



## Comparison of physical, chemical and hydrogeological characteristics of karst springs in the western and eastern regions of Ilam province, Iran

Sadegh Alimoradi<sup>1</sup>, Hamid Reza Nassery<sup>2,\*</sup>, Farshad Alijani<sup>3</sup>, Haji Karimi<sup>4</sup>

1. Ph.D. student, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Assistant professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. Professor, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

### Article info

#### Article history

Received: 22 July 2020

Accepted: 11 May 2022

#### Keywords:

Hydrogeochemistry,  
Sulfur and Thermal Springs,  
Stable Isotopes,  
Sulfate Reduction,  
Ilam province



### Abstract

Karst springs in the western and eastern regions of Ilam province have different physical and chemical characteristics. The springs of the western regions, are sulfuric and thermal with high salinity, while the springs in the eastern regions are fresh and cold. Geological, hydrogeological, hydrogeochemical and isotopic studies were performed to compare and determine the factors affecting the physical and chemical properties of these springs. Monitoring of the springs, including measurement of discharge, temperature, acidity, amount of hydrogen sulfide gas, dissolved oxygen in the field, and analysis of major ion chemistry, was conducted monthly for two years. Deuterium and oxygen-18 stable isotopes were measured during two dry and two wet periods to determine the source of the water. Field studies have shown that the geology of the eastern and western regions of Ilam Province is different. Deep faults have affected the western regions, and some calcareous formations have changed facies so that they have anhydrite members. The deep faults of the western regions of Ilam Province have caused the hydraulic connection of karst formations with the old and lower evaporite formations. The ratios of Na/Cl, SO<sub>4</sub>/Cl and TDS/Br showed that the salinity of the sulfur springs originates from the dissolution of evaporite formations and is not related to the oil field brines. The results of stable isotope analysis of deuterium (<sup>2</sup>H) and oxygen-18 (<sup>18</sup>O) in thermal and sulfur springs showed that the origin of these springs is the local meteoric precipitation. The origin of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) of sulfur and thermal springs was attributed to the activity of sulfate-reducing bacterias. According to the hydrograph of the springs, rainfall affects the discharge increase of fresh and cold springs less than one month; while, the discharge of sulfur and thermal springs increases about two months after rainfalls. In other words, the infiltrating waters that recharge the sulfur springs have a deep circulation. Therefore, the high temperature of the springs in the western regions of Ilam Province is attributed to the deep circulation of infiltrating waters from local precipitation along the faults.

\*Corresponding author: Hamid Reza Nassery; E-mail: h-nassery@sbu.ac.ir

**How to cite this article:** Alimoradi, S., Nassery, H. R., Alijani, F., Karimi, H., 2022. Comparison of physical, chemical and hydrogeological characteristics of karst springs in the western and eastern regions of Ilam province, Iran. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(1), 1-27



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Karst springs in the western and eastern regions of Ilam Province have different physical and chemical characteristics. The springs in the western regions are sulfuric and thermal with high salinity, while the springs in the eastern regions are fresh and cold. So far, no studies have been conducted on the mechanisms affecting the quantity and quality of sulfuric and thermal springs in Ilam Province. The aim of this study is to determine the origin of sulfuric and thermal springs in Ilam Province using hydrogeochemical and isotopic methods and to investigate the differences between the physicochemical properties of these springs and freshwater springs in the eastern regions of the province.

### Material and methods

In this study, the physicochemical characteristics of thermal and sulfur springs and some freshwater springs were monitored monthly for two years (October 2017 to September 2019). The monitoring of springs included the measurement of discharge, temperature, acidity, amount of hydrogen sulfide gas, and dissolved oxygen in the field, and the measurement of concentrations of major ions and trace elements. Stable isotopes of deuterium, oxygen 18, and sulfur 34 were measured in two periods (dry and wet). Field studies for geological studies including lithology, stratigraphy and structure of the area were conducted. After collecting data, Arc Map, Global Mapper, AquaChem, Visio and Excel software were used to prepare maps, composite diagrams and block diagrams to determine the origin of salinity, temperature and hydrogen sulfide of thermal and sulfur springs. The reservoir temperature of thermal springs was estimated using the geothermometric method. The hydrographs of

sulfur springs were drawn from the discharge measurements and compared with the hydrographs of freshwater springs. The hydrogeological behavior of the springs was analyzed. Finally, the conceptual models of springs in Ilam province are presented.

### Results and discussion

Field studies showed that the geology of the eastern and western regions of Ilam Province is somewhat different. So that some limestone formations such as Asmari Formation have changed facies and contain anhydrite members. Furthermore, there are few faults in the east of Ilam Province, but in the west of this province, several main faults exist. The western faults of Ilam Province have caused hydraulic connections between Ilam and Sarvak limestone formations and deep seated evaporite formations. The average values of discharge, temperature, and EC of the sulfur springs are 10 to 1500 l/s, 23 to 41°C, and 1100 to 75000  $\mu\text{mohs/cm}$ , respectively. The ratios and diagrams of Na/Cl,  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ,  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{SO}_4$ ,  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{SO}_4$  to Na/Cl, and TDS/Br showed that the salinity of the sulfur springs originated from the dissolution of evaporite formations and was not related to the oilfield brines. The maximum temperature of the thermal and sulfur spring reservoirs was estimated to be 77.8 °C using silica geothermometer. This temperature is related to the depth of 1.87 km. Comparison of deuterium ( $^2\text{H}$ ) and oxygen 18 ( $^{18}\text{O}$ ) stable isotopes in sulfur and thermal springs with rainwater samples showed that the amount of these isotopes in the springs is less depleted. The depletion of these isotopes in sulfur springs indicates that the recharge area of these springs is situated in high elevations. The origin of hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) of sulfur springs was attributed to the activity of sulfate-reducing bacteria. Sulfur 34

(<sup>34</sup>S) isotope showed that the origin of sulfate ion in sulfur springs is evaporite formations. According to the hydrograph of the springs, precipitation caused the increase of the discharge of fresh and cold springs in less than one month, while the discharge of sulfur and thermal springs increases with about two months delay.

### **Conclusion**

Infiltration of water into formations containing shale layers in Ilam Province causes the consumption of dissolved oxygen and creates suitable conditions for the activity of sulfate-reducing bacteria (SRB). Therefore, these bacteria reduce sulfate to sulfide and produce hydrogen sulfide. Shale layers have very low permeability, so water in these layers usually infiltrates along faults and fractures. Due to the fact that there are more faults and fractures in the western regions of Ilam Province, sulfur springs have been formed in these areas. In addition, some deep faults in the western regions have caused hydraulic connection between karstic formations and old and lower evaporitic formations, therefore, the dissolution of evaporites has increased the salinity of infiltrating waters in these areas. The infiltrating waters that recharge the sulfur springs often have a deeper circulation than the freshwater springs. Therefore, the high temperature of the springs in the western regions of Ilam Province could be attributed to the deep circulation of infiltrating waters from local precipitation along the faults.



## مقایسه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدروژئولوژیک چشمه‌های کارستی مناطق غربی و شرقی استان ایلام، ایران

صادق علیمرادی<sup>۱</sup>، حمیدرضا ناصری<sup>۲\*</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۳</sup>، حاجی کریمی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

| اطلاعات مقاله   | چکیده   |
|---|---|
| <p><b>تاریخچه مقاله</b><br/>دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱<br/>پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱</p> <p><b>واژه‌های کلیدی</b><br/>چشمه کارستی،<br/>چشمه گوگردی و گرم،<br/>هیدروژئوشیمی،<br/>استان ایلام،</p>  | <p>چشمه‌های کارستی در مناطق غربی و شرقی استان ایلام ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. این چشمه‌ها در مناطق غربی دارای آب گوگردی، گرم و اغلب با شوری بالا هستند، در صورتی که در مناطق شرقی شیرین و سرد می‌باشند. به منظور مقایسه و تعیین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این چشمه‌ها بررسی‌های زمین-شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی انجام گرفت. پایش چشمه‌ها به مدت دو سال به طور ماهانه شامل اندازه‌گیری دبی، دما، اسیدیته، میزان گاز سولفید هیدروژن و اکسیژن محلول در محل و سنجش غلظت یون‌های اصلی انجام شد. سنجش ایزوتوپ‌های پایدار دوتریوم (<math>^2\text{H}</math>) و اکسیژن ۱۸ (<math>^{18}\text{O}</math>) نیز در دو دوره خشک و مرطوب به منظور تعیین منشأ آب چشمه‌ها انجام شد. بررسی‌های صحرایی نشان داد که زمین‌شناسی مناطق شرقی و غربی استان ایلام متفاوت است. در مناطق غربی گسل‌های عمیق اثر کرده‌اند و برخی سازندهای آهکی تغییر رخساره داده‌اند و حاوی بخش انیدریتی می‌باشند. در مناطق غربی گسل‌های عمیق باعث ارتباط هیدرولیکی سازندهای آهکی کارستی با سازندهای تبخیری قدیمی و زیرین شده‌اند. نسبت‌های <math>\text{Na/Cl}</math>، <math>\text{SO}_4/\text{Cl}</math> و <math>\text{TDS/Br}</math> نشان داد که منشأ شوری آب چشمه‌های گوگردی و گرم، انحلال سازندهای تبخیری است و با شورابه‌های نفتی منطقه ارتباطی ندارد. ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم و اکسیژن ۱۸ چشمه‌های گرم و گوگردی منشأ این چشمه‌ها را ریزش‌های جوی منطقه نشان می‌دهد. منشأ گاز سولفید هیدروژن (<math>\text{H}_2\text{S}</math>) این چشمه‌ها، فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات تشخیص داده شد. طبق هیدروگراف چشمه‌ها، بارش باران در فاصله زمانی کمتر از یک ماه بر افزایش آبدی چشمه‌های آب شیرین و سرد اثرگذار است، در صورتی که در چشمه‌های گوگردی و گرم حدود دو ماه پس از بارش افزایش آبدی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر آب‌های نفوذی تغذیه کننده چشمه‌های گوگردی چرخش عمیق دارند. بنابراین دمای بالای آب چشمه‌های مناطق غربی به دلیل چرخش عمیق آب‌های نفوذی حاصل از ریزش‌های جوی در امتداد گسل‌ها می‌باشد.</p> |

### مقدمه

(2007). حدود ۱۱ درصد مساحت ایران توسط سازندهای کربناته پوشیده شده است (ناصری، ۱۳۷۰). منابع آب کارست که معمولاً به صورت چشمه‌های کارستی در سطح زمین ظاهر می‌شوند، اغلب به دلیل پایین بودن مواد جامد

منابع آب کارست بخش مهمی از منابع آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. حدود ۲۵-۲۰ درصد جمعیت دنیا به منابع آب کارستی وابسته است (Ford and Williams,

\*نویسنده مسئول: حمیدرضا ناصری [h-nassery@sbu.ac.ir](mailto:h-nassery@sbu.ac.ir)

استناد به این مقاله: علیمرادی، ص.، ناصری، ح.، ر.، علیجانی، ف.، کریمی، ح. (۱۴۰۱) مقایسه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدروژئولوژیک چشمه‌های کارستی مناطق غربی و شرقی استان ایلام، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۲۷



(Richter and Kreitler, 1993) و یا نسبت TDS/Br (Rittenhouse, 1967) استفاده کرده‌اند.

تاکنون مطالعات چندانی در خصوص مقایسه و علت تفاوت چشمه‌ها در یک ناحیه صورت نگرفته است. مطالعات انجام شده در خصوص چشمه‌های کارستی، گوگردی و آبگرم که اغلب به منظور تعیین منشأ به روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی است، عمدتاً جنبه مقایسه‌ای نداشته‌اند. تفاوت آشکار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی مناطق غربی و شرقی استان ایلام منحصر به فرد است. با توجه به اینکه تاکنون در خصوص دلایل تفاوت ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی چشمه‌های کارستی استان ایلام مطالعاتی انجام نشده، لذا در این پژوهش تلفیق مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپ‌های پایدار جهت بررسی سازوکارهای تشکیل چشمه‌های آب شیرین و سرد در مناطق شرقی و چشمه‌های گوگردی و آبگرم در مناطق غربی به کار گرفته شده و مدل مفهومی تشکیل چشمه‌ها ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان ایلام با مساحت حدود ۲۰ هزار کیلومتر مربع بین طول جغرافیایی ۳۵° ۴۵' تا ۴۸° ۰۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° ۰۴' تا ۳۴° ۰۵' شمالی در غرب کشور ایران واقع شده است. علیرغم وسعت نسبتاً کم استان به دلیل اختلاف ارتفاع، میزان بارش و درجه حرارت سالانه در مناطق مختلف استان بسیار متفاوت می‌باشد. میزان متوسط بارش سالانه بیش از ۸۰۰ میلی‌متر در مناطق شمال شرقی و شمالی تا کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در مناطق

محلول، کیفیت مناسب دارند و دمای آن‌ها تقریباً برابر دمای متوسط محل تغذیه می‌باشد. به دلیل پیچیدگی محیط‌های کارستی اغلب مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های کارستی با بررسی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های کارستی انجام می‌شود. ارتباط آبخوان‌های کارستی با شورابه‌های نفتی و شورابه‌های حاصل از انحلال تبخیری‌ها باعث بالا رفتن مواد جامد محلول و فرآیندهای احیاء ترموشیمیایی و باکتریایی سولفات باعث سولفیدی شدن آبخوان‌های کارستی و در نتیجه ظهور چشمه‌های گوگردی می‌شوند. مهم‌ترین مشخصه چشمه‌های گوگردی بوی تخم‌مرغ گندیده ناشی از خروج گاز سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) است. وجود گاز سولفید هیدروژن عامل محدود کننده استفاده آب چشمه‌های گوگردی برای انسان و آبیان می‌باشد. گردش عمیق آب، فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی، واپاشی رادیواکتیو و فعالیت‌های تکتونیکی باعث بالا رفتن دمای آب در آبخوان‌های کارستی و ظهور چشمه‌های آبگرم می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تعیین منشأ، ارتفاع منطقه تغذیه، عمق و دمای مخزن چشمه‌های گوگردی و گرم در جهان و ایران انجام شده است (Mahammadi et al., Tian et al., 2018; 2010; Karimi and Moore, 2008; Mohammadzadeh and Kazemi, 2015; Karimi et al., 2017; Mahammadi et al., 2019; Zega et al., 2015; Avsar et al., 2016; Pasvanoğlu and Çelik, 2018). اغلب مطالعات انجام شده در خصوص منشأ شوری چشمه‌های گوگردی و گرم از نسبت‌هایی نظیر  $Mg/Cl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $Na/Cl$ ,  $(Ca+Mg)/(Na+K)$ ,  $K/Na$ ,  $SO_4/Cl$ ,  $K/Cl$  و  $(Ca+Mg)/SO_4$  و  $SO_4/TDS$

ظهور چشمه‌ها شامل نوع سازندها، سنگ‌شناسی آن‌ها و گسل‌های موجود بررسی شد. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و نمونه‌برداری از آب چشمه‌ها به منظور سنجش شیمیایی و ایزوتوپی انجام گرفت و نتایج تجزیه و تحلیل شد. از نسبت‌های  $SO_4/Cl$ ،  $Na/Cl$  و TDS/Br جهت تشخیص منشأ شوری آب چشمه‌های گوگردی و آبگرم استفاده شد.

