

Investigating the role of tectonics in the development of Leylia - Keynow karstic aquifer (northeast of Khuzestan) with an emphasis on hydro-tectonics analysis

Abbas Charchi^{1*}, Nasrollah Kalantari¹, Hamidreza Mohamadibehzad¹, Yaser Aghdaki¹

1-Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: Leylia-Keynow karstic aquifer, Hydrotectonic regime, Shear fault zones, Structures of folded interference, Mafaroun thrust fault

1-Introduction

In karst environments, geological structures such as anticlines, synclines, with joint patterns in these structures, stratification surfaces, folding intensity, faults, and main joints make the vertical and horizontal connection in the saturation zone. Some fault surfaces may have low porosity due to compaction or filling of fault surfaces by secondary calcite and are a barrier to groundwater.

Sometimes faults move the layers and cause the permeable and impermeable layers to be placed next to each other, which is also an obstacle to water passage (Mohammadibehzad, 2016). In this connection, in the recent years, research on the role of faults has increased so that Charchi et al. (2010) in one of the studies have considered the role of fault structures in karstic aquifer nutrition important. One of the most comprehensive and valuable researches in this field has been done by Ashjari and Raeisi (2006) on 72 karst anticlines in Zagros. In this study, they have presented a conceptual model based on the geometry of the anticlines and the outlet flow position to describe the regions flow and have divided the anticlines into two main groups based on the connection or lack of hydraulic connection between their edges. Geological and tectonic status has been the most critical influential, and controlling factors in this classification. Rubio et al. (2007) studied tectonics' effect on hydrogeological and karstic processes in a fault karst basin (graben). Gremaud et al. (2009) investigated geological structures' role in subsurface recharge and drainage processes in Switzerland's glacial karst system. Chihi et al. (2015) investigated the relationship between tectonic structures and hydrogeochemical distribution in southeastern Tunisian aquifers. It is to be mentioned that these researches were not under the title of hydrotectonic. Addressing this issue can be very useful as a helpful reference for future groundwater exploration to optimize the goal and reduce costs. In this study, we intend to investigate the relationship between geological and tectonic structures (folded and fault structures), their role in the development of the Lily-Keno karst aquifer, and especially in the emergence of karst springs in the study area from the perspective of hydrotectonics to be analyzed. This research aims to study the relationship between geological and tectonic structures (fold and faulted structures) and their role in developing karstic aquifer, especially in the emergence of karstic springs. In this research, we introduce the title of Hydrotectonic in the present article in Iran, with a unique view about karst aquifers.

The calcareous terrain of the Ilam-Sarvak Formation at Leyli-Keynow Anticlines in the northeast of Khuzestan Province has formed a very rich karst aquifer under the influence of geological structures. Many dolines at the heights of these anticlines and karstic springs such as Sousan spring with super-high discharge, springs of Tange-Sard, and Dare-kool with a relatively high discharge indicate that the regional karst is well developed. Studies of geological structures show that the study area is affected by the Izeh and Balaroud shear zones' basement faults. As a result, in addition to fractures' development, the area's anticlines have been merged through structural interferences. The aquifer (anticline) of the Leyli-Keynow results from the same structural development, which can also be linked to the adjacent aquifers (or anticlines) based on water budget estimation. Field surveys also show that faults and fractures are more frequent in the study area. These fractures and faults

*Corresponding author: charchi38@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2020.29686.1992

Received 2019-05-24

Accepted 2020-10-02

play a crucial role in controlling the general flow and water transfer patterns. In sum, these results indicate that a specific hydrotectonic regime controls the karstic aquifer in the study area.

2-Methodology

Using geological maps of 1: 100000 and 1: 250,000 of the National Iranian Oil Company and satellite imagery of the study area's geological map has been drawn. GIS and image enhancement and visual interpretation operations, the geological structures of the faults, fractures, and joints of the study area were extracted from the Landsat 2002 sensor image, using remote sensing techniques. Springs were also identified during field operations in the area. Using a satellite locating device (GPS; Geographical Position System), their location and place were determined and evaluated lithologically and structurally in these visits. In field studies, in the recharge area of Susan, Tange-Sard, and Dare-kool springs, four stations were determined to measure joints and fractures. Then, by drawing a rose diagram, the joints and the type of dominant joints in the study area were determined. Finally, a model of the hydrotectonic regime was presented.

3- Results and discussion

The study area is located in the northwestern part of the Izeh zone and east of Dezful embayment in the folded Zagros tectonic zone. From a tectonic point of view, the study area structures are more periodic than parallel anticlines and synclines. The most critical tectonic movements in the region are orogenic movements of the Cenozoic (Alpine) period. In addition to reducing the sedimentation environment's depth and changing the lithology and thickness of sediments, these tectonic movements have caused folding and development of fractures in the rock units. The performance of the mentioned movements has also caused secondary porosity and increased the rock units' permeability.

The Leyli anticline is asymmetrical and has multiple hinges. The elevation of this anticline in the northwestern regions is higher than its central and southeastern regions so that in that area is the oldest outcrop related to the Garou Formation, while in the southeastern region, the deepest outcrop belongs to the calcareous formations of Ilam- Sarvak (belongs to Bangestan group; Motiei, 1995).

The Keynow anticline has a unique structural condition and an axis length of about 40 km with a northwest-southeast axis trend. This anticline shows several rotations compared to other anticlines in the study area. The southeastern nose and the entire northern edge of this anticline are structurally interfering with the southeastern nose, and the southern edge of the Leyli anticline has an en-echelon arrangement.

It is necessary to determine how the Leyli and Keynow anticlines formed and merged, to understand the pressure and, consequently, the type of tectonic regime governing different parts. Cosgrove and Price (1990) believe that the folds in the folded belts are formed due to the distance between their axes that can affect each other. In this way, the axes of the folds that are formed next to each other usually move to the left or right relative to each other and show an En-echelon arrangement.

The karst features in the study area can be divided into two categories: surface and deep. The most important surface and in-depth karst features are the valleys on the Leyli and Keynow anticlines' heights, respectively, and the karst springs at their limbs, which are of particular geological importance due to their hydrogeological significance.

Most of the Leyli - Keynow karst aquifer springs have appeared along the Mafaroun reverse fault and under the influence of basement faults. Due to the position of Mafaroun fault, its performance has caused the Ilam-Sarvak formation to be located opposite to the Pabdeh-Gurpi impermeable formation and has created a hydraulic dam parallel to the mentioned fault. Hydrotectonic evidence shows that the Susan spring is morphologically in contact-fault springs and is the most critical discharge of the Leylia - Keynow karst basin.

The joints and fractures were investigated to know the role of tectonics and geological structures of the study area. According to these studies, joints in the Tange cord can be divided into two sets: systematic (fractures that are relatively parallel and have regular spacing) and non-systematic (joints that are irregularly spaced). In general, fractures in the area of all three springs are often of the water-conducting type. The transfer rate should be high in these springs' catchment areas, considering the transverse fractures concerning the cross axis and layering and the role of transverse fractures in controlling the general direction of flow within the karst. Karamivardanjani (2016) also showed that the flow velocity due to fractures' development in these springs' catchment areas and the type of fractures and their opening rate is high.

4-Conclusions

The Leylia - Keynow anticlines show several bends compared to other anticlines in the study area. Also, the southeastern nose and the entire northern edge of the Keynow anticline are merged with the southeastern promontory and the southern edge of the Leylia anticline due to structural interference and have an en-echelon arrangement. The reason is the growth of the folds and the performance of the Izeh shear zone's basement faults and the resulting Balaroud shear zone. Tectonic activities of the region in the form of anticline interference and intense faulting in the limestones of the Ilam-Sarvak Formation of these anticlines have created an utterly fragmented zone, and dissolution leads to the development of karst aquifer and hydrotectonic regime in the area has been. The formation of several dolins in the heights of the mentioned anticlines confirms this. The alignment of the position of dolins with the density of fractures and their linear trend, which mainly follow the axis of the anticlines, indicates the effect of the fault path, the fracture system, especially longitudinal fractures (parallel to the axis of the anticline) and the intersection of fractures in the development of these karst features.

References

- Ashjari, J., Raeisi, E., 2006. Anticline structure influences on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst studies* 68, 119-127.
- Charchi, A., Kalantari, N., Agriculture, M. R., 2010. A Study of Karst Audio Aquifer in the Northeast of Khuzestan Province. *Journal of Earth Science Research* 1, 96-84.
- Chihi, H., De Marsily, G., Belayouni, H., Yahyaoui, H., 2015. Relationship between tectonic structures and hydrogeochemical compartmentalization in aquifers: Example of the "Jeffara de Medenine" system, south-east Tunisia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 410-430.
- Herold, T., Jordan, P., Zwahlen, F., 2000. The influence of tectonic structures on karst flow patterns in karstified limestones and aquitards in the Jura Mountains, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 93, 349-362.
- Gremaud, V., Goldscheider, N., Savoy, L., Favre, G., Masson, H., 2009. Geological structure, recharge processes and underground drainage of a glacierised karst aquifer system, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps. *Hydrogeology Journal* 17, 1833-1848.
- Mohammadibehzad, H.R., Charchi, A., Kalantari, N., 2015. Investigation of hydrogeological behavior of Sabzab karst spring, northeast of Khuzestan province. *Advanced Applied Geology* 15, 19-10.
- Motiei, H., 1995. *Geology of Zagros Oil 1 and 2*. Publications of the Geological Survey of Iran, 1009 p.
- Vardanjani, H.K., Chitsazan, M., Ford, D., Karimi, H. and Charchi, A., 2018. Initial assessment of recharge areas for large karst springs: a case study from the central Zagros Mountains, Iran. *Hydrogeology Journal* 26, 57-70.
- Price, N., Cosgrove, J., 1990. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rubio, J.C., Simon, J.L., Soriano, M.A., 2007. Interacting tectonics, hydrogeology and karst processes in an intramontane basin: the Jilocagraben (NE Spain). *Hydrogeology Journal* 15, 1565-1576.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Charchi, A., Kalantari, N., Mohamadibehzad, H., Aghdaki, Y., 2020. Investigating the role of tectonics in the development of Leylia - Keynow karstic aquifer (northeast of Khuzestan) with an emphasis on hydro-tectonical analysis. *Adv. Appl. Geol.* 10(3), 391-406.

