

کلاسترینگ داده‌های هیدروشیمی معدن گل‌گهر سیرجان با روش‌های گرافیکی و آماری

ایمان بهنام^۱؛ عبدالحمید انصاری^۲؛ حمزه ترابی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، Email: i_behnam@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- استادیار دانشکده ریاضی و آمار، دانشگاه یزد

چکیده

امروزه استفاده از روش‌های مرسوم گرافیکی مانند دیاگرام‌های پایپر و استیف برای طبقه‌بندی نمونه‌های هیدروشیمی بخصوص در مواقعی که حجم داده‌های مورد بررسی زیاد باشد، دارای محدودیت‌هایی است. در چنین مواقعی استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در ارائه یک تحلیل دقیق‌تر، می‌تواند راهگشا باشد.

معدن گل‌گهر که در حال حاضر در عمق ۶۰ متری زیر سطح ایستابی استخراج می‌شود، با مشکل عدیده‌ای از جمله ورود آب به پیت استخراج روبروست و معزل زهکشی آب آن نیز جز با شناخت دقیق منشا آب زیرزمینی میسر نمی‌باشد. به همین منظور در طی چندین مرحله از آب چاه‌ها و سطوح تراوشی معدن نمونه‌گیری بعمل آمده و جهت انجام آنالیز میزان املاح به آزمایشگاه فرستاده شد. نتایج آنالیز که شامل غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی و میزان هدایت‌الکتریکی و اسیدیته هر نمونه است با روش‌های گرافیکی (دیاگرام‌های پایپر و استیف) و روش‌های آماری (آنالیز خوشه‌ای، تحلیل مولفه اصلی و کلاسترینگ K میانگین) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعات سفره آبدار از لحاظ کیفی به سه زون تقسیم شده که شامل جبهه شور شمالی، زون آبرفتی و زون اختلاطی می‌باشد و نمی‌توان منشا آب شور جبهه شمالی را از کفه نمک دانست.

کلمات کلیدی: آنالیز خوشه‌ای، تحلیل مولفه اصلی، دیاگرام‌های پایپر و استیف، کلاسترینگ K میانگین، معدن گل‌گهر

Hydrochemical Data Clustering in Gol-e-Gohar Iron Ore by Graphical and Statistical Methods

I.Behnam, A.H.Ansari and H.Torabi

Abstract

Application of ordinary graphical methods such as Piper and Stiff diagrams for classifying hydrochemical samples has some limitations especially when the numbers of samples are high. In this case application of multi-variable statistical methods can be useful.

Gol-E-Gohar iron ore mine has working levels about 60 meter below water table now. This mine is suffered from groundwater seepage, and so, drainage is a major concern in this mine. To study the hydrogeology of the mining area, water samples were collected from wells and seepage surfaces during several stages. Samples were sent to the laboratory to determine their ion concentration electrical conductivity and acidity. The data were analyzed by graphical methods (Piper and Stiff Diagrams) and statistical methods (Cluster analysis, Principal Component analysis and K-Mean Clustering).

According to the obtained results, the aquifer in the studied area can be divided into three zones, including saline northern front, alluvial zone and mixed zone. The source of saline water in northern front cannot be considered from playa.

Keywords: Cluster analysis, Principal Component analysis, Piper and Stiff Diagrams, K-Mean Clustering, Gol-E-Gohar Mine

۱- مقدمه

کیفیت آب زیرزمینی متأثر از کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی می‌باشد که از زمان تشکیل و تراکم آب در اتمسفر تا زمانی که توسط چاه، قنات یا چشمه زمین خارج می‌شود، بر روی آن عمل کرده است؛ این فاصله زمانی ممکن است در حد روز یا چندین سال به درازا بکشد. همچنین کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند نشانه منشا و زمان تماس موادی که در زیرزمین در مسیر حرکت آب‌ها بوده و حتی بیانگر دمای نواحی عمیق نیز باشد. ترکیب شیمیایی آب‌های سطحی و زیرزمینی به وسیله فاکتورهای متعددی از جمله ترکیب بارش، ترکیب کانی‌شناسی حوزه، آب و هوا و توپوگرافی منطقه کنترل می‌شود که ترکیب این فاکتورها تنوع گوناگون آب‌ها و تغییرات زمانی و مکانی آنها را باعث می‌شود.

