



## Hydrochemical Investigation of Khuzestan Sulfur Springs Using Multivariate Statistical Analysis

S.T. Aboudi<sup>1</sup>, M. Chitsazan<sup>2</sup>, and A. Charchi<sup>3</sup>

### Abstract

Sulfur springs are distinguished from other groundwater sources by their specific therapeutic, thermal and hydrochemical properties. Golgir, Meydavood, Naft Sefid, pole Zal, Grasab JaOrdo, Mashrageh, Grab Behbahan, and Baba Ahmad Springs are low-temperature sulfur springs in Zagros area of Khuzestan. These springs have temperatures between 22 and 35 °C and appear along with the Zagros thrust. By analyzing the hydrochemical data of sulfur springs on two periods (December 2017 and May 2018) and applying the hydrochemical methods, principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering (AHC), it has been tried to identify the factors affecting the chemical quality of the springs. The first factor includes the electrical conductivity, Na, Cl, K, Ca, Mg, As and Cd variables, this factor is due to the interaction of aquifer and water materials, as well as high correlation between the main ions, arsenic, and cadmium indicates that these elements have a similar origin. The second factor includes the SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, and S variables. According to the results of TOC analysis, this factor can be attributed to the influence of oil brines. Piper diagrams and hierarchical Q-mode clustering were used to classify the springs studied. The Piper diagram separated these springs into three groups and the hierarchical Q-mode clustering method, taking into account further parameters of sulfur springs in four groups.

**Keywords:** Sulfur Spring, Principal Component Analysis, Hierarchical Clustering, Gachsaran Formation, Oil Brines.

Received: October 13, 2019

Accepted: March 17, 2020

## بررسی هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی خوزستان با استفاده از آنالیزهای آماری چند متغیره

سید طارق عبودی<sup>۱</sup>، منوچهر چیت‌سازان<sup>۲</sup> و عباس چرچی<sup>۳</sup>

### چکیده

چشمه‌های گوگردی با ویژگی‌های درمانی، دمایی و خصوصیات هیدروشیمیایی خاص خود از دیگر منابع آب زیرزمینی متمایز می‌شوند. چشمه‌های گرو گلگیر، گرو میداود، گرو نفت سفید، گرو پل زال، گرساب جاردو، مشراکه، گراب بهبهان و بابا احمد از جمله چشمه گوگردی دمای پایین در محدوده زاگرس خوزستان بشمار می‌روند. این چشمه‌ها دمایی بین ۲۲ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد داشته، و در امتداد راندگی زاگرس ظاهر می‌شوند. با آنالیز داده‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی در دو دوره زمانی آذر ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ و به‌کارگیری روش‌های هیدروشیمیایی، تحلیل عاملی (PCA) و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (AHC) سعی شده است عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی چشمه‌ها شناسایی گردد. عامل اول مؤثر متغیرهای هدایت الکتریکی، Na, Cl, K, Ca, Mg, As و Cd را در برمی‌گیرد، این عامل ناشی از برهمکنش مواد آبخوان و آب می‌باشد، همچنین همبستگی بالا بین یون‌های اصلی و آرسنیک و کادمیوم نشان می‌دهد این عناصر منشأ واحدی دارند. عامل دوم متغیرهای SO<sub>4</sub>، NO<sub>3</sub> و S را در برمی‌گیرد. با توجه به نتایج آنالیز TOC این عامل را می‌توان ناشی از نفوذ شورابه‌های نفتی دانست. برای دسته‌بندی چشمه‌های مورد مطالعه از دو روش دیاگرام پایپر و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی Q-mode استفاده شد. دیاگرام پایپر این چشمه‌ها را در سه گروه و روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی Q-mode با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، چشمه‌های گوگردی در چهار گروه تفکیک کرد.

**کلمات کلیدی:** چشمه‌های گوگردی، تحلیل عاملی، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، سازند گچساران، شورابه نفتی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۲۷

1- Ph.D. Candidate of Hydrogeology, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.

2- Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz. Email: chitsazan.mc@gmail.com

3- Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی- آب، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

خوزستان را مورد تجزیه و تحلیل قرارداد، و سه عامل واکنش سنگ (کانی‌های تبخیری) و آب، تغییرات pH و یون کربنات را در تغییرات کیفیت آبهای زیرزمینی منطقه دخیل دانسته، و با استفاده از روش AHC منابع آبی مورد بررسی را در سه گروه متمایز دسته‌بندی کردند. Umamageswari et al. (2019) با ترکیب روش‌های بررسی همبستگی متغیرهای هیدروشیمیایی و تحلیل‌های هیدروشیمیایی در منابع آب زیرزمینی جنوب هند، سیستم اختلال آب‌های هیدروترمال عمیق و آب‌های زیرزمینی کم‌عمق را در کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مؤثر می‌دانند.

چشمه‌های گوگردی خوزستان از دسته چشمه‌های هیدروترمال دمای پایین می‌باشند که عموماً در طول گسل‌های اصلی و پلانژ تاقدیس‌های حوزه زاگرس قرار گرفته‌اند، از این بین می‌توان به چشمه گلگیر مسجدسلیمان، چشمه گراب بهبهان و چشمه پل زال اشاره کرد. در نمونه‌برداری از چشمه‌های گوگردی خوزستان مقادیر فلزات سنگین مثل آرسنیک و کادمیوم بالایی نشان داده شد، به دلیل آلوده‌کنندگی بالایی این فلزات سنگین و مصارف مختلف این چشمه‌ها همچون کاربردهای درمانی و در برخی موارد کاربری کشاورزی این چشمه‌ها، بررسی وضعیت هیدروشیمیایی این چشمه‌ها حائز اهمیت است. در این پژوهش سعی شده است با تجزیه و تحلیل داده‌های هیدروشیمیایی با استفاده از تکنیک‌های آماری آنالیز چند متغیره عوامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی این چشمه‌ها شناسایی گردد.

## ۲- جایگاه زمین‌شناختی

محدوده مورد مطالعه شامل گستره‌ای از زاگرس چین‌خورده در استان خوزستان است. چشمه‌های مورد مطالعه در یک راستا در امتداد رورانگی زاگرس از جنوب شرق خوزستان در بهبهان تا شمال شرق آن در محدوده پل زال پراکنده‌اند. چشمه گلگیر به مختصات جغرافیایی  $Y: 3517358$ ،  $X: 358795$  در پلانژ تاقدیس دو سو مایل آسماری در جنوب شرق مسجدسلیمان، شمال شرق اهواز و در حوضه کارون میانی قرار گرفته است. این تاقدیس یک تاقدیس نامتقارن است که تحت تأثیر فشارهای تکتونیک قرار گرفته است و دارای سیستم شکستگی در راستاهای مختلفی می‌باشد، این شکستگی‌ها در یال شمال غربی تاقدیس نسبت به یال شمال شرقی بیشتر است. سازند پابده با سن ائوسن-الیگوسن قدیمی‌ترین سازندی است که در منطقه رخنمون دارد و بر روی آن، به ترتیب سازند آهکی آسماری، سازند گچی و مارنی گچساران، سازند آهکی-مارنی میشان، سازند ماسه‌سنگی-مارنی آغاچاری همراه با بخش لهری، سازند کنگلومرایی بختیاری و در نهایت نهشته‌های کواترنری قرار می‌گیرند (شکل ۱).

چشمه‌های هیدروترمال به دلیل ویژگی‌های درمانی و هیدروشیمیایی همواره مورد توجه بوده‌اند. در ایران، حدود ۴۰۰ چشمه معدنی شناسایی شده‌اند (Ghafuri, 2003) که تعدادی از آن‌ها در حوزه زاگرس قرار گرفته‌اند. تاکنون تلاش‌های کمی برای طبقه‌بندی این چشمه‌ها بر اساس خصوصیات فیزیکوشیمیایی صورت گرفته است. از این گذشته اکثر مطالعات صورت گرفته بر این چشمه‌ها در مقیاس محلی انجام شده است. (Chitsazan et al. 2017) با استفاده از پارامترهای هیدروشیمیایی به بررسی منشأ شوری آب در چشمه گرو پرداخته و بر اساس نتایج حاصله علت اصلی شوری چشمه گرو در فصل مرطوب را ورود حجم بالای آب رودخانه تمبی، و در فصل خشک اختلاط با شورابه‌های نفتی می‌دانند. همچنین، (Karimi and Moore 2008) در پژوهشی با بررسی سیستم گرمایش چشمه‌های اهرم، میر احمد و گرو دالکی، خصوصیات این چشمه‌ها را ناشی از گردش عمیق آب‌های جوی، انحلال کانی‌های تبخیری و اختلاط با شورابه‌های نفتی می‌دانند.