جهت تخمین دمای مخزن چشمه‌های گوگردی و آبگرم چنگوله از روش ژئوترموتری استفاده شد. ژئوترموتری بر اساس حلالیت‌پذیری کانی‌هایی مانند کانی‌های سیلیسی که توسط دما کنترل می‌شود و همچنین واکنش‌های تبدالی کاتیون در کانی‌های معین که توسط دما و شرایط احیایی کنترل شده، پایه گذاری شده است (Chandrasekharam and Bundschuh, 2008). ژئوترموتری‌های کاتیونی بر اساس واکنش‌های تبادل کاتیونی با استفاده از ثابت‌های تعادلی وابسته به دما توسعه پیدا کرده‌اند. مهم‌ترین این واکنش‌ها تبادل کاتیون بین فلدسپات‌های سدیم و پتاسیم دار می‌باشند. با توجه به نبود کانی‌های فلدسپاتی در منطقه مورد مطالعه، ژئوترموتری کاتیونی برای منطقه مورد مطالعه صادق نیست، لذا ژئوترموتری چشمه‌های گوگردی و آبگرم استان ایلام بر اساس سیلیس انجام شده است.

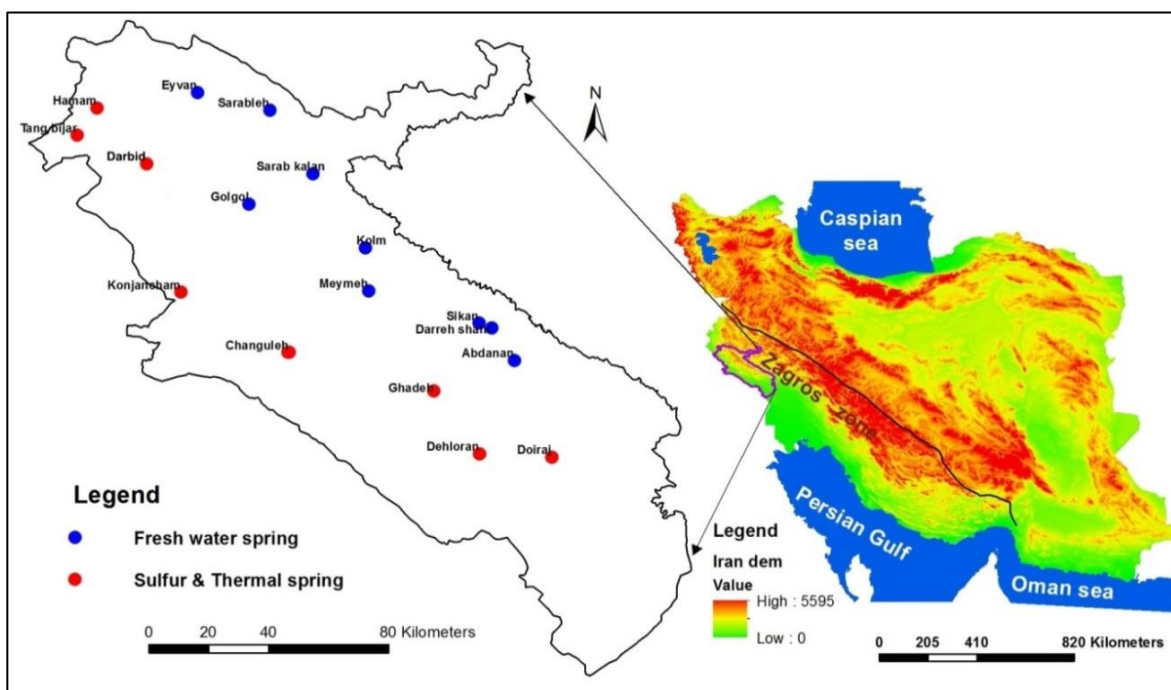
به منظور شناسایی منشأ آب چشمه‌ها ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی نسبت به خط ریزش‌های جوی محلی (LMWL) مقایسه شد. در نهایت با جمع‌بندی یافته‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی مدل تفهیمی ساز و کار تشکیل چشمه‌های استان ایلام ارائه شد.

جنوب غربی متغیر است. دمای متوسط سالانه نیز بیش از  $25^{\circ}C$  در مناطق جنوب غربی تا کمتر از  $10^{\circ}C$  در ارتفاعات شمال شرقی و شمالی متغیر است.

عمده سازندهای آهکی در این استان کارستی شده‌اند و چندین چشمه بزرگ از آبخوان‌های کارستی تخلیه می‌شود (شکل ۱). چشمه‌های کارستی دبی پایه رودخانه‌های استان ایلام را تشکیل می‌دهند. میانگین آبدهی برخی از این چشمه‌ها بیش از ۲۰۰۰ لیتر بر ثانیه است. چشمه‌های کارستی موجود در مناطق شرقی و غربی استان ایلام از نظر فیزیکی و شیمیایی با هم کاملاً متفاوت می‌باشند. در مناطق شرقی آب چشمه‌ها شیرین و سرد است در صورتی که در مناطق غربی گوگردی، گرم و با شوری بالا می‌باشند. مهم‌ترین چشمه‌های کارستی آب شیرین استان ایلام شامل؛ سیکان، دره‌شهر، کلم، آبدانان، میمه، گل‌گل، سرابکلان، سرابله و ایوان می‌باشند. کیفیت آب این چشمه‌ها جهت مصرف‌های مختلف شرب، صنعت و کشاورزی مناسب است به طوری که بخش عمده‌ای از نیاز آب شرب، صنعت و کشاورزی استان ایلام از چشمه‌های کارستی آب شیرین تأمین می‌شود. چشمه‌های گوگردی و آبگرم مناطق غربی استان شامل؛ دهلران، چنگوله، حمام، تنگ بیجار، کنجانچم، قدح و دوبرج است و به دلیل بوی نامطلوب گاز سولفید هیدروژن و شوری زیاد در مصرف شرب، صنعت و کشاورزی تقریباً بلا استفاده می‌باشند.

به منظور تعیین منشأ و سازوکارهای تشکیل دهنده چشمه‌های استان ایلام ابتدا با استفاده از نرم افزار Arc GIS موقعیت چشمه‌ها در نقشه زمین‌شناسی مشخص شد. سپس جهت بررسی تکمیلی طی مطالعات صحرایی، وضعیت زمین‌شناسی استان ایلام به خصوص در محل





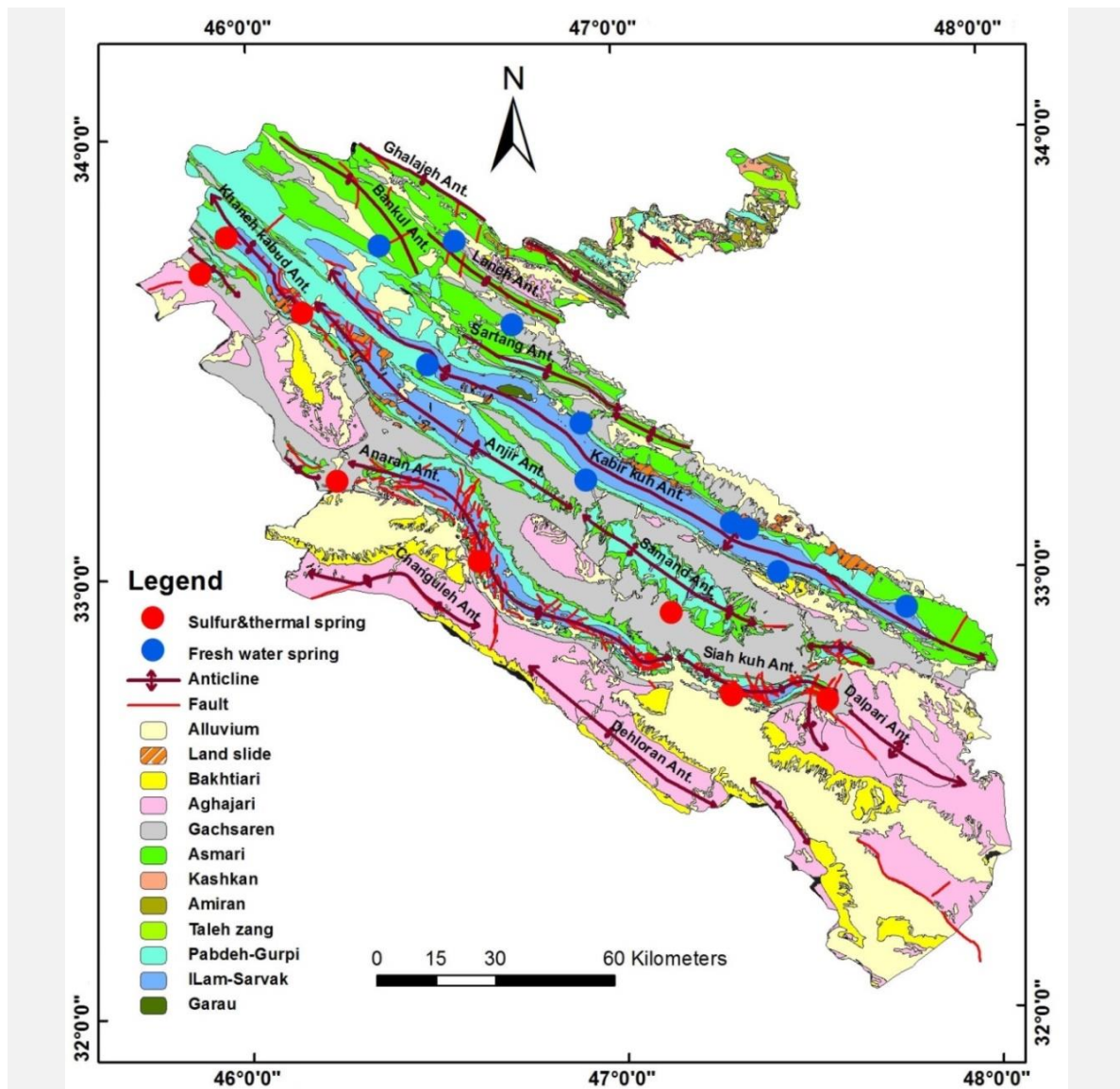
شکل ۱. موقعیت چشمه‌های گوگردی و آب شیرین استان ایلام

Fig. 1. Location of sulfur and fresh water springs in Iran and Ilam Province.

برخی از تاقدیس‌های مناطق غربی نظیر سیاهکوه و اناران توسط گسل‌هایی که اغلب عمود بر امتداد محور این تاقدیس‌ها می‌باشند، قطع شده و باعث جابجایی امتداد محور آن‌ها شده‌اند. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، سازندهایی که در استان ایلام رخنمون دارند به ترتیب سن شامل؛ گرو، سروک، سورگاه، ایلام، گورپی، پابده، امیران، تله‌زنگ، کشکان، آسماری، گچساران، آغاچاری و بختیاری می‌باشند (شکل ۲).

### وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

استان ایلام در تقسیمات واحدهای زمین‌شناسی ساختمانی ایران در زاگرس چین خورده واقع شده است. این واحد ساختاری شامل مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های تقریباً موازی با راستای شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد. مهم‌ترین تاقدیس‌های استان ایلام شامل؛ کبیرکوه، قلاجیه، بانکول، سرتنگ، سمند، انجیر، خانه‌کبود، دالپری، سیاهکوه، اناران، دهلران و چنگوله می‌باشند. برخلاف مناطق شرقی استان ایلام، در مناطق غربی تعداد گسل‌ها و شکستگی‌ها بسیار زیاد است. محور



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و تکتونیک استان ایلام اقتباس از نقشه‌های زمین‌شناسی دهلران (Llewellyn, 1973) و ایلام-کوهدهشت (Llewellyn, 1974)

Fig. 2. Geological and tectonic map of Ilam province adapted from geological maps of Dehloran (Llewellyn, 1973) and Ilam-Kuhdasht (Llewellyn, 1974).