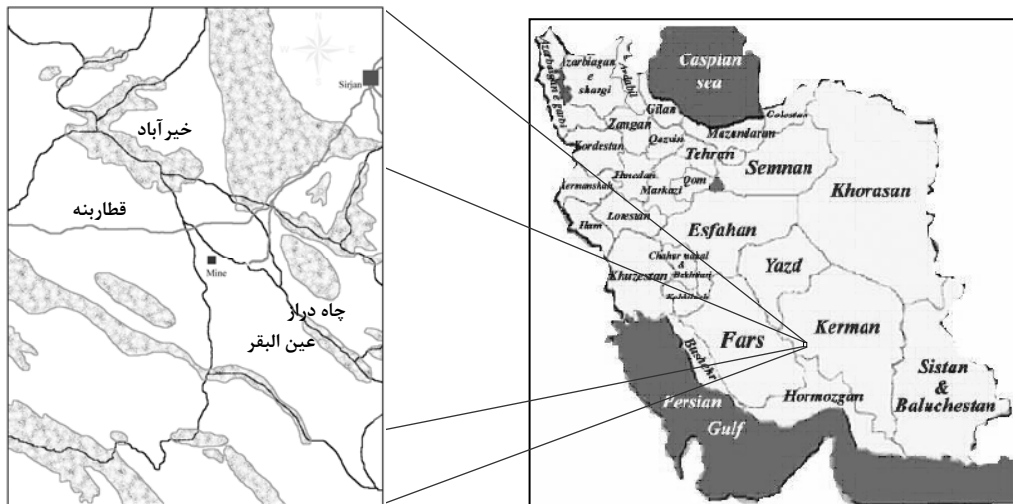
تجزیه شیمیایی تعدادی زیادی نمونه آب، انبوهی از داده‌ها را فراهم می‌آورد که باید برای هدف‌های معین مورد تجزیه تحلیل قرار گیرند. کاربرد تکنیک‌های گرافیکی از سال ۱۹۲۰ به منظور تسهیل در طبقه‌بندی داده‌ها ابداع شد که اغلب این تکنیک‌ها، آب‌ها را محلولی شامل سه جز کاتیونی کلسیم، منیزیم و فلزات قلیائی (سدیم همراه پتاسیم) و سه جز آنیونی سولفات، کلراید و بی‌کربنات همراه کربنات در نظر می‌گیرند. اما با پیشرفت و توسعه علوم، امکان طبقه‌بندی نمونه‌ها به گروه‌های هموزن با روش‌های آماری نیز امکان‌پذیر شد. اکثر روش‌های گرافیکی از پارامترهای محدودی (آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی) استفاده می‌کنند در حالی که روش‌های آماری از تمام پارامترهای در دسترس استفاده می‌کنند لذا امکان دسته‌بندی دقیق‌تری را ارائه می‌دهند.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۵۳ کیلومتری جنوب‌غرب سیرجان در محدوده طول‌های جغرافیایی $55^{\circ}15'$ تا $55^{\circ}24'$ شرقی و عرض‌های $29^{\circ}3'$ تا $28^{\circ}7'$ شمالی واقع شده است. راه ارتباطی این منطقه جاده آسفالتی سیرجان شیراز است که بعد از طی ۴۵ کیلومتر جاده آسفالتی یک راه فرعی آسفالتی درجه ۱ به طرف جنوب تا معدن امتداد می‌یابد. آب و هوای این منطقه خشک و کویری بوده و میانگین میزان بارندگی سالیانه ۱۷۲ میلی‌متر و متوسط رطوبت $33/9\%$ می‌باشد و معمولاً پر باران‌ترین ماه سال آذرماه و کم باران‌ترین ماه سال شهریور ماه است.

ناحیه گل‌گهر در لبه شمال شرقی زون سنندج- سیرجان و لبه فرو افتادگی نمک زار کفه خیرآباد سیرجان که خود در حد فاصل بین زون سنندج- سیرجان و کمربند آتشفشانی ارومیه دختر بوجود آمده، قرار گرفته است. این منطقه عموماً از آبرفت- های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات اندکی که در بخش‌های شرقی و غربی و جنوب معدن رخنمون دارند شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک، سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک می‌باشند. سنگ‌های پالئوزوئیک شامل کمپلکس گل‌گهر بوده که قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این منطقه را تشکیل می‌دهد. بخش تحتانی آن شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتزشیست می‌باشد و بر روی این بخش مجموعه‌ای تشکیل شده است که در تمامی مناطق اسفندقه، حاجی‌آباد و نیریز ویژگی‌های یکنواختی دارد. از لحاظ تکتونیکی این ناحیه امروزه تحت تاثیر تنش‌های شدید تکتونیکی بوده بطوریکه حرکات بلوکی و جابجایی‌های قائم بلوک‌ها حتی در آبرفت‌های پوشاننده معدن کاملاً به چشم می‌خورد.

