

Estimation the annual recharge of Gonabad Plain qanats using isotopic methods

Hojat Mirani Moghadam¹, Gholam Hossein Karami^{1*}, Rahim Bagheri¹

1- Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Keywords: Qanat, Stable isotope, Recharge elevation, Recharge origin

1-Introduction

Qanats are an essential method for the exploitation of groundwater in arid and semi-arid regions. There are 26 qanats in the Gonabad Plain, from which 19.5 million cubic meters of groundwater are annually extracted, whose discharge rates vary from 10 to 120 lit/s. According to archaeological investigations, some of the qanats in Gonabad plain date back to 2700 years ago. However, few hydrogeological studies have been conducted on qanats. Isotope analyses can be employed to create a conceptual hydrogeological model. Isotope composition of groundwater gives essential information about groundwater recharge origin, recharge time, water-rock interactions, and the mixture of different groundwater bodies (Zabala et al., 2015; Vallejos et al., 2015; Ben Musa et al., 2014; Hamed et al., 2014; Hamed and Dhahri., 2013; Pu et al., 2013; Kandu et al., 2012; Wu et al., 2009; Kohfahl et al., 2008). Environmentally stable isotopes, especially ¹⁸O and ²H values, act as highly valuable tracers of regional-scale hydrogeological processes (Paternoster et al., 2008; Clark and Fritz, 1997; Herczeg et al., 1997; Liotta et al., 2013; Mazor, 1991; Kendall and McDonnell, 1998). Isotopic composition changes along groundwater flow paths show the origin and occurrence of different geochemical and mixing processes. By taking into account the amount and isotopic content of rainfalls during a year, the probable processes controlling groundwater recharge can be determined (Gat, 1996; Gat and Airey, 2006; Ladouche et al., 2009; Dindan et al., 2003; Tsujimura et al., 2007; Ako Ako et al., 2012).

This study uses isotopic characteristics to determine the groundwater's annual recharge and recharge origin of the significant qanats of Gonabad Plain (Table 1).

Table 1. The characteristics of the major qanats of Gonabad Plain.

Qanat	Mother well depth (meter)	Length (kilometer)	Discharge (l/s)
Qasabeh	340	33	118
Rahn	260	28	14
Bahabad	170	12.5	25
Kheshuie	170	14	36
Baidokht	145	18	27
Dizagh	144	10	56

2-Methodology

The discharge of the selected qanats was measured from October 2016 to December 2017. The most amount of discharge took place in August, and the lowest amount took place in November. Twelve groundwater samples were taken from them on two different periods (November 2016; the dry period) and August 2017 (the wet period) to study the isotopic composition of the groundwater of these qanats (¹⁸O and ²H). Rainwater samples were collected from four rain gauge stations (Fig. 1) at different altitudes (ranging from 1100 to 2400 m a.s.l) from January to May 2017 to determine the isotopic content of precipitations in Gonabad Catchment.

3- Results and discussion

*Corresponding author: g.karami@shahroodut.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2020.31413.2050

Received 2019-10-22

Accepted 2020-06-12

In the study area, six major qanats, namely, Qasabeh, Baidokht, Rahn, Kheshuie, Dizagh, and Bahabad, are supplying water for potable and irrigation uses during the past centuries (Fig. 1). The annual recharge amount and water origin is the main dilemma. At first, the general isotopic composition of these Qanats and precipitation is discussed. Later the origin of the water and the recharge amount of Qanats related to the precipitation of the water year 2016-2017 was determined.

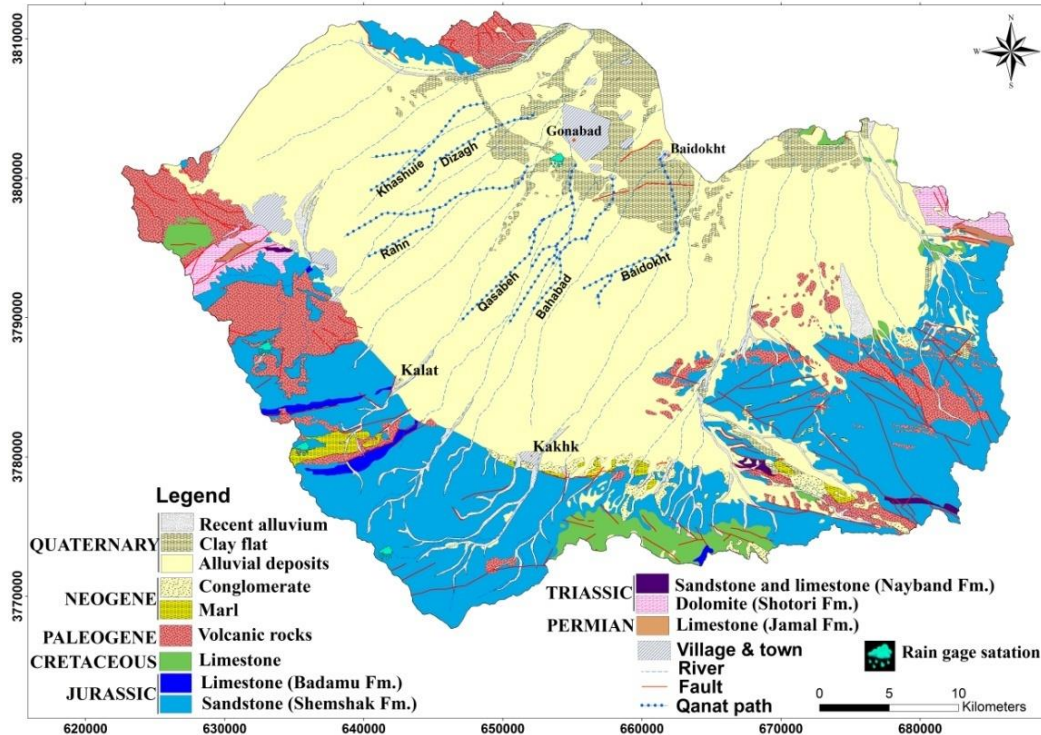


Fig.1. Geological map of Gonabad Basin and the path of major qanats.

3-1- Isotope geochemistry and water origin

The monthly stable isotopic ratios of the precipitation at the four locations ranged from -9.15‰ to -3.22‰ for $d^{18}\text{O}$ and from -50.63‰ to -11.08‰ for $d\text{D}$ during the observation period showing spatial variations with lower values in the mountains and higher values in the plain.

There were apparent differences in hydrogen and oxygen isotope values between the groundwater samples of the qanats in the dry and wet periods. Generally, wet period samples were depleted in $d^{18}\text{O}$ and $d\text{D}$ (ranging from -6.37‰ to -4.91‰ for $d^{18}\text{O}$ and from -49.87‰ to -46.22‰ for $d\text{D}$), compared to dry period groundwater samples (ranging from -8.35‰ to -7.47‰ for $d^{18}\text{O}$ and from -51.26‰ to -46.02‰ for $d\text{D}$). The stable isotopic compositions of the groundwater and precipitation show that the groundwater of these qanats mainly originates from precipitation that falls in the Gonabad Basin. Isotopic compositions of the groundwater of the qanats in the wet period demonstrate weak evaporation influence. The annual recharge of qanats occurs through the infiltration of precipitation into fractures in the sandstone carbonate rocks of the catchment area and infiltration of surface water into coarse grain alluvial cones, Gonabad Plain borders.

3-2- Recharge elevation

The groundwater recharge of the qanats in the study area originates from basins located at high altitudes from 2000 to 2400 m (Fig. 2). In the Gonabad Catchment, the highest elevations in the west and south of the catchment area are 2600 m and 2770 m. Because weak evaporation occurs during precipitation infiltration, the elevation of the recharge basin estimated through the isotopic content of the groundwater of qanats is lower than the actual recharge basin's elevation. The actual recharge of qanats in the Gonabad Catchment originates from a basin located at altitudes from 2000 to 2770 m.

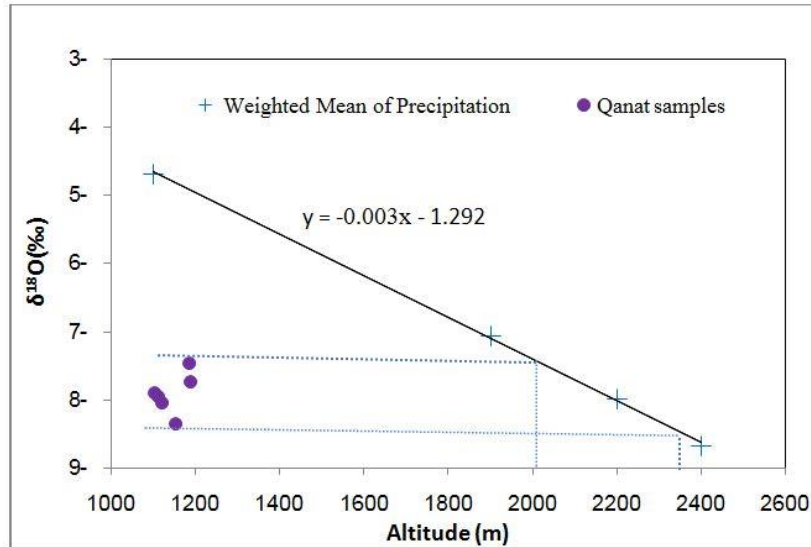


Fig. 2. ^{18}O plotted versus altitude in Gonabad Catchment.