گوتنیا از نظر توالی چینه‌شناسی در زیر سازند گرو واقع شده و تاکنون رخنمون این سازند در استان ایلام گزارش نشده است. به نظر می‌رسد عملکرد گسل‌های موجود در تاقدیس سیاهکوه باعث رخنمون این لایه‌ها شده است

در بررسی‌های صحرایی لایه‌های ضخیم انیدریتی در هسته تاقدیس سیاهکوه مشاهده شد (شکل ۳). این لایه‌ها احتمالاً سازند تبخیری گوتنیا و یا تغییر رخساره لایه‌های زیرین سازند سروک می‌باشند. سازند تبخیری



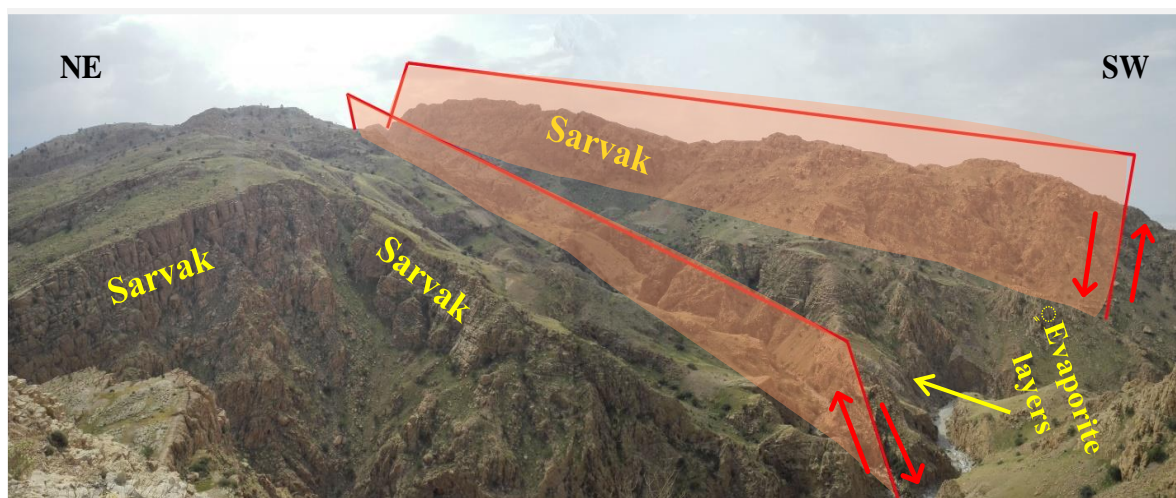
توجه به اینکه هیچ‌گونه آثار تبخیری در سازند گرو حتی در حفاری‌های نفتی گزارش نشده، لذا احتمالاً گسل‌ها باعث پراکندگی قطعات انیدریت و ژپس سازند انیدریتی گوتنیا در سازند شیلی گرو شده است.

(شکل ۴). همچنین در مجاورت گسل‌های تاقدیس اناران در زیر سازند سروک قطعات ریز و درشت از انیدریت و ژپس به طور پراکنده در داخل لایه‌های شیلی مشاهده شد (شکل ۵). لایه‌های شیلی در زیر سازند سروک از لحاظ توالی چینه‌شناسی بایستی سازند گرو باشند و با



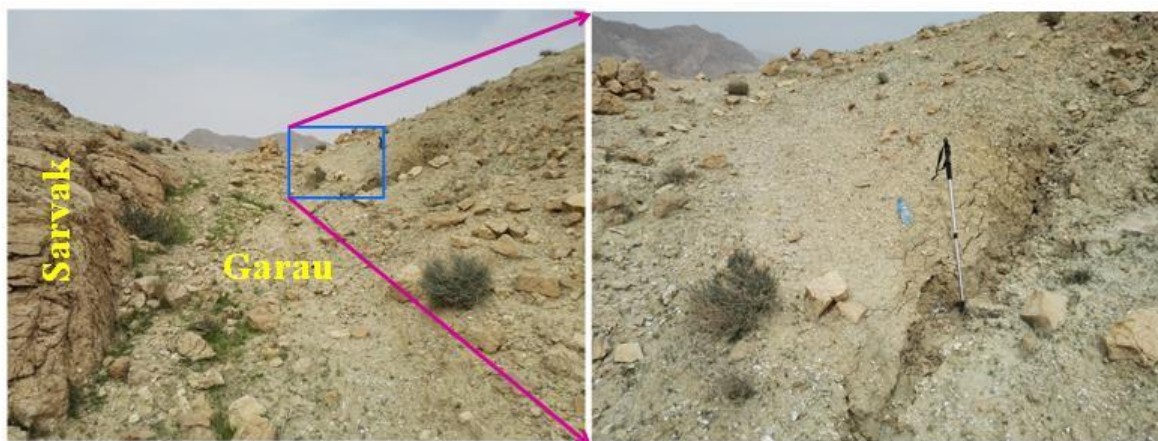
شکل ۳. تصویری از تبخیری‌های مناطق مرکزی تاقدیس سیاهکوه

Fig. 3. Image of evaporites in the central areas of Siahkuh anticline



شکل ۴. تصویری از عملکرد گسل‌ها در مناطق مرکزی تاقدیس سیاهکوه (تکرار سازند سروک و رخنمون لایه‌های تبخیری)

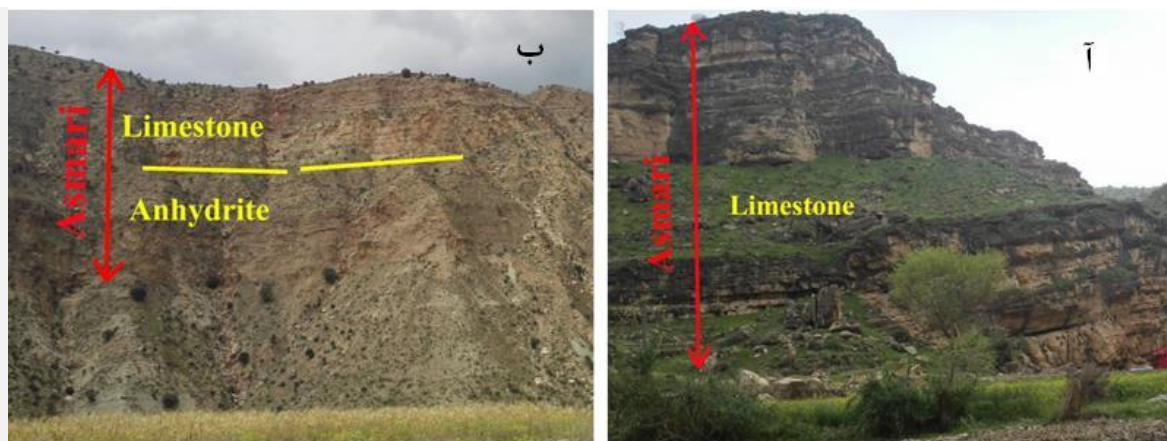
Fig. 4. Image of the faults performance in the central areas of Siahkuh anticline (repetition of Sarvak formation and outcrop of evaporative layers)



شکل ۵. تصویری از قطعات پراکنده انیدریت و ژپس در شیل‌های سازند گرو در زیر سازند سروک (تاق‌دیس اناران)  
 Fig. 5. Image of scattered anhydrite and gypsum fragments in shales of the Garu Formation below the Sarvak Formation (Anaran anticline)

فقط در مناطق غربی استان ایلام وجود دارد. به عبارت دیگر مناطق شرقی استان سازند آسماری صرفاً آهکی است و فاقد بخش تبخیری می‌باشد (شکل ۶). در حفاری‌های نفتی لایه‌های نفتی به ضخامت حدود ۱۲۰ متر در بخش تبخیری کلهر گزارش شده است (مطیعی، ۱۳۷۲).

سنگ‌شناسی سازندهای استان ایلام عمدتاً شیلی (سازندهای گرو، سورگاه، گورپی، امیران و پابده)، آهکی (سازندهای سروک، ایلام و آسماری)، تبخیری (سازندهای گوتنیا، گچساران و بخش کلهر سازند آسماری) و آواری (سازندهای کشکان، آغاچاری و بختیاری) می‌باشد. بخش تبخیری کلهر سازند آسماری



شکل ۶. سازند آسماری در مناطق شرقی (آ) و غربی (ب) استان ایلام  
 Fig. 6. Asmari formation in the eastern (a) and western (b) areas of Ilam Province

خانه‌کبود را تشکیل می‌دهد و به دلیل مقاومت نسبتاً زیاد، معمولاً برجسته می‌باشند و ارتفاعات این تاق‌دیس‌ها

سازندهای آهکی کارستی سروک و ایلام بخش‌های مرکزی تاق‌دیس‌های کبیرکوه، سیاهکوه، اناران و

بالای آن‌ها می‌باشد. چشمه‌های دهلران، چنگوله و حمام از سازندهای ایلام و سروک و چشمه‌های تنگ بیجار، کنجانچم، قدح و دویرج از سازند آسماری سرچشمه می‌گیرند.

### نمونه‌برداری و سنجش نمونه‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تعداد هفت دهانه از چشمه‌های آب شیرین و هفت دهانه از چشمه‌های گوگردی و گرم به مدت یک سال (مهر سال ۹۶ تا شهریور سال ۹۷) به طور ماهانه پایش شد. پایش چشمه‌ها شامل اندازه‌گیری دبی، دما، اسیدیته، میزان گاز سولفید هیدروژن و اکسیژن محلول در محل با دستگاه‌های قابل حمل و نمونه‌برداری جهت سنجش شیمیایی در آزمایشگاه بوده است. میزان گاز سولفید هیدروژن با استفاده از تیتراسیون ید (Giggenbach et al., 1988) اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری جهت تعیین میزان کاتیون و آنیون‌های اصلی به طور ماهانه و جهت تعیین میزان ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم ( $^2\text{H}$ ) و اکسیژن  $^{18}\text{O}$  به صورت دوره‌ای (فصل خشک و فصل تر) انجام گرفت. همچنین نمونه‌برداری تکمیلی جهت سنجش آنیون برم انجام گرفت. با توجه به مشخص بودن منشأ چشمه‌های آب شیرین، سنجش ایزوتوپی صرفاً برای چشمه‌های گوگردی و گرم انجام شد. نمونه‌ها در ظروف پلی اتیلن ۳۵۰ میلی لیتری که قبلاً با آب نمونه سه بار شستشو داده شده بود، جمع‌آوری شد. آنیون‌ها توسط واحد آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام سنجش شد. نمونه‌ها جهت سنجش کاتیون‌ها با استفاده از فیلتر سلولزی ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شد. نمونه‌های فیلتر شده توسط اسید نیتریک غلیظ تا pH کمتر از ۲

را تشکیل می‌دهند. سازند سروک با سازند آهکی ایلام اغلب یک واحد هیدروژئولوژیک نفوذپذیر را تشکیل داده که توسط واحدهای شیلی نفوذناپذیر گرو در زیر و گورپی در بالا محدود می‌شود. سازند آهکی کارستی آسماری نیز یک واحد هیدروژئولوژیک نفوذپذیر را تشکیل داده که بین سازندهای مارنی-شیلی پابده در زیر و تبخیری-مارنی گچساران در بالا محدود می‌شود. چشمه‌های پرآب کارستی در سراسر استان ایلام از واحدهای هیدروژئولوژیک نفوذپذیر ایلام-سروک و آسماری سرچشمه می‌گیرند. چشمه‌های مناطق شرقی که دارای آب شیرین می‌باشند، در تقسیم‌بندی چشمه‌ها از نظر زمین‌شناسی و تکتونیک (Bogli, 1980) از نوع سرریزی و چشمه‌های مناطق غربی که گوگردی و گرم هستند، گسلی می‌باشند.

مهم‌ترین چشمه‌های کارستی آب شیرین استان ایلام شامل؛ سیکان، دره‌شهر، کلم، آبدانان، میمه، گل‌گل، سراپکلان، سرابله و ایوان می‌باشند. این چشمه‌ها فقط از نظر میزان آبدهی با هم تفاوت دارند، به عبارت دیگر کیفیت آب این چشمه‌ها تقریباً مشابه می‌باشد. چشمه‌های سیکان، دره‌شهر، کلم، آبدانان، میمه و گل‌گل از سازند سروک سرچشمه گرفته و در یال‌های جنوبی و شمالی تاقدیس کبیرکوه ظاهر شده‌اند. چشمه‌های سراپکلان، سرابله و ایوان از سازند آسماری سرچشمه می‌گیرند.

چشمه‌های گوگردی و گرم مناطق غربی استان شامل؛ دهلران، چنگوله، حمام، تنگ بیجار، کنجانچم، قدح و دویرج می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی چشمه‌های گوگردی استان ایلام بوی تخم‌مرغ گندیده ناشی از خروج گاز سولفید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{S}$ )، شوری زیاد و دمای



گوگردی با هم بسیار اختلاف دارد و بین ۱۱۸۰ (چشمه گوگردی حمام) تا ۷۵۰۰۰ (چشمه گوگردی تنگ بیجار) میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. حداقل میزان گاز سولفید هیدروژن در چشمه قحح به میزان ۸/۵ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر در چشمه دویرج به میزان ۲۲۰ میلی‌گرم در لیتر است. کم‌آب‌ترین این چشمه‌ها، چشمه حمام با آبدهی متوسط حدود ۱۲ لیتر بر ثانیه و پرآب‌ترین آن‌ها چشمه‌های چنگوله با مجموع آبدهی بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشند.

دمای آب چشمه‌ها نیز متفاوت است به طوری که حداقل دما مربوط به چشمه قحح ( $23/9^{\circ}\text{C}$ ) و حداکثر مربوط به چشمه‌های حمام و دهلران ( $41/1^{\circ}\text{C}$ ) است. مقایسه غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها با دمای چشمه‌ها نشان می‌دهد که ارتباطی بین غلظت مواد محلول و دما وجود ندارد. به طوری که چشمه گوگردی حمام با دمای  $41/1^{\circ}\text{C}$  کمترین غلظت املاح در بین چشمه‌های گوگردی دارد، در صورتی که چشمه گوگردی قحح با دمای  $23/9^{\circ}\text{C}$  میزان املاح زیادی دارد.