گرچه استفاده از انواع نمودارهای توصیفی و ترکیبی از روش‌های معمول در شناخت فرایندهای حاکم بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی است، لیکن پیچیدگی‌های فرایندهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی سبب می‌شود نتوان با روش‌های گرافیکی، کیفیت آب‌های زیرزمینی با شرایط هیدروژئولوژیکی پیچیده را بررسی کرد (Banoeng Yakubo et al., 2009). یکی از روش‌های کاربردی در این زمینه استفاده از روش‌های آماری چند متغیره است، که برای تعیین ارتباط و تحلیل داده‌های مختلف هیدروژئولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی آبخوان‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. (Ghadimi et al. 2013) روش‌های آماری چند متغیره را برای بررسی روابط بین خصوصیات هیدروشیمیایی چشمه‌های هیدروترمال و غیر هیدروترمال منطقه محلات بکار بردند. آن‌ها با به‌کارگیری آنالیز تحلیل عاملی، چهار فاکتور مؤثر بر چشمه‌های هیدروترمال را برهم کنش شیمیایی آب جوی و سنگ، انحلال ژپس، انحلال کلسیت و هوازدگی کانی‌های سیلیکاته در عمق زمین شناسایی کردند. (Ayenew et al. 2009) نیز روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی متغیرهای هیدروشیمیایی را برای دسته‌بندی منابع آب زیرزمینی و درک تغییرات هیدروشیمیایی و دینامیک جریان آب زیرزمینی در عرض ریف اتیوپی بکار بردند. آنها از متغیرهای یون‌های اصلی و فلوئور ۱۲۶ چاه در ریف اتیوپی بهره برده، و منابع آب زیرزمینی را در ۲ گروه و ۷ زیرگروه تقسیم‌بندی کردند. (Kalantari et al. 2018) با بهره‌گیری از روش‌های آماری چند متغیره داده‌های هیدروشیمیایی دشت بستان

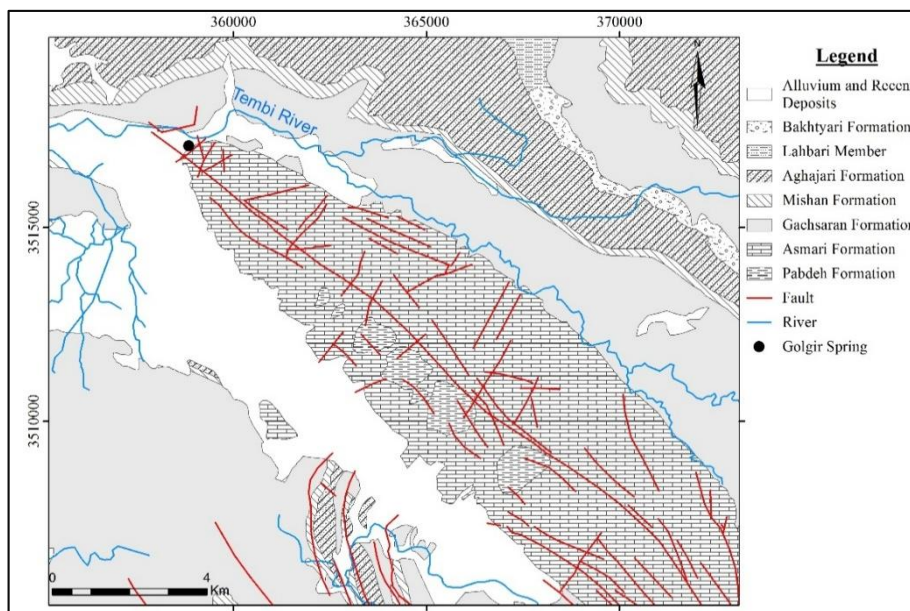


Fig. 1- Geological map of Golgari Spring area

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده چشمه گلگیر

محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند (شکل ۳). مشخصه بارز تاقدیس خائیز، وجود مرز شاخص بین سازند آسماری و رسوبات گچساران یا نهشته‌های آبرفتی است. تاقدیس فوق یک تاقدیس باریک و دو سو به است که یک شکستگی عرضی عمیق آن را قطع کرد. تحت تأثیر این شکستگی، رودخانه مارون با روند شمالی و جنوبی از تاقدیس خائیز عبور کرده و تنگه تکاب را در این تاقدیس به‌وجود آورده است.

گرو میداوود به مختصات جغرافیایی  $Y: 3473141$  ,  $X: 388684$  در پلانژ تاقدیس کوه سفید قرار گرفته و از نهشته‌های سازند گچساران خارج می‌شود. تاقدیس کوه سفید در غرب استان خوزستان و شمال شرق رامهرمز واقع شده است، و به‌صورت یک تاقدیس طولی مطابق با روند عمومی زاگرس، روندی شمال‌غربی - جنوب‌شرقی دارد. به لحاظ چینه‌شناسی سازندهای آسماری، پابده، گورپی و ایلام-سروک چینه‌شناسی ظاهری تاقدیس کوه سفید را تشکیل می‌دهند، که در اطراف تاقدیس با سازند گچساران محدود شده است (شکل ۴).

چشمه مشراگه به مختصات  $Y: 3231315$  و  $X: 347401$  در پلانژ تاقدیس مارون قرار داشته، و از نهشته‌های بخش لهربری خارج می‌شود. تاقدیس مارون به صورت یک تاقدیس زیرسطحی در بخش میانی زون ساختاری زاگرس چین خورده ساده در جنوب فروافتادگی دزفول شمالی و در امتداد تاقدیس‌های رامین و آغاچاری قرار گرفته است. این تاقدیس بخش اصلی میدان نفتی مارون بشمار می‌آید، و از بزرگترین تاقدیس‌های نفتی فروافتادگی دزفول است. همانند دیگر تاقدیس‌های

چشمه باباحمد به مختصات جغرافیایی  $Y: 3577524$  ,  $X: 345549$  در تنگه کارستی باباحمد تاقدیس پابده قرار گرفته است. این تاقدیس دارای روند SE-NW همراستا با روند عمومی زاگرس است، و یک تاقدیس دو سو مایل نامتقارن می‌باشد. سازند آهکی-دولومیتی آسماری هسته تاقدیس پابده را تشکیل داده است. این سازند توسط سازند نفوذناپذیر پابده در زیر و سازندهای نفوذناپذیر گچساران در یال جنوبی، و آغاچاری در یال شمالی محصور شده است (شکل ۲). گسل راستالغز چپ‌بر بالا رود، که یکی از گسل‌های اصلی و بنیادین در کمربند زاگرس چین خورده ایران می‌باشد، در ایجاد پیچیدگی‌های زمین‌شناسی ساختمانی و چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه نقش اساسی دارد. از مهمترین شواهد این زون گسلی می‌توان به ایجاد چین‌های پوششی، بریدن و فرسایش هسته تاقدیس و تشکیل دره‌ها و تنگه‌های کارستی و خردشدگی‌های فراوان در دماغه تاقدیس‌های مسیر، ایجاد گسل‌های عرضی و مورب امتدادلغز اشاره نمود (Kalantari et al., 2011).

چشمه گراب تخلیه کننده عمده تاقدیس خائیز در پلانژ شمال غربی این تاقدیس قرار گرفته است، که از مرز سازند آسماری و گچساران خارج می‌شود. تاقدیس خائیز راستایی شمال‌غرب - جنوب‌شرق همراستا با روند عمومی زاگرس داشته و با طول ۱۸ و عرض متوسط ۴/۵ کیلومتر در شمال غربی بهیمنان واقع شده است. سازندهای شیل مارنی پابده و گورپی، سازند آهکی آسماری، لایه‌های گچ و مارنی سازند گچساران اصلی‌ترین سازندهای زمین‌شناختی می‌باشند که در

این پهنه، یال جنوب غربی آن پرشیب تا برگشته، و یال شمال شرقی کم شیب دارد (شکل ۵).

چشمه گرساب جالاردو به مختصات  $X: 247971$  و  $Y: 3629527$  در پلانژ تاقدیس چناره قرار گرفته است. این تاقدیس در شمال اندیمشک و در کمربند چین خورده-رانده زاگرس واقع شده است.

