

Source identification and health risk assessment of uranium in Tahlab aquifer, Taftan geothermal area-SE Iran

Ata Shakeri^{1*}, Parisa Parviz¹, Mohsen Rezaie², Mogtaba Noori³

1- Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Applied Research Office, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran

Keywords: Tahlab aquifer, Uranium, Source, Health risk, PCA

1-Introduction

Groundwater is an essential source of drinking water in many parts of the world (Jousma and Roelofsen, 2004), and contamination in groundwater of alluvial aquifers have been creating severe health problems for millions of people worldwide (Oremland and Stolz, 2005). Geogenic contamination of groundwater in geothermal areas might emanate from water-rock interaction processes and or mixing of high salinity geothermal groundwater with a cold aquifer (Lopez et al., 2012; Mahanta et al., 2015). Uranium is a harmful component to human health due to its chemical toxicity, even though the specific radioactivity of natural uranium is extremely low. Chronic exposure to uranium occurs predominantly via ingestion of food and water and results in kidney disease and potential toxicity in bones (Brugge and Buchner, 2011; Kurttio et al., 2005; Zamora et al., 1998). Naturally occurring uranium components exist in groundwater through the dissolution of the uranium-bearing minerals. For example, insoluble uraninite is readily oxidized through water-rock interactions to soluble uranyl ions, which transport in the form of chemical complexes with carbonate, phosphate, and sulfate ions (Langmuir, 1978; Murphy and Shock, 1999; Wanty and Schoen, 1992). The concentration of uranium in groundwater is usually in the range 0.1-50 µg/L and about 0.9-1.7 mg/kg in the Earth's crust (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). The uranium solubility in groundwater is predominantly controlled by oxidation-reduction potential, pH, and dissolved carbonate (Murphy and Shock, 1999; Smedley et al., 2006). Studies done in the past decade by the World Health Organization (WHO) and the US Environmental Protection Agency (EPA) have, over time, suggested safety levels for drinking water with limits ranging between 10 and 30 µg/L, the latter being the current value recommended by the WHO (2011). Tahlab aquifer is located in the east of Taftan Geothermal field, southeast of Iran. In the study area, western tributaries of the Gazu river drain through the eastern slope of the Taftan volcano. All fluvial channels flow through the Taftan volcanic rocks, composed of pyroclastic, epiclastic, porphyry andesite, dacite, and rhyolite lava flows, along with sandstone, conglomerate, and shale units (Eftekharneshad et al., 1977). Tahlab aquifer is one of the primary sources for supplying drinking and agriculture usages in the area. This study aims to assess hydrogeochemical characteristics, contamination, health risk assessment, and source apportionment of uranium in the Tahlab groundwater.

2- Material and methods

Water samples were collected from 16 wells in the Tahlab aquifer. The physicochemical parameters, such as TDS, pH, and electrical conductivity (EC), were measured using calibrated portable instruments. Uranium, Si, V, Fe, Ca, Mg, Na, and ICP-MS & OES analyzed in Zar-Azma Lab. The uncertainties are ±5% for ICP-MS & ICP-OEC. For geochemical modeling, PHREEQC Version 2 (Parkhurst and Appelo, 1999) was used to calculate saturation indices (SIs) concerning aqueous species' main mineral phases and activities. Principal component analysis (PCA) was performed to determine selected elements' sources (Kortatsi et al., 2009; Shakeri et al., 2015). Factor loadings of >0.71 are typically regarded as excellent and <0.32 very poor for interpretation (Nowak 1998; Garcia et al., 2004). In this research, the hazard quotient (HQ) and non-carcinogenic health effects are used to assess the public health risk of exposure to uranium through drinking water (US EPA, 2005; 2009).

*Corresponding author: atashakeri@khu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.32135.2072

Received 2020-01-02

Accepted 2020-12-02

3- Results and discussion

Plotting the groundwater samples on the piper diagram shows that most of the hydrochemical facies in the study area fall in the field of Na^+ - SO_4^{2-} - Cl^- type indicating a similar origin for all groundwater samples. The high mean concentrations of SO_4^{2-} and Cl^- along with lower concentrations of HCO_3^- suggest a deep circulation and mixing of the geothermal water with Tahlab groundwater (Shakeri et al., 2015). Bivariate mixing plot of Na-normalized Ca vs. Na-normalized HCO_3^- , examine the relative contribution of three major weathering mechanisms (silicate, carbonate, and evaporate) to solute concentration in groundwater (Halim et al., 2010; Mukherjee et al., 2012). This plot shows that carbonate and evaporates dissolution in groundwater are absent in the study area. Silicate weathering identified as the primary process controlling the groundwater solute content, i.e., the typical processes occurring in a hydrothermal environment. Our hypothesis is consistent with the data distribution on the Ca vs. Sr diagram. The results of saturation index (SI) show that the Tahlab aquifer groundwater samples are oversaturated to quartz, chalcedony, hematite, uraninite (68.75% of samples), coffinite (43.75), and U_4O_9 (31.25%). The principal component analysis was applied to reveal data structure, which helps find the relationship between sampling sites and elements. The PCA results represent three factors retained in the analysis and account for 82.92% of the water samples' variance. The principal component analysis identified that geogenic sources (hydrothermal addition) are more responsible for controlling the variability of physicochemical parameters and selected trace elements in the Tahlab (Shakeri et al., 2008, 2015; Ghoreyshinia et al., 2020). High positive factor loading of U, V, HCO_3^- , and Si suggests that Si-bearing minerals control the U concentration. The health risk from Tahlab groundwater consumption was assessed about its chronic (non-carcinogenic) effects, based on the calculation of the hazard quotient (HQ) for uranium (US EPA, 2005, 2009). If HQ's value exceeds 1, there is an unacceptable risk of adverse non-carcinogenic effects on health, while if the HQ is less than 1, it is at an acceptable level (USEPA, 2005). The results of hazard quotient (HQ) for adults were higher than one in the 81.25% of the groundwater samples. Health risk assessment of U based on the non-carcinogenic effects for children was higher than the acceptable level, although the concentration of U in the groundwater was lower than the groundwater drinking standard, indicating that this area's groundwater may not be safe for drinking purposes.