حداکثر اختلاف دمای آب چشمه‌های گوگردی با میانگین دمای محیط در چشمه حمام و به میزان  $19/2^{\circ}\text{C}$  محاسبه شده است. دمای چشمه‌های گوگردی قحح و کنجانچم به ترتیب ۱/۱ و ۲/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به متوسط دمای سالانه محیط بالاتر است، لذا این چشمه‌های گوگردی، چشمه آبگرم نمی‌باشند. سایر چشمه‌های گوگردی مورد مطالعه، آبگرم نیز می‌باشند.

حداقل میزان ایزوتوپ  $\delta^{18}\text{O}$  در چشمه گوگردی حمام  $6/0\%$  - و حداکثر این ایزوتوپ در چشمه گوگردی دویرج به میزان  $3/75\%$  - اندازه‌گیری شده است. حداقل میزان ایزوتوپ  $\delta^2\text{H}$  نیز در چشمه گوگردی

اسیدی شد. سنجش نمونه‌ها جهت تعیین میزان کاتیون‌ها توسط آزمایشگاه شرکت زرآما به روش ICP-MS و یون برم به روش کروماتوگرافی یونی انجام گرفت. سنجش نمونه‌ها جهت تعیین میزان ایزوتوپ‌های پایدار توسط آزمایشگاه دانشگاه واترلو (Waterloo) کشور کانادا انجام شد.

## نتایج و بحث

### مشخصات فیزیکی و شیمیایی

نتیجه اندازه‌گیری و سنجش شیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های آب شیرین و گوگردی آبگرم استان ایلام در جدول‌های ۱ و ۲ و نتیجه سنجش ایزوتوپی چشمه‌های گوگردی آبگرم در جدول ۳ آورده شده است. همچنین متوسط دمای ماهانه محیط در محل چشمه‌های گوگردی و آبگرم با توجه به داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک یا تبخیرسنجی مجاور آن‌ها محاسبه و در جدول ۳ آورده شد. جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند که چشمه‌های آب شیرین و گوگردی آبگرم استان ایلام دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت می‌باشند. چشمه‌های آب شیرین فقط از نظر میزان آبدهی با هم تفاوت دارند. هدایت الکتریکی آن‌ها بین ۳۷۰ تا ۶۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. میزان اکسیژن محلول این چشمه‌ها بیش از هشت میلی‌گرم در لیتر است و فاقد گاز سولفید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{S}$ ) می‌باشند. چشمه‌های گوگردی از نظر مشخصاتی نظیر میزان دبی، دما و میزان املاح بسیار با هم متفاوت می‌باشند و وجه تشابه آن‌ها بوی تخم‌مرغ گندیده ناشی از وجود گاز سولفید هیدروژن و فقدان اکسیژن محلول در آب این چشمه‌ها است. میزان هدایت الکتریکی چشمه‌های

حمام % ۲۷/۷۹ - و حداقل در چشمه گوگردى دوبرج  
به میزان % ۱۴/۰۰ - اندازه‌گیری شده است (جدول ۴).

جدول ۱. مشخصات و نتایج سنجش شیمیایی چشمه‌های آب شیرین (سال آبی ۹۷-۹۶)

Table 1. Results of measurements and chemical analyses of fresh water springs.

| نام چشمه | پارامتر<br>آمارى | Q<br>(lit/s) | T<br>(°C) | EC<br>(µs/cm) | pH   | meq/l                         |                              |                 |                  |                  |                 |                |
|----------|------------------|--------------|-----------|---------------|------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
|          |                  |              |           |               |      | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> |
| آبدانان  | میانگین          | ۵۳۴          | ۱۸/۶      | ۴۲۴           | ۷/۵۲ | ۳/۵۵                          | ۰/۹۴                         | ۰/۵۰            | ۳/۶۲             | ۱/۰۲             | ۰/۵۴            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۷۴۵          | ۱۹/۰      | ۴۴۵           | ۷/۷۰ | ۴/۵۰                          | ۱/۶۰                         | ۰/۷۰            | ۴/۶۰             | ۱/۶۰             | ۰/۷۵            | ۰/۰۱           |
|          | حداقل            | ۳۶۴          | ۱۸/۲      | ۴۰۱           | ۷/۴۱ | ۳/۱۰                          | ۰/۵۰                         | ۰/۴۰            | ۳/۰۰             | ۰/۵۰             | ۰/۲۴            | ۰/۰۱           |
| سیکان    | میانگین          | ۱۳۸۸         | ۱۷/۹      | ۳۹۹           | ۷/۵۶ | ۳/۱۸                          | ۰/۵۲                         | ۰/۴۱            | ۳/۹۳             | ۰/۷۳             | ۰/۵۶            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۲۹۹۰         | ۱۹/۰      | ۴۴۸           | ۷/۹۸ | ۳/۵۰                          | ۱/۰۰                         | ۰/۶۰            | ۳/۲۰             | ۱/۳۰             | ۰/۹۹            | ۰/۰۱           |
|          | حداقل            | ۴۱۷          | ۱۷/۳      | ۳۷۳           | ۷/۰۹ | ۲/۶۰                          | ۰/۳۰                         | ۰/۲۰            | ۲/۴۰             | ۰/۴۵             | ۰/۳۴            | ۰/۰۱           |
| کلم      | میانگین          | ۷۵۵          | ۱۴/۸      | ۴۴۳           | ۷/۶۱ | ۳/۱۰                          | ۰/۸۲                         | ۰/۴۶            | ۳/۱۰             | ۰/۷۷             | ۰/۵۶            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۱۴۵۵         | ۱۵/۱      | ۵۸۱           | ۷/۹۸ | ۳/۹۰                          | ۲/۴۵                         | ۰/۹۰            | ۳/۸۰             | ۱/۴۰             | ۰/۷۶            | ۰/۰۵           |
|          | حداقل            | ۲۹۵          | ۱۴/۶      | ۳۷۷           | ۷/۰۲ | ۱/۹۰                          | ۰/۴۵                         | ۰/۳۰            | ۲/۷۰             | ۰/۳۰             | ۰/۳۹            | ۰/۰۱           |
| میمه     | میانگین          | ۱۴۳          | ۱۶/۰      | ۴۴۷           | ۷/۸۰ | ۳/۵۳                          | ۰/۸۴                         | ۰/۴۳            | ۳/۲۴             | ۱/۰۵             | ۰/۶۵            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۱۸۳          | ۱۷/۰      | ۶۲۵           | ۷/۹۸ | ۴/۴۰                          | ۳/۳۰                         | ۱/۱۰            | ۴/۲۰             | ۲/۵۰             | ۱/۲۹            | ۰/۰۱           |
|          | حداقل            | ۱۰۲          | ۱۵/۰      | ۳۹۶           | ۷/۵۲ | ۳/۰۰                          | ۰/۲۰                         | ۰/۱۰            | ۲/۴۰             | ۰/۳۰             | ۰/۴۱            | ۰/۰۱           |
| سرابله   | میانگین          | ۲۰۱          | ۱۶/۸      | ۵۴۶           | ۷/۳۵ | ۵/۲۰                          | ۰/۹۰                         | ۰/۴۱            | ۴/۳۹             | ۱/۶۳             | ۰/۵۹            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۳۲۲          | ۱۷/۰      | ۵۸۴           | ۷/۸۰ | ۶/۰۰                          | ۲/۱۰                         | ۰/۵۰            | ۵/۵۰             | ۳/۰۰             | ۰/۸۳            | ۰/۰۱           |
|          | حداقل            | ۱۲۰          | ۱۶/۵      | ۵۲۲           | ۷/۰۳ | ۴/۵۰                          | ۰/۴۰                         | ۰/۲۰            | ۴/۰۰             | ۱/۰۰             | ۰/۱۲            | ۰/۰۱           |
| سرابکلان | میانگین          | ۷۶۵          | ۱۵/۶      | ۴۷۳           | ۷/۳۹ | ۴/۳۴                          | ۰/۷۲                         | ۰/۴۲            | ۳/۸۱             | ۱/۱۷             | ۰/۶۱            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۹۹۰          | ۱۵/۹      | ۵۲۹           | ۷/۶۶ | ۵/۸۰                          | ۱/۲۰                         | ۰/۶۰            | ۴/۳۰             | ۲/۲۰             | ۰/۸۹            | ۰/۰۲           |
|          | حداقل            | ۶۳۶          | ۱۵/۰      | ۴۳۶           | ۷/۰۹ | ۳/۲۰                          | ۰/۲۶                         | ۰/۲۰            | ۳/۳۰             | ۰/۲۰             | ۰/۰۹            | ۰/۰۱           |
| ایوان    | میانگین          | ۱۲۰          | ۱۸/۶      | ۵۳۴           | ۷/۳۲ | ۵/۰۵                          | ۰/۴۴                         | ۰/۶۴            | ۴/۵۸             | ۱/۰۰             | ۰/۶۷            | ۰/۰۱           |
|          | حداکثر           | ۱۶۶          | ۱۹/۰      | ۵۶۵           | ۷/۶۵ | ۵/۹۰                          | ۰/۷۰                         | ۰/۹۰            | ۵/۵۰             | ۱/۶۰             | ۰/۷۹            | ۰/۰۱           |
|          | حداقل            | ۶۱           | ۱۸/۲      | ۴۴۸           | ۷/۰۲ | ۳/۵۰                          | ۰/۲۱                         | ۰/۴۰            | ۳/۵۰             | ۰/۵۰             | ۰/۵۲            | ۰/۰۱           |

H<sub>2</sub>S=۰ CO<sub>3</sub><sup>-</sup>=۰ DO > ۸ mg/l

جدول ۲. مشخصات و نتایج سنجش شیمیایی چشمه‌های آبگرم و گوگردی (سال آبی ۹۷-۹۶)

Table 2. Results of measurements and chemical analyses of sulfur and thermal springs.