3-3- Estimation annual recharge amount of qanats

For estimation recharge amount of qanats during water year 2016-2017, equation (1) was used.

$$Q_w d_w = Q_d d_d + Q_p d_p \quad (\text{Eq.1})$$

Where Q is a discharge component, and the d is an isotopic content component, and subscripts represent discharge of qanats in wet period (w), discharge of qanats in the dry period (d) and amount of recharge of qanats through precipitation infiltration during 2016-2017 water year (p). $d^{18}\text{O}$ content of the groundwater of qanats and precipitation used as isotopic content. The weighted mean of ^{18}O content of precipitation in rain gage stations in Gonabad Catchment (elevation more than 1900 m a.s.l) was calculated about -7.99 and used in the equation as isotopic content of precipitation. The discharge of qanats measured during the 2016-2017 water year. The discharge of qanats was lowest in November 2016 and highest in August 2017, used in the equation as dry and wet. By replacing the isotopic content of the groundwater of qanats in wet and dry periods in equation (1), the amount of recharge of qanats related to the precipitation in the 2016-2017 water year (Q_p) was obtained and presented in Table 2.

Table 2. The annual recharge amount of qanats by 2016-2017 water year precipitation.

Qanat	Qanat discharge in dry period (L/S)	^{18}O content in dry period (‰)	Qanat discharge in wet period (L/S)	^{18}O content in wet period (‰)	Annual recharge amount through precipitation of 2016-2017 water year	Recharge percent
Qasabeh	114.7	-4.91	127	-7.47	48	38
Dizagh	54.5	-5.95	60	-7.96	19	32
Kheshuie	35.5	-6.15	38.5	-8.35	13	34
Rahn	14.3	-5.65	14.8	-7.73	4	28
Baidokht	24.5	-5.89	30	-7.9	12	39
Bahabad	24	-6.37	27.6	-8.04	9	31

The most recharge occurred in Qasabeh qanat and the least in Rahn qanat. Badami limestone with dissolution permeability and Shemshak sandstone with fractured permeability located in Qasabeh qanat catchment caused this qanat to have the most amount of discharge. Also, Kalat and Khanik's temporal rivers, which have an

essential effect on qanat recharge, extended along two qanat's branches. The lowest amount of annual recharge occurred in Rahn qanat. Volcanic rocks with low permeability expanded in the Rahn qanat catchment, and therefore because of low precipitation infiltration, annual qanat recharge is low

4-Conclusions

Environmental isotope methods were used to explore the amount and origin of recharge of the groundwater of qanats in Gonabad Plain. Water samples were collected from 6 significant qanats and rainfalls in the study area to determine isotopic characteristics. Comparing isotopic content of the groundwater of qanats in wet period with isotopic content of precipitation revealed that the recharge of the qanats' aquifer originates from the infiltration of recent precipitation. Also, the recharge is through the infiltration of catchment precipitation (2000 to 2700 m a.s.l altitudes) into fractures in the limestone and sedimentary rocks at the south of the basin and infiltration of surface water, which resulted from altitudes precipitation in the coarse grain alluvial cones and river beds at the southern border of the plain in the cold and humid season (December to May). The amount of recharge through 2016-2017 water year precipitation in selected qanats was estimated at 4 to 48 liter/s. The permeability of catchment formations has an essential effect on qanat recharge. In the 2016-2017 water year, approximately 30 percent of the discharge of qanats resulted from precipitation in the same year.

References

- Ako Ako, A., Shimada, J., Hosono, T., Ichianagi, K., Elambo Nkeng, J., Eneke Takem Eyong, G., Njila Roger, N., 2012. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater in Mbanga, Njombe and Penja (Banana Plain), Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 75, 25-36.
- Ben Musa, A., Mzali, H., Zouari, K., Hezzi, H., 2014. Hydrochemical and isotopic assessment of groundwater quality in the Quaternary shallow aquifer, Tazoghrane region, north-eastern Tunisia. *Quaternary international* 338, 51-58.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, p. 328.
- Dindan, K., Bouchaou, Y., Hsissou, Y., Krimissa, M., 2003. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 36, 315-327.
- Fontes, J.C., 1976. *Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects*. Ph.D. Thesis, University of Paris.
- Gat, J.R., 1996. Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrological cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24, 225-262.
- Gat, J.R., Airey, P.L., 2006. Stable water isotopes in the atmosphere/biosphere/lithosphere interface: scaling-up from the local to continental scale, under humid and dry conditions. *Global and Planetary Change* 51, 25-33.
- Hamed, Y., Ahmadi, R., Demdoun, A., Bouri, S., Gargouri, I., Ben Dhia, H., Al-Gamal, S., Laouar, R., Choura A., 2014. Use of geochemical, isotopic, and age tracer data to develop models of groundwater flow: A case study of Gafsa mining basin-Southern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 100, 418-436.
- Hamed, Y., Dhahri, F., 2013. Hydro-geochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in Northwestern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 83, 10-24.
- Herczeg, A.L., Leaney, F.W.J., Stadler, M.F., Allan, G.L., Fifield, L.K., 1997. Chemical and isotopic indicators of point-source recharge to a karst aquifer, South Australia. *Journal of Hydrology* 192, 271-299.
- Kandu, T., Mori, N., Kocman, D., Stibilj, V., Grassa, F., 2012. Hydrogeochemistry of Alpine springs from North Slovenia: insights from stable isotopes. *Chemical Geology*, 300-301, 40-54.
- Kendall, C., McDonnell, J.J., 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam.
- Kohfahl, C., Sprenger, C., Benavente, J.B.H., Meyer, H., Fernández Chacón, F., Pekdeger, A., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: a field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Applied Geochemistry* 23, 846-862.
- Ladouche, B., Luc, A., Dörfli, N., 2009. Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996-2002): Potential use as input signal for karst functioning investigation. *Journal of Hydrology* 367, 150-164.
- Li, J., Liu, J., Pang, Z., Wang, X., 2013. Characteristics of chemistry and stable isotopes in groundwater of the Chaobai River catchment, Beijing. *Procedia Earth and Planetary Science* 7, 487-490.
- Liotta, M., Grassa, F., D'Alessandro, W., Favara, R., Gagliano Candela, E., Pisciotta, A., Scaletta, C., 2013. Isotopic composition of precipitation and groundwater in Sicily, Italy. *Applied Geochemistry* 34, 199-206.
- Mazor, E., 1991. *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Halsted Press, New York, p. 274.
- Paternoster, M., Liotta, M., Favara, R., 2008. Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy. *Journal of Hydrology* 348, 87-97.
- Pu, T., He, Y., Zhang, T., Wu, J., Zhu, G., Chang, L., 2013. Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: a case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region. *Applied Geochemistry* 33, 199-212.

- Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J., Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D., 2007. Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia. *Journal of Hydrology* 333, 47-57.
- Vallejos, A., Diaz-Puga, M.A., Sola, F., Daniele, L., Pulido-Bosch., 2015. Using ion and isotope characterization to delimitate a hydrogeological macrosystem, Sierra de Gador (SE, Spain). *Journal of Geochemical Exploration* 155, 14-25.
- Xing, L., Gua, H., Zhan, Y., 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences* 70-71, 250-264.
- Zabala, M.E., Manzano, M., Vives, L., 2015. The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina. *Science of the Total Environment* 518-519, 168-188.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mirani Moghadam, H., Karami, G.H., Bagheri, R., 2021. Estimation the annual recharge of Gonabad Plain qanats using isotopic methods. *Adv. Appl. Geol.* 11(1), 84-98.

DOI: 10.22055/aag.2020.31413.2050

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15857.html?lang=en

برآورد میزان تغذیه سالانه قنات‌های دشت گناباد به وسیله روش‌های ایزوتوپی

حجت میرانی مقدم

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

غلامحسین کرمی*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

رحیم باقری

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳

* g.karami@shahroodut.ac.ir

چکیده

دشت گناباد در منطقه خشک و نیمه خشک قرار دارد. مهمترین روش استفاده از آب‌های زیرزمینی در این منطقه قنات است. در دشت گناباد سالانه حدود ۱۹/۵ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی از طریق ۲۶ رشته قنات با دبی‌های متغیر حدود ۱۰ تا ۱۲۰ لیتر در ثانیه تخلیه می‌گردد. در این تحقیق از ۶ رشته قنات مهم دشت نمونه برداری شده و در آنها آنالیزهای ایزوتوپی با هدف تعیین میزان تغذیه سالانه قنات‌ها انجام شده است. نتایج ایزوتوپی‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم نشان می‌دهد تغذیه قنات‌ها از طریق نفوذ آب بارش درون درز و شکاف‌های سازندهای آهکی و ماسه‌سنگی جنوب حوضه و همچنین نفوذ آب‌های سطحی حاصل از بارش در مخروط‌های آبرفتی دانه درشت حاشیه ارتفاعات حوضه اتفاق می‌افتد. خط شیب ایزوتوپی منطقه نشان می‌دهد تغذیه قنات‌ها از محدوده‌ای در ارتفاعات بین ۲۰۰ تا ۲۷۰۰ متر حوضه منشأ می‌گیرد. میزان آبدهی و ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر و خشک و ترکیب ایزوتوپی بارش سالانه نشان می‌دهد حدود ۲۸ تا ۳۹ درصد آبدهی قنات‌ها مربوط به بارش‌های همان سال می‌باشد.