4-Conclusion

This study was conducted to evaluate the source, contamination, and risk assessment of uranium in Tahlab groundwater in the east of Taftan geothermal field and west bank of Talkhab River near the Iran-Pakistan border. The investigated groundwater samples' chemical signature suggests that they are mostly affected by a hydrothermal source related to deep circulation waters from Taftan volcano (Shakeri et al., 2008, 2015; Ghoreyshinia et al., 2020). The high concentration of sulfate and chloride ions in the groundwater, absence of evaporating formation in the study area, quartz, chalcedony, hematite, uraninite, coffinite and U_4O_9 supersaturation indicate more influences of SO_4 - Cl hydrothermal waters in the chemistry of Tahlab aquifer. The results of health risk assessment for U and the relatively high concentration of U, Si, SO_4 , and Cl , deriving from the addition of hydrothermal fluids to the Tahlab surficial aquifer, pose severe concerns about the quality of water in the study area.

References

- Brugge, D., Buchner, V., 2011. Health effects of uranium: new research findings. *Reviews on Environmental Health* 26(4), 231-249.
- Eftekharneshad, J., Samimi-namin, M., Arshadi, S., 1977. Khash and Narreh-now quadrangle maps 1:250000, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Garcia, J.H., Li, W.W., Arimoto, R., Okrasinski, R., Greenlee, J., Walton, J., Schloesslin, C., Sage, S., 2004. Characterization and implication of potential fugitive dust sources in the Paso del Norte region. *Science of the Total Environment* 325(1-3), 95-112.
- Ghoreyshinia, S.K., Shakeri, A., Mehrabi, B., Tassi, F., Mehr, M.R. Deshaee, A., 2020. Hydrogeochemistry, circulation path and arsenic distribution in Tahlab aquifer, East of Taftan Volcano, SE Iran. *Applied Geochemistry* 119, 104629.
- Halim, M.A., Majumder, R.K., Nessa, S.A., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B.B., Saepuloh, A., Jinno, K., 2010. Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: spatial variability on arsenic and boron enrichment. *Journal of Hazardous Materials* 180(1-3), 50-62.

- Jousma, G., Roelofsen, F.J., 2004. World-wide inventory on groundwater monitoring. International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC). Report nr. GP, 1.
- Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B., 2007. Trace elements from soil to human. Springer Science & Business Media.
- Kortatsi, B.K., Anku, Y.S.A., Anornu, G.K., 2009. Characterization and appraisal of facets influencing geochemistry of groundwater in the Kulpawn sub-basin of the White Volta Basin, Ghana. *Environmental Geology* 58(6), 1349-1359.
- Kurtio, P., Komulainen, H., Leino, A., Salonen, L., Auvinen, A., Saha, H., 2005. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives* 113(1), 68-72.
- Langmuir, D., 1978. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42(6), 547-569.
- López, D.L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M.A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., Ormachea, M., 2012. Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment* 429, 57-75.
- Mahanta, C., Enmark, G., Nordborg, D., Sracek, O., Nath, B., Nickson, R. T., Herbert, R., Jacks, G., Mukherjee, A., Ramanathan, A. L., Choudhury, R., Choudhury, R., 2015. Hydrogeochemical controls on mobilization of arsenic in groundwater of a part of Brahmaputra river floodplain, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 154-171.
- Mukherjee, A., Scanlon, B.R., Fryar, A.E., Saha, D., Ghosh, A., Chowdhuri, S., Mishra, R., 2012. Solute chemistry and arsenic fate in aquifers between the Himalayan foothills and Indian craton (including central Gangetic plain): influence of geology and geomorphology. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 90, 283-302.
- Murphy, W.M., Shock, E., 1999. Environmental aqueous geochemistry of actinides. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 38, 221-253.
- Nowak, B., 1998. Contents and relationship of elements in human hair for a non-industrialised population in Poland. *Science of the Total Environment* 209(1), 59-68.
- Oremland, R.S., Stolz, J.F., 2005. Arsenic, microbes and contaminated aquifers. *Trends in microbiology* 13(2), 45-49.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report* 99(4259), 312.
- Shakeri, A., Ghoreyshinia, S., Mehrabi, B., 2015. Surface and groundwater quality in Taftan geothermal field, SE Iran. *Water Quality, Exposure and Health* 7(2), 205-218.
- Shakeri, A., Moore, F., Kompani-Zare, M., 2008. Geochemistry of the thermal springs of Mount Taftan, southeastern Iran. *Journal of volcanology and geothermal research* 178(4), 829-836.
- Shakeri, A., Shakeri, R., Mehrabi, B., 2015. Potentially toxic elements and persistent organic pollutants in water and fish at Shahid Rajaei Dam, north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(7), 2201-2212.
- Smedley, P.L., Smith, B., Abesser, C., Lapworth, D., 2006. Uranium occurrence and behaviour in British groundwater. British Geological Survey, Groundwater Programme Commissioned Report CR/06/050N.
- EPA, U., 2005. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/630/P-03/001F.
- US EPA, 2005. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. EPA/630/P-03/001F. Washington, DC: Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency.
- Wanty, R.B., Schoen, R., 1992. A review of the chemical processes affecting the mobility of radionuclides in natural waters, with applications. *Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water*, 183.
- World Health Organization, 2011. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th edition. WHO, Geneva, Switzerland.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Shakeri, A., Parviz, E., Rezaie, M., Noori, M., 2022. Source identification and health risk assessment of uranium in Tahlab aquifer, Taftan geothermal area-SE Iran. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 740-752.