| نام چشمه  | پارامتر آماری | Q (lit/s) | T (°C) | pH   | EC (µs/cm) | mg/l             |       |                  | meq/l                         |                              |                 |                  |                  |                 |                |
|-----------|---------------|-----------|--------|------|------------|------------------|-------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
|           |               |           |        |      |            | H <sub>2</sub> S | TDS   | SiO <sub>2</sub> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> |
| دهلران    | میانگین       | ۲۹۶       | ۴۱/۱   | ۶/۶۰ | ۸۵۸۹       | ۱۳۲/۶            | ۵۷۵۴  | ۲۴/۲             | ۸/۳                           | ۱۴/۶                         | ۶۸/۹            | ۱۹/۴             | ۱۰/۳             | ۶۰/۷            | ۱/۳۲           |
|           | حداکثر        | ۳۹۰       | ۴۱/۵   | ۷/۸۵ | ۸۸۴۰       | ۱۴۰/۰            | ۵۹۲۳  | ۱۵/۶             | ۱۱/۶                          | ۲۹/۹                         | ۸۹/۵            | ۲۲/۲             | ۱۵/۷             | ۹۲/۹            | ۱/۹۶           |
|           | حداقل         | ۲۲۷       | ۴۰/۸   | ۶/۲۷ | ۸۳۵۰       | ۱۲۷/۰            | ۵۵۹۴  | ۲/۱۹             | ۲/۳                           | ۸/۹                          | ۵۴/۰            | ۱۵/۷             | ۵/۰              | ۴۹/۲            | ۱/۰۰           |
| دوبرج     | میانگین       | ۴۸        | ۳۰/۲   | ۶/۳۰ | ۴۳۵۶۷      | ۱۸۲/۳            | ۲۹۱۹۰ | ۲۸/۶             | ۹/۸                           | ۷۷/۹                         | ۳۸۰/۹           | ۵۷/۷             | ۲۳/۱             | ۳۸۷/۶           | ۱/۱۱           |
|           | حداکثر        | ۷۵        | ۳۱/۶   | ۷/۷۰ | ۴۶۰۰۰      | ۲۲۱/۰            | ۳۰۸۲۰ | ۱۶/۵             | ۱۲/۸                          | ۱۳۹/۱                        | ۵۷۰/۰           | ۷۲/۵             | ۳۷/۰             | ۵۵۲/۴           | ۱/۹۸           |
|           | حداقل         | ۱۲        | ۲۹/۵   | ۶/۰۴ | ۳۹۲۰۰      | ۱۶۱/۰            | ۲۶۲۶۴ | ۲۴/۰             | ۳/۲                           | ۳۵/۹                         | ۲۸۵/۰           | ۴۴/۰             | ۱۸/۷             | ۳۰۸/۴           | -۰/۶۴          |
| قدح       | میانگین       | ۱۹۸       | ۲۳/۹   | ۶/۸۰ | ۲۱۲۱۶      | ۱۱/۹             | ۱۴۲۱۵ | ۲۲/۸             | ۳/۳                           | ۵۰/۲                         | ۱۹۱/۴           | ۴۷/۳             | ۱۲/۵             | ۱۸۴/۸           | -۰/۷۳          |
|           | حداکثر        | ۲۸۰       | ۲۳/۹   | ۷/۱۴ | ۲۲۶۰۰      | ۲۵/۵             | ۱۵۱۴۲ | ۱۸/۶             | ۴/۰                           | ۸۲/۲                         | ۳۰۰/۰           | ۶۳/۰             | ۱۸/۳             | ۲۹۶/۷           | -۰/۸۸          |
|           | حداقل         | ۱۰۰       | ۲۳/۷   | ۶/۶۴ | ۱۸۹۹۰      | ۸/۵              | ۱۲۷۲۳ | ۲۰/۲             | ۲/۴                           | ۱۷/۳                         | ۱۴۵/۰           | ۴۰/۰             | ۸/۰              | ۱۴۸/۵           | -۰/۵۶          |
| چنگوله    | میانگین       | ۱۰۱۶      | ۳۰/۸   | ۶/۷۰ | ۳۸۶۰       | ۲۹/۹             | ۲۵۸۶  | ۱۹/۹             | ۵/۹                           | ۱۰/۶                         | ۲۳/۵            | ۱۴/۴             | ۷/۰              | ۱۸/۲            | -۰/۵۴          |
|           | حداکثر        | ۱۲۲۴      | ۳۰/۸   | ۷/۰۰ | ۴۰۳۰       | ۳۵/۰             | ۳۷۰۰  | ۱۴/۶             | ۷/۰                           | ۱۹/۷                         | ۲۹/۵            | ۲۰/۰             | ۱۱/۰             | ۲۹/۸            | ۱/۱۰           |
|           | حداقل         | ۸۰۳       | ۳۰/۸   | ۶/۵۲ | ۳۷۵۰       | ۲۵/۰             | ۲۵۱۳  | ۱۵/۵             | ۴/۸                           | ۲/۵                          | ۱۹/۵            | ۱۱/۰             | ۳/۲              | ۹/۷             | -۰/۳۲          |
| تنگ بیجار | میانگین       | ۱۹        | ۳۳/۹   | ۶/۲۲ | ۷۱۹۷۵      | ۱۹۰/۲            | ۴۸۲۲۳ | ۲۷/۵             | ۹/۹                           | ۱۰۱/۷                        | ۸۴۳/۲           | ۷۲/۵             | ۲۵/۹             | ۸۵۱/۳           | ۱/۰۴           |
|           | حداکثر        | ۲۶        | ۳۴/۴   | ۶/۵۹ | ۷۵۱۰۰      | ۲۲۹/۰            | ۵۲۳۲۷ | ۲۳/۲             | ۱۲/۶                          | ۱۸۹/۵                        | ۱۲۵۰            | ۷۸/۰             | ۴۶/۰             | ۱۲۹۲            | ۱/۵۸           |
|           | حداقل         | ۱۳        | ۳۳/۴   | ۶/۰۷ | ۶۷۵۰۰      | ۱۵۳/۰            | ۴۵۲۲۵ | ۲۵/۵             | ۷/۷                           | ۴۰/۶                         | ۵۳۴/۰           | ۶۶/۰             | ۱۲/۰             | ۵۶۸/۴           | -۰/۷۸          |
| کنجانچم   | میانگین       | ۶۳        | ۲۷/۰   | ۶/۷۳ | ۱۵۵۶۰      | ۶۸/۰             | ۱۰۴۲۵ | ۲۳/۳             | ۷/۶                           | ۳۵/۱                         | ۱۱۵/۳           | ۳۸/۱             | ۱۴/۱             | ۱۰۵/۳           | -۰/۶۹          |
|           | حداکثر        | ۷۰        | ۳۲/۱   | ۷/۲۵ | ۱۶۷۶۰      | ۱۰۲/۰            | ۱۱۲۲۹ | ۲۱/۱             | ۱۰/۴                          | ۵۷/۷                         | ۱۷۰/۵           | ۵۶/۵             | ۲۳/۵             | ۱۴۶/۹           | -۰/۹۶          |
|           | حداقل         | ۶۰        | ۲۱/۲   | ۶/۶۲ | ۱۲۵۹۰      | ۵۱/۰             | ۸۴۳۵  | ۲۲/۳             | ۴/۹                           | ۲۲/۰                         | ۸۵/۰            | ۲۴/۰             | ۹/۸              | ۸۳/۶            | -۰/۴۰          |
| حمام      | میانگین       | ۱۱        | ۴۰/۹   | ۷/۱۱ | ۱۱۸۶       | ۳۷/۴             | ۷۷۲   | ۲۸/۶             | ۸/۳                           | ۲/۱                          | ۲/۸             | ۳/۹              | ۳/۲              | ۵/۴             | -۰/۱۵          |
|           | حداکثر        | ۱۴        | ۴۱/۱   | ۷/۵۹ | ۱۵۵۷       | ۵۹/۵             | ۱۰۲۸  | ۲۷/۲             | ۱۲/۳                          | ۵/۰                          | ۷/۵             | ۶/۰              | ۶/۵              | ۱۳/۹            | -۰/۲۹          |
|           | حداقل         | ۷         | ۴۰/۷   | ۶/۸۷ | ۱۱۰۷       | ۲۵/۵             | ۷۲۰   | ۲۸/۱             | ۵/۷                           | ۰/۵                          | ۰/۷             | ۲/۲              | ۱/۳              | ۱/۸             | -۰/۰۶          |

CO<sub>3</sub><sup>-</sup> = ۰ DO = ۰



جدول ۳. متوسط دمای چشمه‌های گوگردی، متوسط دمای محیط و اختلاف دمای محیط با دمای چشمه‌ها (°C)  
 Table 3. Average temperature of sulfur springs, average environment temperature, and temperature difference between environment and springs (°C)

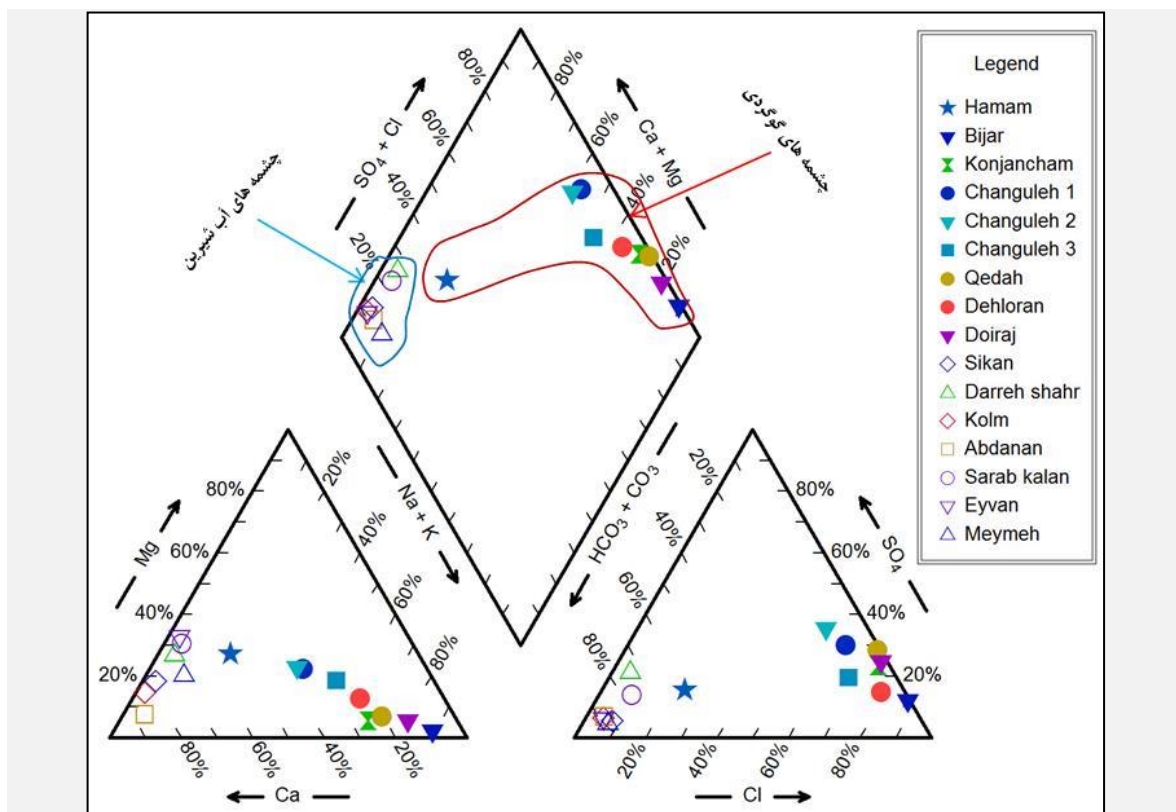
| نام چشمه  | دمای چشمه | دمای محیط | اختلاف دما |
|-----------|-----------|-----------|------------|
| دهلران    | ۴۱/۱      | ۲۶/۰      | ۱۵/۱       |
| دوبرج     | ۳۰/۲      | ۲۴/۵      | ۵/۷        |
| قدح       | ۲۳/۹      | ۲۲/۸      | ۱/۱        |
| چنگوله    | ۳۰/۸      | ۲۴/۶      | ۶/۲        |
| تنگ بیجار | ۲۳/۹      | ۲۴/۰      | ۹/۹        |
| کنجانچم   | ۲۷/۰      | ۲۴/۹      | ۲/۱        |
| حمام      | ۴۰/۹      | ۲۱/۷      | ۱۹/۲       |

جدول ۴. نتایج سنجش ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی (VSMOW‰)  
 Table 4. Isotopic analysis results of sulfur springs samples.

| نام چشمه  | فصل تر                |                    | فصل خشک               |                    |
|-----------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
|           | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ |
| قده       | -۴/۷۲                 | -۲۰/۸۱             | -۴/۷۰                 | -۱۹/۰۵             |
| حمام      | -۵/۹۶                 | -۲۷/۷۹             | -۶/۰۰                 | -۲۶/۹۲             |
| تنگ بیجار | -۴/۵۷                 | -۲۱/۴۶             | -۴/۴۶                 | -۱۹/۶۹             |
| چنگوله    | -۵/۰۳                 | -۲۰/۹۹             | -۴/۸۵                 | -۲۰/۱۳             |
| دهلران    | -۵/۲۶                 | -۲۲/۲۲             | -۵/۱۷                 | -۲۲/۳۹             |
| دوبرج     | -۴/۲۳                 | -۱۴/۰۰             | -۳/۷۵                 | -۱۲/۹۰             |
| کنجانچم   | -۳/۸۲                 | -۱۶/۸۵             | -۴/۲۶                 | -۱۹/۳۵             |

ایلام در مناطق غربی و شرقی از واحدهای هیدروژئولوژی آهکی ایلام- سروک و آسماری سرچشمه می‌گیرند، تیپ آب کلروره سدیک چشمه‌های گوگردی و آبگرم نشان دهنده انحلال هالیت در سازندهای تبخیری و یا یک منبع شوری دیگر از جمله اختلاط با شورابه‌های نفتی می‌باشد.

با توجه به نمودار پایپر (شکل ۷) تمامی چشمه‌های آب شیرین مناطق شرقی استان ایلام دارای تیپ و رخساره بی‌کربناته کلسیک می‌باشند و چشمه‌های گوگردی به استثنای چشمه حمام که تیپ و رخساره بی‌کربناته سدیک دارد، دارای تیپ و رخساره کلروره سدیک می‌باشند. با توجه به اینکه چشمه‌های استان



شکل ۷. نمودار پایپر چشمه‌های آب شیرین و گوگردی استان ایلام

Fig. 7. Piper diagram of freshwater and sulfur springs of Ilam province.

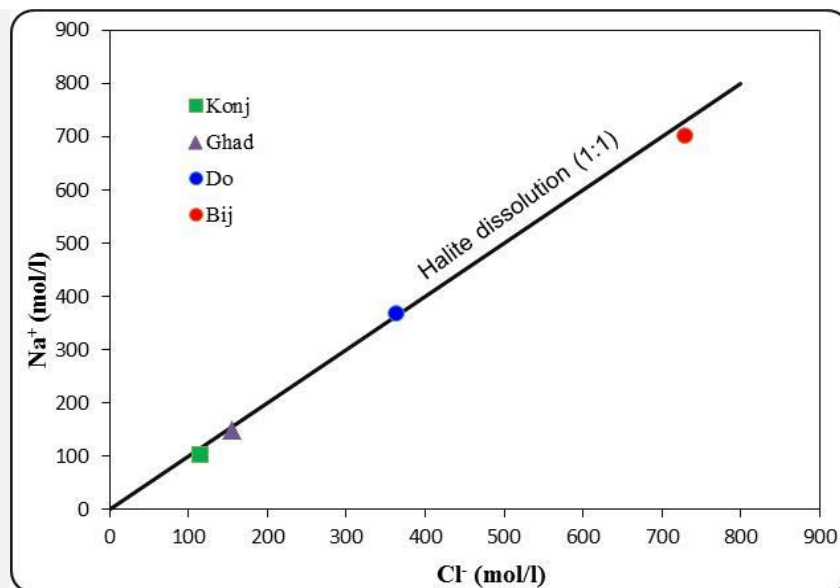
### تعیین منشأ شوری

Na/Cl نزدیک به ۱ بیانگر منشأ شوری از هالیت است، در صورتی که این نسبت از یک کمتر باشد منشأ شوری شورابه‌های نفتی می‌باشد. این روش به خصوص در غلظت‌های بالای کلرید مفید است و استفاده از این روش در صورتی که  $(Na+Cl)/TDS \geq 0.64$  پیشنهاد شده است (Richter and Kreitler, 1993). با توضیحات فوق از نسبت Na/Cl برای تعیین منشأ شوری چشمه‌های تنگ بیجار، قح، کنجانچم و دویرج استفاده شد و نمودار رابطه Na به Cl برای این چشمه رسم گردید (شکل ۸). با توجه به اینکه نسبت Na/Cl چشمه‌های تنگ بیجار، قح، کنجانچم و دویرج نزدیک به خط انحلال هالیت است، لذا منشأ شوری آب این

چشمه‌های کارستی مناطق شرقی استان ایلام دارای آب شیرین، صرفاً متأثر از سازندهای کارستی ایلام، سروک و آسماری می‌باشند. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان داد که چشمه‌های کارستی مناطق غربی که گوگردی، گرم و دارای املاح زیاد هستند، متأثر از سازندهای تبخیری می‌باشند. جهت تعیین منشأ شوری چشمه‌های گوگردی آبگرم از روش‌های هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی نیز استفاده شد.