کلمات کلیدی: قنات، ایزوتوپ پایدار، ارتفاع تغذیه، منشأ تغذیه، خط شیب ایزوتوپی

مقدمه

زمان تغذیه، واکنش‌های آب و سنگ و اختلاط آب زیرزمینی در اختیار قرار می‌دهد (Pu et al., 2013; Kandu et al., 2012; Wu et al., 2009; Kohfahl et al., 2008). تغییرات ترکیب ایزوتوپی به تاریخچه آب از زمان تبخیر از اقیانوس‌ها و تشکیل ابر و زمان بارش و چگونگی نفوذ به داخل زمین بستگی دارد این تغییرات می‌تواند جهت تعیین زمان تغذیه، سرعت جریان و مشخص نمودن اثر جریان‌های سریع استفاده گردد (Mazor, 2004). علاوه بر تاثیر دما، رطوبت، ارتفاع، نوع بارش و سایر موارد در تغییرات ایزوتوپی نوع تغذیه بر ترکیب ایزوتوپی تاثیرگذار می‌باشد در تغذیه افشان با توجه به اینکه تبخیر بیشتری در زون غیر اشباع انجام می‌گردد تفکیک بیشتر انجام شده و در نتیجه این نوع تغذیه نسبت به تغذیه نقطه‌ای دارای ایزوتوپ‌های سنگین بیشتری می‌باشد (Alsaaran, 2006). تحلیل‌های ایزوتوپی برای ارائه یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تنوع در ترکیب ایزوتوپی باران یک منطقه توسط پارامترهای آب و هوایی محلی شامل منشاء توده بخار، تبخیر مجدد در طول بارش و فصل و ماه بارش کنترل می‌شود (Hamed, 2013) به نقل از Jouzel et al., 1987, 1991; Clark and Fritz, 1997; Hamed, 2004, 2012).

دشت گناباد در منطقه خشک و نیمه خشک بیابانی قرار دارد که در آن جریان آب سطحی وجود نداشته و تنها راه حیات استفاده از آب‌های زیرزمینی است. قنات مهمترین روش استخراج آب زیرزمینی در دشت گناباد است چنانکه در این دشت، ۲۶ رشته قنات وجود دارد که بیشترین حجم برداشت از آب‌های زیرزمینی (سالانه ۱۹/۵ میلیون مترمکعب) از طریق این قنات‌ها انجام می‌گیرد در حالی که میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌ها سالانه برابر ۱۱/۸ میلیون مترمکعب است. کهن‌ترین و عمیق‌ترین قنات‌های دنیا در دشت گناباد قرار دارند. عمق مادر چاه برخی از این قنات‌ها همچون قصبه و رهن به ترتیب برابر ۳۵۰ و ۲۶۰ متر است (Papoliyazdi et al., 2000). براساس مطالعات باستان‌شناسی قدمت برخی از این قنات‌ها نیز مانند قصبه به ۲۷۰۰ سال قبل برمی‌گردد (Papoliyazdi et al., 2000). مطالعات هیدروژئولوژیکی و ایزوتوپی به منظور شناخت منطقه، مکانیسم و میزان تغذیه سالانه قنات‌ها انجام می‌گیرد که برای طراحی برنامه توسعه و مدیریت موثر منابع آب به منظور حفاظت و نگهداری از این منبع آبی مهم در مناطق خشکی همچون گناباد ضروری است. ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی اطلاعات با ارزشی از منشأ تغذیه آب زیرزمینی،

بر اساس ترکیب ایزوتوپی در آبخوان کواترنری کم عمق در منطقه تازقران در شمال شرقی تونس دو نوع آب تفکیک شد. آبهای تبخیر نشده که با محتوای پایین ایزوتوپهای پایدار قابل تشخیص اند و نشان دهنده تغذیه از بارشهای کنونی از توده‌های مدیترانه‌ای می‌باشند. آبهای تبخیر شده که با غنی شدگی نسبی در مقادیر ایزوتوپها مشخص می‌شوند و نشان دهنده تغذیه برگشتی آبهای کشاورزی به آبخوان می‌باشد (Ben Mussa et al., 2014).

تهی‌شدگی میزان ایزوتوپهای پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم در آب زیرزمینی عمیق دشت چین شمالی مربوط به تغذیه از بارش در شرایط آب و هوای قدیمه در دوره‌های یخچالی و بین یخچالی است که نشان دهنده تجدیدپذیری بسیار محدود آب زیرزمینی در منطقه می‌باشد (Xing et al., 2013). دشت چین شمالی از دو آبخوان کم عمق (۵۰-۱۰ متر) و آبخوان عمیق (۴۰۰-۵۰ متر) تشکیل شده است. براساس نتایج آنالیز ایزوتوپی تفاوت زیادی بین ترکیب ایزوتوپی آبهای کم عمق و عمیق وجود دارد. آبهای زیرزمینی عمیق تهی‌شدگی در میزان اکسیژن ۱۸ و دوتریم در مقایسه با آبهای کم عمق نشان می‌دهند. آبهای عمیق منفی‌تر هستند و در سمت راست خط آب جوی جهانی قرار می‌گیرند که نشان دهنده تاثیر تغذیه قدیم می‌باشد (Clark and Fritz, 1977; Xing, 2013 به نقل از).

بر اساس ایزوتوپهای پایدار آبهای زیرزمینی حوضه رودخانه چوای به دو گروه آبهای قدیمی و آبهای جدید تقسیم شد. آبهای جدید مقدار اکسیژن ۱۸ بین ۹/۹- تا ۶/۶- پرمیل را دارد و در امتداد یک خط با شیب ۴ در دیاگرام دوتریم براساس اکسیژن ۱۸ قرار می‌گیرند که در اثر تبخیر در حین تغذیه می‌باشد. آبهای قدیمی که ترکیب ایزوتوپی متفاوتی دارند (۱۱- پرمیل برای اکسیژن ۱۸ و ۶۸/۲- پرمیل برای دوتریم) که بیان کننده آب و هوای سرد و خشک در دوره‌های یخچالی گذشته می‌باشد (Li et al., 2013).

در این تحقیق با استفاده از داده‌های ایزوتوپی بارش و آب زیرزمینی قنات‌ها، منشأ، منطقه و میزان تغذیه سالانه ۶ رشته از قنات‌های مهم دشت گناباد مورد بررسی قرار گرفت که مشخصات این قنات‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به محتوای ایزوتوپی بارش در طول سال، فرایندهای احتمالی کنترل کننده تغذیه آب زیرزمینی تعیین می‌گردد (Gat, 1996; Herczeg et al., 1997; Kendall and McDonnell, 1998; Dindan et al., 2003; Gat and Airey, 2006; Ladouche et al., 2009; Vallejos et al., 2015; Zabala et al., 2015).

با ترسیم نمودار اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتریم نمونه‌های آب زیرزمینی دشت موز در کامرون مشخص گردید نمونه‌های آب زیرزمینی در مجاورت یا روی خط آب جوی محلی و خط آب جوی جهانی قرار می‌گیرند که نشان دهنده منشأ جوی آنهاست و نیز بیانگر این موضوع است که بارش‌های جدید منشأ اصلی این آب‌ها می‌باشد (Ako Ako, et al., 2012).

با ترسیم خط آب جوی محلی و پلات کردن نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب سفره آب زیرزمینی پامپانو در آرژانتین، برخی از نمونه‌های آب زیرزمینی بالای خط آب جوی قرار گرفتند که به دو دلیل است: یا تغذیه بعد از بارش‌های خاص که شاخص شرایط معمول حوضه نیستند اتفاق افتاده است و یا اینکه تغذیه از خارج حوضه اتفاق می‌افتد که دلیل دوم امکان پذیرتر است (Zebala et al., 2014).

ایزوتوپهای پایدار سنگین، اگر آب نفوذ کرده کاملاً بعد از بارش تبخیر شود در خاک حفظ نمی‌گردد. وقتی آب زیرسطحی نفوذ کرده بعد از بارش به کلی تبخیر می‌گردد، سیگنال‌های تبخیری ایزوتوپی در خاک باقی نمی‌ماند زیرا دوتریم و اکسیژن ۱۸ اجزای ملکول آب هستند. ولی در مناطق بالادست حوضه، آب زیرسطحی نفوذ کرده در طول واقعه بارش، بعد از بارش به طور بخشی تبخیر می‌گردد و تاثیر تبخیر در ترکیب ایزوتوپی آب خاک باقی می‌ماند. بنابراین ترکیب متوسط ایزوتوپی آب زیرزمینی از ترکیب ایزوتوپی میانگین وزنی حجمی سالانه بارش بزرگتر است (Tsuji-mura et al., 2006).