DOI: 10.22055/AAG.2020.32135.2072

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16254.html?lang=en

تعیین منشاء اورانیوم و ارزیابی ریسک سلامت آن در آبخوان تهلاب، منطقه زمین گرمایی تفتان - جنوب شرق ایران

عطا شاکری*

گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

پریسا پرویز

گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

محسن رضایی

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

مجتبی نوری

دفتر پژوهش و تحقیقات کاربردی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۲

*atashakeri@khu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه ترکیب زمین شیمیایی و رخداد اورانیوم در آبخوان تهلاب واقع در جنوب شرق ایران و در مجاور منطقه زمین گرمایی تفتان، به منظور تعیین منشاء اورانیوم و فرایندهای کنترل کننده شیمی آبخوان مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ارزیابی ریسک سلامت اورانیوم برای آب شرب در ۱۶ چاه نمونه برداری مورد بررسی قرار گرفت. آنیون های اصلی در تمام نمونه ها مقادیر بالاتر از استاندارد آب شرب (WHO) را نشان دادند. بررسی نمودار پایپر نشان داد که تیپ آب ها از نوع سولفات - کلروره و رخساره غالب سدیک است. نتایج هیدروژئوشیمیایی پیشنهاد می دهد که ترکیب شیمی آب زیرزمینی تهلاب تحت تاثیر منشاء هیدروترمالی در ارتباط با چرخش عمیق در محدوده آتشفشان تفتان قرار دارد. نتایج شاخص اشباع نشان داد که نمونه های آب زیرزمینی آبخوان تهلاب نسبت به کوارتز، کلسدونی، هماتیت، اورانیت (۶۸/۷۵ درصد نمونه ها)، کافینیت (۴۳/۷۵) و U_4O_9 (۳۱/۲۵) فوق اشباع هستند. نتایج تحلیل مولفه اصلی، فاکتور وزنی مثبت بالای اورانیوم، وانادیم، بیکربنات و سیلیس را نشان داد که تایید کننده منشاء زمین زاد اورانیوم و همچنین نقش سیلیس در کنترل غلظت اورانیوم در آبخوان است. محاسبه شاخص خطر براساس عنصر اورانیوم، برای ۸۱/۲۵ درصد نمونه ها مقدار بالاتر از یک را نشان داد. از این رو استفاده آب شرب برای کودکان توصیه نمی شود. ارزیابی ریسک سلامت نشان می دهد که مصرف آب در ناحیه مورد مطالعه می تواند تهدید سلامتی را به همراه داشته باشد. از این رو با توجه به تاثیر فعالیت هیدروترمالی آتشفشان تفتان، نیاز به پایش منظم عناصر بالقوه سمناک آبخوان است.

کلمات کلیدی: آبخوان تهلاب، اورانیوم، منشاء، ریسک سلامت، تحلیل مولفه اصلی

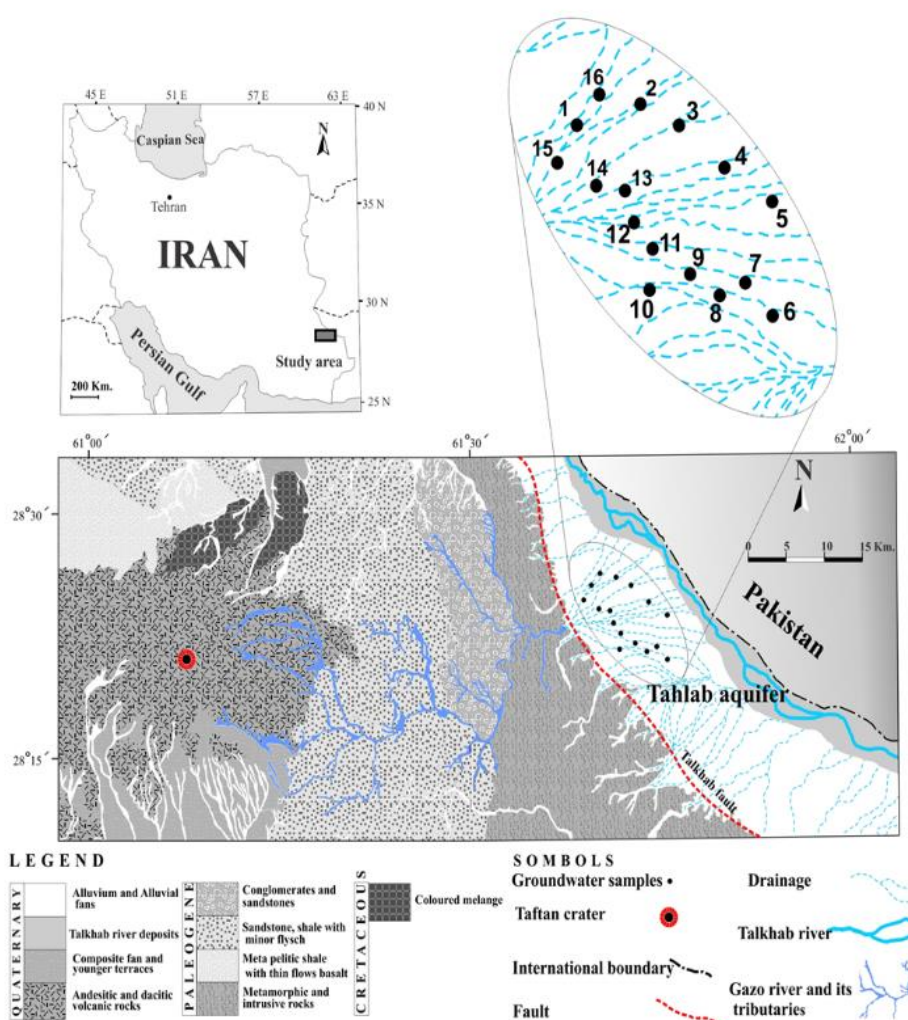
مقدمه

اورانیوم طبیعی شدت پایین است. قرار گرفتن در معرض اورانیوم در نتیجه مصرف غذا و آب رخ می دهد که باعث ایجاد بیماری مزمن کلیه و سمیت در استخوان ها می شود (Zamora et al., 1998; Kurttio et al., 2005; Brugge and Buchner, 2011). رخداد طبیعی ترکیبات اورانیوم در آب زیرزمینی از طریق کانی های حمل کننده اورانیوم بوجود می آید. برای مثال کانی اورانینیت در نتیجه اکسید شدن در طی واکنش های آب - سنگ یون های اورانیل محلول را بوجود می آورد که می تواند با تشکیل کمپلکس های شیمیایی با یون های کربنات، فسفات و سولفات انتقال پیدا نماید (Langmuir, 1978; Murphy and Shock, 1999; Wanty and Schoen, 1992). غلظت اورانیوم در آب زیرزمینی معمولاً در محدوده ۰/۱ تا ۵۰ میکروگرم بر لیتر و برای پوسته زمین

آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تامین آب آشامیدنی در قسمت هایی از جهان است، که آلودگی آن در آبخوان های آبرفتی می تواند مشکلات زیادی برای میلیون ها انسان در سرتاسر دنیا بوجود آورد (Jousma and Roelofsen, 2004; Oremland and Stolz, 2005). آلودگی زمین زاد آب زیرزمینی در مناطق زمین گرمایی ممکن است ناشی از فرایندهای آب - سنگ یا در نتیجه مخلوط شدن آب زمین گرمایی دارای شوری بالا با یک آبخوان سرد باشد (Lopez et al., 2012; Mahanta et al., 2015). اورانیوم بدلیل سمیت شیمیایی که دارد به عنوان یک ترکیب مضر شناخته می شود، اگرچه رادیواکتیویته ویژه آن بصورت

بر زمان، کیفیت آب زیرزمینی، شدت در معرض آلودگی فلزات سنگین قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق منابع آب زیرزمینی شرق تفتان (آبخوان تهلاب) می باشد. آبخوان تهلاب با توجه به قرار گرفتن در شرق ناحیه زمین گرمایی تفتان (شکل ۱) و تغذیه آن توسط حوزه آبریز تفتان می تواند تحت تاثیر سیستم هیدروترمالی، واکنش آب - سنگ و راهسازی عناصر سنگین بویژه اورانیوم قرار گیرد. همچنین وجود چشمه های گرم و سرد اسیدی با غلظت بالای عناصر سنگین (Shakeri et al., 2015) نشان دهنده تاثیر منطقه زمین گرمایی تفتان بر کیفیت منابع آب زیرزمینی اطراف آن است. از این رو بررسی آلودگی و ارزیابی ریسک سلامت اورانیوم با توجه به مصرف شرب و تعیین منشاء اورانیوم در آبخوان تهلاب از اهداف اصلی این پژوهش است.

در حدود ۰/۹ تا ۱/۷ میلی گرم بر کیلوگرم است (Kabata-Pendias and Mukherjee 2007). انحلال پذیری اورانیوم در آب زیرزمینی بطور غالب بوسیله پتانسیل اکسایشی - کاهش، pH و انحلال پذیری کربنات کنترل می شود (Murphy and Shock, 1999; Smedley et al., 2006). مطالعات صورت گرفته در دهه گذشته بوسیله سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا سطح ایمنی اورانیوم برای آب شرب را در محدوده ۱۰ تا ۳۰ میکروگرم در لیتر قرار داده است (WHO, 2011). استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق کشور به دلیل وضعیت اقلیمی به شدت با کمبود منابع آب به ویژه آب زیرزمینی مواجه است. از طرفی بدلیل قرار گرفتن بخش مهمی از منابع مهم آب زیرزمینی استان در مجاورت مناطق زمین گرمایی تفتان و



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری چاه های آب.

Fig. 1. Geological map of the Tahlab aquifer and location of the sampled water wells.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از آبخوان تهاب است که از جنوب به شهرستان‌های میرجاوه و خاش، از خاور به مرز پاکستان و از باختر به شهرستان نوک‌آباد محدود می‌شود و در موقعیت جغرافیایی بین $28^{\circ}15'$ تا $28^{\circ}30'$ عرض شمالی و $61^{\circ}00'$ تا $62^{\circ}00'$ طول شرقی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در شهرستان‌های خاش و میرجاوه واقع شده است. حداکثر بارش در ارتفاعات در محدوده مطالعاتی به میزان حدود ۱۶۰ میلی‌متر در سال و کمترین در دشت به میزان حدود ۵۵ میلی‌متر در سال می‌باشد. آبخوان تهاب از نوع آبرفتی است. رسوبات آبرفتی قسمت اعظم دشت تهاب را می‌پوشاند. ضخامت رسوبات آبرفتی از ۶۰ تا بیش از ۱۲۰ متر متغیر است و تناوبی از شن و ماسه و رس دارد (Eftekharneshad et al., 1977). در حاشیه غربی دشت به واسطه ورود رودخانه‌ها مخروط افکنه آبرفتی نسبتاً وسیع دیده می‌شود. جنس مواد متشکله آبرفتی اکثراً ماسه‌سنگ و از جنس پیروکلاستیک‌ها، اپی‌کلاستیک‌ها، اندریت‌های پورفیری، داسیت و ریولیت است که حاصل تخریب و فرسایش ارتفاعات تفتان است و در محدوده مورد مطالعه بیشتر توسط رودخانه گزو نهشته شده است (Eftekharneshad et al., 1977). رودخانه گزو، یکی از رودخانه‌های اصلی دشت تهاب است، سرچشمه‌های این رودخانه کوه‌های بیرک و مورپیش در جنوب، کوه گزو در شرق، کوه پنج انگشت در غرب و کوه تفتان در شمال محدوده حوضه است.

آبخوان تهاب از غرب توسط منطقه آتشفشانی تفتان و از شرق به وسیله رودخانه تلخ آب (مرز ایران و پاکستان) محدود شده است. سنگ بستر حوضه تهاب رسی مارنی است و نوع آبخوان تهاب از نوع آزاد تشخیص داده شده است. گسترش زون‌های دگرسانی و بالابودن غلظت عناصر سنگین در چشمه‌های گرمایی و سرد اسیدی محدوده آتشفشان تفتان (Shakeri et al., 2015) و مجاورت بخشی از آبخوان تهاب با این منطقه زمین گرمایی فعال احتمال رهاسازی اورانیوم را در این آبخوان را بیشتر می‌نماید. از این رو بررسی غلظت و منشاء احتمالی عنصر اورانیوم با توجه به نوع مصرف آب، ضروری است.