چشمه گرو نفت سفید به مختصات  $X: 354893$  و  $Y: 3488308$  در شمال غرب هفتگل قرار گرفته است. این چشمه در پلانژ تاقدیس میدان نفتی هفتگل و در مرز سازندهای میشان و گچساران خارج

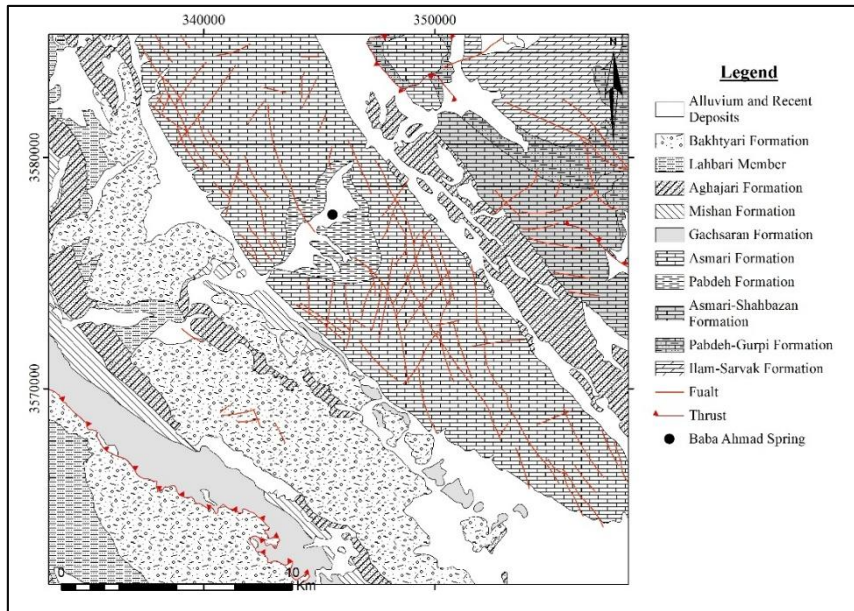


Fig. 2- Geological map of Baba Ahmad Spring area

شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه بابا احمد

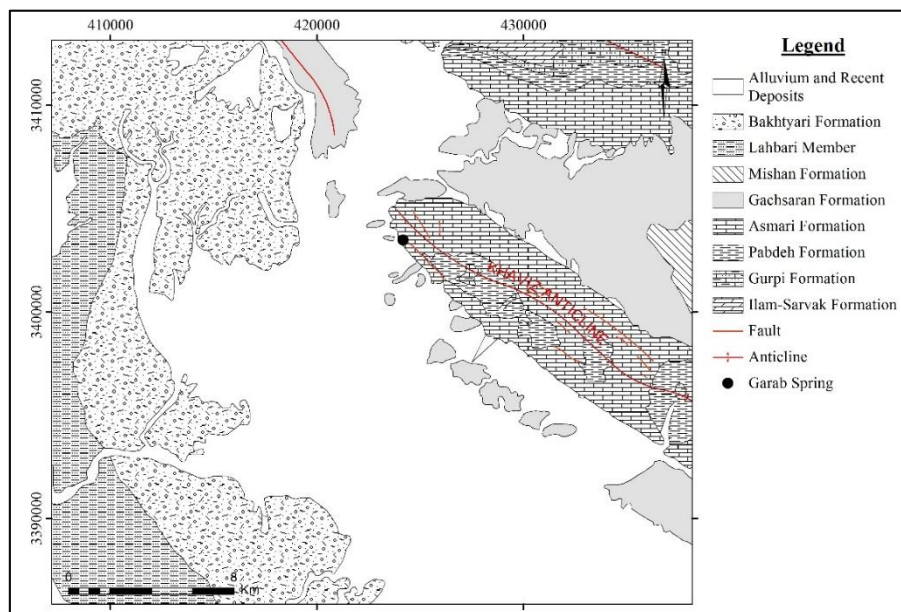
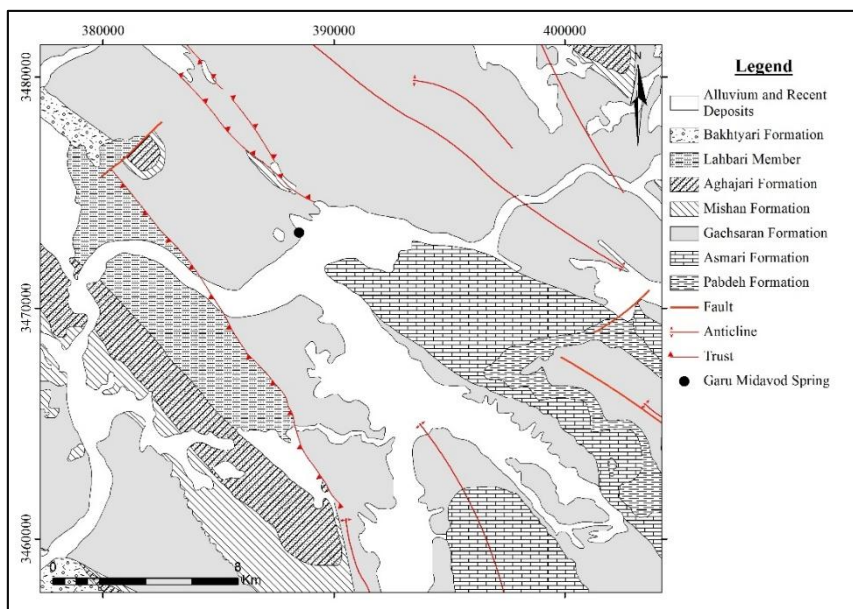


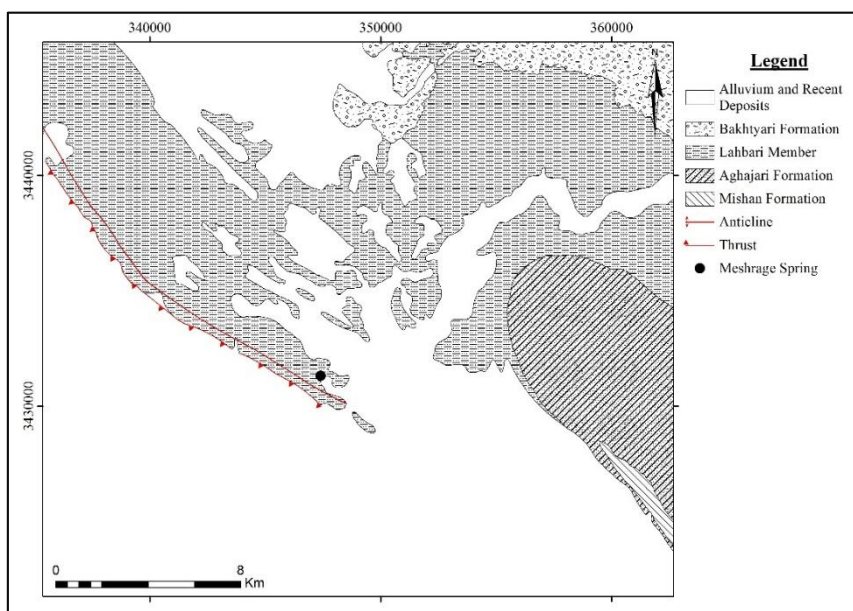
Fig. 3- Geological map of Garab Spring area