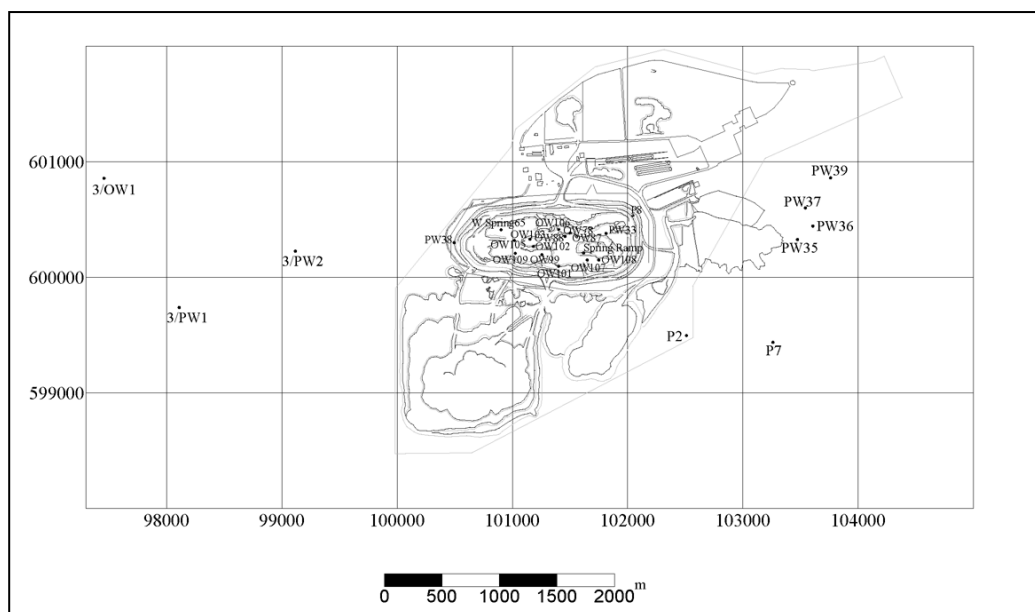
به لحاظ موقعیت محلی در اطراف محدوده معدن شماره یک گل‌گهر چندین حوزه آبریز وجود دارد که شامل حوزه‌های آبریز چاه‌دراز، عین‌البقر، قطاربنه و خیرآباد می‌باشد. معدن گل‌گهر در بخش شمالی حوزه عین‌البقر قرار دارد. این حوزه از شمال با حوزه خیرآباد، از شرق با حوزه چاه‌دراز، از سمت غرب با حوزه قطاربنه و از جنوب با کویر مرگ در ارتباط است. شبکه آبراهه- های موجود در این ناحیه فصلی بوده و به طور کامل در این ناحیه گسترش یافته‌اند و سرچشمه آبراهه‌ها از دو ناحیه عمده ارتفاعات و دشت‌های آبرفتی شمال شرق شروع می‌شود. در شکل ۱ نقشه زیرحوزه‌های ناحیه معدن و اطراف آن آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه زبر حوزه‌های آبریز ناحیه

۳- نمونه برداری

جهت بررسی و شناخت دقیق منشا آب‌های مختلف در منطقه معدن و نواحی اطراف، در طی سه مرحله تعداد ۷۵ نمونه آب از چاه‌ها و چشمه‌های موجود تهیه و جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه علوم زمین دانشگاه شیراز ارسال گردیده است که شامل ۱۳ نمونه در فروردین ماه، ۳۶ نمونه در تیر ماه، ۲۶ نمونه در مرداد ماه سال ۱۳۸۴ و مربوط به ۴۰ مکان مختلف در داخل معدن و نواحی اطراف آن بوده است (شکل ۲). در این نمونه‌گیری‌ها سعی شده است تا حداکثر پوشش در ناحیه معدن با توجه به چاه‌ها و چشمه‌ها و سطوح تراوشی موجود بدست آید، در واقع تقریباً از تمام نقاطی که امکان نمونه‌برداری از آنها و نیز مناطقی که احتمال ارتباط بین آنها با سایر نقاط وجود داشته، نمونه‌گیری انجام شده است. پارامترهای گزارش شده برای هر نمونه شامل کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، PH و EC می‌باشد.