نمونه‌برداری و روش آزمایشگاهی

در این مطالعه به منظور تعیین منشاء اورانیوم و ارزیابی ریسک سلامت آن، از ۱۶ حلقه چاه در محدوده آبخوان تهاب (Tah1-16) در شرق منطقه زمین گرمایی تفتان براساس روش استاندارد نمونه‌برداری صورت گرفت (شکل ۱). نمونه‌برداری پس از ۱۰ دقیقه پمپاژ برای هر چاه انجام شد (APHA, 1995). پارامترهای pH و EC (هدایت الکتریکی) با استفاده از دستگاه قابل حمل (Eutech instruments, PCD650) در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شدند. قبل از نمونه‌برداری وسایل لازم جهت

نمونه‌برداری آماده گردید. نمونه‌برداری به این صورت انجام شد که در ابتدا هر بطری یک و نیم لیتری پلی اتیلنی ۳ بار توسط همان آب شسته شده و بطری به طور کامل پر شد. بر روی هر نمونه، برچسب با تاریخ، مکان و زمان نمونه‌برداری زده شد. نمونه‌های آب زیرزمینی با استفاده از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرومتر و پمپ خلأ برای جداسازی مواد معلق، فیلتر شدند. سپس نمونه‌های فیلتر شده به دو بخش تقسیم شد. pH یک بخش از نمونه‌های مورد نظر برای تجزیه کاتیون‌های اصلی، اورانیوم، سیلیس، آهن و وانادیم با استفاده از نیتریک اسید غلیظ با خلوص بالا به کمتر از ۲ رسید. بخش دیگر اسیدی نشده برای تعیین غلظت آنیون‌های حل شده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها تا زمان انجام تجزیه در دمای ۴ درجه سانتی-گراد در یخچال قرار گرفتند. غلظت، اورانیوم، آهن، وانادیم و سیلیس به روش ICP-MS در شرکت زرآما و یون‌های اصلی در آزمایشگاه هیدروشیمی دانشگاه خوارزمی اندازه‌گیری شدند.

روش تحلیل آماری و هیدروژئوشیمیایی

مهمترین روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق روش تحلیل مولفه اصلی (PCA: Principal Component Analysis) است که با استفاده از نرم‌افزار SPSS22 به منظور تعیین منشأ اورانیوم و ارتباط بین پارامترهای هیدروژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل مؤلفه اصلی، یکی از انواع آنالیزهای چند متغیره است که به‌طور وسیعی در مطالعات زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته است (Kortatsi et al., 2009; Shakeri et al., 2015). رایج‌ترین نوع PCA برای تفسیر نتایج مؤلفه‌های آلودگی، روش Varimax Rotation است. در این روش، مقادیر فاکتورهای با وزن بالای ۰/۷۱ (Factor loading) قابل توجه و مقادیر کمتر از ۰/۳۱ ضعیف در نظر گرفته می‌شود (Nowak 1998; Garcia et al., 2004).

به منظور تحلیل هیدروژئوشیمیایی آبخوان تهاب، واکنش آب-سنگ، و ارزیابی درجه تعادل بین کانی‌ها از نمودارهای دوتایی، پایپر و شاخص اشباع (SI) استفاده شده است. نسبت‌های یونی، معرف‌های مناسبی برای بررسی ترکیب شیمی منابع آب زیرزمینی هستند و استفاده از آن‌ها روش مناسبی برای تعیین منشأ املاح است. این نسبت‌ها متأثر از ترکیب شیمیایی کانی‌های محلول در آب بوده است و مقدار کانی انحلال یافته در درجه بعدی اهمیت قرار دارد (Han et al., 2010). از شاخص اشباع برای پیدا کردن ساختار هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی که ارتباط متقابل سنگ‌های دربرگیرنده، درجه تعادل بین کانی‌ها و ترکیب شیمیایی آب را نشان می‌دهد، استفاده می‌شود (Lopez-Chicano et al., 2001). در این پژوهش شاخص اشباع توسط نرم افزار PHREEQC Interactive 2.17. 4799 محاسبه شده است. شاخص اشباع از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$SI = \log(P_A / K_T) \quad (1)$$

بحث

هیدروژئوشیمی

نتایج آنالیز شیمیایی یون‌های اصلی، اورانیوم، سیلیس، آهن و وانادیوم نمونه‌های آبخوان تهاب در جدول ۱ ارائه شده است. کمینه و بیشینه مقدار هدایت الکتریکی آبخوان تهاب ۳۱۵۰ تا ۹۳۹۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و pH نمونه‌ها ۷/۶ تا ۸/۱ می‌باشد که نشان دهنده ماهیت خنثی تا قلیایی آب زیرزمینی است. مقایسه غلظت اورانیوم با مقادیر استاندارد آب شرب (WHO, 2011) نشان می‌دهد که غلظت این عنصر در آبخوان تهاب کمتر از استاندارد است. سولفات، کلر، پتاسیم و هدایت الکتریکی (WHO, 2011) در تمام نمونه‌ها مقادیر بالاتر از استاندارد آب شرب را نشان دادند.