در یک منطقه نیمه خشک، در تانزانیا (آفریقای مرکزی) بارش‌های کمتر از ۱۵ میلیمتر در تغذیه آب زیرزمینی شرکت نمی‌کند و آب نفوذ کرده در خاک، سریعاً بعد از بارش تبخیر می‌گردد و فقط بارش‌های با حجم بیش از ۲۰ میلیمتر و با ترکیب ایزوتوپی نسبتاً سبکتر در تغذیه آب زیرزمینی نقش دارد (Tsuji-mura et al., 2006) به نقل از (Onodera, 1996).

جدول ۱- مشخصات قنات‌های اصلی دشت گناباد.

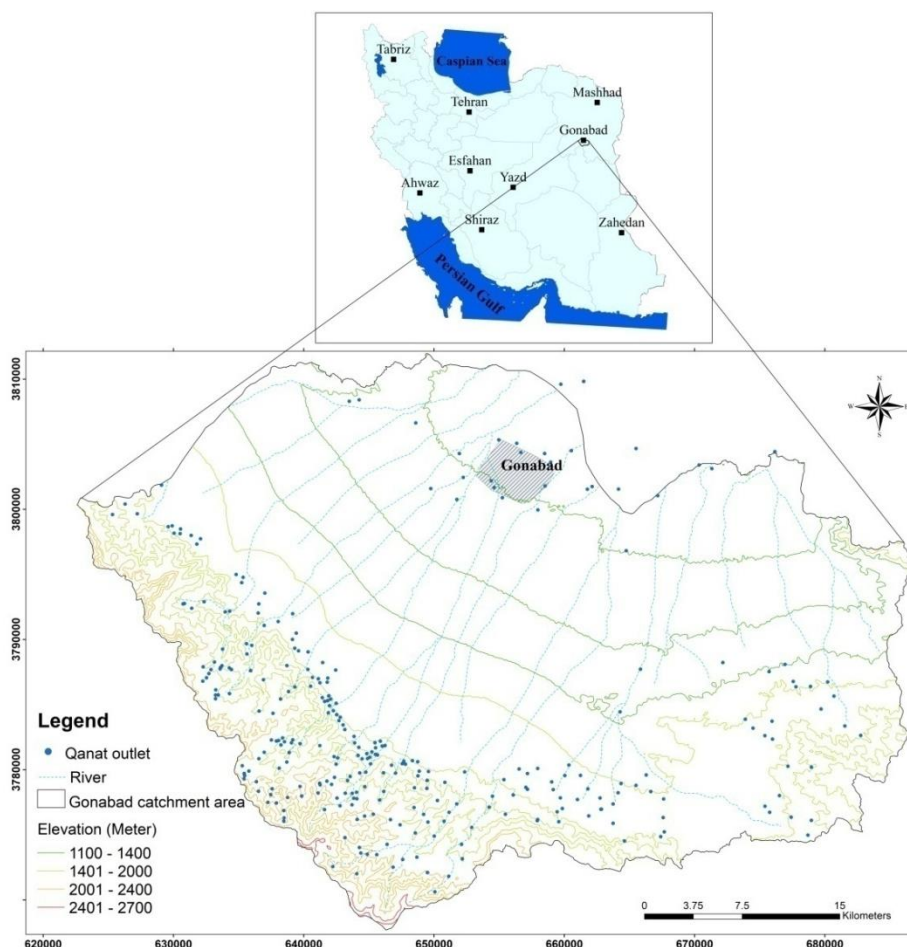
Table 1. The characteristics of the major qanats of Gonabad Plain.

Discharge (l/s)	Mother well depth (m)	Qanat length (Km)	Qanat name
118	340	33	Qasabeh
14	260	28	Rahn
25	170	12.5	Bahabad
36	170	14	Khashuie
27	145	18	Baidokht
56	144	10	Dizagh

توصیف محدوده

دشت گناباد در شرق ایران و در قسمت جنوب استان خراسان رضوی قرار دارد. وسعت کل حوضه آبریز گناباد ۱۸۷۲ کیلومترمربع است که ۹۳۹ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و ۹۳۳ کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. بلندترین نقطه این محدوده ۲۷۷۰ متر و کمترین ارتفاع آن کمتر از ۹۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاعات محدوده از سمت شرق، جنوب و غرب دشت را احاطه کرده است. شاخه‌های جمع آوری کننده رواناب محدوده شامل تعدادی مسیل موازی با جهت جنوب به شمال است که از ارتفاعات جنوب سرچشمه گرفته و بعد از ورود به دشت گناباد با همان امتداد از مسیرهای خروجی حوضه در حد شمالی آن خارج می‌شوند. آب و هوای منطقه مورد مطالعه خشک و نیمه

خشک است، فصل بارش از آذر تا اردیبهشت و فصل خشک از خرداد تا آبان ماه است. مقدار بارش از ۱۴۵ میلی متر در دشت (متوسط ارتفاع ۱۲۴۰ متر) تا ۲۶۴ میلیمتر در ارتفاعات (متوسط ارتفاع ۱۶۰۴ متر) متغیر است. میزان تبخیر از سطح آزاد آب از ۲۷۵۴ میلیمتر در سال در دشت تا ۲۳۳۹ میلیمتر در سال در ارتفاعات متغیر است. متوسط دما از ۱۸ درجه در ارتفاعات تا ۲۴ درجه در دشت افزایش می‌یابد. دی ماه سردترین (۹ درجه سانتیگراد) و تیر گرمترین ماه (۳۶ درجه سانتیگراد) است (آمار ایستگاه‌های باران سنجی و تبخیرسنجی محدوده گناباد، آب منطقه‌ای خراسان رضوی). علاوه بر نفوذ مستقیم بارش و رواناب در سازندهای ارتفاعات، آبرفت‌های دانه درشت مجاور ارتفاعات نیز با نفوذ بارش و رواناب ارتفاعات نقش مهم در تغذیه آب قنات‌ها دارند.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز گناباد و مظهر قنات‌های موجود در حوضه.

Fig.1. Gonabad Catchment situation and qanats outlet in Gonabad Catchment.

می‌دهند (شکل ۲). مهمترین تشکیلات زمین‌شناسی متعلق به دوران مزوزوئیک، سازند شمشک (ژوراسیک) با لیتولوژی ماسه سنگ، شیل‌های تیره‌رنگ و شیل‌های آهکی است که گسترش وسیعی در جنوب و جنوب شرقی محدوده دارد. این تشکیلات به شدت گسل خورده بوده و شکستگی‌های فراوانی در آن وجود دارد و به همین دلیل دارای نفوذپذیری بالایی بوده و سبب نفوذ آب بارش و تغذیه آبرفت

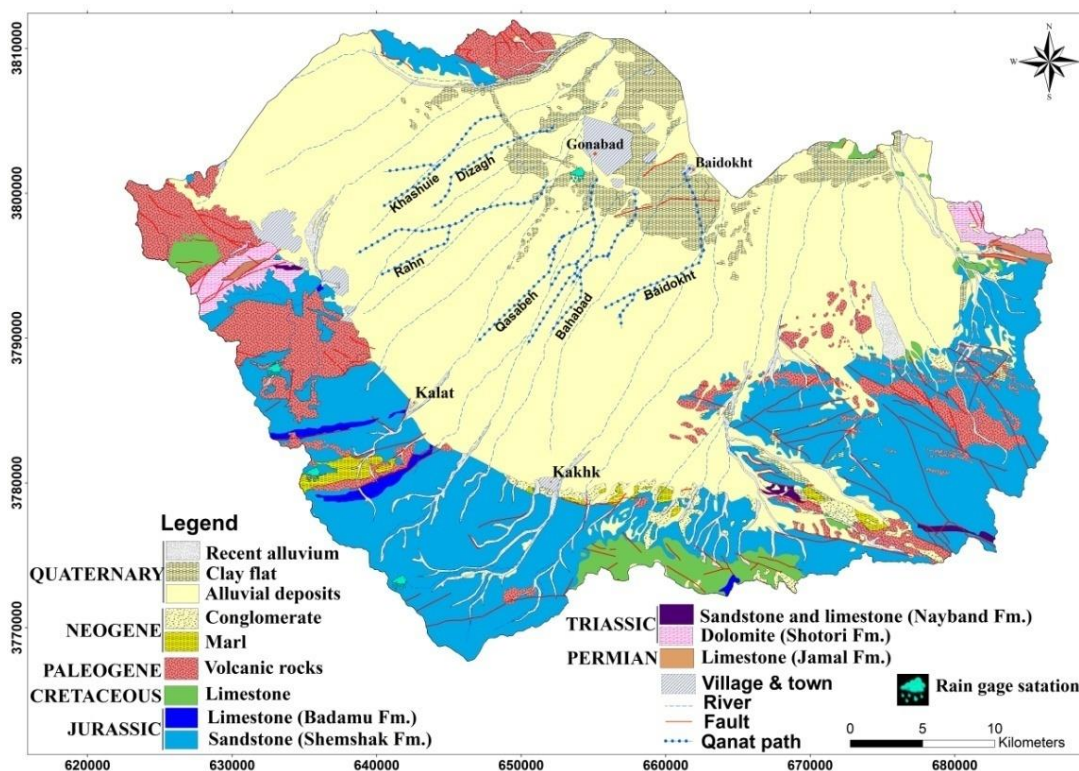
زمین شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