DOI: 10.22055/AAG.2020.29686.1992

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15917.html?lang=en

بررسی نقش تکتونیک در توسعه آبخوان کارستی لیلی - کینو (شمال شرق خوزستان) با تأکید بر تحلیل

هیدرو تکتونیک

عباس چرچی *

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

نصراله کلانتری

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

حمیدرضا محمدی بهزاد

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

یاسر عقدکی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱

*charchi38@scu.ac.ir

چکیده

پهنه آهکی سازند ایلام - سروک در تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو در شمال شرق استان خوزستان، تحت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی، آبخوان کارستی بسیار غنی را تشکیل داده است. دولین‌های متعدد در ارتفاعات این تاقدیس‌ها و چشمه‌های کارستی مانند چشمه سوسن با آبدهی فوق‌العاده بالا، تنگ‌سرد و دره‌کول با آبدهی نسبتاً بالا نشان از توسعه کارست منطقه می‌باشد. مطالعات ساختارهای زمین‌شناسی نشان می‌دهد منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر گسل‌های پی‌سنگی زون‌های برشی ایذه و بالارود قرار داشته که در پی آن علاوه بر توسعه شکستگی‌ها، تاقدیس‌های منطقه بر اثر تداخل ساختاری با یکدیگر ادغام شده‌اند. آبخوان (تاقدیس) کارستی لیلی-کینو حاصل همین توسعه ساختاری می‌باشد که بر اساس بررسی بیلان آب‌برزمینی این ارتباط با آبخوان‌ها (یا تاقدیس‌های) مجاور نیز می‌تواند برقرار باشد. ساختار گسله مهم دیگر منطقه، راندگی مفارون می‌باشد که با قراردادن سازند ایلام-سروک در مقابل سازند نفوذناپذیر پایده -گورپی و همچنین ایجاد خردشدگی‌های فراوان، نقش مهمی را در ظهور چشمه‌های منطقه داشته است. بررسی‌های میدانی نیز نشان می‌دهد که گسل‌ها و شکستگی‌های عرضی در محدوده مورد مطالعه از فراوانی بیشتری برخوردار می‌باشند. این نوع از شکستگی‌ها و گسل‌ها نقش کلیدی را در کنترل جهت‌گیری کلی جریان و انتقال آب ایفا می‌نمایند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که آبخوان کارستی منطقه را می‌توان تحت کنترل یک رژیم هیدرو تکتونیک خاص معرفی و تحلیل کرد.

کلمات کلیدی: آبخوان کارستی لیلی-کی‌نو، رژیم هیدرو تکتونیک، زون‌های گسله برشی، ساختارهای چین‌خورده تداخلی، گسل راندگی مفارون

مقدمه

(Andreo, 2007). ساختارهای چین‌خورده نیز می‌توانند نقش مهمی را بر روی هندسه آبخوان، میزان ذخیره آب‌برزمینی و الگوی جریان آب‌برزمینی و موقعیت جریان خروجی داشته باشند. بطور کلی، این ارتباط بین تمام ساختارهای زمین‌شناسی (چه گسله و چه چین‌خورده) در توسعه آبخوان‌های کارستی را می‌توان در قالب یک عنوان جدید بنام هیدرو تکتونیک مورد تحلیل قرار داد. در این ارتباط؛ در سال‌های اخیر تحقیقات قوت گرفته است بطوری که Charchi و همکاران (۲۰۱۰) در یکی از ابتدایی‌ترین بررسی‌ها نقش ساختارهای گسله را در تغذیه آبخوان کارستی حائز اهمیت دانستند. Ghafari (۱۳۹۰) به ارزیابی خصوصیات ساختاری حاکم بر کارستی شدن در منطقه کارستی شیمبار و تأثیر آن بر وضعیت آبدهی چشمه‌ها و کنترل جریان آب‌برزمینی در حوضه‌ابگیر آنها پرداخت. Mohammadibehzad (۲۰۱۶) روابط ساختارهای زمین‌شناسی (چین‌خوردگی با چین‌خوردگی، چین‌خوردگی با گسل و گسل‌خوردگی) را در ظهور چشمه‌ها و توسعه آبخوان‌های کارستی شمال شرق خوزستان مورد ارزیابی قرار داد. Herold و همکاران (۲۰۰۰) تأثیر ساختارهای تکتونیک را بر آهک‌های کارستی شده و آکی‌تاردهای مناطق کوهستانی سوئیس مورد مطالعه قرار دادند. یکی از تحقیقات جامع و ارزشمند در این زمینه توسط Ashjari and

در محیط‌های کارستی ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل تاقدیس، ناودیس و الگوی درزه‌های موجود در این ساختارها، سطوح لایه‌بندی، شدت چین-خوردگی، گسل‌ها و درزه‌های اصلی ارتباط عمودی و افقی را در ناحیه اشباع فراهم می‌کنند. بعضی از سطوح گسل‌ها ممکن است به علت فشردگی و یا پر شدن سطوح گسلی بوسیله کلسیت ثانویه تخلخل کمی داشته باشند و مانند سدی بر سر راه آب زیرزمینی قرار گیرند. گاهی اوقات گسل‌ها که باعث بریده شدن و جابجایی لایه‌ها می‌شوند موجب قرار گرفتن لایه‌های تراوا و ناتراوا در کنار یکدیگر می‌شوند که این نیز مانعی بر سر عبور آب است (Mohammadibehzad, 2016). گسل‌ها در مقیاس بزرگ و منطقه‌ای می‌توانند موجب انتقال آب از یک زون کارستی به زون کارستی دیگر شوند که در این صورت ممکن است یک زون کارستی با وجود داشتن شرایط لازم، به دلیل فرار آب از طریق گسل از پتانسیل بالایی برخوردار نباشد و برعکس یک زون کارستی در صورت نداشتن شرایط لازم به دلیل تغذیه از زون‌های مجاور که از طریق گسل صورت می‌گیرد، پتانسیل مناسبی داشته باشد. به هر حال نقش گسل در کنترل و انتقال آب‌برزمینی بسته به شرایط گسل و وضعیت منطقه تعیین‌کننده می‌باشد (Goldscheider and

سروک این منطقه شده است. توسعه دولین‌های متعدد در سطح این تاقدیس‌ها و ظهور یک چشمه به نام سوسن سرخاب با آبدهی فوق‌العاده بالا (متوسط ۲۰ مترمکعب بر ثانیه) و همینطور چشمه‌های نسبتاً پرآب دیگر همچون چشمه تنگ‌سرد و دره‌گول با آبدهی متوسط به ترتیب ۱/۲ و ۰/۳۵ متر مکعب بر ثانیه مؤید همین مطلب است.

روش کار

با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ شرکت ملی نفت ایران و تصویر ماهواره‌ای نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ترسیم شده است. با بکارگیری تکنیک‌های سنجش از دور، GIS و عملیات بارسازی تصویر و تفسیر چشمی، سیمای ساختاری گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌های محدوده مورد مطالعه از تصویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۲۰۰۲ استخراج گردید. همچنین در طی عملیات میدانی در منطقه چشمه‌ها شناسایی شدند. در این بازدیدها با استفاده از دستگاه مکان‌یاب ماهواره‌ای (GPS, Geographical Position System)، موقعیت مکانی و محل ظهور آن‌ها تعیین و از نظر لیتولوژیکی و ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مطالعات میدانی، در منطقه تغذیه چشمه‌های سوسن، تنگ‌سرد و دره‌گول ۴ ایستگاه جهت برداشت درزه و شکستگی تشکیل شد که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه با ترسیم دیاگرام گل‌سرخ امتداد درزه‌ها، نوع درزه‌های غالب در محدوده مورد مطالعه تعیین شد. در نهایت یک مدل از رژیم هیدروتکتونیکی ارائه شد.

بحث و بررسی

تکتونیک محدوده مورد مطالعه

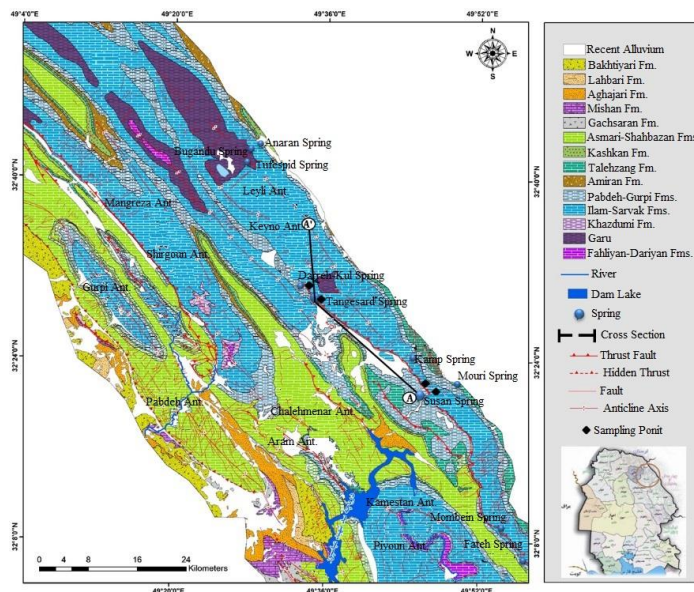
منطقه مورد مطالعه در بخش شمال‌غربی پهنه ایزه و شرق فروافتادگی دزفول در زون زمین ساختی زاگرس چین‌خورده واقع شده است. از دیدگاه تکتونیکی، ساختارهای منطقه مورد مطالعه بیشتر تناوبی از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موازی‌اند. مهم‌ترین حرکات تکتونیکی در منطقه، حرکات کوهزایی دوران سنوزوئیک (آلپین) می‌باشد که علاوه بر کاهش عمق محیط رسوب‌گذاری و تغییر جنس و ضخامت رسوبات و حتی خروج تمام یا بخش‌هایی از منطقه از آب، موجب چین‌خوردگی و توسعه شکستگی‌های متعدد در واحدهای سنگی شده‌اند و خردشدگی ناشی از عملکرد حرکات یاد شده نیز موجب توسعه تخلخل ثانویه و افزایش نفوذپذیری واحدهای سنگی شده است. تاقدیس لیلی نامتقارن و با لولاهای چندگانه می‌باشد که هم در عرض و هم در طول از کوهان‌هایی متصل تشکیل شده است. اثر محوری این چین مستقیم نبوده و در هر دو دماغه دارای پلانژ می‌باشد. از طرف دیگر بالایآمدگی این تاقدیس در نواحی شمال‌غربی نسبت به نواحی مرکزی و جنوب شرقی آن بیشتر است، بطوری‌که در آن ناحیه قدیم‌ترین رخنمون مربوط به سازند گرو می‌باشد در حالی‌که در ناحیه جنوب شرقی عمیق‌ترین رخنمون متعلق به سازندهای آهکی ایلام-سروک (متعلق به گروه بنگستان) است (Motiei, 1995). تاقدیس کی‌نو با یک وضعیت ساختمانی منحصر به فرد و طول محور حدود ۴۰ کیلومتر با روند محوری شمال‌غرب - جنوب شرق می‌باشد. این تاقدیس نسبت به سایر تاقدیس‌های محدوده مطالعاتی از خود چرخش‌های متعددی نشان می‌دهد. دماغه جنوب شرقی و تماماً یال شمالی این تاقدیس با دماغه جنوب شرقی و یال جنوبی تاقدیس لیلی با هم تداخل ساختاری (Interference) پیدا کرده است (شکل ۲) و دارای آرایش نردبانی (En-echelon) می‌باشد.