برای بررسی تیپ و رخساره و وضعیت تکامل شیمیایی آبخوان تهاب از ترکیب نمودار پایپر با نمودار مثلثی $Cl-SO_4-HCO_3$ (Giggenbach, 1991) استفاده شده است (شکل ۲). این نمودار مشخصات شیمیایی آب را برحسب غلظت نسبی و نه بر حسب غلظت مطلق، نشان می‌دهد. با پلات کردن نمونه‌های آب بر روی نمودار پایپر، مشاهده می‌شود که سدیم کاتیون غالب و سولفات و کلر به ترتیب آنیون غالب در نمونه‌های آب هستند، بنابراین تیپ نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان تهاب در شرق تفتان سولفات - کلروره و رخساره غالب آن سدیک است. در آبخوان تهاب در جهت جریان آب زیرزمینی منابع آب از تیپ سولفات به سمت کلروره تکامل یافته اند. بررسی نمودار نسبت کلر، سولفات و بی‌کربنات نشان می‌دهد که نمونه‌های آب زیرزمینی در محدوده آب‌های آتشفشانی قرار دارند (شکل ۲). غلظت بالای یون‌های سولفات و کلر و پایین بودن غلظت یون بی‌کربنات احتمالاً نشان دهنده چرخش عمیق و آمیختگی آب زمین‌گرمایی با آبخوان تهاب است (Shakeri et al., 2015). در این تحقیق از نمودار دوتایی Ca/Na در مقابل HCO_3/Na برای تعیین سهم نسبی فرایند هوازدگی سیلیکات‌ها، کربنات‌ها و تبخیری‌ها برای کنترل شیمی آبخوان در یک محیط هیدروترمال استفاده شده است (Halim et al., 2010; Mukherjee et al., 2012). بررسی این نمودار (شکل ۳a) نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آبخوان تهاب تحت تاثیر هوازدگی سیلیکات‌ها در یک محیط هیدروترمال قرار دارد. نبود رخنمون‌های تبخیری در منطقه (Eftekharneshad et al., 1977) تایید کننده بی‌تاثیر بودن کربنات‌ها و تبخیری‌ها در کنترل شیمی آبخوان است. این ایده توسط نمودار غلظت کلسیم در مقابل استرانسیم (شکل ۳b) مورد تایید قرار گرفته است.

در این رابطه P_{AI} محصول فعالیت یونی یون‌ها و K_T ثابت تعادل کانی در دمای خاص است. شاخص اشباع مثبت نشان دهنده فوق اشباع بودن یون تشکیل دهنده یک کانی در محیط آب و در نتیجه تمایل به نشست و خارج شدن به صورت کانی را دارد. اگر شاخص اشباع یک کانی منفی باشد، نشان دهنده تحت اشباع بودن آن کانی است و پتانسیل حل شدن در آب را دارد. شاخص اشباع یونی صفر نشان دهنده محصول فعالیت یونی و محصول انحلال پذیری برابر است و تعادل ترمودینامیک با فاز جامد همراه است (Gemici and Filiz, 2001).

ارزیابی ریسک سلامت

محاسبه ضریب خطر (Hazard Quotient)

به منظور تخمین خطر سلامتی مصرف آب برای انسان، ضریب خطر (HQ) از تقسیم میانگین دوز مصرف روزانه (ADD) بر دوز مرجع (RFD) (رابطه ۲) محاسبه می‌شود (US EPA, 2009):

$$HQ = ADD/RFD \quad (2)$$

و میانگین دوز روزانه نیز از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (US EPA, 2005).

$$ADD = C_m C_R / B_W \quad (3)$$

که در رابطه‌های ۲ و ۳:

RFD: دوز مرجع $(mg/kg-d)$ ، ADD: میانگین دوز مصرف روزانه $(mg/kg-d)$ ، B_W : وزن بدن مصرف کننده (۷۱ کیلوگرم برای بزرگسالان و ۱۴/۵ کیلوگرم برای کودکان)، C_m : غلظت اندازه‌گیری شده آلاینده m در آب، CR: میانگین مصرف روزانه آب (سه لیتر در روز).

اگر برای هر یک از آلاینده‌ها HQ کمتر از یک شود به این معنی است که خطر قابل توجهی از نظر سمی بودن ندارد. نسبت‌های بیش از یک برای HQ می‌تواند نشان دهنده احتمال وجود پتانسیل خطر باشد (US EPA, 2005).

محاسبه حد مجاز مصرف آب

برای محاسبه مقدار مجاز مصرف روزانه آب بر اساس عوارض غیرسرطان‌زایی آلاینده‌ها از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

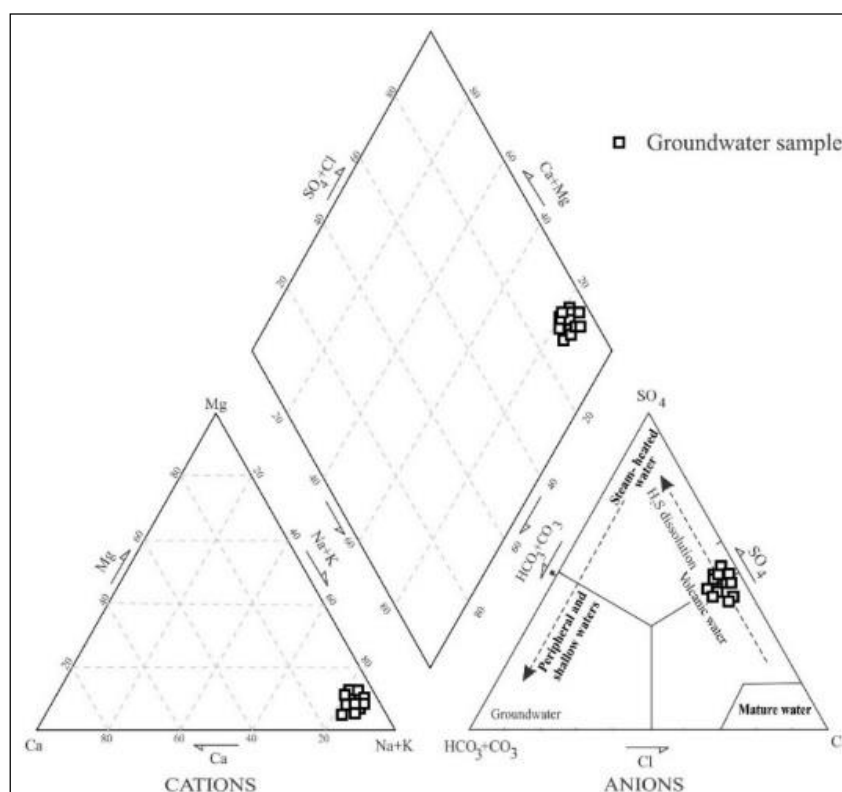
CR_{lim} : بیشترین حد مجاز مصرف آب برحسب لیتر در روز، B_W : وزن بدن مصرف کننده (۷۱ کیلوگرم برای بزرگسالان، ۱۴/۵ کیلوگرم برای کودکان)، C_m : غلظت اندازه‌گیری شده آلاینده m در آب است.