شکل ۳- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه گراب



**Fig. 4- Geological map of Midavod Spring area**

شکل ۴- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه میداوود

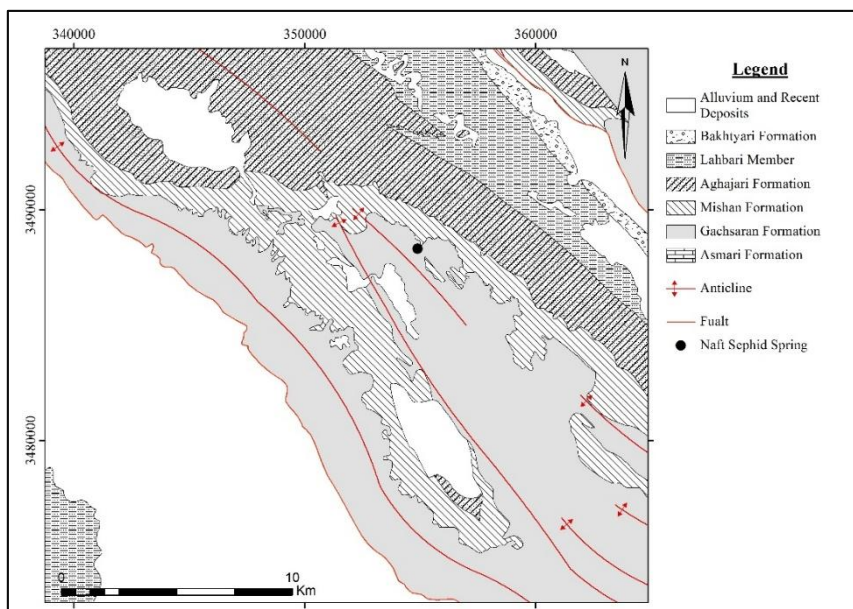


**Fig. 5- Geological map of Meshrage Spring area**

شکل ۵- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه مشراگه

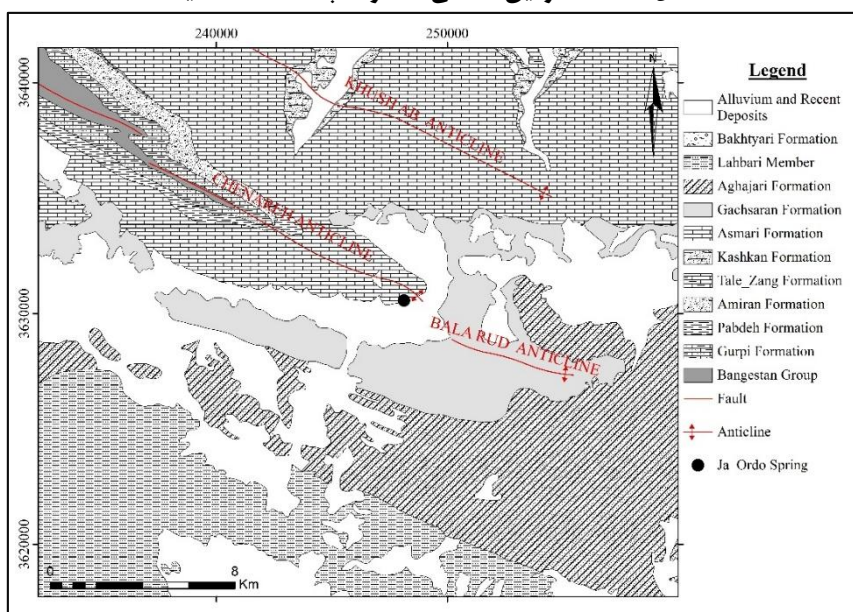
تغییرات جانبی این رخساره‌ها در این منطقه، به عملکرد گسل راندگی مدفون بالارود نسبت داده می‌شود (Hajjalibeigi et al., 2009). سازند گورپی و سازندهای گروه بنگستان مشتمل بر سازندهای سروک و ایلام در هسته تاقدیس رخنمون دارند. سازند سروک قدیمی‌ترین سازندی است که در هسته تاقدیس مشاهده می‌شود (شکل ۷).

پس از نهشته‌های کواترنری، جوانترین واحدهای سنگ‌شناسی تاقدیس چناره سازند آغاچاری است که گسترش آن و همچنین سازند گچساران محدود به بخش جنوب شرقی یال جنوبی است. اصلی‌ترین و گسترده‌ترین رخنمون در این تاقدیس، سازند آسماری است. در یال جنوبی سازند پایده قرار دارد که به طرف یال شمالی به سازندهای امیران، تله زنگ، کشکان و شهبازان به صورت جانبی تبدیل می‌شود.



**Fig. 6- Geological map of Naft Sefid Spring area**

شکل ۶- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه نفت سفید



**Fig. 7- Geological map of Ja Ordo Spring area**

شکل ۷- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه گرساب جارردو

سازندهای کربناتی توسط لایه‌های نفوذناپذیر گرو، پابده-گورپی و گچساران محصور شده‌اند.

### ۳- نمونه برداری و آنالیز

در مجموع ۱۸ نمونه از ۸ چشمه گوگردی در گستره استان خوزستان طی دو دوره آذر ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ نمونه برداری گردید. پارامترهای هیدروشیمیایی pH، EC و دما در محل نمونه برداری به واسطه

چشمه پل زال به مختصات X: ۲۲۴۰۳۲ و Y: ۳۶۳۱۹۲۹ از پلانژ تاقدیس کبیرکوه خارج می‌شود. تاقدیس کبیرکوه یک تاقدیس از دو سو مایل است، که با طول بیش از ۱۵۰ کیلومتر از جنوب شرقی ایلام تا نزدیک اندیمشک در خوزستان امتداد یافته، و یکی از طولانی‌ترین تاقدیس‌های زاگرس محسوب می‌شود. واحدهایی که در این کوه رخنمون دارند از قدیم به جدید شامل سازندهای گرو، سروک، سورگاه، ایلام، گورپی، پابده، آسماری و گچساران می‌باشند (شکل ۸).

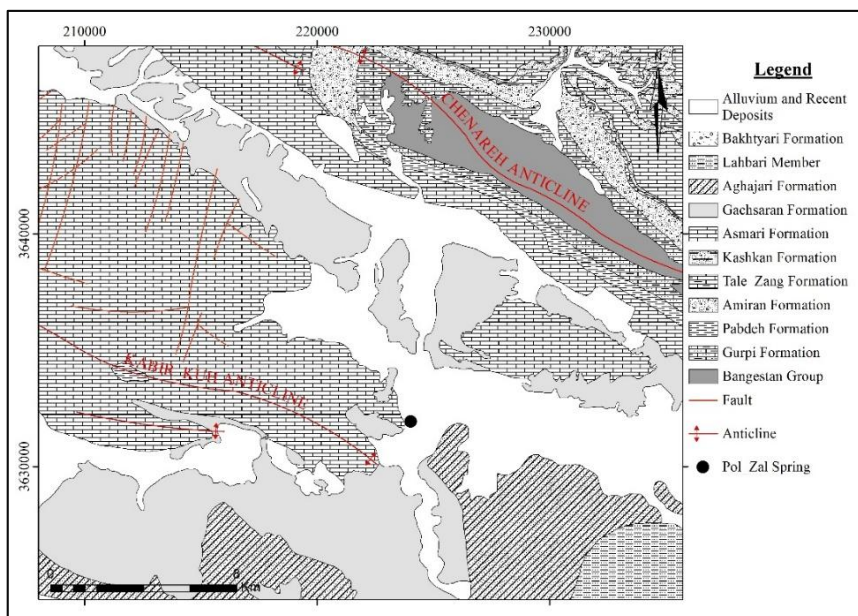


Fig. 8- Geological map of Pol Zal Spring area

شکل ۸- نقشه زمین شناسی محدوده چشمه پل زال

سولفات و چشمه‌های مشراکه، گراب و گلگیر تپ سدیک کلره، چشمه بابا احمد در فصل تر کلسیم کلره و در فصل خشک کلسیم کربناته و در آخر جاردو در فصل تر تپ کلسیم کربناته و در فصل خشک تپ کلسیم کلره نشان می‌دهند. تپ کسیم کلره می‌تواند در اثر نفوذ شورابه‌های نفتی به آب زیرزمینی ایجاد شود (Richter and Kreitler, 1993).

همچنین با توجه به پراکندگی نمونه‌ها در نمودار پایپر می‌توان سه تجمع داده را تشخیص داد. تجمع‌های ایجاد شده نشان می‌دهد چشمه‌های گوگردی هر دسته خصوصیات شیمیایی مشترکی داشته، و عوامل یکسانی در ایجاد آن‌ها نقش داشته است. چشمه‌های مشراکه، گلگیر و گراب در یک گروه قرار گرفته‌اند، این چشمه‌ها بیشتر تحت تأثیر نفوذ شورابه‌های نفتی قرار گرفته‌اند. گروه نمونه‌های چشمه‌های میداوود و نفت سفید مقادیر بالایی یون‌های سولفات و کلسیم را نشان می‌دهند، که نشان می‌دهد بیش از دیگر چشمه‌ها تحت تأثیر سازندهای تبخیری منطقه (گچساران) قرار گرفته‌اند. با توجه به موقعیت این چشمه‌ها در نقشه‌های زمین‌شناسی مشخص است این چشمه‌ها از سازند گچساران تخلیه می‌شوند.

#### ۴-۲- آنالیز آماری چند متغیره

تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی بر پایه ماتریس همبستگی می‌تواند ارتباط بین متغیرها و همچنین ارتباط مجموعه داده‌ها با یکدیگر را نشان دهد (Oinam et al., 2012).