شکل ۲- موقعیت مکان‌های نمونه‌گیری در محدوده معدن شماره ۱ گل‌گهر

۳-۱- صحت سنجی نتایج

نتایج آنالیز نمونه‌های آب برای محاسبه خطای بالانس یونی با رابطه (۱) باید مورد بررسی قرار بگیرند.

$$CBE \% = \frac{\sum z . m_c - \sum z . m_a}{\sum z . m_c + \sum z . m_a} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه Z : مقدار مطلق ظرفیت یونی، m_c : مولالیت کاتیون‌ها و m_a : مولالیته آنیون‌ها می‌باشد. حد مجاز قابل قبول برای خطای بالانس یونی $\pm 10\%$ می‌باشد و داده‌های با خطای بالاتر باید از بانک داده‌ها حذف شوند. بر اساس این معیار نمونه‌های $OW78$ در آنالیز ۱۳۸۴/۱/۳۰ و نمونه $PW33$ در آنالیز ۱۳۸۴/۵/۲۹ از مجموعه آنالیزها کنار گذاشته شدند.

۴- مطالعات گرافیکی داده‌ها

مطالعات گرافیکی داده‌ها (شکل ۳) با استفاده از دیاگرام‌های پایپر و استیف توسط نرم‌افزار *RockWork* صورت گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود از لحاظ آنیون‌ها نسبت یون‌های کربنات و بی‌کربنات ناچیز است که این مساله احتمال وجود آب-های کارستی را کم می‌کند؛ همچنین نسبت یون سولفات در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۲۰ درصد است و در مجموع آب‌های معدن دارای تیپ کلروره هستند. از لحاظ کاتیون‌ها میزان یون کلسیم در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۶۰ درصد و میزان یون منیزیم کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که آب‌های معدن در محدوده اسیدهای قوی و با سختی غیرکربناتی بالا قرار دارند. بر اساس میزان منیزیم می‌توان منطقه را به دو قسمت غربی با میزان منیزیم بالا و ناحیه شمالی با مقدار کم منیزیم تقسیم کرد. در دیاگرام‌های استیف و بر پایه غلظت مطلق کاتیون‌ها و آنیون‌ها می‌توان چند منطقه مختلف در ناحیه معدنی مشخص کرد. بر این اساس می‌توان نمونه‌هایی که دارای غلظت بالایی از کاتیون‌ها و آنیون‌ها هستند را در یک گروه، نمونه‌هایی که دارای غلظت پایینی هستند در گروه دیگر و نمونه‌های مابین را در گروه سوم قرار داد.

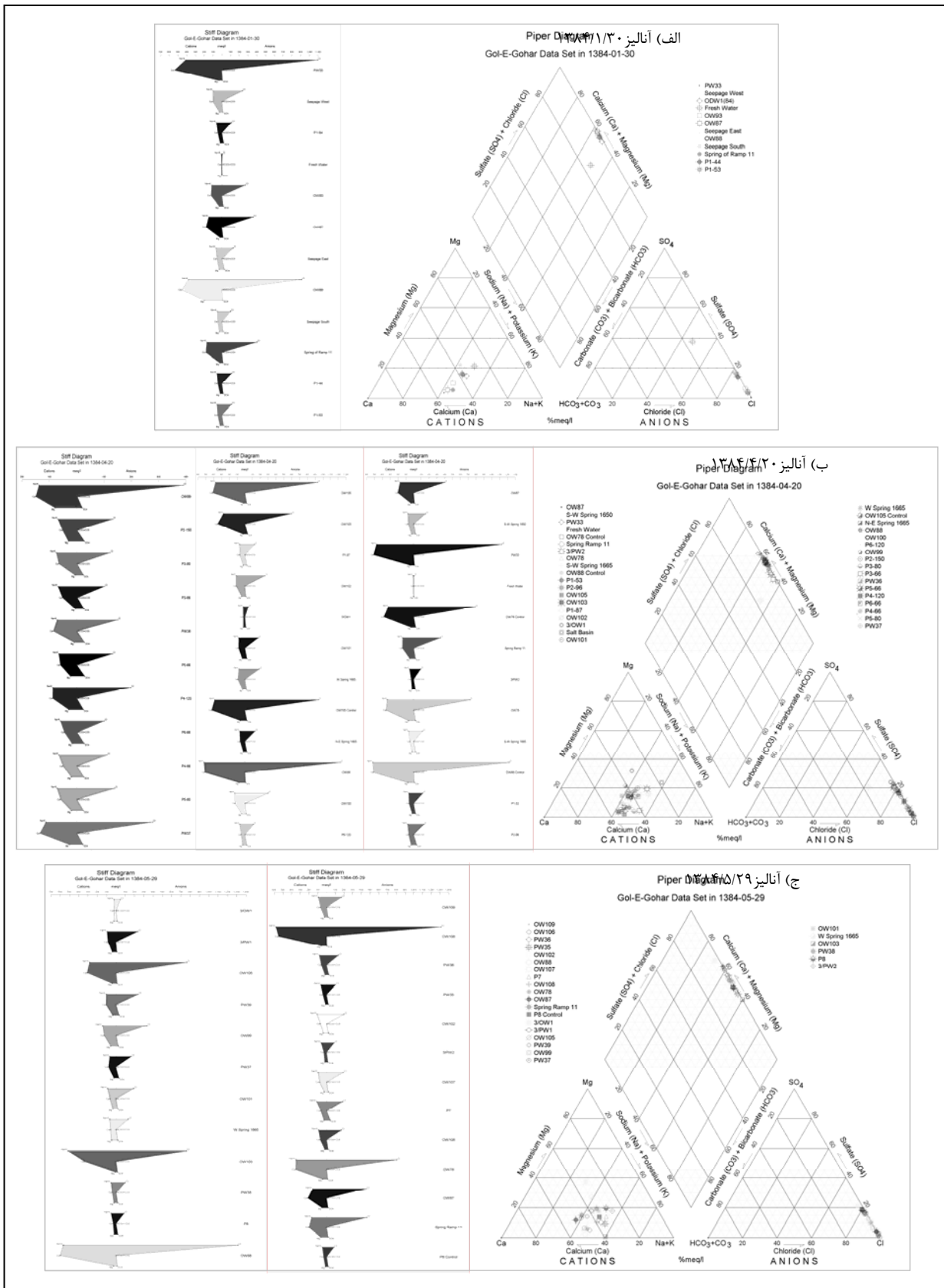
همانطور که مشاهده می‌شود دو نمونه آب شرب معدن و نمونه آب کفه نمک با سایر نمونه‌های اخذ شده از پیت معدن و نواحی اطراف همخوانی ندارد. در نمونه آب شرب که از حوزه چاه‌دراز تامین می‌شود میزان تمام آنیون‌ها و کاتیون‌ها کمتر از ۸ میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر می‌باشد و در نمونه آب کفه نمک میزان املاح بخصوص یون کلر بسیار بالا (بالاتر از ۴۰۰۰ میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر) می‌باشد لذا به هیچ عنوان نمی‌توان منشأ آب شور بخش شمالی معدن را از کفه نمک دانست.