$$CR_{lim} = RFD \cdot B_W / C_m \quad (4)$$

جدول ۱- خلاصه آماری نتایج آنالیز پارامترهای فیزیکی شیمیایی، یون‌های اصلی و عناصر انتخابی در نمونه‌های آب آبخوان تهلاب

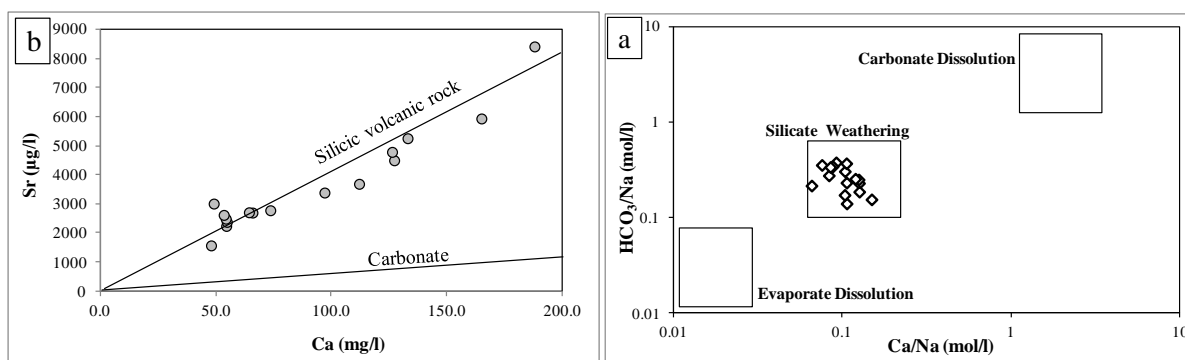
Table 1. Descriptive statistics of physicochemical parameters, major ions and selected elements in the analyzed water samples of the Tahlab aquifer.

Samples	pH	EC μs/cm	TDS mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	U μg/l	Si μg/l	V μg/l	Fe μg/l
Tah-1	8.1	3280	2132	38	22.8	584.2	11.7	213.5	490.0	580.8	4.70	23720	37.59	20
Tah-2	8.0	3150	2048	38	22.8	556.6	11.7	207.4	486.5	532.8	6.35	24950	50.14	30
Tah-3	7.9	3200	2080	36	22.8	570.4	11.7	195.2	490.0	561.6	5.65	25520	52.87	150
Tah-4	7.7	5460	3549	70	49.2	972.9	19.5	225.7	903.0	1008.0	12.60	30530	61.26	10
Tah-5	7.6	9390	6104	114	84.0	1692.8	35.1	231.8	1750.0	1608.0	10.76	28000	48.64	20
Tah-6	7.7	6270	4776	68	52.8	1159.2	23.4	195.2	910.0	1425.6	6.60	14000	21.88	20
Tah-7	7.7	5080	3302	62	52.8	906.2	19.5	170.8	854.0	974.4	5.33	18290	25.38	10
Tah-8	7.7	5690	3699	80	67.2	1002.8	19.5	158.6	1050.0	1017.6	5.08	18320	20.90	90
Tah-9	7.8	3540	2301	26	31.2	664.7	11.7	140.3	591.5	672.0	0.75	4430	0.75	20
Tah-10	7.7	4560	2964	66	40.8	811.9	19.5	207.4	735.0	873.6	8.07	11140	12.98	10
Tah-11	7.7	4180	2717	52	44.4	726.8	15.6	189.1	665.0	782.4	6.54	15250	19.05	10
Tah-12	7.8	3440	2236	40	32.4	616.4	11.7	146.4	542.5	672.0	3.16	16400	24.07	10
Tah-13	7.8	3390	2204	40	32.4	579.6	11.7	176.9	525.0	595.2	6.27	21200	29.25	10
Tah-14	7.8	3190	2074	32	28.8	558.9	11.7	207.4	490.0	542.4	3.86	20040	26.71	40
Tah-15	7.7	3220	2093	36	33.6	584.2	11.7	164.7	490.0	657.6	6.86	20500	36.22	30
Tah-16	7.7	3200	2083	35	31.3	573.2	11.7	190.4	490.0	590.1	7.09	20820	38.32	30
Maximun	8.1	9390	6104	114	84.0	1692.8	35.1	231.8	1750.0	1608.0	12.60	30530	61.26	150
Minimum	7.6	3150	2048	26	22.8	556.6	11.7	140.3	486.5	532.8	3.16	4430	12.98	10
Mean	7.8	4390	2897	52	40.6	785.1	16.1	188.8	716.4	818.4	6.59	19569	33.69	32
USEPA	6.5 – 8.5	–	500	–	–	30-60	–	–	250	250	–	–	–	300
WHO	6 – 8	–	1500	200	150	50	12	–	250	250	15	–	–	300



شکل ۲- نمودار پایپر نمونه‌های آب آبخوان تهلاب.

Fig. 2. Piper diagram of the Tahlab groundwater samples.



شکل ۳- نمودار دوتایی Ca/Na در مقابل HCO_3^-/Na و Sr در مقابل Ca برای نمونه های آب زیر زمینی ناحیه مورد مطالعه.
 Fig. 3. HCO_3^-/Na vs. Ca/Na and Sr vs. Ca binary plots for groundwater samples from the study area.