Raeisi (۲۰۰۶) بر روی ۷۲ تاقدیس کارستی در زاگرس انجام شده است. آنها در این مطالعه یک مدل مفهومی بر اساس هندسه تاقدیس‌ها و موقعیت جریان خروجی، برای تشریح جریان منطقه ارائه داده‌اند و تاقدیس‌ها را بر اساس ارتباط یا عدم ارتباط هیدرولیکی بین یال‌هایشان به دو گروه اصلی تقسیم بندی کرده‌اند. وضعیت زمین‌شناسی و تکتونیکی مهم‌ترین عوامل مؤثر و کنترل‌کننده در این طبقه‌بندی بوده است (Rubio et al., 2007). تأثیر تکتونیک بر فرایندهای هیدروژئولوژیکی و کارستی را در یک حوضه کارستی گسلی (گرابنی) مورد مطالعه قرار دادند. Gremaud و همکاران (۲۰۰۹) نقش ساختارهای زمین‌شناسی را بر فرایندهای تغذیه و زهکشی زیرزمینی در یک سیستم کارستی یخچالی در سوئیس مورد بررسی قرار دادند. Chihی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی رابطه بین ساختارهای تکتونیکی و توزیع هیدروژئوشیمیایی در آبخوانهای جنوب شرقی تونس پرداختند. لازم به ذکر است که مباحث مطرح شده در تمام این تحقیقات بطور کلی و بدون اشاره به عنوان یاد شده بوده است. پرداختن به این موضوع، می‌تواند به عنوان یک مرجع کارآمد برای اکتشافات آب‌زیرزمینی آینده برای محدود کردن این هدف و کاهش هزینه‌ها بسیار مفید واقع شود. در این تحقیق قصد بر این است تا با بررسی ارتباط بین ساختارهای زمین‌شناسی و تکتونیکی (ساختارهای چین‌خورده و گسلی)، نقش آنها در توسعه آبخوان کارستی لیلی-کی‌نو و به ویژه در ظهور چشمه‌های کارستی محدوده مورد مطالعه از دیدگاه هیدروتکتونیک مورد تحلیل قرار گیرد. در حقیقت، در این تحقیق این عنوان برای اولین بار در سطح ایران و حتی جهان با نگرشی ویژه در مورد آبخوان‌های کارستی مطرح و بسط داده می‌شود.

وضعیت عمومی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (تاقدیس‌های لیلی و کینو) در شمال شرق خوزستان و در حد فاصل طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی تا طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۲۶ دقیقه شمالی واقع شده است. این محدوده از لحاظ آب و هوایی غالباً تحت تأثیر جریان‌ات مدیترانه‌ای قرار دارد و بر اساس اقلیم نمای دومارتن جزء مناطق نیمه‌مرطوب تا مرطوب است و متوسط بارش سالانه در آن حدود ۱۰۸۴ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه آن ۹/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مرتفع‌ترین نقطه این تاقدیس تا بیش از ۳۷۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد (Karimi Vardanjani et al., 2018).

امتداد تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو شمال‌غرب - جنوب شرق بوده و از لحاظ چینه‌شناسی سازندهای رخنمون یافته در آن از قدیم به جدید شامل آهک‌های بسیار رسی گرو (کرتاسه)، آهک ایلام - سروک (کرتاسه فوقانی)، رسوبات شیلی - ماری و آهک ماری سازندهای پابده و گورپی (کرتاسه فوقانی - پالوسن) می‌باشد (شکل ۱). جزئیات لیتولوژی این سازندها توسط Darvishzadeh (۲۰۰۴) و Aghanabati (۲۰۰۶) شرح داده شده‌اند. تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو که هسته اصلی سازنده آنها تشکیلات آهکی ایلام-سروک می‌باشد، در بیشتر قسمت‌ها با هم ادغام شده‌اند (شکل ۱)، به‌طوری‌که تفکیک واحدهای آبدار کارستی آن‌ها از هم مشکل به‌نظر می‌رسد. لذا، در این مطالعه به‌نام آبخوان کارستی لیلی-کی‌نو معرفی می‌گردد. فعالیت‌های تکتونیکی، چین‌خوردگی و عملکرد گسل‌های طولی و عرضی موجب خردشدگی، افزایش نفوذپذیری و توسعه آبخوان کارستی در آهک‌های ایلام-

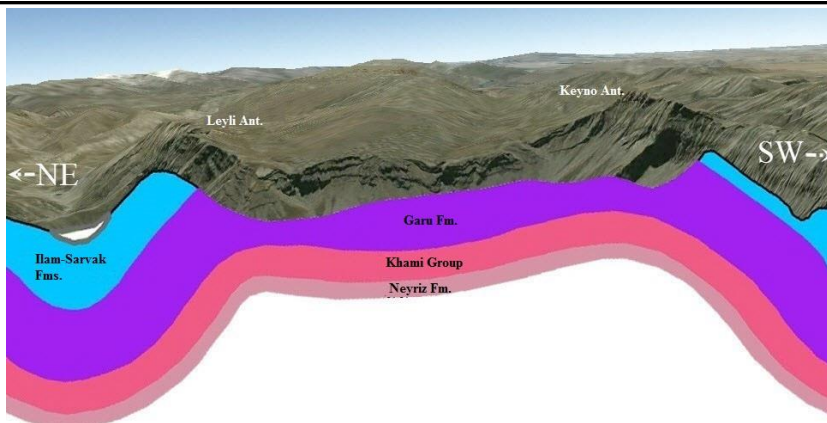


شکل ۱- نقشه زمین شناسی و موقعیت منطقه مورد مطالعه.
Fig. 1. Geological map and location of the study area.

محور آن‌ها نیز دچار انحنا شده‌اند، این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر تداخل ناشی از رشد چین‌ها، عامل دیگری نیز در شکل‌گیری آن‌ها مؤثر بوده است. مهم‌ترین عاملی که در این منطقه می‌توان ذکر کرد، پهنه برشی راست‌بر ایذه (با روند تقریبی شمالی- جنوبی) و دو گسل امتداد لغز چپ‌بر (با روند تقریبی شمال شرقی- جنوب غرب) مرتبط با پهنه برشی چپ‌بر بالارود که به عنوان شکستگی‌های P یک گسله اصلی در پی سنگ محسوب می‌شوند؛ می‌باشد (شکل ۴). عملکرد متقابل این سامانه‌های گسلی در تاقدیس‌های یاد شده سبب تغییر روند اثر محوری بخش مرکزی تاقدیس کی‌نو از شمال غرب به شمالی- جنوبی و همچنین مجموعه‌ای از گسل‌های فرعی با روندهای شمال شرقی- جنوب غربی، شمالی- جنوبی، شمال غربی- جنوب شرقی و شرقی- غربی و همین‌طور موجب توسعه دره‌های متعدد در جهت عمود بر محور تاقدیس‌ها شده است. در واقع مراحل تکاملی تداخل این دو تاقدیس را می‌توان اینگونه شرح داد: رشد چین‌ها در ابتدا به صورت آرایش نردبانی شروع شده و همزمان با آن تأثیر زون‌های گسله باعث خمش در محور تاقدیس کی‌نو شده و در نهایت دو تاقدیس در هم تداخل پیدا کرده‌اند. این مراحل در شکل ۳ نشان داده شده است.