۵- مطالعات آماری داده‌ها

امروزه روش‌های آماری چند متغیره کاربرد وسیعی را در آنالیز داده‌های هیدروشیمی و ژئوشیمیایی پیدا کرده‌اند. این روش‌ها، امکان آنالیز آماری همزمان چندین متغیر را فراهم می‌کنند. در مواردی که با یک فضای چند بعدی، به طور مثال ۱۰ یا ۲۰ بعدی روبرو هستیم لازم است با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره به کاهش تعداد بعد فضاهای مورد مطالعه بپردازیم بطوریکه با تعداد کمتری متغیر بتوان بخش اعظم تغییرپذیری را تشریح کرد و یا بر اساس تحلیل خوشه‌ای به طبقه‌بندی مناسب‌تر نمونه‌ها بر اساس تشابه هر چه بیشتر درون گروهی و اختلاف هر چه بیشتر برون گروهی اقدام کرد. از آنجا که لازمه بررسی‌های آماری، نرمال بودن تابع توزیع داده‌ها می‌باشد از آزمون فرض زیر استفاده می‌شود.

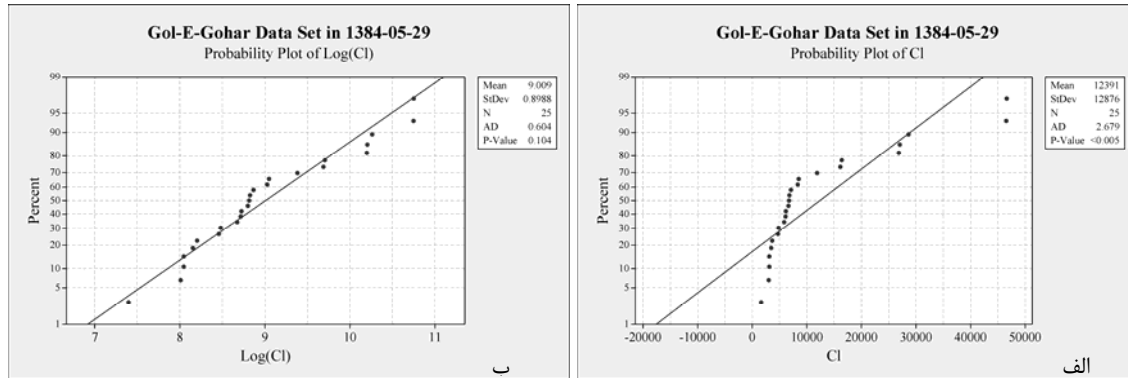
$$\begin{cases} H_0 = & (1) \\ & \text{پارامترها نرمال هستند} \\ H_1(2) & \\ & \text{پارامترها نرمال نیستند} \end{cases} \quad (2)$$