یکی از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها جهت تشخیص منشأ شوری حاصل از انحلال هالیت از شورابه‌های نفتی نسبت Na/Cl است. نسبت مولار

چشمه‌ها انحلال‌هالیت موجود در سازندهای تبخیری می‌باشد.

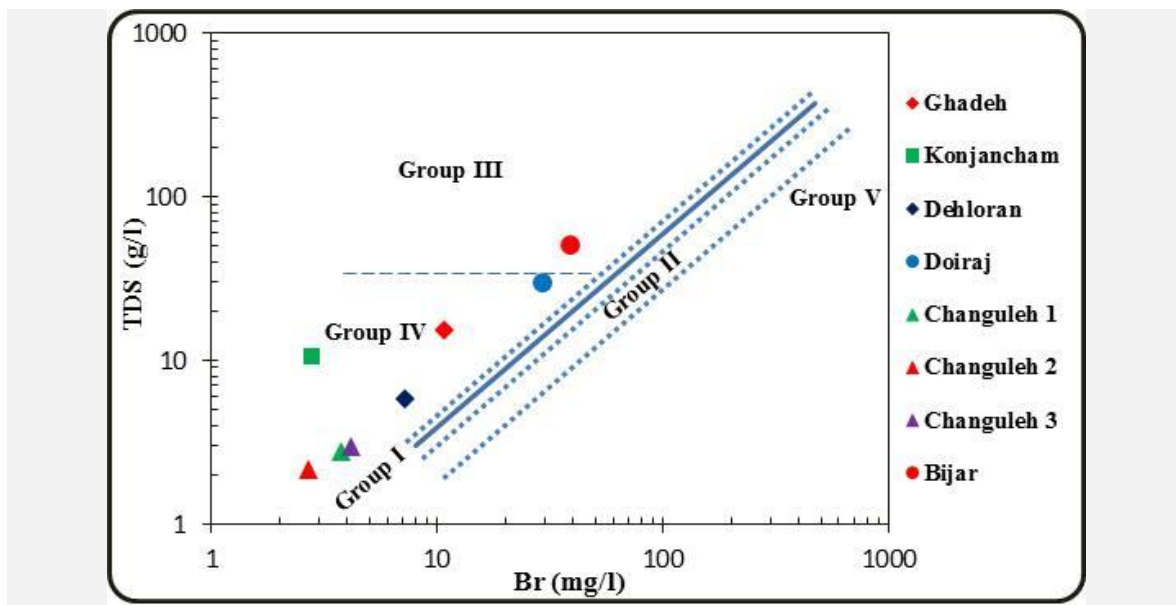


شکل ۸. نمودار رابطه Na به Cl چشمه‌های گوگردی تنگ بیجار، قدح، کنجانچم و دوبرج  
 Fig. 8. Na/Cl diagram of Tang Bijar, Ghedah, Konjancham and Doiraj sulfur springs.

(Rittenhouse, 1967). غلظت کم یون برم همراه با میزان TDS بالا نشان دهنده انحلال‌هالیت است که آب‌های این دسته در گروه III واقع می‌باشند. گروه I و II اختلاط با آب دریا، گروه III شورابه‌های حاصل از انحلال‌هالیت، گروه IV آب‌های حاصل از اختلاط با شورابه‌های انحلال‌هالیت و گروه V شورابه‌های عمیق می‌باشند. در نمودار نسبت TDS/Br چشمه‌های گوگردی استان ایلام (شکل ۹) در گروه III و IV واقع شده که در گروه آب‌های حاصل از انحلال‌هالیت و یا آب‌های رقیق شده حاصل از انحلال‌هالیت می‌باشند.

نسبت سولفات به کلر (SO<sub>4</sub>/Cl) نیز می‌تواند جهت تشخیص شورابه‌های نفتی از انحلال‌هالیت استفاده شود. شورابه‌های نفتی اغلب نسبت SO<sub>4</sub>/Cl خیلی کمی (کمتر از ۰/۰۱) دارند (Whittemore, 1995). نسبت SO<sub>4</sub>/Cl چشمه‌های گوگردی استان ایلام حداقل ۰/۱ در چشمه تنگ بیجار و حداکثر ۰/۵۴ در چشمه حمام است، بنابراین منشأ شوری این چشمه‌ها انحلال‌هالیت در سازندهای تبخیری می‌باشد.

یکی دیگر از روش‌های تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی و تشخیص شورابه‌های نفتی از انحلال‌هالیت نمودار رابطه مواد کل جامد محلول و یون برم می‌باشد



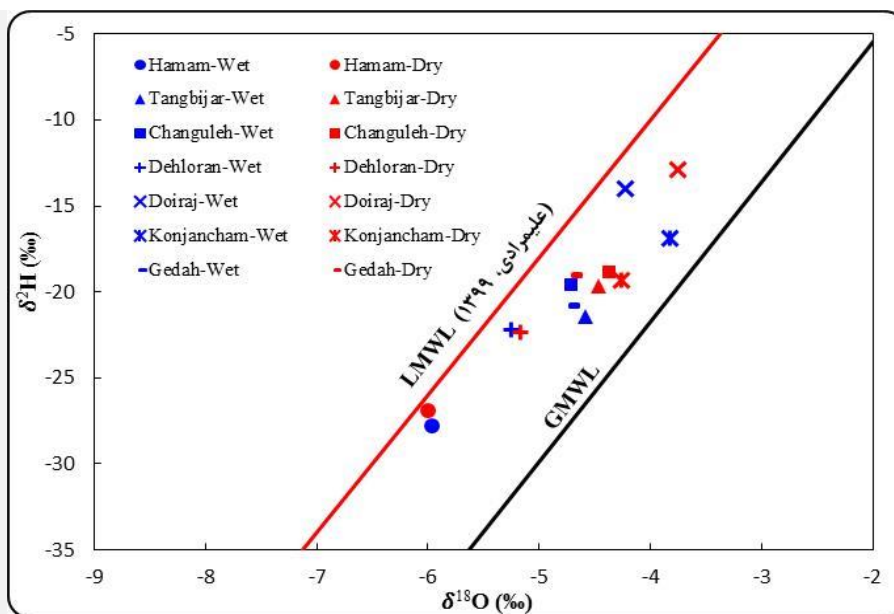
شکل ۹. نمودار رابطه TDS به Br چشمه‌های آبگرم و گوگردی استان ایلام

Fig. 9. TDS/Br relationship diagram of Ilam province sulfur springs.

#### ایزوتوپ‌های پایدار

نسبت به  $^{18}\text{O}$  آب باران غنی شده است. غنی شدگی ایزوتوپ‌های پایدار  $^2\text{H}$  و  $^{18}\text{O}$  آب چشمه‌ها نسبت به ریزش‌های جوی به دلیل تبخیر ریزش‌های جوی قبل از نفوذ عمقی و فرایند تبادل در سیستم ژئوترمال می‌باشد (Clark, 2015 ; Drever, 1982) با توجه شکل ۱۰ ترکیب ایزوتوپی فصل تر و خشک چشمه‌های دهلران و حمام اختلاف ناچیز دارند که حاکی از اختلاط آب‌های نفوذی تغذیه کننده این چشمه‌ها در فصل تر و خشک به دلیل گردش عمیق می‌باشد. دمای بالاتر چشمه‌های آبگرم و گوگردی دهلران و حمام (جدول ۲) نیز گردش عمیق‌تر این چشمه‌ها را تأیید می‌کند.

خط محلی ریزش‌های جوی ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم ( $^2\text{H}$ ) و اکسیژن ۱۸ ( $^{18}\text{O}$ ) استان ایلام نسبت به خط جهانی ریزش‌های جوی ایزوتوپ‌های پایدار انحراف دارد و منطبق بر خط ریزش‌های جوی مدیترانه شرقی می‌باشد (علیمرادی و همکاران، ۱۳۹۹). ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی استان ایلام در فصل‌های تر و خشک در نمودار رابطه  $^2\text{H}$  در مقابل  $^{18}\text{O}$  (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که میزان ایزوتوپ‌های پایدار  $^{18}\text{O}$  و  $^2\text{H}$  در آب اغلب این چشمه‌ها با اندکی تغییر در سمت راست خط ریزش‌های جوی محلی (LMWL) واقع می‌باشد. به عبارت دیگر میزان  $^{18}\text{O}$  آب چشمه‌ها



شکل ۱۰. نمودار رابطه دوتریم ( $^2\text{H}$ ) در مقابل اکسیژن  $^{18}\text{O}$  چشمه‌های گوگردی استان ایلام (فصل تر و خشک)

Fig. 10.  $^2\text{H}$  vs.  $^{18}\text{O}$  relationship diagram from Ilam province sulfur springs (dry and wet season).

و یا دیگر ژئوترموترها درجه حرارتی بین ۱۲۰ تا  $180^\circ\text{C}$  نشان دهد (Arnorsson, 1983). با توجه به اینکه حداکثر دمای مخزن ژئوترمال چشمه‌های آبگرم و گوگردی استان ایلام با استفاده کوارتز  $81/6^\circ\text{C}$  محاسبه شده، بنابراین مقدار دمای مخزن ژئوترمال تخمینی به روش کلسدونی صحیح نیست و دارای خطا می‌باشد. همچنین ژئوترموتر کوارتز حداکثر بخار آب برای چشمه‌های جوشان کاربرد دارد، با توجه به اینکه چشمه‌های آبگرم استان ایلام چشمه جوشان نیستند، لذا این روش نیز برای این چشمه‌ها صحیح نیست. بنابراین با توضیحات فوق ژئوترموتر کوارتز بدون خروج بخار آب برای چشمه‌های آبگرم استان ایلام صحیح‌تر می‌باشد.

با توضیحات فوق حداکثر دمای نسبتاً قابل قبول مخزن چشمه‌های آبگرم و گوگردی استان ایلام  $77/8^\circ\text{C}$  تخمین زده شد که مربوط به چشمه گوگردی

### تعیین منشأ گاز سولفید هیدروژن

منشأ گاز سولفید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{S}$ ) می‌تواند فعالیت‌های ولکانیکی، احیاء باکتریایی سولفات (BSR) و احیاء ترموشیمیایی سولفات (TSR) باشد. با توجه به نبود فعالیت ولکانیکی در پهنه زاگرس، منشأ گاز سولفید هیدروژن چشمه‌های گوگردی استان ایلام از فعالیت ولکانیکی منتفی است. احیاء باکتریایی و ترموشیمیایی سولفات در دو رژیم دمایی منحصر به فرد رخ می‌دهند، به طوری که احیاء باکتریایی سولفات در دمای  $0^\circ\text{C}$  (صفر) شروع شده و تا حدود دمای  $60-80^\circ\text{C}$  ادامه دارد، در صورتی که ظهور احیاء ترموشیمیایی سولفات در دمای بین  $100$  تا  $140^\circ\text{C}$  می‌باشد (Machel, 2001). دمای مخزن چشمه‌های آبگرم و گوگردی با استفاده از ژئوترموتر سیلیس تخمین زده شد (جدول ۵). ژئوترموتری به روش سیلیس کلسدونی در صورتی استفاده می‌شود که مخزن ژئوترمال با استفاده از کوارتز

حمام می‌باشد، بنابراین منشأ گاز سولفید هیدروژن این چشمه‌ها احیاء باکتریایی سولفات می‌باشد.

جدول ۵. تخمین دمای مخزن ژئوترمال چشمه‌های گوگردی با استفاده از ژئوترموتر سیلیس (°C)  
Table 5. Estimation of geothermal reservoir temperature for sulfur springs using silica geothermometers.

| نام چشمه  | Quartz<br>(no steam loss) | Quartz<br>(max. steam loss) | Chalcedony |
|-----------|---------------------------|-----------------------------|------------|
| قده       | ۵۹/۸                      | ۶۵/۷                        | ۲۷/۶       |
| حمام      | ۷۷/۸                      | ۸۱/۶                        | ۴۶/۳       |
| تنگ بیجار | ۷۴/۷                      | ۷۸/۹                        | ۴۳/۱       |
| چنگوله    | ۵۷/۳                      | ۶۳/۵                        | ۲۵/۰       |
| دهلران    | ۷۱/۰                      | ۷۵/۶                        | ۳۹/۲       |
| دوبرج     | ۷۰/۹                      | ۷۵/۶                        | ۳۹/۲       |
| کنجانچم   | ۶۵/۳                      | ۷۰/۶                        | ۳۳/۳       |

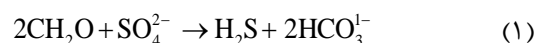
گوگردی بیشتر است. بالا بودن یون بی‌کربنات در چشمه گوگردی تنگ بیجار نظرات فوق را تأیید می‌کند.

#### هیدروگراف چشمه‌ها

به منظور بررسی اثرات بارش بر دبی چشمه‌های استان، نمودار تغییرات ماهانه میزان دبی چشمه آب شیرین سیکان به عنوان پرآب ترین چشمه آب شیرین و سرد استان ایلام و چشمه گوگردی چنگوله به عنوان پرآب ترین چشمه گوگردی و گرم استان ایلام (و ایران) رسم شد (شکل ۱۱ آ و ب). بارش ماهانه از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی به این چشمه‌ها استفاده شد.

شکل ۱۱ آ نشان می‌دهد که نوسانات میزان آبدهی چشمه آبگرم و گوگردی چنگوله در طول دوره مورد مطالعه کم است، به طوری که حداقل آبدهی ۶۷۰ و حداکثر آبدهی ۹۳۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. همچنین بارش هر ماه حدود دو ماه بعد باعث افزایش آبدهی می‌شود.

در فرآیند احیاء باکتریایی سولفات، گونه‌های سولفور غیر آلی در اکسیداسیون مواد آلی توسط باکتری‌ها، به عنوان الکترون گیرنده عمل می‌کنند و سولفور به سولفید احیاء می‌شود (Clark, 2015 ; Langmuir, 1997).