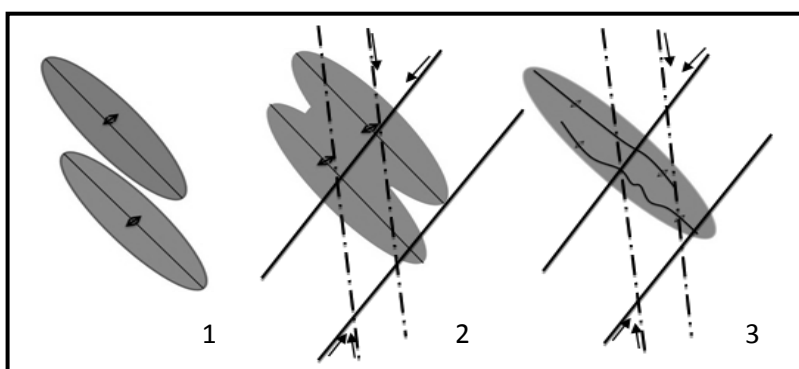
جهت پی بردن به نحوه فشارش و در نتیجه نوع رژیم تکتونیکی حاکم بر قسمت‌های مختلف لازم است ابتدا نحوه شکل‌گیری و ادغام تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو مشخص شود. Cosgrove و Price (۱۹۹۰) عقیده دارند چین‌هایی که در کمربندهای چین‌خورده تشکیل می‌شوند، با توجه به فاصله بین محورهای خود می‌توانند بر همدیگر تأثیر بگذارند. به این صورت که محور چین‌هایی که در کنار هم تشکیل می‌شوند، معمولاً نسبت به هم جابجایی به چپ یا راست دارند و حالت نردبانی از خود نشان می‌دهند. در این وضعیت، دو حالت وجود دارد (شکل ۳):

الف) اگر فاصله بین محور چین‌ها از نصف طول موج آنها کمتر باشد، نشان- دهنده این است که این چین‌ها در ادامه رشد خود به یکدیگر متصل شده و ساختار پیوسته‌ای ایجاد کرده‌اند. این پیوستگی با خمشی در محل اتصال دو چین همراه است و با این ویژگی می‌توان آنها را از چین‌های منفرد تشخیص داد. ب) اگر فاصله بین محور چین‌ها از نصف طول موج آنها بیشتر باشد، این چین‌ها نمی‌توانند به هم متصل شوند، ولی با ادامه رشد، به هم نزدیک می‌شوند و با هم‌پوشانی سبب ایجاد حالت نردبانی می‌شوند. در این مرحله، چین‌ها از رشد یکدیگر جلوگیری می‌کنند و به اصطلاح حالت قفل شدن (Lock up) رخ می‌دهد. علاوه بر تداخل بین تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو



شکل ۲- مقطعی از تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو که نشان‌دهنده ادغام این تاقدیس‌ها می‌باشد.

Fig. 2. A section of the Leylia and Keynow anticlines showing the merging of these anticlines.

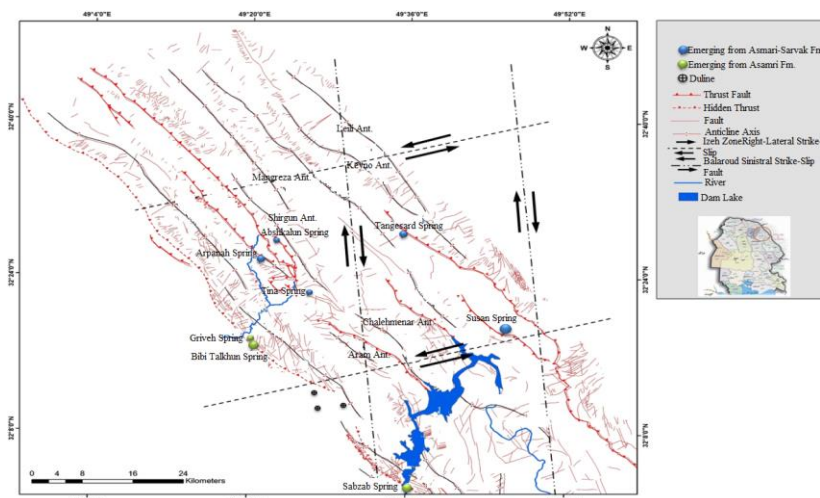


شکل ۳- مراحل ساختاری ادغام تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو.

Fig. 3. Structural steps of merging Leylia and Keynow anticlines.

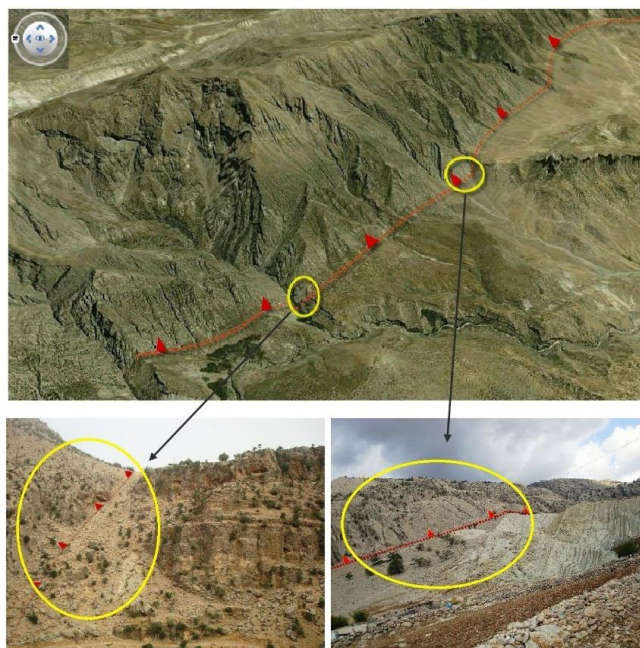
تاقدیس کی‌نو بر روی سازندهای پایده - گورپی کوه مالک و مدارون رانده شده‌اند. این امر باعث شده که شیب لایه‌های آهکی سازند ایلام- سروک در یال جنوب غربی تاقدیس کی‌نو به طور ناگهانی افزایش یابد و حتی در بعضی از قسمت‌ها نیز دچار برگشتگی شود (شکل ۵).

یکی دیگر از سیماهای تکتونیکی مهم در محدوده مورد مطالعه گسل معکوس مغارون با راستای شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد که دارای شیبی به سمت شمال شرق و درازای ۸۰ کیلومتر در غرب و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در راستای این راندگی سنگ‌های آهکی ایلام- سروک



شکل ۴- نقشه هیدروتکتونیک چشمه‌ها؛ در این نقشه عملکرد گسل‌های پهنه برشی راست‌بر ایذه (با روند شمالی- جنوبی) و دو گسل امتدادلغز چپ‌بر (با روند شمال شرق- جنوب غرب) مرتبط با پهنه برشی چپ‌بر بالارود بر منطقه و موقعیت ظهور چشمه‌ها به خوبی نشان داده شده است.

Fig. 4. Hydrotectonic map of springs. In this map, the performance of Izeh right lateral shear zone faults (with north-south trend) and two left lateral strike-slip faults (with northeast-southwest trend) related to the Balaroud left lateral shear zone on the region and the location of the springs are well illustrated.



شکل ۵-راندگی مفارون در غرب و جنوب غرب تاقدیس کینو.

Fig. 5. Mafaroun thrust in the west and southwest of the Keynow anticline.

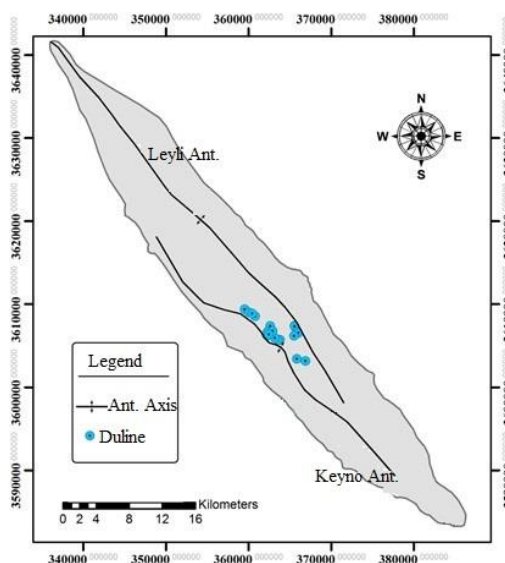
محور تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو توسعه یافته‌اند. دلیل اصلی این مطلب به توسعه درز و شکاف‌های کششی در بالاترین قسمت تاقدیس‌ها برمی‌گردد. جهت بررسی نقش شکستگی‌ها در توسعه این سیمای‌های کارستی پس از برداشت شکستگی‌ها، در محیط ARC GIS10 نقشه تراکم شکستگی‌ها تهیه شد (شکل ۷). همانگونه که در شکل ۷ قابل ملاحظه است، تراکم شکستگی‌ها در بخش میانی تاقدیس‌های یاد شده از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد که تا حدود زیادی با موقعیت دولین‌ها همخوانی دارد. بر این اساس، پیدایش این دولین‌ها را می‌توان به مسیر گسل‌ها، سیستم شکستگی به خصوص شکستگی‌های طولی (به موازات محور تاقدیس) و همچنین تقاطع شکستگی‌ها نسبت داد.

سیمای‌های کارستی منطقه

سیمای‌های کارستی موجود در منطقه مورد مطالعه را به دو دسته سطحی و عمقی می‌توان تقسیم کرد. مهم‌ترین سیمای‌های کارستی سطحی و عمقی به ترتیب دولین‌های موجود در سطح ارتفاعات تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو (شکل ۶) و همچنین چشمه‌های کارستی در پای یال آنها می‌باشند (شکل ۱) که با توجه به اینکه از لحاظ هیدروژئولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند، در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

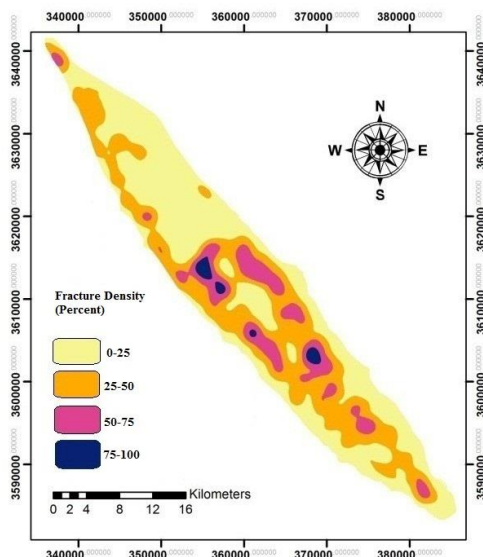
دولین‌ها

همانطور که در شکل ۶ قابل ملاحظه می‌باشد، دولین‌های موجود در منطقه مورد مطالعه از یک روند خطی برخوردار می‌باشند و تقریباً در امتداد



شکل ۶- موقعیت دولین‌های موجود در سطح تاقدیس‌های لیلی و کی‌نو.

