utilizing staged factor analysis and fractal modeling 284 in Takht-e-Gonbad porphyry deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 161, 119-127.
- [11] Zhao, J., Chen, S. and Zuo, R. (2017). Identification and mapping of litho-geochemical 385 signatures using staged factor analysis and fractal/multifractal models. *Geochemistry Exploration, Environment, Analysis*, 17(3), 239-251.
- [12] Javadi Sharif, P. (2017). Application of multivariate statistical indices and methods to determine the origin of groundwater contamination in Arak plain, Masters Degree in Mining Engineering, Mining Department, Arak University of Technology Exploration Trends, 160 p. (in Persian).
- [13] Filzmoser, P., Hron, K. and Reimann, C. (2009). Principal components analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20, 621-632.
- [14] Ghadimi, F. and Ghomi, M. (2016). Statistical analysis of geochemical exploration data (in Statistica software), Arak University of Technology Publications, 333 p. (in Persian).
- [15] Reimann, C. and Filzmoser, P. (2000). Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39, 1001-1014.
- [16] Carranza, E.J.M. (2011). Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 110, 167-185.
- [17] Iranian Standard Industrial Institute (2002). Physical and chemical properties of drinking water, National Iranian Standard, Report 1053. (in Persian).
- [18] Kim, J., Kim, R., Lee, J., Cheong, T., Yum, B. and Chang, H. (2005). Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. *Hydrology Process*, 19, 1261-1276.
- [19] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2012). Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical 366 evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115, 24-35.

- [20] Ghadimi, F. (2017). Application of multivariate statistical methods in data analysis of earth and environmental sciences, Arak University of Technology Publications, 243 p. (in Persian).
- [21] Ghadimi, F. and Ghomi, M. (2012). Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in alluvial aquifer of Arak Mighan playa, Markazi Province, Iran. *Journal of Water Sciences Research*, 4(1), 31-45.
- [22] Maa, J., He, J., Qi, S., Zhu, G., Zhao, W., Edmunds, M. and Zhao, Y. (2013). Groundwater recharge and evolution in the Dunhuang Basin, northwestern China. *Applied Geochemistry*, 28, 19-31.
- [23] Einsiedl, F. (2012). Sea-water/groundwater interactions along a small catchment of the European Atlantic coast. *Applied Geochemistry*, 27, 73-80.
- [24] Heagle, D., Hayashi, M. and Kamp, G. (2013). Surface-subsurface salinity distribution and exchange in a closed-basin prairie wetland. *Journal of Hydrology*, 478, 1-14.
- [25] Ghadimi, F., Ghomi, M. and Azimi, R. (2016). Sources of nitrate and bromide contaminants of groundwater in alluvial aquifer of Arak, Iran. *Journal of Tethys*, 4 (2), 100-114.
- [26] Pastén-Zapata, E., Ledesma-Ruiz, R., Harter, T., Ramírez, A.I. and Mahlkecht, J. (2014). Assessment of sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area by using a multi-tracer approach. *Science of the Total Environment*, 470-471, 855-864.
- [27] Jin, Z., Pan, Z., Jin, M., Li, F., Wan, Y. and Gu, B. (2012). Determination of nitrate contamination sources using isotopic and chemical indicators in an agricultural region in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155, 78-86.
- [29] Rebolledo, B., Gil, A., Flotats, X. and Sánchez, J.A. (2016). Assessment of groundwater vulnerability to nitrates from agricultural sources using a GIS-compatible logic multicriteria model. *Journal of Environmental Management*, 171(15), 70-80.
- [30] Zamani, A., Yafian, M. and Parizanganeh, A. (2012). Multivariate statistical assessment of heavy metal pollution sources of groundwater around a lead and zinc plant. *Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*, 9, 1-12.
- [31] Magda, M., El-salam, A., Gaber, I. and Zuid, A. (2015). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research*, 6(4), 579-586.
- [32] Oinam, J. D., Ramanathan, A. L., Linda, A. and Singh, G. (2011). A study of arsenic, iron and other dissolved ion variations in the groundwater of Bishnupur District, Manipur, India. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1183-1195.
- [33] Kern, M.L., Vieiro, A.P. and Machado, G. (2008) The fluoride in the groundwater of Guarani Aquifer System: the origin associated with black shales of Parana Basin. *Environmental Geology*, 55, 1219-1233.
- [34] Singaraja, C., Chidambaram, S., Jacob, N., Babu, G.J., Selvam, S., Anandhan, P., Rajeevkumar, E., Balamurugan, K. and Tamizharasan, K. (2018). Origin of high fluoride in groundwater of the Tuticorin district, Tamil Nadu, India, *Applied water science*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-018-0694-x>.
- [35] Sajil, P.J. (2017). Kumar fluoride in groundwater- sources, geochemical mobilization and treatment options, *Mining Review*, 1(4), 1-2.
- [36] Rafique, T., Naseem, S., Ozsvath, D., Hussain, R., Bhangar, M.I. and Usmani, T.H. (2015). Geochemical controls of high fluoride groundwater in Umarmkot Sub-District, Thar Desert, Pakistan. *Science Total Environment*, 530-531, 271-278.