در این آزمون از مقدار P -Value برای رد یا پذیرش فرض H_0 استفاده می‌شود. این مقدار دارای رنج صفر تا یک می‌باشد و کمترین مقدار آن، کمترین احتمال برای رد فرض H_0 نمی‌باشد؛ بلکه در هر آنالیز آماری یک سطح آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود که معمولاً ۰/۰۵ است و اگر P -Value کمتر از مقدار آلفا باشد، فرض H_0 رد می‌شود و فرض H_1 پذیرفته می‌شود.



شکل ۳- دیگرام‌های پایپر و استیف مجموعه نمونه‌گیری‌ها (الف) آنالیز ۱۳۸۴/۱/۳۰ (ب) آنالیز ۱۳۸۴/۴/۲۰ (ج) آنالیز ۱۳۸۴/۵/۲۹

نتایج این آزمون مشخص ساخت که تمامی عناصر به جز SO_4 و PH دارای توزیع لاگ-نرمال با چولگی مثبت می‌باشند لذا باید با یک تبدیل لگاریتمی توابع توزیع پارامترها را نرمال کرد. برای مثال نتایج آزمون برای یون کلر در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به اینکه دو نمونه آب شرب حوضه چاه دراز و آب کفه نمک خیرآباد متعلق به جامعه آماری سایر نمونه‌ها نمی‌باشند این دو نمونه از مطالعات آماری کنار گذاشته شده‌اند. همچنین از آنجا که واحد اندازه‌گیری متغیرها یکسان نمی‌باشد و امکان تاثیرپذیری از مقادیر بالای پارامترها در تقسیم بندی وجود دارد، داده‌ها در مقیاس Z -Score استاندارد می‌شوند. در این حالت تمامی پارامترها دارای میانگین صفر و واریانس یک هستند.