Fig. 6. Position of the dolines on the surface of the Leylia and Keynow anticlines.



شکل ۷- نقشه تراکم شکستگیهای محدوده مورد مطالعه.

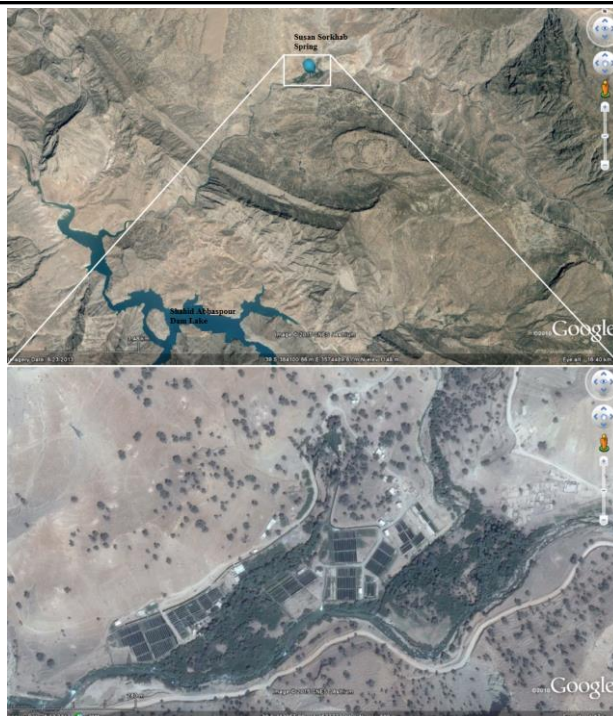
Fig. 7. Density map of fractures in the study area.

چشمه‌ها

چندین خروجی طبیعی از آبخوان کارستی لیلی - کی‌نو صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آنها چشمه کارستی سوسن سرخاب در روستای گردشگری سوسن سرخاب (شهرستان اندیکا، شمال شرق خوزستان) می‌باشد. این چشمه؛ در حقیقت بعنوان بزرگترین چشمه منطقه مورد مطالعه و بزرگترین چشمه ایران بحساب می‌آید (Karimivardenjani, 2013). موقعیت ظهور این چشمه در دماغه جنوبی تاقدیس کی‌نو قرار دارد که تقریباً از قسمت‌های میانی سازند نفوذناپذیر پایده- گورپی، در راستای راندگی مفارون ظهور یافته است. چشمه سوسن دارای چندین دهنه تخلیه است که دو دهنه اصلی آن بنام‌های ابراهیم مردان و چاله‌شه که مشخص و قابل رؤیت هستند، در ابتدای محل تخلیه و در فاصله حدود ۳۵۰ متری از هم قرار دارند و مابقی در زیر آب می‌باشند. بطوریکه با فاصله گرفتن از دودهنه یاد شده، بر میزان آبدهی چشمه افزوده می‌شود و این امر نشان می‌دهد که دهنه‌هایی به صورت پنهان از کف مسیر می‌جوشد و به آب چشمه اضافه می‌شود. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است از آب این چشمه برای حوضچه‌های پرورش ماهی که در مسیر آب چشمه احداث شده‌اند، استفاده می‌شود. چشمه سوسن با توجه به آبدهی بسیار زیادی که دارد یکی از سرچشمه‌های مهم رودخانه کارون (به‌عنوان سطح اساس کارست در منطقه) می‌باشد که پس از طی مسیر کوتاهی (حدود ۹ کیلومتر) به دریاچه سد شهید عباسپور می‌ریزد. متوسط، حداقل و حداکثر پارامترهای آبدهی و EC آب چشمه در طی چندین سال اخیر به ترتیب حدود ۲۴/۵، ۱۴/۹ و ۴۳/۸ مترمکعب بر ثانیه و ۴۹۸، ۳۴۰ و ۷۲۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد (Karimivardenjani, 2016). تیپ غالب آب این چشمه (بیکربناته- کلسیک) و نسبت کلسیم به منیزیم آن (بیشتر از ۳) نشان می‌دهد که آب این چشمه از یک سازند آهکی (سازند ایلام- سروک) با درصد خلوص آهک بالاتر تأمین می‌شود. میزان آبدهی زیاد این چشمه حاکی از پستوانه تغذیه‌ای خوب (بارش‌های مناسب از نوع باران و برف در فصل تر و در فصل خشک توده‌های مترکم برف که تا نیمه‌های تابستان ذوب آن طول می‌کشد) و کارست‌شدگی قابل ملاحظه آبخوان(های) تغذیه کننده این چشمه می‌باشد.

این به دلیل وجود چترواره‌هایی از دولین و حتی شافت‌های پنهان در سطح حوضه آبگیر چشمه (تاقدیس کی‌نو) می‌باشد که با توجه به ریزش‌های مناسب به‌ویژه از نوع برف و وجود شرایط یخچالی در این بخش از منطقه، مشارکت خوبی در تغذیه چشمه شکل داده است. همچنین با توجه به خردشدگی‌های شدید آهک‌های سازند ایلام- سروک تاقدیس کی‌نو ناشی از دو زون برشی ایذ و بالارود در این منطقه (شکل ۴)، شرایط برای نفوذ آب باران و آب‌های حاصل از ذوب برف بسیار مساعد می‌باشد.

خروجی‌های مهم دیگری در یال شمالی و جنوبی تاقدیس کارستی کی‌نو وجود دارند (شکل ۱) اما تمرکز ما در این تحقیق علاوه بر چشمه سوسن، بر روی دو چشمه مهم دیگر از آنها یعنی دره‌کول و تنگ سرد می‌باشد. چشمه دره‌کول که درون آهک‌های درز و شکاف‌دار سازند ایلام- سروک در یال جنوبی تاقدیس کی‌نو و در تنگ عمیق و باریک ظاهر شده، چشمه‌ای فصلی است به طوری که آبدهی آن در اواخر بهار و اوایل تابستان به بیش از ۰/۳۵ متر مکعب در ثانیه می‌رسد و در اواخر تابستان و اوایل پاییز تقریباً خشک می‌شود (شکل ۱۰). چشمه تنگ‌سرد نیز مانند چشمه دره‌کول از درون آهک‌های درز و شکاف‌دار سازند ایلام- سروک و با شیب لایه‌بندی بسیار زیاد ظاهر شده است و در دیواره شمالی تنگ عمیق به نام تنگ سرد در ارتفاع ۱۳۲۴ متر از سطح دریا قرار دارد. این چشمه، از نوع دائمی است به طور متوسط دارای آبدهی بیش از ۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. هر چند بخش اصلی آبدهی چشمه مربوط به دو دهنه بالایی می‌باشد، اما مظهر آن به صورت یک نقطه متمرکز نیست و آب آن از ۷ نقطه ظاهر می‌شود. نوع جریان در این چشمه غالباً از نوع کانالی می‌باشد (شکل ۱۰). با در نظر گرفتن حجم آب تخلیه‌ای توسط این چشمه‌ها و متوسط تخلیه چشمه سوسن؛ کل حجم آب تخلیه‌ای از حوضه کارستی کی‌نو، با وسعت قابل توجه این حوضه (حدود ۶۵۴ کیلومتر مربع) همخوانی ندارد. به بیان روشن‌تر؛ می‌توان گفت حوضه کارستی کی‌نو تقریباً دو سوم از حوضه آبگیر (سطحی) چشمه سوسن را در بر می‌گیرد. اما یک سوم دیگر، بر اساس همین بررسی‌ها می‌تواند به ورودی‌های زیرزمینی از حوضه کارستی مجاور (حوضه آبگیر زیرسطحی) ارتباط یابد.



شکل ۸- تصویری از چشمه سوسن و موقعیت آن نسبت به دریاچه سد شهید عباسپور (در نمایی دور) و حوضچه‌های پرورش ماهی (در نمایی نزدیک).

Fig. 8. Picture of Susan spring and its position in relation to Shahid Abbaspour dam lake (in distant view) and fish ponds (in close view).



شکل ۹- تصویری از آبراهه چشمه سوسن (دید عکس به سمت شمال شرق).

Fig 9- Picture of Susan springdrainage (photo view to the northeast).

میزان EC این چشمه پرآب در انتهای فصل خشک به ۷۲۵ میکروزیمنس بر سانتیمتر هم رسیده است و سبب شده تا تیپ غالب آب از بیکربناته - کلسیک به سولفات کلسیک - منیزیک تغییر یابد (Mohammadibehzad, 2016)، ارتباط هیدروژئولوژیکی بین دو یال تاقدیس کی‌نو در بعضی قسمت‌های آن با توجه به ارتفاع بالای سازند نفوذناپذیر گرو در هسته تاقدیس برقرار نمی‌باشد (Mohammadibehzad, 2016).

بطوری‌که آب‌زیرزمینی در یال شمالی به موازات محور تاقدیس جریان می‌یابد و در محل‌هایی توسط گسل‌ها و درزه‌های عرضی و متقاطع در نزدیکی منطقه پلانچ که هسته نفوذناپذیر در عمق‌های پایین‌تر قرار دارد به یال جنوبی انتقال می‌یابد.