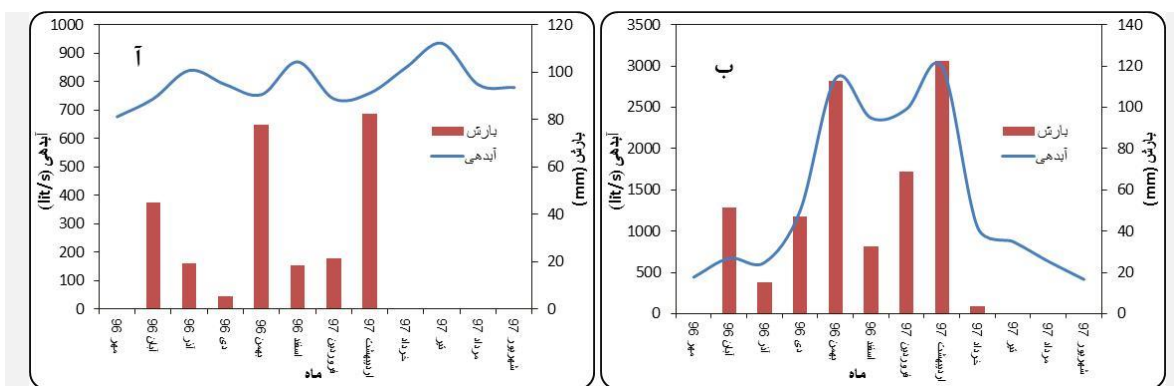


سازندهای شیلی گرو، سورگاه، پایده و گورپی در استان ایلام حاوی ۰/۵ تا ۵ درصد مواد آلی می‌باشند (Kobraei et al., 2017; Mahbobipour et al., 2016; Mashhadi et al., 2015). لذا مواد آلی مورد نیاز واکنش فوق از سازندهای شیلی تأمین می‌شود. بالا بودن یون بی‌کربنات در آب چشمه‌های گوگردی نسبت به چشمه‌های آب شیرین ناشی از واکنش فوق می‌باشد. میزان گاز سولفید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{S}$ ) در چشمه گوگردی تنگ بیجار بیشتر می‌باشد، لذا فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات در این چشمه از سایر چشمه‌های



طوری که حداقل آبدهی ۴۰۰ و حداکثر آبدهی ۳۰۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. همچنین اثرات بارش هر ماه بر میزان آبدهی مشهود است. به عبارت دیگر آب‌های نفوذی تغذیه کننده این چشمه گردش عمقی ندارند.

این بدان معنی است که آب‌های نفوذی تغذیه کننده این چشمه گردش عمقی دارند. شکل ۱۱ ب حاکی از آن است که نوسانات میزان آبدهی چشمه آب شیرین و سرد سیکان در طول دوره مورد مطالعه بسیار زیاد است، به



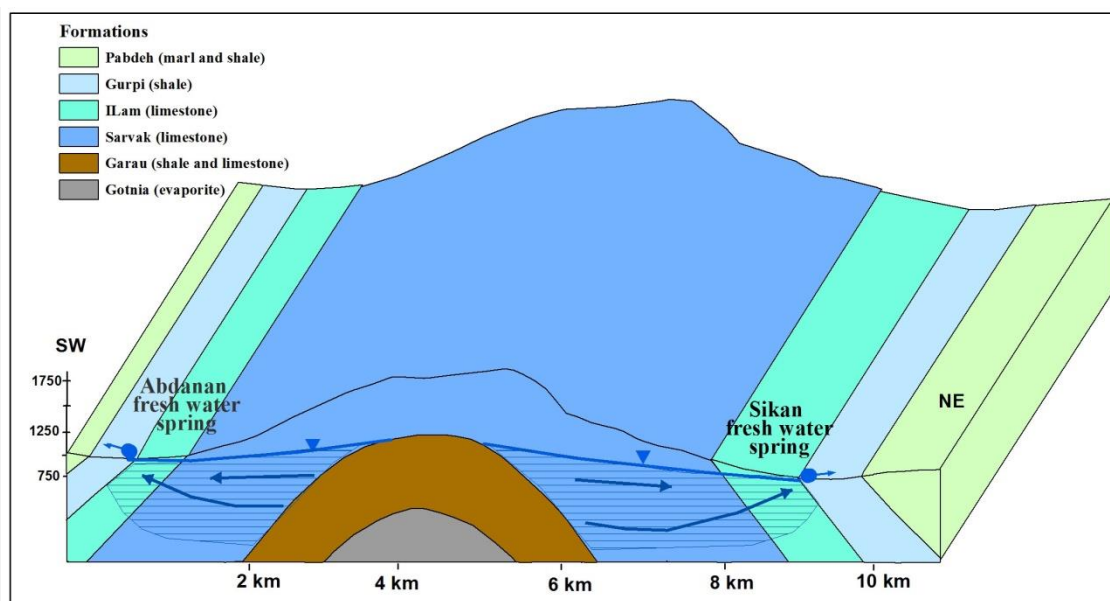
شکل ۱۱. تغییرات ماهانه دبی چشمه آبگرم و گوگردی چنگوله (ا) و تغییرات دبی چشمه آب شیرین و سرد سیکان (ب)

Fig. 11. Monthly fluctuations discharge of Changleh sulfur spring (a) and Sikan fresh water spring (b).

آبخوان آهکی را تشکیل داده است که سنگ کف آن سازند نفوذناپذیر شیلی- مارنی گرو می‌باشد. ظهور چشمه‌ها در محل تماس سازند ایلام با شیل‌های نفوذناپذیر سازند گورپی می‌باشد. شیل‌های نفوذناپذیر سازند گرو ارتباط هیدرولیکی واحد هیدروژئولوژیک ایلام- سروک را با تبخیری‌های سازند گوتنیا قطع کرده است. لذا آب این چشمه‌ها شیرین است (هدایت الکتریکی کمتر از ۴۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و به علت گردش عمقی کم، دمای آب این چشمه‌ها پایین می‌باشد (کمتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد).

#### مدل مفهومی چشمه‌ها

به منظور نمایش نحوه و چگونگی تشکیل چشمه‌های استان ایلام و همچنین علل تفاوت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های مناطق شرقی و غربی این استان مدل مفهومی تهیه شد (شکل‌های ۱۲ تا ۱۵). شکل ۱۲ مدل مفهومی تشکیل چشمه‌های کارستی سیکان و آبدانان در یال‌های شمالی و جنوبی تاقدیس کبیرکوه به عنوان تیپیک چشمه‌های آب شیرین با منشأ واحد هیدروژئولوژیک ایلام- سروک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واحد هیدروژئولوژیک ایلام- سروک یک

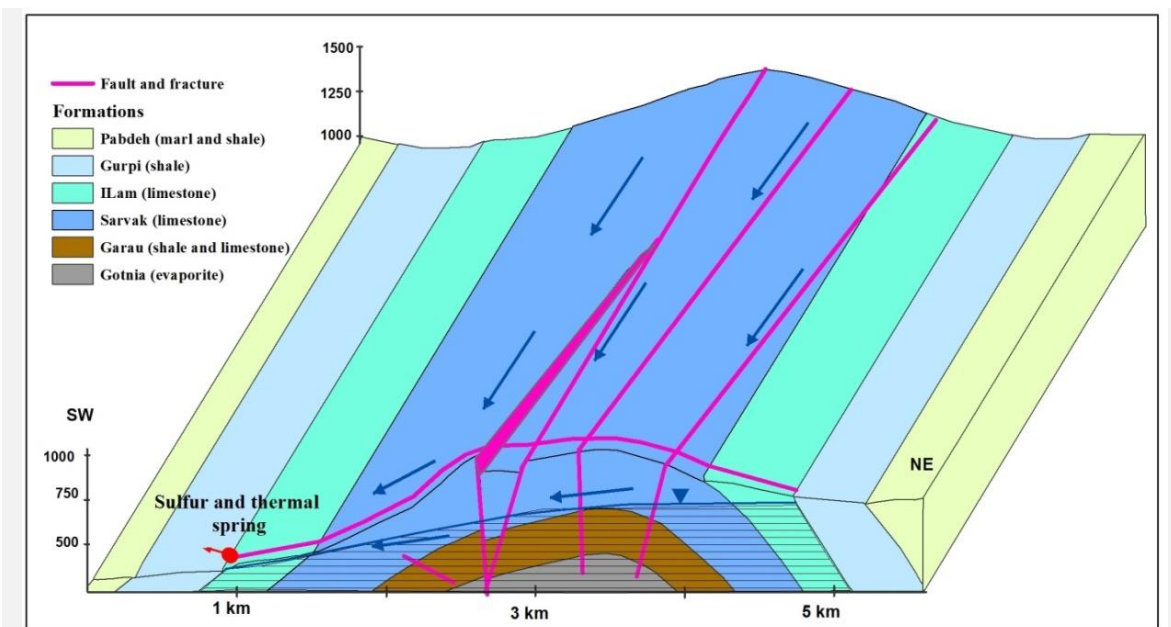


شکل ۱۲. مقطع زمین‌شناسی تاقدیس کبیرکوه و مدل مفهومی سه بعدی چشمه‌های آب شیرین سازندهای ایلام و سروک (چشمه‌های سیکان و آبدانان تپیک چشمه‌های آب شیرین سازندهای ایلام و سروک)

Fig. 12. Geological cross section of Kabirkoh anticline and conceptual model of Ilam province fresh water springs in Ilam-Sarvak hydrogeologic unit (Sikan and Abdanan springs, fresh water typical springs in Ilam and Sarvak formations)

بالا رفتن شوری می‌شود. نفوذ و بالآمدگی تبخیری‌های سازندهای زیرین از طریق گسل‌های موجود در تاقدیس سیاهکوه چنانچه در شکل ۳ آورده شده، محتمل است. گوگردی شدن آبخوان کارستی به این دلیل است پس از مصرف اکسیژن محلول در آب‌های نفوذی شرایط مناسب برای فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات فراهم می‌شود، لذا این باکتری‌ها جهت تغذیه و اکسیداسیون مواد آلی، سولفات را به سولفید احیاء کرده و سولفید هیدروژن تولید می‌کنند. گردش عمیق آب‌های نفوذی باعث گرم شدن آب متأثر از گرادیان زمین‌گرمایی می‌شود، لذا چشمه دهلران دمای بالایی (حدود ۴۱ درجه سانتی‌گراد) دارد.

شکل ۱۳ مدل مفهومی تشکیل چشمه آبگرم و گوگردی دهلران در یال جنوبی این تاقدیس به عنوان تپیک چشمه‌های آبگرم و گوگردی با منشأ واحد هیدروژئولوژیک ایلام- سروک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، گسل‌ها و شکستگی‌های عمیق باعث ارتباط هیدرولیکی واحد هیدروژئولوژیک ایلام- سروک با سازندهای شیلی (گرو) و تبخیری (گوتنیا) شده است. ورود آب‌های نفوذی حاصل از ریزش‌های جوی به سازندهای ایلام و سروک باعث تشکیل آبخوان‌های کارستی آب شیرین با کیفیت مناسب می‌شود. لیکن ارتباط هیدرولیکی آبخوان کارستی با لایه‌های شیلی سازند گرو باعث تماس با مواد آلی و در نتیجه مصرف اکسیژن می‌شود. انحلال سازندهای تبخیری‌ها نیز باعث



شکل ۱۳. مقطع زمین‌شناسی مناطق میانی تاقدیس سیاه کوه و مدل مفهومی سه بعدی تشکیل چشمه‌های آبگرم و گوگردی سازندهای ایلام-سروک ( چشمه گوگردی دهلران تیپیک چشمه‌های گوگردی آبگرم سازندهای ایلام و سروک)

Fig. 13. Geological cross section central area of Siahkoh anticline and conceptual model of Ilam province sulfur springs in Ilam-Sarvak hydrogeologic unit (Dehloran spring, typical of sulfur springs in Ilam and Sarvak formations)

در زیر بخش آهکی سازند آسماری بخش انیدریتی کلهر واقع شده و شکستگی‌ها باعث ارتباط هیدرولیکی بخش آهکی و بخش انیدریتی شده‌اند. بخش انیدریتی کلهر حاوی لایه‌های هالیت نیز می‌باشد. انحلال تبخیری‌های بخش انیدریتی کلهر باعث بالا رفتن شوری آب این چشمه شده است (هدایت الکتریکی حدود ۴۳۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر). گردش نسبتاً عمیق آب‌های نفوذی باعث گرم شدن آب متأثر از گرادیان زمین گرمایی شده، لذا چشمه گوگردی دوبرج دمای نسبتاً بالایی دارد (حدود ۳۱ درجه سانتی‌گراد). ارتباط هیدرولیکی آبخوان کارستی با لایه‌های شیلی سازندهای پابده و گورپی باعث تماس با مواد آلی و در نتیجه مصرف اکسیژن می‌شود. گوگردی شدن آبخوان کارستی به این