مولتی متر HQ 40 Hach اندازه‌گیری گردید. یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات به عنوان یون‌های اصلی با استفاده از روش یون کروماتوگرافی، بی‌کربنات به واسطه تیتراسیون، نیترات به منظور شناسایی نقش مواد آلی و گوگرد به واسطه روش اسپکتروفتومتری در آزمایشگاه آب گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز، فلزات سنگین آرسنیک و کادمیوم به عنوان فلزات سنگین آلوده‌کننده در این منابع آبی به روش ICP-MS در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی اندازه‌گیری گردید. نتایج آنالیزهای هیدروشیمیایی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین تعداد ۸ نمونه از این چشمه‌های گوگردی برای آنالیز کربن آلی کل برداشت و در آزمایشگاه آراین فن آزما به روش اکسیداسیون پرسولفات اندازه‌گیری شده است.

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- هیدرو شیمی چشمه‌ها

هدایت الکتریکی چشمه‌های گوگردی بین  $190000-800 \mu\text{s/cm}$  و pH بین  $4/4$  تا  $8$  متغیر است. کمترین هدایت الکتریکی در چشمه بابا احمد و بالاترین در چشمه مشراکه مشاهده می‌شود. ترسیم داده‌های هیدروشیمیایی بر روی نمودار پایپر نشان می‌دهد نمونه‌های برداشت شده به دلیل تأثیر سازندهای تبخیری همچون گچساران حاوی مقادیر بالایی یون کلسیم، سولفات و کلر می‌باشند (شکل ۹). بر این اساس چشمه‌های پل زال، میداوود و نفت سفید تپ کلسیم

**Table 1- HydroChemical variables of Sulfur spring**

جدول ۱- متغیرهای هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی

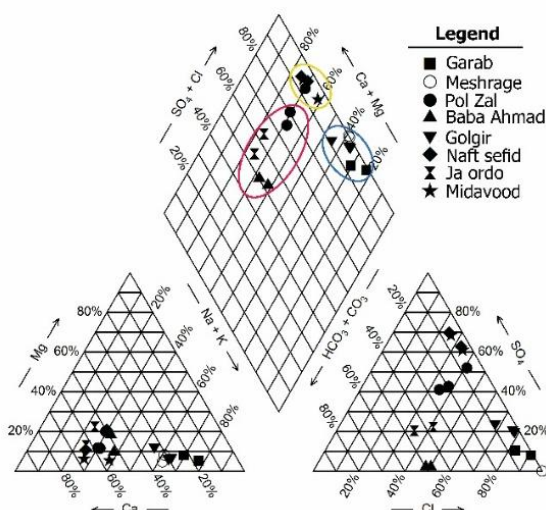
ID	EC μs/cm	pH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	S μg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	As mg/l	Cd mg/l
Meshrage 1	180000	4.4	35914.5	3100.6	74767.4	2727.9	99.6	217.4	180982.0	28500	425.3	0.22	0.09
Pol Zal 1	1620	5.7	197.9	24.2	116.5	3.5	263.6	302.3	176.2	5400	14.2	0.06	0.04
Pol Zal 2	1630	7.2	193.5	23.7	119.8	3.8	249.0	293.0	181.5	1140	11.1	0.23	0.03
Baba Ahmad 1	966	7.3	108.4	12.2	88.1	5.8	284.1	9.4	157.8	7650	12.8	0.11	0.02
Golgir 1	4500	5.8	248.4	32.0	603.2	8.7	240.2	394.3	1063.0	16500	79.7	0.12	0.04
Golgir 2	3900	5.6	200.1	29.7	517.1	9.5	266.5	317.5	912.9	18300	96.1	0.08	0.05
Naft sefid 1	2700	7.5	659.3	66.8	293.4	11.7	196.2	1780.0	461.9	170	1.3	0.13	0.04
Ja ordo 1	1560	8	209.1	26.6	91.3	4.6	496.5	172.0	212.3	897	6.7	0.08	0.02
Midavood 1	3800	7.3	665.3	37.7	300.0	15.0	204.0	1777.0	496.3	240	2.3	0.18	0.04
Baba Ahmad 2	805	7.5	107.5	24.3	79.5	5.3	269.5	9.3	142.4	8000	155.5	0.10	0.06
Ja ordo 2	1290	8	189.5	47.4	93.3	2.7	331.0	155.9	215.5	1046	17.7	0.09	0.02
Pol Zal 3	1302	7.3	179.4	43.1	119.1	2.1	175.7	274.0	178.9	6300	37.7	0.17	0.05
Garab 2	7300	6.5	397.2	86.5	1401.2	23.1	486.2	387.5	2250.5	650000	116.1	0.25	0.04
Meshrage 2	190000	4.5	35517.0	5720.7	79053.3	2924.8	87.9	215	191454.5	31000	124.5	0.37	0.11
Naft sefid 2	4650	6.9	779.9	198.5	521.7	20.2	213.8	2106.1	820.6	100	2.7	0.05	0.05
Golgir 3	3260	6.9	268.9	59.9	504.1	9.1	243.1	426.7	889.7	19000	14.2	0.13	0.04
Midavood 2	5300	7	820	48.6	630.0	23.0	231.9	2209.0	930	130	4.0	0.07	0.05

هالیت و ژینس باشد. دیگر ارتباط قوی بین فلزات سنگین آرسنیک و کادمیوم با یون‌های اصلی مشاهده می‌شود.

همبستگی بین فلزات سنگین و یون‌های ذکر شده نشان می‌دهد فلزات سنگین در این چشمه‌ها می‌توانند از نهشته‌های تبخیری منطقه منشأ گرفته باشند. دیگر ارتباط قوی بین گوگرد (H<sub>2</sub>S) و نیترات مشاهده می‌شود (۰/۸۳). منشأ واحد یون‌های گوگرد و نیترات می‌تواند در ارتباط بانفوذ شورابه‌های نفتی و فعالیت میکروارگانیسم‌های احیاکننده سولفات باشد (Marietou, 2016).

#### ۴-۳- تحلیل عاملی

تحلیل عاملی آنالیز چند متغیره آماری است که امکان تجزیه و تحلیل روابط بین متغیرهای هیدروشیمیایی و دسته‌بندی داده‌های اولیه را فراهم می‌کند. تحلیل عاملی می‌تواند متغیرهای متعدد هیدروشیمیایی را به تعداد محدودی عامل مؤثر با ضریب تأثیر مشخص کاهش دهد (Love et al., 2004). تجزیه و تحلیل فاکتورهای ژئوشیمیایی می‌تواند به ما در شناخت فرآیندهای حاکم بر توزیع متغیرهای هیدروشیمیایی کمک کند. بررسی آماری داده‌های هیدروشیمیایی در این پژوهش نشان می‌دهد که این داده‌ها عموماً چولگی مثبت دارند و از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند.



**Fig. 9- Piper diagram of sulfur springs**

شکل ۹- نمودار پایپر چشمه‌های گوگردی

ماتریس همبستگی پارامترهای کیفیت آب چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین هدایت الکتریکی و یون‌های Ca و Na, K, Mg, Cl دیده می‌شود، این همبستگی نشان می‌دهد کیفیت شیمیایی نمونه‌ها به‌واسطه این متغیرها کنترل می‌شود. ارتباط بین این یون‌ها می‌تواند در نتیجه انحلال کانی‌های تبخیری مثل



**Table 2- Correlation matrix of hydrochemical variables of Sulfur springs**  
**جدول ۲- ماتریس همبستگی متغیرهای هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه**

Variables	EC	Na	K	Mg	Ca	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	S	NO <sub>3</sub>	As	Cd
EC	1											
Na	0.994	1										
K	0.976	0.974	1									
Mg	0.927	0.923	0.923	1								
Ca	0.943	0.925	0.947	0.961	1							
Cl	0.993	0.997	0.976	0.931	0.930	1						
HCO <sub>3</sub>	-0.636	-0.635	-0.649	-0.736	-0.775	-0.630	1					
SO <sub>4</sub>	0.234	0.189	0.112	0.189	0.267	0.154	-0.165	1				
S	0.326	0.381	0.290	0.167	0.056	0.379	0.168	-0.422	1			
NO <sub>3</sub>	0.454	0.505	0.437	0.369	0.264	0.516	-0.140	-0.509	0.830	1		
As	0.525	0.555	0.507	0.487	0.475	0.539	-0.485	-0.033	0.445	0.425	1	
Cd	0.702	0.729	0.702	0.732	0.716	0.706	-0.784	0.188	0.162	0.427	0.490	1

KMO بالاتر از ۰/۶ بوده، و لذا حجم داده‌های هیدروشیمیایی جهت انجام آنالیزهای آماری کفایت دارند.