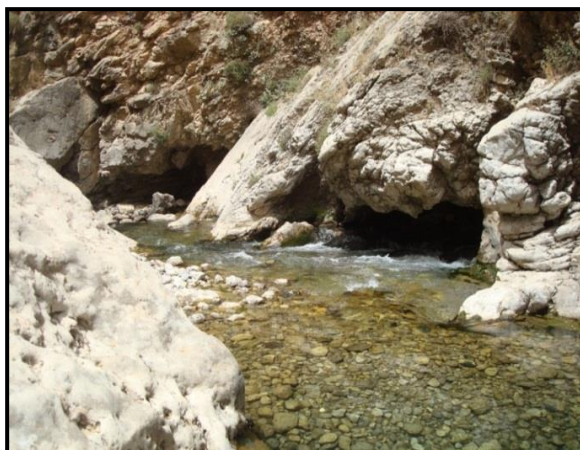
شواهد هیدروتکتونیکی ذیل نشان می‌دهد، چشمه سوسن از لحاظ مورفولوژیکی در رده چشمه‌های کنتاکی- گسلی قرار دارد و مهم‌ترین تخلیه کننده حوضه کارستی لیلی- کی‌نو بحساب می‌آید: (۱) این چشمه در پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوضه کارستی ظهور یافته است و این نقطه به عنوان سطح اساس کارستی شدن برای این حوضه می‌باشد، (۲) در دماغه جنوبی تاقدیس کی‌نو و در درون بخش میانی سازند (نفوذناپذیر) پابده-گورپی بدلیل شدت خردشدگی (زون خردشده) ناشی از عملکرد گسل راندگی مفارون، چشمه ظهور یافته است. در واقع عملکرد این گسل مرز لیتولوژیکی را تحت تأثیر قرار داده است و با نفوذپذیر کردن بخشی زیادی از سازند پابده - گورپی، موقعیت ظهور چشمه را تغییر داده است. بدین ترتیب ظهور چشمه در این موقعیت، نتیجه دو عامل لیتولوژیکی و تکتونیکی است که سطح اساس کارست را کنترل نموده‌اند. همین عامل سبب شده است تا شیمی آب چشمه متأثر از لایه‌های ژیبسی و مارن‌های منیزیم‌دار گردد. بطوری‌که حداکثر

بررسی هیدروتکتونیک آبدی چشمه‌های اصلی منطقه مورد

مطالعه

اغلب چشمه‌های آبخوان کارستی لیلی- کی‌نو در امتداد گسل معکوس مفارون و همچنین تحت تأثیر عملکرد گسل‌های پی‌سنگی ظاهر شده‌اند. با توجه به موقعیت گسل مفارون که گسلی با ساز و کار معکوس می‌باشد، عملکرد آن باعث شده است تا سازند ایلام- سروک در مقابل سازند نفوذناپذیر پابده - گورپی قرار گیرد، و یک سد هیدرولیکی به موازات گسل یاد شده ایجاد شود. این موضوع در بخش بعد به خوبی توضیح داده شده است. همچنین دره‌های کارستی که این دو چشمه را در خود جای داده‌اند، ناشی از ایجاد شکستگی‌های R ، R' و P زون‌های برشی ایذه و بالارود می‌باشند (شکل ۱۱). بررسی‌های میدانی در محدوده تنگ سرد و دره‌کول عملکرد قطعه گسلی را با امتداد تقریبی $N60W, 70NE$ را اثبات می‌کند که تا تنگ دره‌کول نیز قابل پیگیری است. آثار این گسل به صورت خش لغزشی با جابجایی شیب‌لغز و همچنین زون‌های خردشده در مظهر چشمه تنگ سرد به خوبی دیده می‌شود (شکل ۱۲). این گسل، شاخه فرعی گسل

مفارون می‌باشد که در اثر عملکرد آن، آب‌های زیرزمینی موجود در آبخوان لیلی- کی‌نو که به سد هیدرولیکی ناشی از عملکرد گسل مفارون برخورد کرده است، راهی به سطح زمین پیدا کرده و در نهایت، به همراه آب هدایت شده از مجاری بالاتر به صورت چشمه‌ای نسبتاً پرآب در محدوده تنگ سرد ظاهر شده است. اصلی‌ترین چشمه منطقه یعنی چشمه سوسن در ارتباط با چند شاخه از این گسل در بخش میانی سازند نفوذناپذیر پابده - گورپی ظهور نموده است. در حقیقت می‌توان گفت که این راندگی کنترل‌کننده سطح اساس کارستی شدن در ارتباط با آبخوان کارستی لیلی کی‌نو است. در شکل ۱۳ نقش راندگی مفارون در ظهور چشمه‌های پرآب آبخوان کارستی لیلی- کی‌نو همراه با تقادیس‌های مجاور لیلی و کی‌نو در غالب یک تصویر سه بعدی که در نرم‌افزار Auto CAD 2007 تهیه شده، ارائه گردیده است. وضعیت هیدروتکتونیک چشمه سوسن (به‌عنوان چشمه اصلی آبخوان لیلی- کی‌نو) کمی متفاوت از سایر چشمه‌ها می‌باشد که در بخش بعد بطور کامل توضیح داده شده است.



شکل ۱۰- چشمه دره‌کول (سمت راست) و تنگ‌سرد (سمت چپ) در آبخوان کارستی لیلی- کی‌نو.

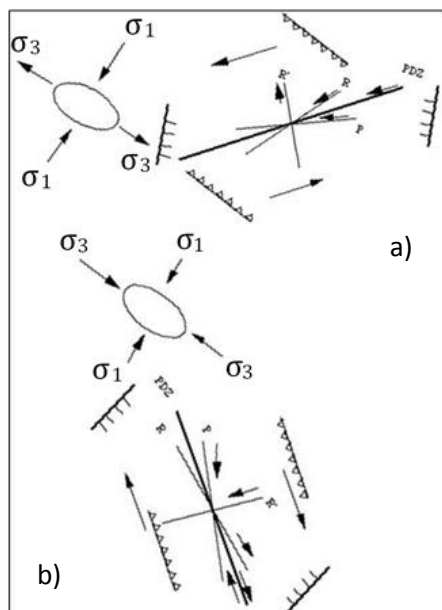
Fig. 10. Dare-kool (right) and Tange-Sard (left) springs in the Leylia - Keynow karst aquifer.

در محدوده چشمه‌های تنگ سرد و دره‌کول لایه‌های آهکی ایلام- سروک دارای لایه‌بندی با امتداد $N30W, 80SW$ می‌باشد. بررسی درزه‌های موجود در محدوده تنگ سرد نشان می‌دهد، که این درزه‌ها را بر مبنای موقعیت و روند، به چهار دسته می‌توان تقسیم بندی نمود (شکل ۱۵):

الف- دسته ۱ با روند $N55E$ تا $N65E$ که تقریباً عمود بر امتداد لایه‌بندی و با توجه به روند کلی چین‌خوردگی منطقه، جزء درزه‌های عرضی محسوب می‌شوند.

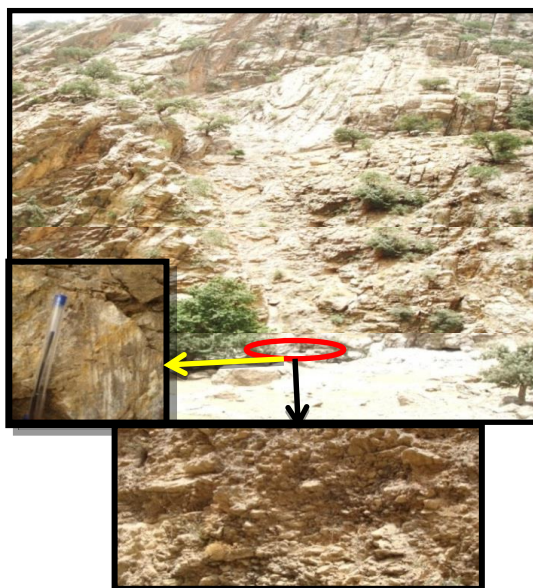
ب- دسته ۲ با روند $N20E$ تا $N30E$ ، بر اساس روند چین‌خوردگی جزء درزه‌های مورب به حساب می‌آیند، ج- دسته ۳ با روند $N45W$ تا $N60W$ ، با توجه روند چین‌خوردگی منطقه از نوع درزه‌های طولی هستند، و د- دسته ۴ با روند $N80E$ تا $N90E$ همانند درزه‌های دسته ۲، درزه‌های مورب محسوب می‌شوند.

جهت شناخت دقیق‌تر نقش ساختارهای زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه اقدام به بررسی درزه‌های موجود در محدوده تنگ‌سرد و دره‌کول گردید. بر اساس این بررسی‌ها درزه‌های موجود در محدوده تنگ سرد را می‌توان دو دسته سیستماتیک (شکستگی‌هایی که به نسبت موازی هستند و از فاصله‌بندی منظمی برخوردار هستند) و غیرسیستماتیک (درزه‌هایی که در جهات نامنظمی به هم می‌رسند و یکدیگر را قطع نمی‌کنند) تقسیم‌بندی نمود (شکل ۱۴). درزه‌های غیرسیستماتیک در منطقه مورد مطالعه که نسبت به درزه‌های سیستماتیک از بازشدگی و طول به مراتب کمتری برخوردار هستند، اهمیت (نسبی) کمتری را در نفوذ و هدایت جریان آب دارند. البته باید اضافه کرد که این درزه‌ها به نوبه خود موجب افزایش تراکم درزه‌ها در واحد سطح گشته و به همین دلیل باعث افزایش نفوذ آب به درون آبخوان می‌گردند. علاوه بر آن، درزه‌های غیرسیستماتیک با ایجاد کانال‌های ارتباطی بین درزه‌های سیستماتیک می‌توانند نقش مهمی را در جریان آب ایفا کنند.



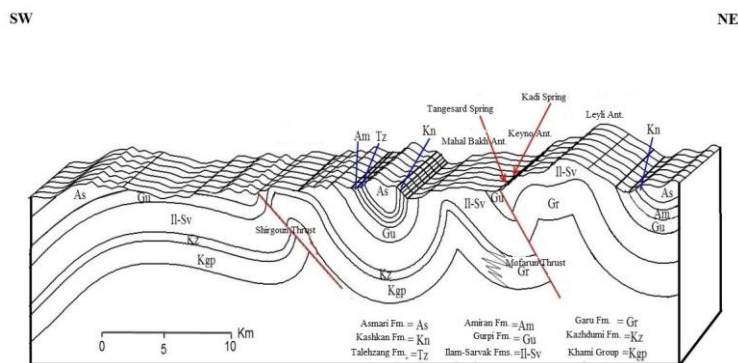
شکل ۱۱- الگوی هندسی سیستم شکستگی های ریدل R، R' و P گسل های امتداد لغز چپ بر بالارود (a) و راست بر ایذه (b).