شکل ۴- بررسی تابع توزیع یون کلر در دو حالت الف) عادی ب) لگاریتمی

۵-۱- آنالیز خوشه‌ای

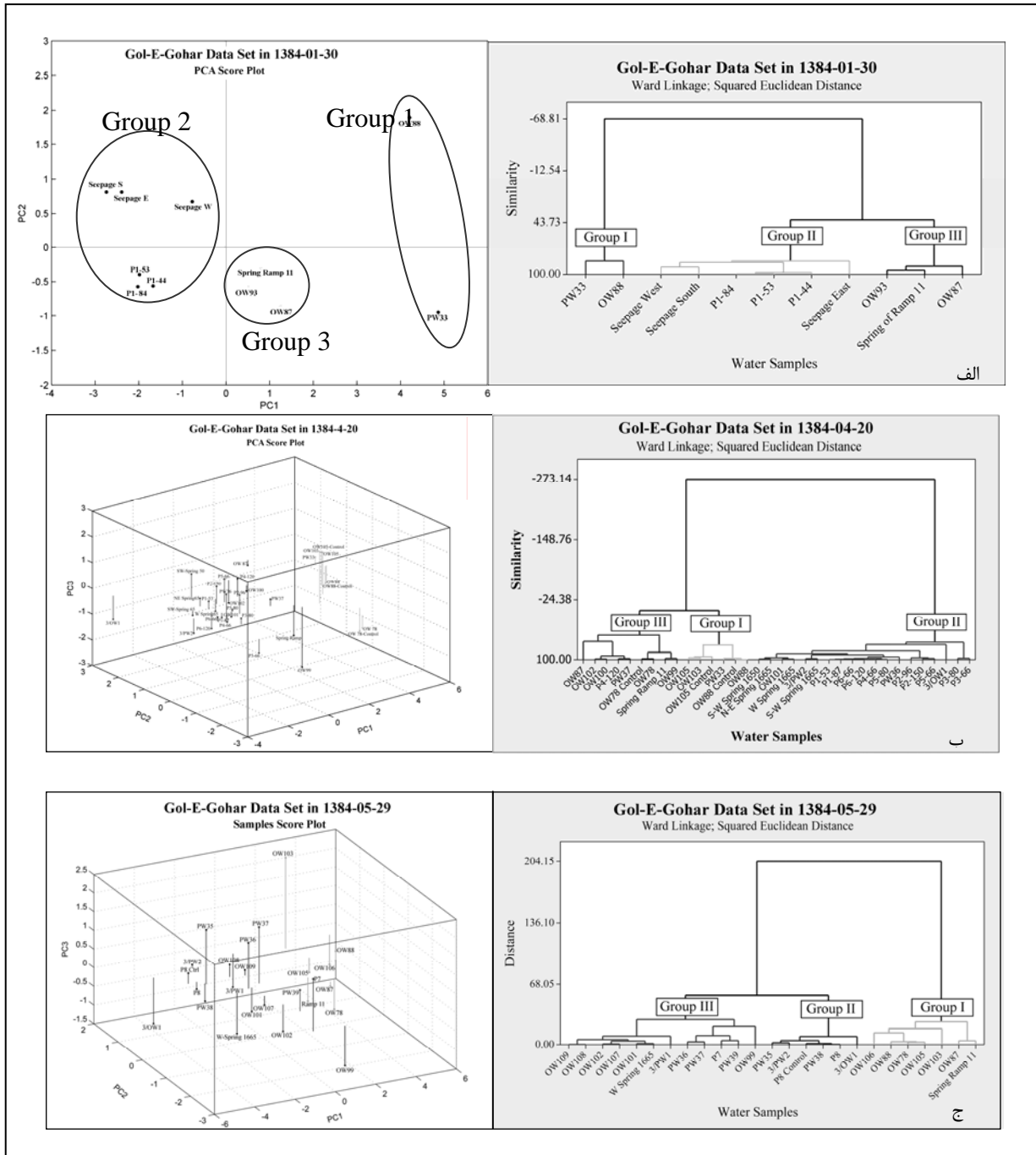
آنالیز خوشه‌ای یک عنوان کلی برای یک سری از روش‌های ریاضی است که برای پیدا کردن شباهت بین افراد در یک مجموعه بکار می‌روند. خوشه‌ها با مفهوم شباهت درونی و انزوای بیرونی تعریف می‌شوند. در آنالیز خوشه‌ای معمولاً P صفت برای N نمونه اندازه‌گیری می‌شود و سپس ماتریس داده‌های خام به ماتریس شباهت یا فاصله تبدیل می‌شود و با استفاده از یکی از روش‌های اتصال، نمونه‌ها گروه‌بندی می‌شوند. یکی از راه‌های نمایش نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای، دندروگرام یا دیاگرام درختی است. دندروگرام خوشه‌های که به هم شبیه هستند را به هم متصل می‌کند و در حقیقت ساختار درونی داده‌ها را بصورت طبقاتی نشان می‌دهد. برای بکارگیری این روش بر روی داده‌های هیدروشیمی معدن گل‌گهر از روش محاسبه شباهت مربع فاصله اقلیدسی و روش اتصال وارد ($WARD$) استفاده شده که نتایج گروه‌بندی‌های بدست آمده برای هر تاریخ نمونه- برداری به طور مجزا در دندروگرام‌های شکل ۵ نشان داده شده است.

۵-۲- آنالیز مولفه اصلی

این روش تکنیکی است برای پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که تشکیل یک دستگاه محور مختصات جدید را بدهند. این ترکیبات خطی، مولفه‌های اصلی نامیده می‌شوند بطوریکه بخش اعظمی از تغییرپذیری می‌تواند بوسیله تعداد محدودی از متغیرهای جدید توجیه شود. تعداد مولفه‌های اصلی قابل محاسبه بستگی به تعداد متغیرهای اولیه همبسته و حداکثر پراش قابل توجیه دارد. معمولاً اولین مولفه‌های اصلی می‌توانند قسمت اعظم تغییرپذیری را توجیه کنند؛ لذا در عمل می‌توان به قیمت از دست دادن چند درصد از تغییرپذیری تعداد مولفه‌های اصلی را نسبت به متغیرهای اولیه تا حد بسیار زیادی کاهش داد. در این تحقیق تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی تمامی پارامترها به کمک نرم افزار *Minitab* و با استفاده از ماتریس همبستگی و بر اساس چرخش *Varimax* که در آن تعامد محورها حفظ می‌شود، انجام شده است. با در نظر گرفتن دو عامل اول برای آنالیز ۱۳۸۴/۱۳۰ و سه عامل اول برای آنالیز ۱۳۸۴/۴۲۰ و ۱۳۸۴/۵۲۹ که بالغ بر ۸۵ درصد تغییرپذیری را توجیه می‌کند و با استفاده از کلاسترینگ *K-Mean* در نرم‌افزار *Matlab*، نمونه‌ها در دستگاه دو بعدی یا سه بعدی جدید تقسیم‌بندی می‌شوند که این طبقه‌بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌گونه که نتایج مطالعات آماری مشخص می‌سازد می‌توان سفره آبدار منطقه از لحاظ کیفی به سه بخش تقسیم‌بندی کرد. در گروه اول این طبقه‌بندی چاه‌های بخش شمالی معدن قرار دارند که در بستر سنگی حفر شده‌اند و غلظت کاتیون‌ها و آنیون-