آنالیز تحلیل عاملی نشان می‌دهد چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه تحت تأثیر دو عامل اصلی می‌باشند (شکل ۱۰). عامل‌های اول و دوم با ۸۱/۹٪ واریانس داده‌ها بیشترین تأثیر را در کیفیت هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه دارند. عامل اول متغیرهای هدایت الکتریکی Na، K، Mg، Ca و Cl را تحت تأثیر خود دارد، عامل دوم نیز مقدار گوگرد، نیترات و سولفات را تحت تأثیر قرار می‌دهد (جدول ۴).

البته بیشتر توزیع داده‌های طبیعی از این الگو تبعیت می‌کنند (Miesch, 1976). به کارگیری لگاریتم داده‌ها کمک می‌کند توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک شود. سپس داده‌ها با استفاده از رابطه ۱ استانداردسازی شدند. بدین صورت هر داده هیدروشیمیایی وزنی برابر در آنالیزهای آماری خواهد داشت (Güler et al., 2002).

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (1)$$

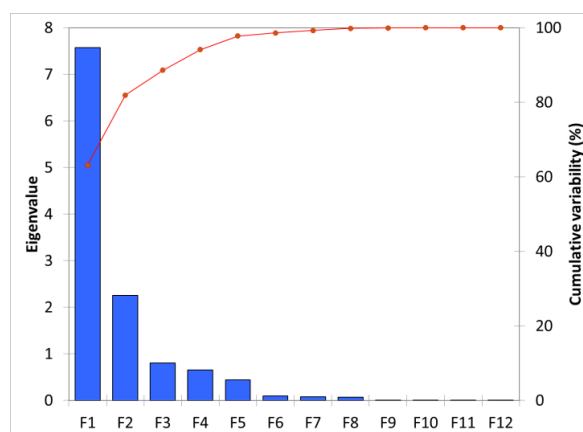
که در آن  $X_i$ : مقدار پارامتر  $X$ ،  $\bar{X}$ : میانگین پارامتر و  $S$ : انحراف معیار می‌باشد. در گام بعدی از آزمون کایزر مایر و بارتلت جهت بررسی کفایت داده‌ها استفاده شد. با توجه به نتایج جدول ۳ مقدار آزمون

**Table 3- Kaiser Mayer and Bartlett Spearman's data adequacy test**

**جدول ۳- آزمون کفایت داده کایزر مایر و کرویت بارتلت**

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0.695
Approx. Chi-Square		85.965
Bartlett's Test of Sphericity	df	66
	Sig.	0.05

با توجه به لیتولوژی منطقه عامل اول را می‌توان برهمکنش مواد آبخوان و آب زیرزمینی دانست. به این ترتیب سازندهای کربناته و سولفات زاگرس تأثیر اصلی را بر کیفیت آب چشمه‌های گوگردی مورد بحث دارند. همچنین این تشکیلات می‌توانند منشأ اصلی فلزات سنگین کادمیوم و آرسنیک در آب‌های منطقه باشند. سازندهای آسماری و گچساران دارای مقدار زمینه آرسنیک به ترتیب ۵ ppm (Chitsazan et al., 2008) و ۶ ppm (Chitsazan et al., 2017) می‌باشند. پیریت در ساختار خود معمولاً حاوی عناصر کالکوفیل مثل آرسنیک است (Malik and Rajagopal, 1996). از آنجایی که سنگ آهک سازند آسماری دارای مقادیری پیریت به صورت ناخالصی است. احتمالاً مقادیر آرسنیک سازند آسماری، در ساختمان چنین پیریت‌هایی قرار دارد. همچنین وجود آرسنیک در نمونه‌های برداشتی از مارن خاکستری رنگ و قرمز رنگ سازند گچساران گزارش شده است (Chitsazan et al., 2017).



**Fig. 10- Diagram of Factors Affecting Water Quality of study Sulfur Springs**

**شکل ۱۰- نمودار فاکتورهای مؤثر در کیفیت آب چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه**

است که گوگرد موجود در چشمه‌های گوگردی منطقه عموماً از انحلال نهشته‌های ژئوسپت منطقه حاصل شده‌اند (شکل ۱۱). گرچه سولفات همانند دیگر یون‌های اصلی از برهمکنش مواد آبخوان و آب زیرزمینی منشأ می‌گیرد، لیکن عامل دوم یعنی احیا سولفات توسط میکروارگانسیم‌ها بر مقدار نهایی آن در چشمه‌های گوگردی تأثیرگذار خواهد بود.

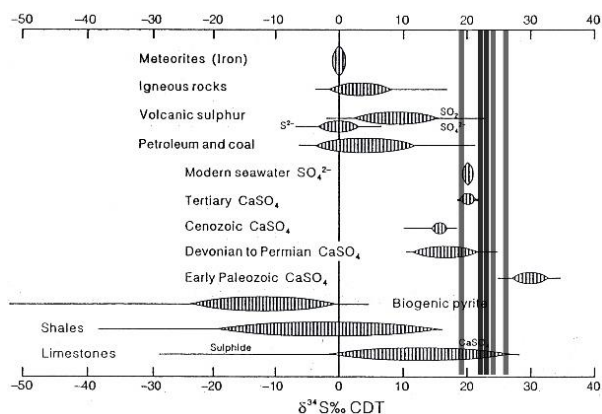


Fig. 11- Content of  $^{34}\text{S}$  isotope of Khuzestan sulfur springs (Clark and Fritz, 1997)

شکل ۱۱- محتوی ایزوتوپ  $^{34}\text{S}$  چشمه‌های گوگردی خوزستان (Clark and Fritz, 1997)

نمودارهای دمولفه‌ای می‌تواند اثرگذاری هر یک از فاکتورها و متغیرهای شیمیایی دربرگیرنده را در هر یک از چشمه‌های مورد بررسی نشان دهند (شکل ۱۲). در این نمودار متغیرهای کیفی با بردار قرمز و چشمه‌ها با نقاط آبی‌رنگ نشان داده شده است. طول هر بردار، تأثیر آن را بر هر عامل را نشان می‌دهد. عامل اول مقدار یون‌های اصلی به استثنای سولفات و فلزات سنگین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یون بیکربنات گرچه از عامل اول منشأ می‌گیرد لیکن روندی مشابه دیگر متغیرهای متأثر از این عامل ندارد. بیکربنات در آب‌های با املاح بالا خیلی زود به حد اشباع می‌رسد، لذا روند مشابه با سایر املاح که در فاکتور یک تجمع پیدا کرده‌اند نشان نمی‌دهد. عامل اول بیشترین تأثیر در چشمه مشراکه می‌گذارد، چشمه‌های گلگیر، پل زال و جاردو نیز متأثر از عامل اول‌اند. عامل دوم ناشی از ورود شورابه‌های نفتی و فعالیت میکروارگانسیم‌های احیا سولفات بر مقدار نیترات، گوگرد و سولفات مؤثر است، گرچه سولفات از انحلال ژئوسپت منطقه منشأ می‌گیرد، لیکن مقدار نهایی این متغیر تحت تأثیر فعالیت میکروارگانسیم‌های احیاکننده سولفات است. این میکروارگانسیم‌ها با مصرف سولفات سبب آزادسازی گوگرد (به صورت  $\text{H}_2\text{S}$ ) و نیترات می‌شوند، در نتیجه تغییرات سولفات گرچه تحت تأثیر عامل دوم است، لیکن روندی مشابه تغییرات نیترات و گوگرد نخواهد داشت. بیشترین

Table 4- Factor loads and component values

جدول ۴- بارهای عاملی و مقادیر ویژه مؤلفه‌ها		
	F1	F2
EC	0.947	0.002
Na	0.963	0.000
K	0.927	0.001
Mg	0.898	0.022
Ca	0.890	0.069
Cl	0.957	0.001
HCO3	0.553	0.122
SO4	0.021	0.581
S	0.112	0.756
NO3	0.264	0.628
As	0.389	0.067
Cd	0.655	0.010
Eigenvalue	7.576	2.258
Variability (%)	63.134	18.814
Cumulative%	63.134	81.948

عامل دوم گوگرد، نیترات و سولفات را به ترتیب با مربع کسینوس  $0/756$ ،  $0/628$  و  $0/581$  تحت تأثیر قرار می‌دهد. منشأ گوگرد، نیترات و سولفات می‌تواند به علت نفوذ شورابه‌های نفتی به چشمه‌های مورد بررسی باشد. شورابه‌های نفتی بانفوذ از عمق با درجه حرارت بالا بر روی کانی‌های ژئوسپت و آندیریت اثر گذاشته و سبب آزادسازی سولفات می‌شوند، در زیر سطح باکتری‌های احیاکننده سولفات، اکسیژن را از سولفات جدا کرده، سبب تولید  $\text{H}_2\text{S}$  می‌شوند. همچنین نفوذ شورابه‌های نفتی و ارتباط مواد آلی مرتبط با هیدروکربن‌های نفتی با آب‌های زیرزمینی باعث احیایی‌تر شدن محیط و بالا رفتن غلظت آرسنیک در آب‌های کارستی این سازندها می‌شود. بنابراین منشأ واحد یون‌های گوگرد و نیترات می‌تواند در ارتباط بانفوذ شورابه‌های نفتی و فعالیت میکروارگانسیم‌های احیاکننده سولفات باشد (Marietou, 2016). آنالیز کربن آلی کل در چشمه‌های مورد بررسی نفوذ شورابه‌های نفتی را تأیید می‌کند (جدول ۵).