از نظر جایگاه زمین‌شناسی حوضه آبریز گناباد جزئی از زون زمین‌شناسی ایران مرکزی و بلوک لوت است. براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد، قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در محدوده، سنگ آهک و دولومیت‌های توده‌ای متعلق به پرمین و اوایل تریاس هستند که بخش اعظم ارتفاعات شرق دشت گناباد را تشکیل

رسوبات در حاشیه ارتفاعات دانه درشت تر بوده و به واسطه نفوذ سیلاب‌ها تغذیه اصلی آبخوان آبرفتی دشت از طریق این رسوبات انجام می‌گیرد. به تدریج با نزدیک شدن به نقاط خروجی دشت، این تشکیلات ریزدانه‌تر شده و نفوذپذیری آنها کاهش می‌یابد، تا آنجایی که در حوالی شهر گناباد و خروجی این دشت پهنه‌های رسی وجود دارد (Report of 1:100000 geological map of Gonabad). براساس نتایج عملیات ژئوفیزیک انجام گرفته در دشت گناباد در سال ۱۳۴۸ توسط کمیانی ژنرال ژئوفیزیک، ضخامت آبرفت‌ها در دشت از حداقل ۲۰ متر در بخش شرقی تا حداکثر ۳۰۰ متر در شمال شهر کاخک در نوسان است. فروافتادگی سنگ کف در بخش جنوبی دشت سبب افزایش ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر در این ناحیه شده است. نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد حداکثر تراز آب زیرزمینی در جنوب و جنوب غرب دشت است که به سمت شمال کاهش می‌یابد و همچنین جهت جریان آب زیرزمینی تقریباً همسو با جهت جریانات سطحی دشت و از ارتفاعات جنوب و جنوب غرب به سمت شمال شرق محدوده (مهمترین خروجی آبخوان) می‌باشد (شکل ۴). تغییرات عمق در سطح آب زیرزمینی در دشت گناباد متأثر از توپوگرافی سطح زمین است. حداکثر عمق سطح آب زیرزمینی در حاشیه جنوب آبخوان به میزان ۱۶۰ متر اندازه‌گیری شده است. با فاصله گرفتن از ارتفاعات جنوب به سمت شمال عمق سطح آب به سرعت کاهش یافته و به ۵۰ متر در شمال آبخوان می‌رسد (شکل ۵).

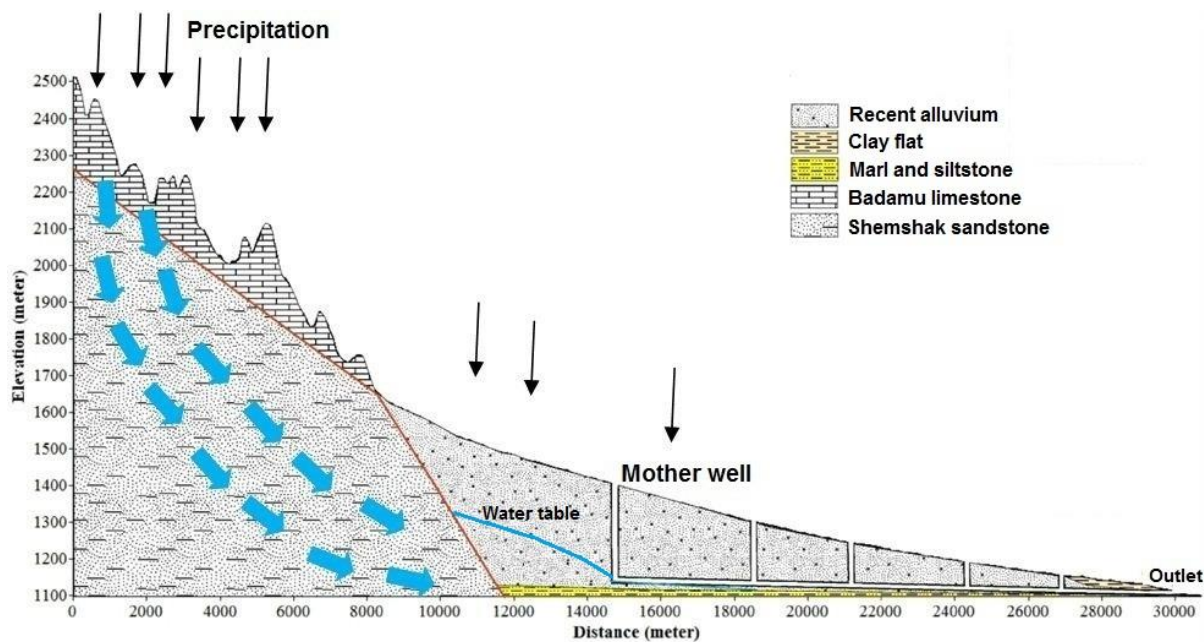
دشت می‌گردد (شکل ۳). از سازندهای دیگر مزوزوئیک، آهک بادامو به سن ژوراسیک پایانی است که به‌طور هم‌شیب بر روی سازند شمشک قرار گرفته است. این تشکیلات به صورت محدود در جنوب غربی محدوده رخنمون دارند. آهک بادامو نیز دارای درز و شکاف‌های تکتونیکی و انحلالی زیادی است و نقش زیادی در تغذیه آبرفت دشت دارند. رسوبات کرتاسه شامل آهک‌های ضخیم و هیپوریت‌دار است که در شمال شرق، شرق و جنوب محدوده به‌صورت محدود رخنمون دارند.

در دوره پالئوژن به‌واسطه تاثیر فزاینده کوهزایی، فعالیت‌های آتشفشانی شدید در سطح منطقه رخ داده است. به‌واسطه عملکرد این فعالیت‌ها تشکیلات آذرین اسیدی شامل ریولیت، داسیت و توف سبز در ابتدا و سپس لاوهای داسیتی و پیروکسن آندزیت‌ها در منطقه بوجود آمده‌اند. این تشکیلات در جنوب شرقی دشت به‌صورت توده باتولیتی دیده می‌شوند. همچنین گسترش قابل توجهی از این سنگ‌ها در غرب و شمال غرب دشت نیز وجود دارد. در مناطقی که این تشکیلات دارای درز و شکستگی‌های تکتونیکی هستند همچنین توف‌ها نقش موثری در تغذیه آبخواند دشت دارند. تشکیلات نفوژن را می‌توان به دو دسته رسوبات قدیمی که شامل کنگلومراهای پلیوسن و رسوبات جوان‌تر که شامل تشکیلات رس و ماری بوده تقسیم نمود که در حاشیه جنوبی دشت رخنمون دارند. این تشکیلات نقش سنگ کف آبخوان آبرفتی محدوده را دارند. تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های آبرفتی دوره کواترنری در سطح وسیعی رخنمون داشته و بخش اعظم پهنه آبرفتی دشت گناباد را تشکیل داده و آبخوان آبرفتی این دشت را در خود جای داده است. این



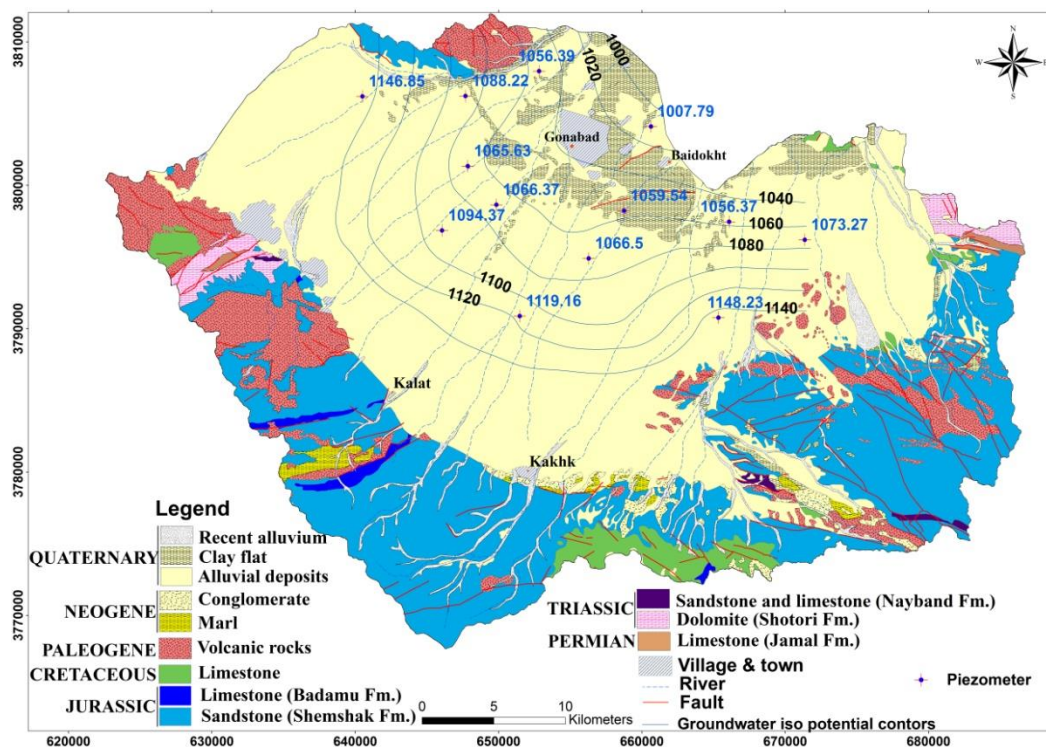
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز گناباد (1:100000 geological map of Gonabad, Geological Survey of Iran).