های آنها نسبت به سایر نمونه‌ها بالاتر می‌باشد و منشا آب آنها را می‌توان سفره تحت فشار منطقه دانست. در گروه دوم که چاه‌های بخش جنوبی و چشمه‌های تراوشی را شامل می‌شود کمترین میزان املاح وجود دارد که مربوط به بارندگی و سیلاب-های ارتفاعات است که پس از نفوذ باعث تشکیل سفره آزاد در منطقه می‌گردد و در گروه آخر نمونه‌هایی که ترکیب مابین این دو گروه را دارند، قرار گرفته‌اند که تشکیل زون اختلاطی در قسمت میانی معدن را می‌دهند.



شکل ۵- نتایج آنالیز خوشه‌بندی و تحلیل مولفه اصلی نمونه‌گیری‌ها (الف) آنالیز ۱۳۸۴/۱/۳۰ (ب) آنالیز ۱۳۸۴/۴/۲۰ (ج) آنالیز ۱۳۸۴/۵/۲۹

۶- نتیجه

کارایی و ماهیت بی‌طرفانه روش‌های آماری، این روش‌ها را عالی‌تر و برتر از روش‌های گرافیکی در تقسیم‌بندی گروه‌ها بر مبنای نتایج هیدروشیمی می‌سازد اگر چه روش‌های گرافیکی اطلاعات باارزشی درباره خصلت شیمیایی گروه‌های مختلف به ما ارائه می‌کنند. بنابراین با ترکیب این دو روش می‌توان به نتایج ارزشمند و اضافه‌تری درباره گروه‌های مختلف دست یافت.

بر اساس نتایج حاصل از کاربرد روش‌های گرافیکی و آماری بر روی داده‌های هیدروشیمی معدن گل‌گهر سیرجان می‌توان منطقه مورد مطالعه را به سه بخش مختلف زیر تقسیم کرد.

- جبهه شور شمالی: در این چاه‌ها غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها به شدت بالا می‌باشد و میزان EC آن در حدود ۱۰۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد (گروه اول).
- چاه‌های آبرفتی: که دارای EC در حدود ۲۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشند و به طور عمده در بخش‌های جنوبی و غربی معدن یعنی مناطقی که سطوح تراوش در دیواره‌های معدن دیده می‌شود، وجود دارند (گروه دوم).
- چاه‌های اختلاطی: این چاه‌ها ترکیبی از آب‌های گروه اول و دوم را نشان می‌دهند و EC آنها حدود ۶۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد و عمدتاً در بخش‌های میانی معدن دیده می‌شوند (گروه سوم).

۷- مراجع

- [۱] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۸۵، تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم.
- [۲] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۸۱، اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه تهران. چاپ چهارم.
- [۳] کرمی، محسن؛ ۱۳۸۳، "کاربرد تحلیل مولفه‌های اصلی در داده‌های ژئوشیمیایی بر گره ۱/۵۰۰۰۰ شورجستان"، پایان نامه کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- [۴] فاریابی، محمد و دیگران؛ ۱۳۸۶؛ "کاربرد روش‌های آماری در تحلیل کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت باغملک"، مجموعه مقالات بیست و پنجمین کنفرانس علوم زمین.
- [۵] شرکت کوشا معدن؛ ۱۳۸۵؛ گزارش میان دوره هیدروشیمی معدن گل‌گهر سیرجان، مجتمع معادن گل‌گهر سیرجان.

[6] Guler, C, McCray, J.E.; 2002 "Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data", Hydrogeology journal 10, 455-474.

[7] Reneta Santos, Luid Ribeiro; 2005 "The use of multivariate statistical analysis to evaluate spatial and temporal water contamination in Germunde coal mine (Portugal)", The fourth inter-Celtic on hydrology and management of water Resources, Portugal

[8] Petr, Praus; 2005; "Water quality assessment using SVD-based principal component analysis of hydrological data", Water SA, Vol. 31, No. 4

[9] George Papatheodorou; 2005; "A long-term study of temporal hydrochemical data in a shallow lake using multivariate statistical techniques", Ecological Modelling, Elsevier journal.