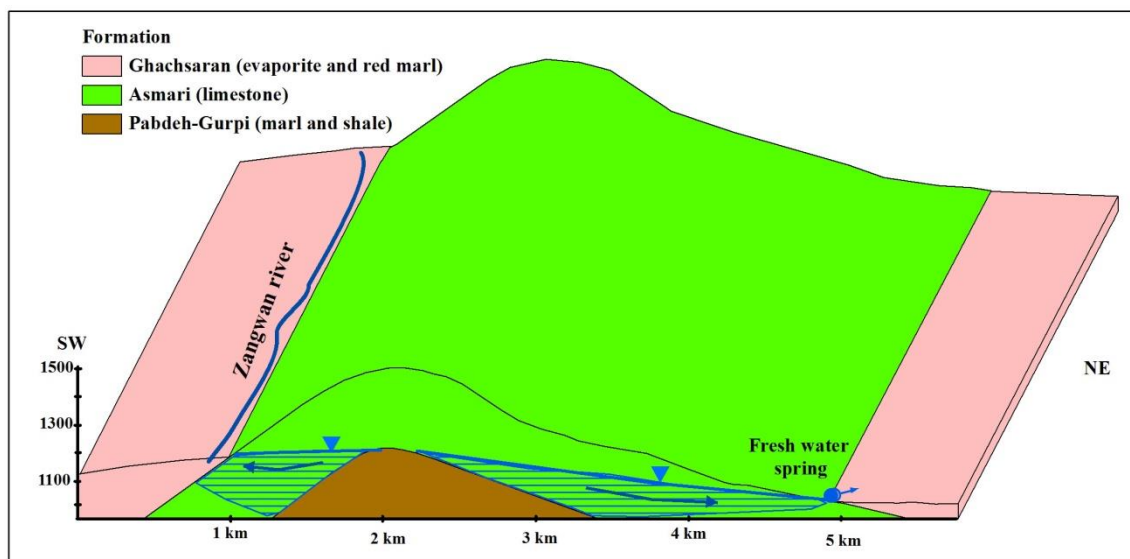
شکل ۱۴ مدل مفهومی سه بعدی تشکیل چشمه کارستی سرابله در یال شمالی تاقدیس لنه به عنوان تیپیک چشمه‌های آب شیرین با منشأ سازند آسماری در مناطق شرقی استان ایلام را نشان می‌دهد. سازند آسماری یک آبخوان آهکی را تشکیل داده است که سنگ کف آن سازند نفوذناپذیر شیلی-مارنی پابده می‌باشد. محل ظهور چشمه سرابله نیز لایه‌های مارنی سازند گچساران می‌باشد. سازند آسماری در مناطق شرقی استان ایلام صرفاً آهکی است و فاقد بخش تبخیری می‌باشد (شکل ۵ آ). شکل ۱۵ مدل مفهومی سه بعدی تشکیل چشمه گوگردی دوبرج به عنوان تیپیک چشمه‌های گوگردی با منشأ سازند آسماری در مناطق غربی استان ایلام را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل

کارستی با سازندهای تبخیری زیرین شده، لذا انحلال تبخیری‌ها باعث افزایش شوری و گردش عمیق آب باعث بالا رفتن آب‌های نفوذی شده است. نسبت‌های  $\text{Na/Cl}$ ،  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ، نمودار ریتنهوس (نسبت TDS در مقابل  $\text{Br}$ ) نیز نشان داد که منشأ شوری چشمه‌های گوگردی و آبگرم، انحلال تبخیری‌های می‌باشد. بررسی ایزوتوپ‌های پایدار  $^2\text{H}$  و  $^{18}\text{O}$  منشأ آب چشمه‌های گوگردی و آبگرم را ریزش‌های جوی نشان می‌دهد. همچنین گسل‌های مناطق شرقی باعث نفوذ آب به سازندهای شیلی شده‌اند، در نتیجه تماس آب با مواد آلی در لایه‌های شیلی باعث مصرف اکسیژن محلول شده است. محیط بی‌هوازی و دمای بالای ناشی از گردش عمیق آب شرایط مناسب جهت فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات فراهم کرده است.

دلیل است پس از مصرف اکسیژن محلول در آب‌های نفوذی شرایط مناسب برای فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات فراهم می‌شود.

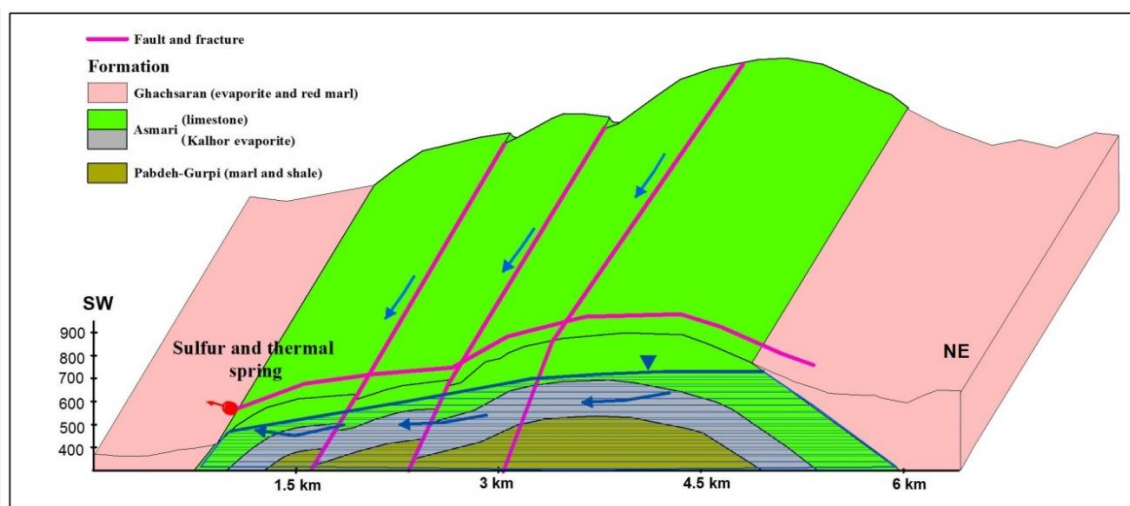
### نتیجه‌گیری

سازندهای آهکی آسماری، ایلام و سروک در استان ایلام آبخوان‌های کارستی را تشکیل داده‌اند و چشمه‌های کارستی با دبی بالا در مناطق مختلف این استان ظاهر شده است. چشمه‌های کارستی مناطق شرقی دارای آب شیرین و سرد می‌باشند در صورتی که در مناطق غربی آب چشمه‌ها گوگردی، گرم و دارای شوری بالایی می‌باشند. چشمه‌های گوگردی استان ایلام پرآب‌ترین چشمه‌های گوگردی ایران می‌باشند، به طوری که میانگین آبدهی برخی از آن‌ها نظیر چشمه‌های گوگردی چنگوله بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. عامل اصلی اختلاف ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های مناطق غربی و شرقی استان ایلام تفاوت شرایط زمین‌شناسی می‌باشد. به این صورت که در مناطق شرقی گسل‌های عمیق باعث ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌های



شکل ۱۴. مقطع زمین‌شناسی تاقدیس لنه و مدل مفهومی تشکیل چشمه آب شیرین واحد هیدروژئولوژیک آسماری (چشمه سرابله تیپیک چشمه‌های آب شیرین سازند آسماری)

Fig. 14. Geological cross section of Laneh anticline and conceptual model of Ilam province fresh water springs in Asmari hydrogeologic unit (Sarableh spring, fresh water typical spring in Asmari formation)



شکل ۱۵. مقطع زمین‌شناسی پلانژ شرقی تاقدیس سیاهکوه و مدل مفهومی تشکیل چشمه آبگرم گوگردی با سنگ مخزن آسماری (چشمه دویرج تیپیک چشمه‌های آبگرم گوگردی سازند آسماری)

Fig. 15. Geological cross section eastern area of Siahkoh anticline and conceptual model of Ilam province sulfur springs in Asmari hydrogeologic unit (Doiraj spring, typical of sulfur springs in Asmari formation)

## منابع

- بوسلیک، ز.، "بررسی منشأ و خصوصیات چشمه‌های گوگردی دالکی شهرستان دشتستان استان بوشهر"، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی - هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۹۰).
- شاچری، س.، "منشأ یابی آرسنیک چشمه گرو"، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی - هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۹۰).
- درویش‌زاده، ع.، "زمین‌شناسی ایران"، نشر دانش‌امروز (۱۳۷۰).
- غفوری، م.ر.، "شناخت آب‌معدنی و چشمه‌های معدنی ایران"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۲)
- علیمرادی، ص.، ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف.، کریمی، ح.، "تعیین منشأ و سازوکارهای تشکیل چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاقدیس سیاهکوه"، جنوب غرب ایران، با استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی. مجله هیدروژئولوژی، دوره ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان (۱۳۹۹) ۳۱-۱۶.
- مطیعی، ه.، "زمین‌شناسی ایران - چینه‌شناسی زاگرس"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۲).
- ناصری، ح.ر.، "مطالعات هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی در حوضه آبریز سد درودزن"، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی - هیدروژئولوژی، دانشگاه شیراز (۱۳۷۰).
- ناصری، ح.ر.، محمدزاده، ح.، سلامی، ه.، "بررسی منشأ سولفات در تعدادی از چشمه‌های گوگردی زاگرس چین خورده با استفاده ایزوتوپ سولفور ( $^{34}\text{S}$ )"، نخستین همایش ملی کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲).
- Alavi, M., "Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution", *American Journal of Science*, 304 (2004) 1-20.
- Arnorsson, S., "Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems-implications for chemical geothermometry investigations", *Geothermics journal*, 12 (1983), 119-128.
- Avsar, O., Kurtulus, B., Gürsu, S., Gencalioglukus, G., Kacaroglu, F., "Geochemical and isotopic characteristics of structurally controlled geothermal and mineral waters of Mugla (SW Turkey)", *Geothermics journal*, 64 (2016) 466-481
- Bogli, A., "Karst Hydrology and Physical Speleology", Springer Verlag, Berlin, (1980)
- Chandrasekharam, D., Bundschuh, J., "Low-Enthalpy Geothermal Resources for Power Generation", CRC Press LLC, Taylor & Francis Group, (2008)
- Clark, I.D., "Groundwater Geochemistry and Isotopes", Taylor & Francis Group, LLC, (2015)
- Drever, J.I., "The Geochemistry of Natural Waters. Prentice-Hall", (1982)
- Ford, D.C., Williams, P.W., "Karst geomorphology and hydrology", 2nd edn. John Wiley & Sons, Chichester, U.K., (2007)
- Giggenbach, W.F., "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators", *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 52 (1988) 2749-2765.
- Karimi, H., Moore, F., "The source and heating mechanism for the Ahran, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran", *Geothermics journal*, 37 (2008) 84-100
- Karimi, S., Mohammadi, Z., Samani, N., "Geothermometry and circulation depth of groundwater in Semnan thermal springs, Northern Iran", *Environmental Earth Science*, (2017) 76:659
- Kobraei, M., Rabbani, A., Taati, F., "Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin-southwest Iran", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7 (2017) 1051-1070.
- Kompani-Zare, M., Moore, F., "Chemical thermometry and origin of the Dalaki mineral springs, Boshehr Province, Iran", *Journal of Hydrology, (New Zealand)* 40(2) (2001) 189-204.



- Machel, H.G., "Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights", *Sedimentary Geology*, 140 (2001) 143-175.
- Langmuir, D., "Aqueous Environmental Geochemistry", Prentice-Hall, (1997)
- Llewellyn, P.G., "Dehloran geological compilation map 1:250000", Iranian Oil Operating Companies, (1973)
- Llewellyn, P.G., "Ilam-Kuhdasht geological compilation map 1:250000", Iranian Oil Operating Companies, (1974)
- Mahbobipour, H., Kamali, M.R., Solgi, A., "Organic geochemistry and petroleum potential of Early Cretaceous Garau Formation in central part of Lurestan zone, northwest of Zagros, Iran" *Marine and Petroleum Geology* (2016)
- Mashhadi, Z.S., Rabbani, A.R., Kamali, M.R., Mirshahani, M., Khajehzadeh, A., "Burial and thermal maturity modeling of the Middle Cretaceous–Early Miocene petroleum system, Iranian sector of the Persian Gulf", *Petroleum Science*, 12 (2015) 367–390.
- Mazor, E., "Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology", CRC Press (2003)
- Mohammadi, Z., Bagheri, R., Jahanshahi, R., "Hydrogeochemistry and geothermometry of Changal thermal springs, Zagros region, Iran", *Geothermics*, 39 (2010) 242-249.
- Mohammadzadeh, H., Kazemi, M., "Geothermal reservoir characteristics (T and depth) of Ayub peighambar and Shafa hot springs using geothermometers and environmental  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopes", *International symposium on isotope hydrology*, Vienna, Austria (2015)
- Pasvanoğlu, S., Çelik, M., "A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province", *Geothermics journal*, 71 (2018) 88-107
- Richter, B., Kreitler, C., "Geochemical Techniques for identifying sources of ground-water salinization", CRN Press Inc, Florida, (1993)
- Richter, B., Kreitler, C., "Identification of sources of ground-water salinization using geochemical techniques", The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, (1991)
- Rittenhouse, G., "Bromine in oil-field waters and its use in determining possibilities of origin of these waters". *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51 (1967) 2430–2440
- Stocklin, J., "Structural history and tectonics of Iran. A review", *AAPG Bull*, 52(7) (1968) 1229–1258.
- Tian, J., Pang, Z., Guo, Q., Wang, Y., Li, J., Huang, T., Kong, Y., "Geochemistry of geothermal fluids with implications on the sources of water and heat recharge to the Reheng high-temperature geothermal system in the Eastern Himalayan Syntax", *Geothermics journal*. 74 (2018) 92-105
- Stocklin, J., Setudehnia, A., "Stratigraphic Lexicon of Iran", Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, (1977)
- Wynn, J.G., Sumrall, J.B., Onac, B.P., "Sulfur isotopic composition and the source of dissolved sulfur species in thermo-mineral springs of the Cerna Valley, Romania", *chemical geology*, 271 (2010) 31–43.
- Whittemore, D.O., "Geochemical differentiation of oil and gas brine from other saltwater sources contaminating water resources: case studies from Kansas and Oklahoma", *Environmental Geoscience*, 2 (1995) 15-31.
- Zega, M., Rozic, B., Gabersek, M., "Mineralogical, hydrogeochemical and isotopic characteristics of the Zveplenic sulphide karstic spring (Trebusa Valley, NW Slovenia) ", *Environmental Earth Sciences*, 74 (2015) 3287–3300.