Fig. 11. Geometric pattern of Riedel fractures system R, R' and P of Balaroud left lateral strike-slip faults (a) and Izeh right lateral (b).



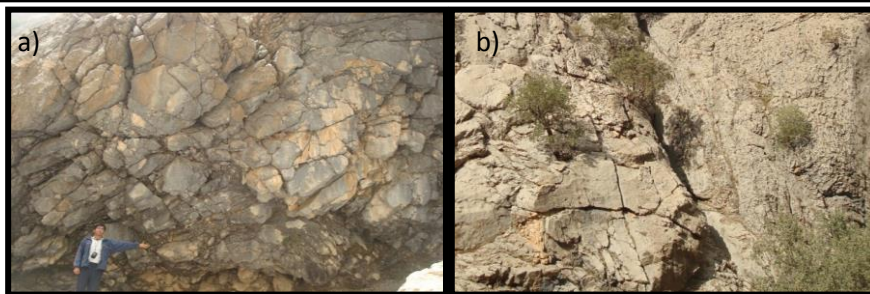
شکل ۱۲- عملکرد گسل مفاورون در محدوده چشمه تنگ سرد همراه با خردشدگی و خش گسلی.

Fig 12. Effect of Mafaroun fault in the area of Tang-sard spring with fragmentation and faulting striation.



شکل ۱۳- مدل سه بعدی از ساختارهای زمین شناسی (شامل تاقدیس ها و راندگی های) موجود در منطقه مورد مطالعه که در ظهور چشمه های تنگ سرد و دره کولنقش کلیدی داشته اند.

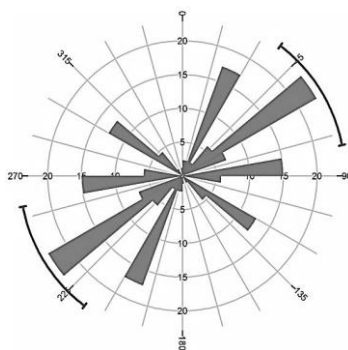
Fig.13. Three-dimensional model of geological structures (including anticlines and thrusts) in the study area which have played a key role in the appearance of Tange-Sard, and Dare-kool springs.



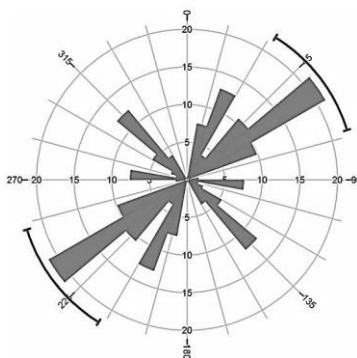
شکل ۱۴- نمونه‌ای از درزه‌های سیستماتیک (a) و غیر سیستماتیک (b) در چشمه تنگ سرد.
 Fig. 14. An example of systematic (a) and non-systematic (b) joints in Tange-Sard spring.

این چشمه‌ها بالا باشد. در این حالت زمان ماندگاری آب کم بوده و به تبع آن غلظت املاح باید کمتر باشد. ولی شکستگی‌های طولی میزان نفوذپذیری را در کل منطقه افزایش می‌دهند و در هدایت آب نقش تعیین کننده‌ای ندارند و زمان ماندگاری آبی که وارد این مجاری می‌شود تا رسیدن به محل تخلیه چشمه بیشتر بوده و در نتیجه املاح آب باید بالا باشد (Sahebdel, 2009). این نوع از شکستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه فراوانی چندانی ندارند (کمتر از ۱۵ درصد). این موضوع، به کمک شاخص اشباع (Saturation Index) مورد تأیید قرار گرفت و مشخص گردید که آب هر سه چشمه نسبت به کانی کلسیت تحت اشباع می‌باشند (Karimi Vardanjani, 2016) که نشان می‌دهد سرعت جریان ناشی از توسعه شکستگی‌ها در حوضه‌های آبگیر این چشمه‌ها و بعلاوه نوع شکستگی‌ها و میزان بازشدگی آن‌ها بالا می‌باشد.

بررسی درزه‌های موجود در محدوده چشمه سوسن نیز نشان می‌دهد، که این درزه‌ها را بر مبنای موقعیت و روند، به سه دسته اصلی می‌توان تقسیم بندی نمود:
 الف- دسته ۱ با روند N50E تا 60E، جزء درزه‌های عرضی هستند، ب- دسته ۲ با روند N45W تا N60W، از نوع درزه‌های طولی می‌باشند، و ج- دسته ۳ با روند N15E تا N30E جزء درزه‌های مورب محسوب می‌شوند. همانطور که در شکل ۱۵ مشخص می‌باشد، بیش از ۳۰ درصد شکستگی‌های محدوده چشمه‌های تنگ سرد و دره کول از نوع عرضی هستند. همچنین در محدوده چشمه سوسن این نوع از شکستگی‌ها بیش از ۴۰ درصد کل شکستگی‌ها می‌باشند (شکل ۱۶). بر این اساس می‌توان گفت که در حالت کلی شکستگی‌های محدوده هر سه چشمه غالباً از نوع هدایت کننده آب هستند. با توجه به وضعیت تشکیل شکستگی‌های عرضی نسبت به محور چین و لایه‌بندی و همچنین نقش شکستگی‌های عرضی در کنترل جهت کلی جریان درون کارست می‌توان گفت سرعت انتقال باید در حوضه آبگیر



شکل ۱۵- دیاگرام گل سرخی شکستگی‌های دره‌های تنگ سرد و دره کول.
 Fig. 15. Rose diagram of fractures in the Tange-Sard, and Dare-kool springs.



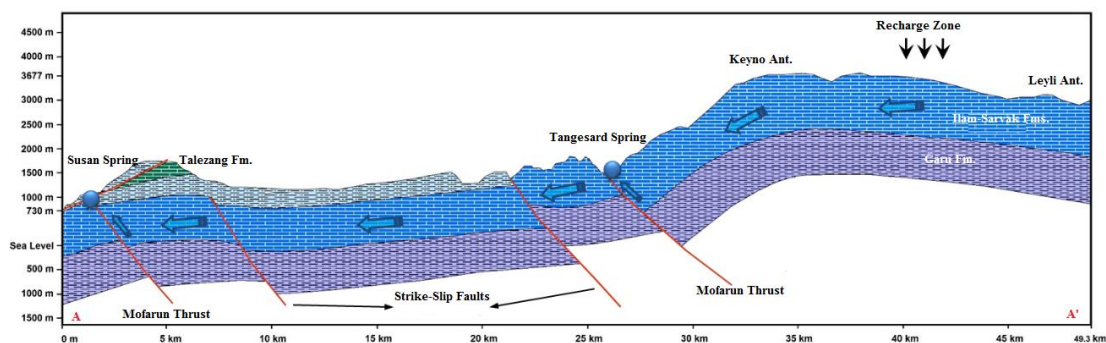
شکل ۱۶- دیاگرام گل سرخی شکستگی‌های دره چشمه سوسن.
 Fig. 16. Rose diagram of fractures in the Susan spring.

مدل هیدروتکتونیکی آبخوان کارستی لیلی - کینو

همانطور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، چشمه سوسن مهم‌ترین خروجی آبخوان لیلی - کینو می‌باشد و از آنجا که اغلب آب‌های این آبخوان از این چشمه زهکشی می‌شود بنابراین مدل هیدروتکتونیکی مبتنی بر وضعیت تغذیه و تخلیه این چشمه طراحی شده است.

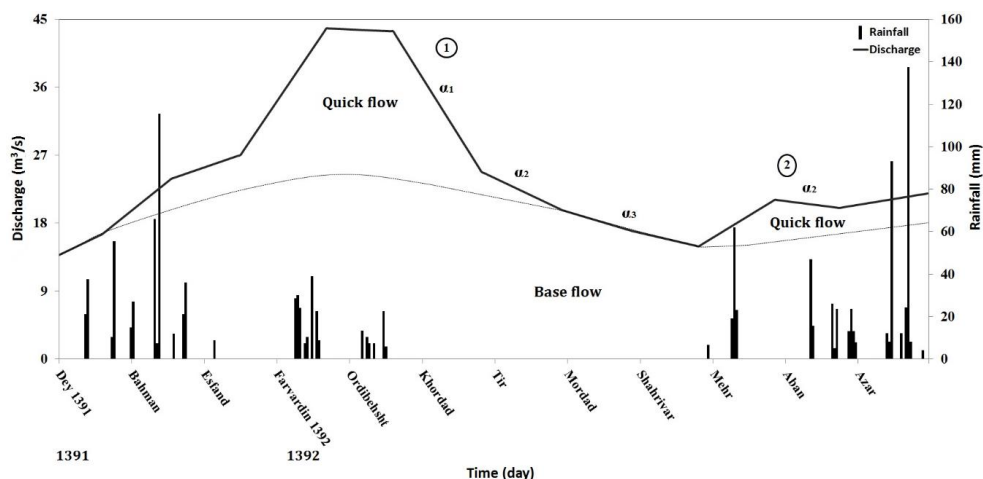
روند تغذیه چشمه سوسن بدین ترتیب است که در ابتدا جریان آب‌های تغذیه‌ای از دامنه جنوبی کوه کی‌نو و همینطور دامنه شمالی کوه محال‌باخ که توسط گسل‌های کشتی با یکدیگر در ارتباط هستند، به طرف موقعیت چشمه سوسن هدایت می‌شوند. بخشی از این آب‌ها که در عمق کم چرخش دارند در امر تغذیه چشمه تنگ سرد مشارکت می‌کنند. این موضوع، در مقطع شماتیک هیدروتکتونیکی شکل ۱۷ به خوبی نشان داده شده است. اما بخش اعظم این آب‌ها که به صورت جریان‌های عمیق چرخش می‌یابند، به سمت چشمه سوسن هدایت می‌شوند. بر مبنای بررسی هیدروگراف این چشمه (شکل ۱۸) بنظر می‌رسد این آب‌ها بلافاصله از چشمه تخلیه نمی‌شوند و به مخزن (احتمالی) بزرگی که در فاصله کمی از موقعیت ظهور چشمه در نزدیکی دماغه تاقدیس کی‌نو (و قبل از مرز لیتولوژیکی آن یعنی سازند پابده - گورپی) قرار دارد، وارد می‌شوند. پس از پر شدن مخزن که با فاصله زمانی حداقل دو هفته بطول می‌انجامد، آب‌های مزبور فرصت می‌یابند