Fig. 2. Geological map of Gonabad Basin. Adapted from 1:100000 geological map of Gonabad, Geological Survey of Iran.



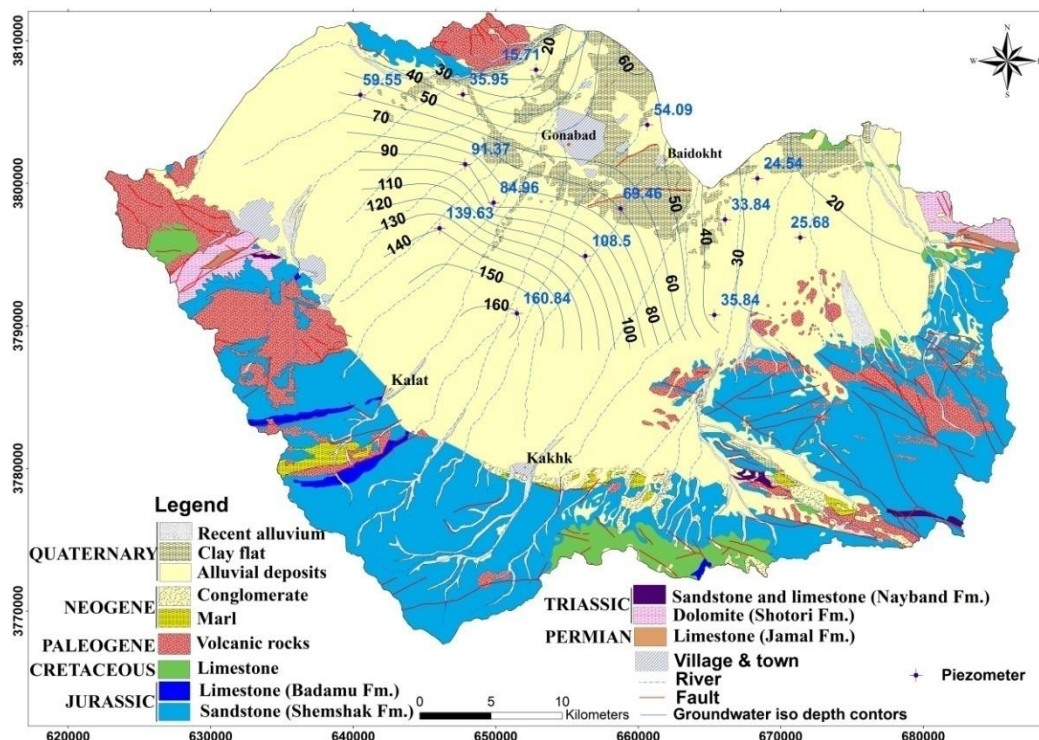
شکل ۳- نیمرخ هیدروژئولوژیکی محدوده (جنوبی-شمالی).

Fig. 3. Hydrogeological cross section of basin (south to north).



شکل ۴- نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی.

Fig. 4. Groundwater iso potential map.



شکل ۵- نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی.

Fig. 5. Groundwater iso depth map.

که R_{sample} نسبت ایزوتوپی نمونه ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) و R_{VSMOW} نسبت ایزوتوپی استاندارد مرجع بین‌المللی است. میانگین وزنی اکسیژن ۱۸ و دوتریم بارش در هر ایستگاه بر اساس معادله زیر محاسبه شد (Paternoster et al., 2008).

$$R_{\text{mw}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

که P_i مقدار بارش در هر واقعه بارش و n تعداد وقوع بارش است و X_i مقادیر ^2H یا ^{18}O هر بارش است.

بحث

مشخصات ایزوتوپی

برای تعیین محتوای ایزوتوپی بارش‌های منطقه ۱۶ نمونه بارش از ۴ ایستگاه جمع‌آوری گردید. محدوده تغییرات مقادیر اکسیژن ۱۸ و دوتریم در نمونه‌های بارش منطقه به ترتیب از حداقل ۹/۱۵- تا ۳/۲۲- پرمیل و از ۵۰/۶۳- تا ۱۱/۰۸- می باشد. همچنین مقادیر اکسیژن ۱۸ و دوتریم در آب زیرزمینی قنات‌های منطقه در فصل تر به ترتیب از ۸/۳۵- تا ۷/۴۷- پرمیل و از ۵۱/۲۶- تا ۴۶/۰۲- پرمیل در تغییر است و در فصل خشک محدوده تغییرات مقادیر مذکور در نمونه‌های آب قنات-ها از ۶/۳۷- تا ۴/۹۱- پرمیل و از ۴۹/۸۷- تا ۴۶/۲۲- پرمیل می‌باشد.

ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها در فصل تر (شکل ۷) نشان دهنده تغذیه قنات‌ها توسط بارش‌های سالانه محدوده گناباد با تاثیر کمتر تبخیر و از طریق نفوذ آب حاصل از بارش درون سنگ‌های درزو

روش مطالعه

آبدهی قنات‌های انتخابی در سال آبی ۹۶-۹۵ برای تعیین حداقل و حداکثر آبدهی در طول سال (فصل خشک و تر) اندازه‌گیری شد. با ترسیم هیدروگراف قنات‌ها مشخص گردید حداقل آبدهی قنات‌ها در پاییز و حداکثر آبدهی در تابستان اتفاق می‌افتد. برای مثال هیدروگراف قنات قصبه در شکل ۶ آمده است. برای مطالعه ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی قنات‌ها نمونه‌برداری از خروجی قنات‌های دشت در دو نوبت آبان ماه ۹۵ به عنوان دوره خشک و مردادماه ۹۶ به عنوان دوره تر صورت گرفته است. به منظور تعیین رفتار ایزوتوپی بارش واقع در منطقه گناباد از ۴ ایستگاه باران‌سنجی در ارتفاعات مختلف از ۱۱۰۰ متر تا ۲۴۰۰ متر نمونه‌های بارش جمع‌آوری گردید (شکل ۲). در هر ایستگاه ظرف جمع‌آوری نمونه بارش شامل یک ظرف پلاستیکی و یک قیف بود که درون ظرف پلاستیکی مقداری پارافین برای جلوگیری از تبخیر ریخته شد. نمونه‌ها جهت آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم به آزمایشگاه شرکت مصباح انرژی، سازمان انرژی اتمی ایران ارسال شدند.

نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن به صورت اختلاف نسبی (مقادیر) از استاندارد متوسط آب اقیانوس‌ها به قسمت در هزار بیان می‌گردد (Fontes, 1976):

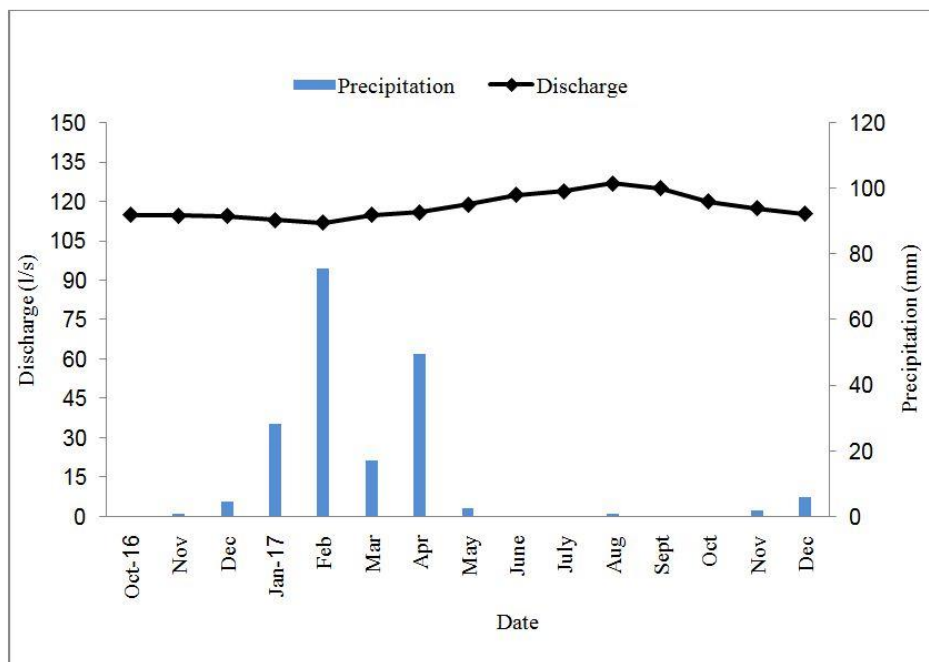
$$(\%) = \frac{R_{\text{sample}} - V_{\text{SMOW}}}{V_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

قنات‌ها در محدوده مورد مطالعه از حوضه‌ای در ارتفاعات بین ۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ متر منشأ می‌گیرد. در حوضه آبریز گناباد حداکثر ارتفاع در ارتفاعات غربی محدوده برابر ۲۶۰۰ متر و در ارتفاعات جنوبی محدوده برابر ۲۷۷۰ متر است. البته به دلیل تاثیر ضعیف تبخیر در فصل تر، ارتفاع حوضه تغذیه کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌گردد و در اصل تغذیه قنات‌ها از بارش‌های محدوده ارتفاعات بین ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متر و رواناب حاصله از ارتفاعات مذکور است.