Table 5- Total organic carbon in sulfur springs

جدول ۵- کربن آلی کل در چشمه‌های گوگردی	
Spring	TOC (mg/l)
Garab	65
Midavood	14
Pol Zal	7
Baba Ahmad	10
Golgir	34
Naft sefid	16
Ja ordo	12
Meshrage	140

همچنین مطالعات قبلی ایزوتوپ گوگرد نیز نشان می‌دهد آب‌های چشمه‌های مورد مطالعه غالباً دارای ایزوتوپ  $\delta^{34}\text{S}$  % ۲۰ تا % ۲۶ می‌باشند (Nasari et al., 2013)، و این مهم نشان‌دهنده این واقعیت

(Meng and Maynard, 2001; Kebede et al., 2005). این تکنیک آماری چند متغیره برای طبقه‌بندی داده‌های هیدروشیمیایی است، به‌گونه‌ای که اعضای گروه‌ها یا زیرگروه‌های حاصل مشابه یکدیگر و متمایز از دیگر گروه‌ها می‌باشند. این طبقه‌بندی برای درک کنترل‌گرهای زمین‌شناختی شیمی آب در شرایطی مفید است که داده‌های ژئوشیمیایی برداشت شده‌اند، اما مدل‌های هیدروژئولوژیکی هنوز ایجاد نشده‌اند. شکل ۱۳ دندروگرام ایجاد شده به روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی داده‌های هیدروشیمیایی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر این اساس چهار خوشه اصلی قابل تشخیص می‌باشند. نمونه‌های چشمه مشراکه و گراب متمایز از دیگر چشمه‌ها هر یک در گروهی مجزا قرار می‌گیرند. چشمه‌های جاردو، بابا احمد، گلگیر و پل زال به لحاظ خصوصیات هیدروشیمیایی به هم نزدیک بوده و در یک گروه قرار می‌گیرند، چشمه‌های نفت سفید و میداود نیز در یک گروه قرار می‌گیرند.

تأثیر عامل دوم در چشمه گراب، نفت سفید و میداود دیده می‌شود. عامل دوم تا حدودی بر متغیر آرسنیک نیز تأثیرگذار است، در واقع شوراب‌های نفتی و ارتباط مواد آلی مرتبط با هیدروکربن‌های نفتی با آب‌های زیرزمینی باعث احیایی‌تر شدن محیط و بالا رفتن غلظت آرسنیک می‌شوند.

#### ۴-۴- خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (AHC)

در این پژوهش داده‌های هیدروشیمیایی برای دسته‌بندی آب‌ها در رده‌های مختلف بر اساس تجزیه و تحلیل خوشه‌ای Q-mode مورد استفاده قرار گرفتند. طبقه‌بندی آماری داده‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) Q-mode به‌عنوان مبنایی مناسب برای طبقه‌بندی ترکیب شیمیایی آب به‌صورت رخساره‌های هیدروشیمیایی به اثبات رسیده است.

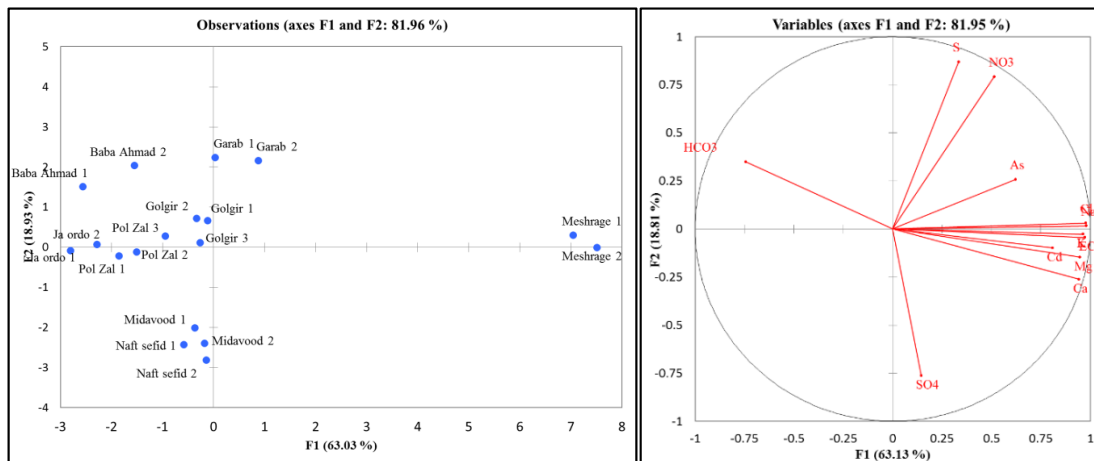


Fig. 12- Two-factor diagram of factors affecting the quality of sulfur springs

شکل ۱۲- نمودار دوعاملی عوامل مؤثر بر کیفیت چشمه‌های گوگردی

برای درک بهتر تمایز بین گروه‌های استخراجی در روش AHC مقدار متوسط متغیرهای شیمیایی در گروه‌های به‌دست‌آمده از آنالیز خوشه‌ای در جدول ۶ آورده شده است. با توجه مقدار میانگین داده‌ها در هر گروه ملاحظه می‌شود اختلاف مقدار سدیم، کلسیم و سولفات در بین گروه‌های مختلف فراوان است، این موضوع به دلیل میزان انحلال متفاوت سازندهای تبخیری در چشمه‌ها است. همچنین مقادیر گوگرد و نترات در گروه‌ها چهارگانه متمایزند، این موضوع اهمیت نفوذ شورابه‌های نفتی و تأثیر آن بر کیفیت چشمه‌های گوگردی را نشان می‌دهد. گروه اول شامل چشمه مشراکه به‌واسطه یون‌های محلول و در نتیجه هدایت الکتریکی بالاتر از دیگر چشمه‌ها متمایز می‌شود. چشمه‌های گروه دوم به نسبت یون‌های محلول و در نتیجه هدایت الکتریکی کمتری نشان می‌دهند که می‌تواند در نتیجه تأثیر بیشتر

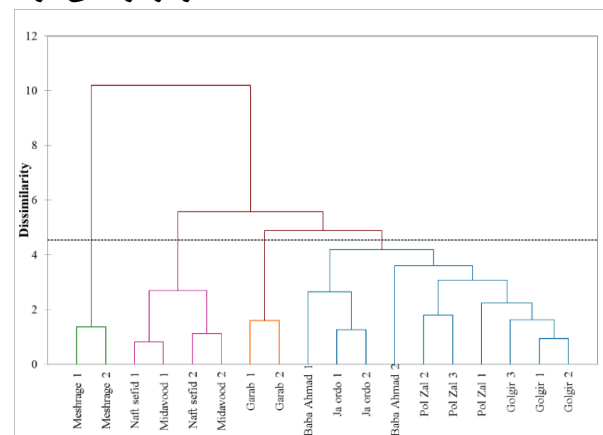


Fig. 13- Hydrochemical data clustering of sulfur springs

شکل ۱۳- خوشه‌بندی داده‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های گوگردی

**Table 6- Mean hydrochemical variables in AHC groups****جدول ۶- میانگین متغیرهای هیدروشیمیایی در گروه‌های AHC**

	EC µm/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	S µg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	As mg/l	Cd mg/l
Group 1	185000	76910	2826	4411	35716	186218	94	216	29750	275	0.30	0.10
Group 2	2080	233	5	32	190	413	282	235	8423	45	0.11	0.04
Group 3	7225	1208	29	62	300	1948	474	292	646500	108	0.19	0.04
Group 4	4112	436	17	88	731	677	211	1968	160	3	0.11	0.05

روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی Q-mode چشمه‌های مورد بحث را در چهار گروه متمایز قرار داد. نمونه‌های چشمه مشراکه و گراب متمایز از دیگر چشمه‌ها هر یک در گروهی مجزا قرار می‌گیرند. چشمه‌های جاردو، بابا احمد، گلگیر و پل زال به لحاظ خصوصیات هیدروشیمیایی به هم نزدیک بوده و در یک گروه قرار می‌گیرند، چشمه‌های نفت سفید و میداود نیز در یک گروه قرار می‌گیرند. در نمودار پایپر چشمه‌های مورد بررسی در سه گروه قرار گرفتند. گرچه نمودار پایپر روشی اساسی در تحلیل نتایج هیدروشیمیایی است، لیکن در این روش نمی‌توان متغیرهای چون نیترات یا دیگر مؤلفه‌های آب زیرزمینی را در نظر گرفت. روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی تقسیم‌بندی را با در نظر گرفتن خصوصیات بیشتری نسبت به نمودار پایپر نشان می‌دهد، و می‌تواند در کنار آن درک صحیح‌تری از روند متغیرهای آب زیرزمینی ارائه دهد.