تا از طریق چشمه سوسن تخلیه شوند (Mohammadibehzad, 2016). لازم به توضیح است که آب‌های انتقالی از بیشتر قسمت‌ها می‌توانند توسط گسل راندگی مفارون به موقعیت چشمه سوسن هدایت شوند. از طرف دیگر، آب‌های تغذیه‌ای که از نقاط دور دست حوضه (دامنه شمالی کوه لیلی - کی‌نو و دامنه جنوبی کوه محال‌باخ) در جریان هستند با فاصله زمانی طولانی‌تری در امر تغذیه چشمه مشارکت می‌کنند. این آب‌ها نیز در انتهای مسیر توسط گسل راندگی مفارون به طرف مخزن اصلی هدایت می‌شوند. در حقیقت، گسل راندگی مفارون به همراه سازند نفوذناپذیر پابده - گورپی (که بر اثر شدت فعالیت گسل یاد شده تا قسمت‌های میانی نیز نفوذپذیر گشته است) در موقعیت دماغه جنوبی تاقدیس لیلی - کی‌نو، بعنوان مانع هیدرولیکی عمل نموده و آب‌های انتقالی را به سطح اساس کارست هدایت می‌کنند. بطوریکه این آب‌ها پس از عبور از عرض سازند یاد شده (که از لایه‌های شیل، مارن - های منیزیم‌دار و لایه‌های ژیبسی تشکیل شده است)، در قسمت‌های میانی آن بالا آمده و در چندین نقطه از آن ظاهر می‌شوند و خروجی چشمه سوسن (چه بصورت نمایان و چه بصورت پنهان و نامعلوم) را تشکیل می‌دهند. از همین رو در زمان‌هایی که حجم آب‌های تغذیه‌ای به مخزن چشمه کاهش می‌یابد، فرصت کافی برای اثرپذیری این آب‌ها از لایه‌های مخرب سازند یاد شده بوجود می‌آید و بدنبال آن میزان املاح آب چشمه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷- مقطع شماتیک هیدروتکتونیکی از روند تغذیه چشمه کارستی سوسن، نماینده آبخوان کارستی لیلی - کینو.

Fig. 17. Hydrotectonic schematic section of the feeding process of Susan karst spring, representative of Leylia - Keynow karst aquifer.



شکل ۱۸- هیدروگراف روزانه، منحنی‌های فرود و تفکیک جریان پایه و سریع آبخوان کارستی چشمه سوسن از ابتدای دی ۱۳۹۱ تا انتهای آذر ۱۳۹۲ (اطلاعات مربوط به آبدی چشمه سوسن از Karimi Vardanjani و همکاران (۲۰۱۳) برگرفته شده است.

Fig. 18. Daily hydrograph, curves of base and rapid flow of karst aquifer of Susan spring from the beginning of January 2012 to the end of December 2013 (Information about the flow of Susan spring is taken from the Karimi Vardanjani et al. (2013).

نتیجه گیری

امر منجر به ظهور چشمه با آبدهی فوق العاده بالا بنام چشمه سوسن و همینطور چشمه های با آبدهی نسبتاً بالا از جمله چشمه تنگ سرد و چشمه دره کول در راستای این راندگی شده است. در محدوده این چشمه ها غالب شکستگی ها از نوع عرضی می باشند که کنترل کننده جهت کلی جریان در این حوضه های آبخیز چشمه ها می باشند. در مجموع بررسی مدل هیدروتکتونیک آبخوان کارستی لیلی- کینو نشان می دهد که بخش اعظم آب های ورودی به این آبخوان (تغذیه ای) در امتداد راندگی مفارون توسط چشمه سوسن تخلیه می شود. جریان های ناحیه ای و عمیقی هدایت کننده آب های گردشی در حوضه آبخیز این چشمه تحت تأثیر شکستگی های ناشی از دو زون مهم در منطقه بنام های زون برشی های ایزه و بالارود در امر تغذیه و تخلیه آن دخالت دارند. تهیه این مدل و تحلیل هیدروتکتونیک در برنامه ریزی های آینده می تواند به عنوان یک مرجع کارآمد برای اکتشافات آب زیرزمینی آینده برای محدود کردن اهداف اکتشاف بسیار مفید و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مقاله از حمایت های مالی صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.EG98.613) در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را می نمایند.

تاقدیس های لیلی و کی نو نسبت به سایر تاقدیس های محدوده مطالعاتی از خود خمش های متعددی نشان می دهند. همچنین دماغه جنوب شرقی و تماماً یال شمالی تاقدیس کی نو با دماغه جنوب شرقی و یال جنوبی تاقدیس لیلی بر اثر تداخل ساختاری با هم ادغام شده اند و دارای آرایش نردبانی می باشد. دلیل این مطلب به رشد چین ها و همچنین عملکرد گسل های پی- سنگی پهنه برشی ایزه و پهنه برشی بالارود ناشی از آن برمی گردد. فعالیت های تکتونیک منطقه بصورت تداخل تاقدیس ها و گسل خوردگی شدید در آهک های سازند ایلام- سروک این تاقدیس ها، یک زون کاملاً خرد شده را به وجود آورده که همراه با انحلال منجر به توسعه آبخوان کارستی و رژیم هیدروتکتونیک در این ناحیه شده است. تشکیل دولین های متعدد در ارتفاعات تاقدیس های یاد شده مؤید همین مطلب است. همخوانی موقعیت این دولین ها با تراکم شکستگی ها و همچنین روند خطی آن ها که تا حدود زیادی از محور تاقدیس ها تبعیت می کنند، نشان دهنده تأثیر مسیر گسل ها، سیستم شکستگی به خصوص شکستگی های طولی (به موازات محور تاقدیس) و همچنین تقاطع شکستگی ها در توسعه این سیمای کارستی می باشد. یکی دیگر از سیمای تکتونیک مهم در محدوده مورد مطالعه راندگی مفارون می باشد که موجب افزایش ناگهانی شیب لایه های آهکی سازند ایلام- سروک در یال جنوب غربی تاقدیس کی نو شده است. با توجه به مکانیسم فشارشی این گسل و همچنین قراردادن آبخوان لیلی- کی نو در مقابل سازند نفوذ ناپذیر پابده- گورپی یک سد هیدرولیکی ایجاد شده که این

منابع

- Aghanabati, A., 2006. The geology of Iran. Geological Survey and mineral exploration of Iran Publication, p. 586 (in Persian).
- Ashjari, J., Raeisi, E., 2006. Anticline structure influences on regional flow, Zagros, Iran. Journal of Cave and Karst Studies 68 (3), 119-127.
- Charchi, A., Kalantari, N., Keshavarzi, M.R., 2010. Assessment of Ovid karstic aquifer, SE Khouzestan. Researchs in Earth Sciences 1, 84-96 (in Persian with English abstract).
- Chihi, H., De Marsily, G., Belayouni, H., Yahyaoui, H., 2015. Relationship between tectonic structures and hydrogeochemical compartmentalization in aquifers: Example of the "Jeffara de Medenine" system, south-east Tunisia. Journal of Hydrology: Regional Studies 4, 410-430.
- Darvishzadeh, A., 2004. The Geology of Iran, Amirkabir Publications, p. 434 (in Persian).
- Ghafari, H., 2011. Effects of tectonic structures in the development of karstic springs of Shirn-Bahar area. M.Sc Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Gremaud, V., Goldscheider, N., Savoy, L., Favre, G., Masson, H., 2009. Geological structure, recharge processes and underground drainage of a glacierised karst aquifer system, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps. Hydrogeology Journal 17, 1833-1848.
- Herold, T., Jordan, P., Zwahlen, F., 2000. The influence of tectonic structures on karst flow patterns in karstified limestones and aquitards in the Jura Mountains, Switzerland. Eclogae Geologicae Helvetiae 93(3), 349-362.
- Karimi Vardanjani, H., 2016. Investigation of hydrochemical features in Keynow anticline; Emphasize on isotope characteristics of water resources. Ph.D Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Mohammadibehzad, H.R., 2016. Investigation of charge sources of karst aquifers in northeastern Khouzestan province; using physico-chemical parameters and stable isotopes. Ph.D Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Mohammadibehzad, H.R., Charchi, A., Kalantari, N., 2015. Investigation of hydrogeological behavior of Sabzab karst spring, northeast of Khouzestan Province. Advanced Applied Geology 15, 10-19 (in Persian with English abstract).
- Mohammadibehzad, H.R., Kalantari, N., Biglari, B., Torabi, K., 2016. Investigation of the source of salinity of Zohreh River downstream of Chamshir-dam and its capability for agricultural use. Advanced Applied Geology 21, 73-84 (in Persian with English abstract).
- Motiei, H., 1995. Petroleum Geology of Zagros, Geological Survey of Iran Publication, p. 1009 (in Persian).
- Price, N., Cosgrove, J., 1990. Analysis of Geological Structures. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rubio, J. C., Simon, J. L., Soriano, M. A., 2007. Interacting tectonics, hydrogeology and karst processes in an intramontane basin: the Jilocagraben (NE Spain), Hydrogeology Journal 15, 1565-1576.

- Sahebdel, M., 2009. Hydrochemical assessment of karst in Shirin-Bahar area. M.Sc Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Vardanjani, H.K., Chitsazan, M., Ford, D., Karimi, H., Charchi, A., 2018. Initial assessment of recharge areas for large karst springs: A case study from the central Zagros Mountains, Iran. Hydrogeology Journal 26(1), 57-70.