شکاف‌دار ارتفاعات و نیز رسوبات دانه درشت مخروط افکنه‌های موجود در حاشیه ارتفاعات جنوب دشت گناباد است.

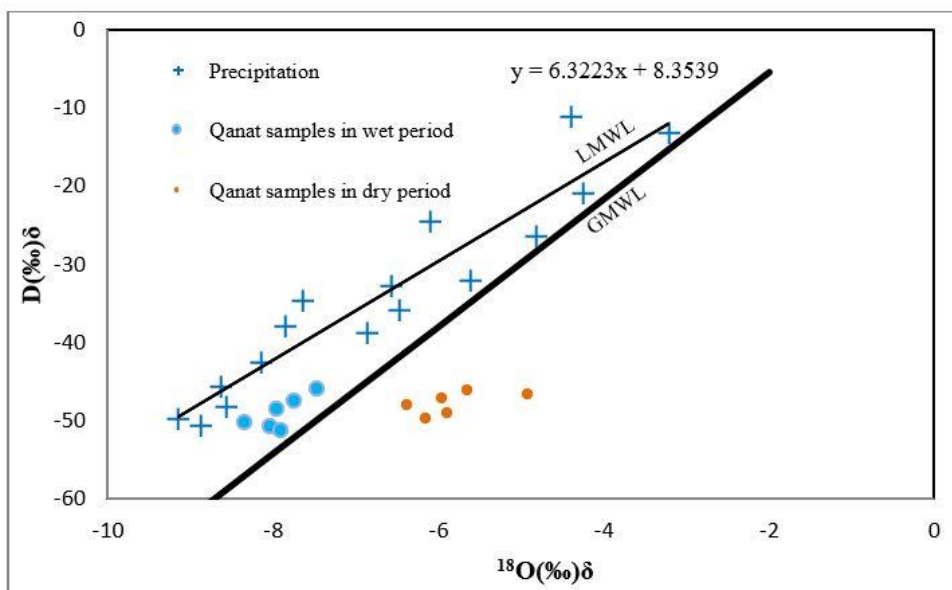
تعیین ارتفاع تغذیه

جهت تعیین ارتفاع منطقه تغذیه، رابطه بین مقدار ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و ارتفاع برای ایستگاه‌های بارش محدوده گناباد ترسیم شد (شکل ۸). مقدار تهی‌شدگی اکسیژن ۱۸ در بارش‌های منطقه حدود ۰/۳ پرمیل در ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع می‌باشد. بر این اساس تغذیه آب زیرزمینی



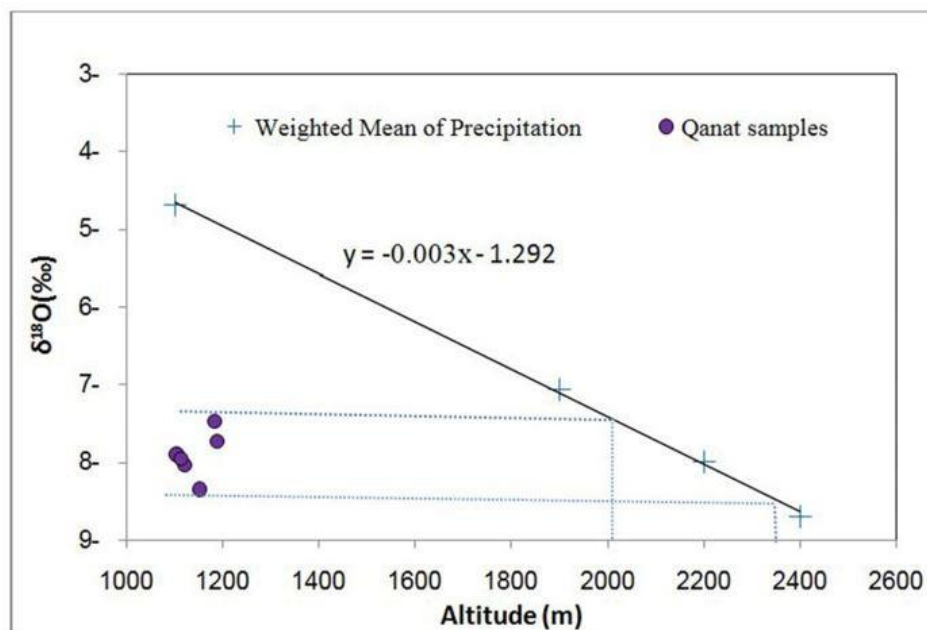
شکل ۶- هیدروگراف قنات قصبه در طول سال ۹۵-۹۶.

Fig. 6. Monthly discharge of Qasabeh qanat from October 2016 to December 2017.



شکل ۷- ارتباط بین اکسیژن ۱۸ و دوتریم برای نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه.

Fig. 7. The $D^{18}O$ relationship for Gonabad Plain qanats and precipitation samples.



شکل ۸- نمودار مقادیر اکسیژن ۱۸ در مقابل ارتفاع برای تخمین ارتفاع تغذیه قنات‌ها با استفاده از ترکیب ایزوتوپی بارش و آب زیرزمینی.

Fig. 8. ^{18}O plotted versus altitude in order to obtain the principal recharge areas based on the isotopic composition of precipitation and groundwater.

تعیین میزان تغذیه سالانه هر قنات

برای محاسبه میزان تغذیه قنات‌ها از رابطه Clark and Fritz, (1997) استفاده شد. که d , w , p و Q_p به ترتیب ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر، خشک و آب باران است. Q_d و Q_w به ترتیب دبی قنات‌ها در فصل تر، خشک و میزان تغذیه از بارش است:

$$Q_w d_w = Q_d d_d + Q_p d_p$$

برای ترکیب ایزوتوپی از مقادیر اکسیژن ۱۸ آب قنات‌ها و بارش منطقه استفاده شد. ترکیب ایزوتوپی بارش برابر میانگین وزنی اکسیژن ۱۸ بارش ایستگاه‌های با ارتفاع بیش از ۱۹۰۰ متر منطقه به میزان ۷/۹۹- پرمیل محاسبه و در معادله لحاظ شد. آبدهی قنات‌ها در طول سال آبی ۹۵-۹۶ اندازه‌گیری شده و آبدهی آبان ماه قنات‌ها برای فصل خشک و آبدهی مرداد ماه (بیشترین آبدهی قنات‌ها) به عنوان دوره تر در معادله لحاظ گردید. با توجه به ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر و خشک تنها مجهول معادله یعنی Q_p (مقدار آب قنات حاصل از بارش‌های سال ۹۵-۹۶) برای هر قنات محاسبه و در جدول شماره ۲ ارائه شد. منطقه گناباد در سال ۹۵-۹۶ دارای بارش نرمال بوده و میزان بارش در ایستگاه‌های باران سنجی ارتفاعات این منطقه ۲۵۰ میلی‌متر بوده است. براین اساس سهم آب قنات‌ها از بارش سال ۹۵-۹۶ بین ۲۸ تا ۳۸ درصد آبدهی حداکثر قنات‌هاست. بیشترین مقدار تغذیه در بین قنات‌های دشت در قنات قصبه به میزان ۴۸ لیتر در ثانیه است این

نشان می‌دهد در صورتیکه در سال ۹۵-۹۶ بارش وجود نداشت آبدهی قنات در مردادماه ۹۶ برابر ۸۰ لیتر در ثانیه بود. قنات مذکور دارای بیشترین میزان آبدهی در دشت گناباد نیز می‌باشد. یکی از دلایل تغذیه بیشتر قنات قصبه وجود سازندهای ماسه سنگی شمشک و آهک بادامو در ارتفاعات حوضه آبرگیر قنات است که به دلیل وجود درز و شکاف‌های تکتونیکی و انحلالی دارای نفوذپذیری بالایی هستند. همچنین دو مسیل جمع‌آوری کننده رواناب‌های ارتفاعات (خانیک و کلات) که در امتداد دو رشته اصلی قنات مذکور قرار دارند نقش مهمی در تغذیه قنات دارند. کمترین مقدار تغذیه نیز در قنات رهن اتفاق می‌افتد. ارتفاعات حوضه آبرگیر قنات مذکور از عمدتاً از تشکیلات ولکانیکی تشکیل شده که نفوذپذیری کمی دارند و در نتیجه باعث کاهش میزان نفوذ بارش در ارتفاعات و کاهش تغذیه قنات می‌گردد. قنات مذکور دارای کمترین آبدهی در بین قنات‌های مورد مطالعه می‌باشد و در چند سال اخیر دارای کاهش آبدهی قابل ملاحظه‌ای بوده است که یکی از مهمترین دلایل کاهش آبدهی آن رسوب ترکیبات کربناتی در قسمت تره‌کار قنات و کاهش تراوایی آن است که این پدیده باعث کاهش تغذیه قنات نیز شده است. در این روش مقدار تغذیه بیش از مقدار واقعی آن به دست آمد که به دلیل تأثیر تبخیر از آب قنات‌ها در حین حرکت در کوره قنات در فصل خشک است.