در ادامه پیشنهاد می‌شود برای درک صحیح منشأ آبهای این چشمه‌ها و همچنین منشأ آلودگی فلزات سنگین و نیترات از آنالیزهای ایزوتوپی اکسیژن، هیدروژن، استرانسیم و نیتروژن بهره برد. همچنین با توجه با بار آلودگی این چشمه‌ها بررسی تأثیر آنها بر منابع آبی مجاور ضروریست.

## ۶- مراجع

- Ayeneu T, Fikre S, Wisotzky F, Demlie M, Wohnlich S (2009) Hierarchical cluster analysis of hydrochemical data as a tool for assessing the evolution and dynamics of groundwater across the Ethiopian rift. *International Journal of Physical Sciences* 4(2):76-90
- Banoeng Yakubo B, Yidana SM, Nti E (2009) Hydrochemical analysis of groundwater using multivariate statistical methods the Volta region Ghana. *KSCE Journal of Civil Engineering* 13(1):55-63
- Chitsazan M, Dorranejad MS, Zarasvandi A, Mirzaii SY (2008) Occurrence, distribution and source of arsenic in deep groundwater wells in Maydavood

سازندهای کربناته نسبت به سازندهای تیخیری در این چشمه باشد. چشمه گراب به‌واسطه مقدار بالای گوگرد و نیترات متمایز می‌شوند، منشأ بالای نیترات و گوگرد را می‌توان به نفوذ بیشتر مواد هیدروکربوری و فعالیت میکروارگانیسم‌های احیاء سولفات مرتبط دانست. مقدار کربن آلی کل در این چشمه نفوذ مواد هیدروکربوری بیشتری را نسبت به دیگر چشمه به‌استثنای مشراکه نشان می‌دهد (جدول ۵). گروه چهارم شامل نفت سفید و چشمه میداود به شدت تحت تأثیر سازند گچساران بوده و مقدار سولفات بالاتری نسبت به دیگر چشمه‌ها نشان می‌دهند.

## ۵- نتیجه‌گیری

آنالیز شیمیایی چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه نشان داد فلزات سنگین آرسنیک و کادمیوم مقادیری بالاتر از استاندارد جهانی دارند. مقدار استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای آرسنیک ۱۰ ppb، و برای کادمیوم ۵ ppb می‌باشد. همبستگی بالا بین یون‌های سدیم، کلرید، پتاسیم، منیزیم و کلسیم با آرسنیک و کادمیوم نشان می‌دهد آلودگی فلزات سنگین ایجاد شده زمین‌زاد بوده، و متأثر از فرآیند برهمکنش مواد آبخوان و آب است. در بکارگیری روش PCA نیز عامل اول تغییرات کیفی ۶۳/۱٪ بر مقدار یون‌های اصلی و فلزات سنگین تأثیرگذار است. این عامل را می‌توان همان تأثیر سازندهای آبخوان بر کیفیت آب زیرزمینی دانست.

مقادیر کربن آلی در نمونه‌های چشمه‌های گوگردی نشان می‌دهد عامل دوم مؤثر بر کیفیت آب این چشمه را می‌توان نفوذ شورابه‌های نفتی و مواد هیدروکربوری و در نتیجه فعالیت میکروارگانیسم‌های احیاء‌کننده سولفات دانست. این میکروارگانیسم‌ها با تغذیه از مواد هیدروکربوری با احیاء سولفات بر مقدار نهایی این یون تأثیر گذاشته، سبب آزادسازی هیدروژن سولفور و بالا رفتن مقدار نیترات در چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه می‌شوند. بنابراین چشمه‌های مورد بحث به لحاظ کیفی در درجه اول تحت تأثیر مواد آبخوان و بعدازآن نفوذ شورابه‌های نفتی قرار دارند.

- management, two southern African case studies. *Physics and Chemistry of the Earth* 29(15-18):1135-1143
- Malik SS, Rajagopal NR (1996) Groundwater development in the arsenic affected alluvial belt of west Bengal some questions. *Current Science* 70(11):956-958
- Marietou A (2016) Nitrate reduction in sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Letters* 363(15)
- Meng SX, Maynard JB (2001) Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: Water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo state, Brazil. *Journal of Hydrology* 250(1-4):78-97
- Miesch A (1976) Geochemical survey of Missouri-methods of sampling, laboratory analysis and statistical reduction of data. US Geology Survey Prof Pap 954-A
- Naseri H, Mohammadzadeh H, Salami H (2013) Investigation of sulfate source in some sulfur springs of Zagros folded using sulfur isotope (34S). In: Proc. Of First National Conference on the Use of Sustainable Isotopes, 8-9 May, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 168-175 (In Persian)
- Oinam JD, Ramanathan A, Singh G (2012) Geochemical and statistical evaluation of groundwater in Imphal and Thoubal district of Manipur, India. *Journal of Asian Earth Sciences* 48:136-149
- Richter BC, Kreitler CW (1993) Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization. CRC Press, 272p
- Umamageswari TSR, Sarala Thambavani D, Liviu M (2019) Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Batlagundu block, Dindigul district, Tamil Nadu: Conventional graphical and multivariate statistical approach. *Applied Water Science* 9:(14)
- Zarvash N, Vaezi A, Karimi H (2013) Evaluation of karst development potential in Kabir Kuh anticline of Ilam province using fuzzy integration and hierarchical analysis (AHP) method and remote sensing and GIS. *Quantitative Geomorphology Research* 3(3):144-157 (In Persian)
- area, southwestern Iran. *Environmental Geology* 58(4):727-737
- Chitsazan M, Mirzaei SY, Shacheri S, Aboudi ST (2017) Evaluation of water resource mixing of karst aquifers, a case study of Garu Karstic spring located in eastern Khuzestan. *Journal of Advanced Applied Geology* 7(24):65-75 (In Persian)
- Clark I D, Fritz P (1997) *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, 352p
- Ghadimi F, Mirzaei M, Ghomi M (2013) Multivariate statistical analyzing of chemical parameters of thermal and non-thermal springs of Mahalat area in Iran. *Geopersia Journal* 3(1):57-68
- Ghafuri M (2003) *Recognition of Iranian mineral water and springs (Second Edition)*. Tehran University Press and Publication Institute, 386p (In Persian)
- Güler C, Thyne GD, McCray JE, Turner KA (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10(4):455-474
- HajiAliBeigi H, Alavi SA, Eftekharnajad J, Mokhtari M, Adabi M (2009) The application of fractures in structural interpretation of an anticline, a Case Study Chenareh Anticline, SW Iran. *Earth Sciences* 19(74): 33-44 (In Persian)
- Kalantari N, Anbari A, Mohammadi H (2018) Hydrochemical investigation of surface and groundwater resources in the Bostan Plain using multivariate statistical techniques. *Iran-Water Resources Research* 14(2):236-248 (In Persian)
- Kalantari N, Mohammadi Behzad HR, Keshavarzi M (2011) Karst springs as the simplest tool for determination of hydrogeological characteristics of karst aquifers, Case study of Bibitalkhoun spring, Khuzestan province. *Advanced Applied Geology* 2(1):90-100 (In Persian)
- Karimi H, Moore F (2008) The source and heating mechanism for the Ahrum, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. *Geothermics* 37(1):84-100
- Kebede S, Travi Y, Alemayehu T, Ayenew T (2005) Groundwater recharge, circulation and geochemical evolution in the source region of the Blue Nile River, Ethiopia. *Applied Geochemistry* 20(9):1658-1676
- Love D, Hallbauer D, Amos A, Hranova R (2004) Factor analysis as a tool in groundwater quality