جدول ۲- برآورد سهم بارش‌های سال آبی ۹۶-۹۵ در آبدهی قنات‌های دشت گناباد.

Table 2. The annual recharge amount of qanats by 2016-2017 water year precipitation.

Recharge percent	Recharge amount from 2016-2017 precipitation	^{18}O in wet period (%)	Wet period discharge (l/s)	^{18}O in dry period (%)	Dry period discharge of (l/s)	Qanat name
38	48	-7.47	127	-4.91	114.7	Qasabeh
32	19	-7.96	60	-5.95	54.5	Dizagh
34	13	-8.35	38.5	-6.15	35.5	Khashuie
28	4	-7.73	14.8	-5.65	14.3	Rahn
39	12	-7.9	30	-5.89	24.5	Baidokht
31	9	-8.04	27.6	-6.37	24	Bahabad

نتیجه‌گیری

شمشک و بادامو که در ارتفاعات حوضه آبخیز قنات مذکور قرار دارند می‌باشد. تغذیه کم در قنات رهن احتمالاً به دلیل نفوذپذیری کم سازندهای ارتفاعات قنات (سنگ‌های آذرین) و کاهش نفوذپذیری تره‌کار قنات به دلیل رسوب ترکیبات کربناتی است. بر این اساس بطور متوسط حدود ۳۰ درصد آب قنات‌های دشت گناباد در سال آبی ۹۶-۹۵ مربوط به بارش‌های همان سال است. تبخیر از آب قنات‌ها در حین حرکت در کوره قنات در فصل خشک، سبب محاسبه مقدار تغذیه بیش از مقدار واقعی آن در این روش می‌گردد. با توجه به تاثیر بارش در آبدهی قنات‌ها، برای حفظ قنات‌ها لازم است از اقداماتی که منجر به کاهش نفوذ بارش در حوضه آبخیز قنات‌ها می‌شود مانند احداث سد، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها و تخریب بستر آنها، بهره‌برداری از معادن و تخریب ارتفاعات همچنین اقداماتی که باعث برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی می‌گردد مانند حفر چاه جلوگیری شود. پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده، سن‌سنجی آب قنات‌ها انجام گیرد.

قنات مهمترین منبع تامین کننده آب کشاورزی و شرب در منطقه خشک و بیابانی گناباد از ۲۷۰۰ سال پیش تاکنون است. ترکیب ایزوتوپی ۶ رشته قنات مهم دشت گناباد به همراه ترکیب ایزوتوپی بارش‌های منطقه جهت تعیین منشأ و میزان تغذیه قنات‌ها استفاده شد. محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها در فصل تر و بارش‌های منطقه نشان می‌دهد منشأ تغذیه قنات‌ها بارش‌های سالانه و محلی محدوده گناباد (ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متری محدوده) بوده که از طریق نفوذ بارش‌ها در درز و شکاف‌های سازندهای ارتفاعات (سپس تغذیه آبرفت دشت توسط سازندهای ارتفاعات)، همچنین نفوذ رواناب حاصل از بارش‌های ارتفاعات در مخروط افکنه‌های حاشیه دشت اتفاق می‌افتد. مقدار آب قنات‌ها ناشی از بارش سال ۹۶-۹۵ (تغذیه از بارش) در قنات‌های مورد مطالعه بین ۴ تا ۴۸ لیتر در ثانیه برآورد شد. در قنات قصبه بیشترین میزان تغذیه اتفاق می‌افتد که به دلیل تغذیه قنات توسط دو مسیل کلات و خانیک و همچنین نفوذپذیری بالای سازندهای

منابع

- Ako Ako, A., Shimada, J., Hosono, T., Ichianagi, K., Elambo Nkeng, J., Eneke Takem Eyong, G., Njila Roger, N., 2012. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater in Mbanga, Njombe and Penja (Banana Plain), Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 75, 25-36.
- Alsaaran, N., 2006. Using environmental isotopes for estimating the relative contributions of groundwater recharge mechanisms in an arid Basin, Central Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering* 31, 3-13.
- Ben Musa, A., Mzali, H., Zouari, K., Hezzi, H., 2014. Hydrochemical and isotopic assessment of groundwater quality in the Quaternary shallow aquifer, Tazoghane region, north-eastern Tunisia. *Quaternary international* 338, 51-58.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, p. 328.
- Dindan, K., Bouchaou, Y., Hsissou, Y., Krimissa, M., 2003. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 36, 315-327.
- Fontes, J.C., 1976. *Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects*. Ph.D. Thesis, University of Paris.
- Gat, J.R., 1996. Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrological cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24, 225-262.
- Gat, J.R., Airey, P.L., 2006. Stable water isotopes in the atmosphere/biosphere/lithosphere interface: Scaling-up from the local to continental scale, under humid and dry conditions. *Global and Planetary Change* 51, 25-33.

- Geological Survey of Iran, 1:100000 geological map of Gonabad.
- Geological Survey of Iran, report of 1:100000 geological map of Gonabad, p. 14.
- Hamed, Y., Ahmadi, R., Demdoum, A., Bouri, S., Gargouri, I., Ben Dhia, H., Al-Gamal, S., Laouar, R., Choura A., 2014. Use of geochemical, isotopic, and age tracer data to develop models of groundwater flow: A case study of Gafsa mining basin-Southern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 100, 418-436.
- Hamed, Y., Dhahri, F., 2013. Hydro-geochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in Northwestern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 83, 10-24.
- Herczeg, A.L., Leaney, F.W.J., Stadler, M.F., Allan, G.L., Fifield, L.K., 1997. Chemical and isotopic indicators of point-source recharge to a karst aquifer, South Australia. *Journal of Hydrology* 192, 271-299.
- Kandu, T., Mori, N., Kocman, D., Stibilj, V., Grassa, F., 2012. Hydrogeochemistry of Alpine springs from North Slovenia: insights from stable isotopes. *Chemical Geology* 300-301, 40-54.
- Kendall, C., McDonnell, J.J., 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam.
- Kohfahl, C., Sprenger, C., Benavente, J.B.H., Meyer, H., FernándezChacón, F., Pekdeger, A., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: a field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Applied Geochemistry* 23, 846-862.
- Ladouche, B., Luc, A., Dörfli, N., 2009. Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996-2002): Potential use as input signal for karst functioning investigation. *Journal of Hydrology* 367, 150-164.
- Li, J., Liu, J., Pang, Z., Wang, X., 2013. Characteristics of chemistry and stable isotopes in groundwater of the Chaobai River catchment, Beijing. *Procedia Earth and Planetary Science* 7, 487-490.
- Liotta, M., Grassa, F., D'Alessandro, W., Favara, R., Gagliano Candela, E., Pisciotta, A., Scaletta, C., 2013. Isotopic composition of precipitation and groundwater in Sicily, Italy. *Applied Geochemistry* 34, 199-206.
- Mazor, E., 1991. *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Halsted Press, New York, 274 p.
- Papolyazdi, M., Labafkhaniki, R., Labafkhaniki, M., Jalali, A., Vosoghi, F., 2000. Qasabeh Qanat a myth, Khorasan Water Company Authority, Mashhad, p. 292.
- Paternoster, M., Liotta, M., Favara, R., 2008. Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy. *Journal of Hydrology* 348, 87-97.
- Pu, T., He, Y., Zhang, T., Wu, J., Zhu, G., Chang, L., 2013. Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: a case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region. *Applied Geochemistry* 33, 199-212.
- Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J., Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D., 2007. Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia. *Journal of Hydrology* 333, 47-57.
- Vallejos, A., Diaz-Puga, M.A., Sola, F., Daniele, L., Pulido-Bosch., 2015. Using ion and isotope characterization to delimitate a hydrogeological macrosystem, Sierra de Gador (SE, Spain). *Journal of Geochemical Exploration* 155, 14-25.
- Xing, I., Gua, H., Zhan, Y., 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences* 70-71, 250-264.
- Zabala, M.E., Manzano, M., Vives, L., 2015. The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina. *Science of the Total Environment* 518-519, 168-188.