تحلیل مولفه اصلی

نتایج تحلیل مولفه اصلی برای عناصر اورانیوم، وانادیم، آهن، سیلیسیم، یونهای اصلی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی با واریانس کل ۸۲/۹۲ درصد در جدول ۲ ارائه شده است. مولفه اول با ۵۰/۷۹ درصد از واریانس کل، فاکتور وزنی مثبت بالای منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم، EC، کلر و سولفات ($0.97 < PC1 < 0.95$) را نشان می‌دهد. اورانیوم (۰/۴۳) فاکتور وزنی مثبت متوسطی دارد. این عامل مهمترین دلیل افزایش کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی آب و عامل اصلی کنترل هدایت الکتریکی در آبخوان و تعیین کننده کیفیت آب منطقه است. مولفه دوم با ۲۰/۸۹ درصد از واریانس کل، فاکتور وزنی مثبت بالای عناصر وانادیم، سیلیسیم، اورانیوم و بیکربنات ($0.93 < PC2 < 0.79$) را نشان می‌دهد (جدول ۲) که بیانگر کنترل غلظت و تحرک پذیری اورانیوم توسط سیلیس و تاحدودی بیکربنات در آبخوان تهلاب است. غلظت اورانیوم و تحرک

آن در سیستم‌های آبی توسط انواع عامل کمپلکس کننده مانند کربنات‌ها، فسفات، وانادات، فلوراید، سولفات و سیلیکات کنترل می‌شود (Langmuir, 1997). فاکتور مثبت بالای سیلیس با اورانیوم نشان می‌دهد که اورانیوم همراه با سیلیس بوسیله چرخش عمیق سیالات زمین‌گرمایی (Shakeri et al., 2015, Ghoreyshinia et al., 2020) و اضافه شدن از سیستم هیدروترمال تفتان به آبخوان منشاء گرفته‌اند. افزایش فشار بخشی CO_2 در نتیجه فعالیت زمین‌گرمایی و شکستگی‌های منطقه و انحلال این گاز در لایه آبدار می‌تواند منجر به انحلال کانی‌های فلدسپار موجود در آبرفت‌های تشکیل دهنده سفره و افزایش غلظت Ca و بی‌کربنات و در نتیجه قلیابیت آب زیرزمینی شود (Norton, 2009). اورانیوم همچنین با pH همبستگی بالای منفی دارد. افزایش pH باعث افزایش خروج اورانیوم محلول از ماتریس سنگ می‌شود (Langmuir, 1978).

جدول ۲- تحلیل مولفه اصلی (PCA) نمونه‌های آبخوان تهلاب.

Table 2. Principal component analysis for the Tahlab aquifer samples.

Rotated Component Matrixa			
	PC1	PC2	PC3
Na	0.97	0.15	-0.10
EC	0.97	0.18	-0.10
K	0.96	0.21	-0.17
Cl	0.96	0.17	-0.02
SO ₄	0.96	0.06	-0.18
Ca	0.95	0.22	-0.10
Mg	0.97	0.02	-0.06
V	0.05	0.93	-0.13
Si	0.10	0.92	-0.17
Fe	-0.11	0.20	-0.96
U	0.43	0.79	-0.43
HCO ₃	0.20	0.84	-0.27
pH	-0.45	0.13	0.36

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization

شاخص اشباع

به منظور تعیین فعالیت گونه‌های مختلف اورانیوم در آب و تعادل کانی‌های اورانیوم‌دار، شاخص اشباع برای تمام نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه شد. بررسی نتایج بدست آمده (جدول ۳) نشان می‌دهد که حدود ۶۸/۷۵ درصد نمونه‌ها نسبت به اورانینیت، ۳۱/۲۵ درصد نسبت به U_4O_9 و ۴۳/۷۵ درصد نمونه‌ها نسبت به کافینیت فوق اشباع هستند. تمام نمونه‌های آب نسبت به UO_2 تحت اشباع هستند. همچنین تمام نمونه‌های آب نسبت به کوارتز، هماتیت و کلسدون (بجز نمونه Th9) فوق اشباع هستند که نشان دهنده‌ی ته‌نشست کانی‌های سیلیسی و آهن‌دار در آبخوان ته‌لاب است. شکل ۴ شاخص اشباع کانی‌های مختلف اورانیوم‌دار نمونه‌های آب در مقابل هدایت الکتریکی نشان داده شده است. با افزایش هدایت الکتریکی (EC) شاخص اشباع کانی‌های اورانینیت، کافینیت، U_4O_9 و UO_2 در نمونه‌های آب، افزایش می‌یابد. بنابراین هدایت الکتریکی نقش مهمی در کنترل غلظت کانی‌های اورانیوم‌دار در منابع آب منطقه تفتان دارد (شکل ۴).

ارزیابی ریسک سلامت

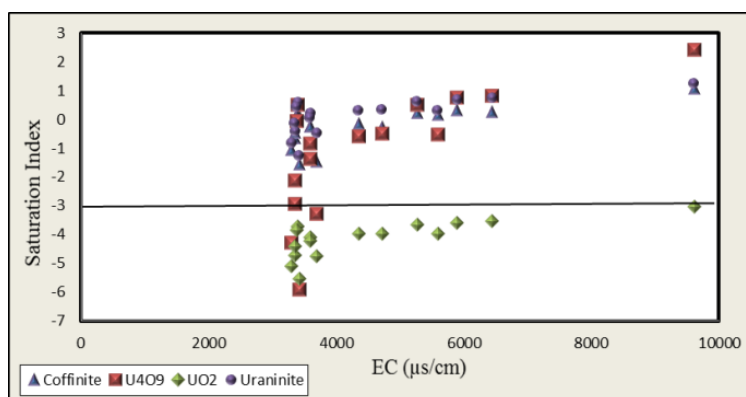
برای تخمین خطر سلامتی احتمالی ناشی از مصرف منابع آب زیرزمینی آبخوان ته‌لاب برای انسان، ضریب خطر (HQ) بر اساس رابطه ۱ برای عنصر اورانیوم محاسبه شد. باتوجه به نتایج بدست آمده، مصرف آب از چاه‌های انتخابی آبخوان ته‌لاب برای بزرگسالان بلامانع است؛ در صورتی که مصرف آب برای کودکان در تمام چاه‌های نمونه‌برداری شده (به جز چاه‌های Tah9، Tah12 و Tah14) خطرناک ارزیابی می‌شود (جدول ۴).

حد مجاز مصرف آب بر اساس عوارض غیرسرطانی اورانیوم با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است. بر اساس عوارض غیر سرطانی اورانیوم مقدار مجاز آب مصرفی همه‌ی چاه‌ها برای بزرگسالان، بیشتر از سه لیتر در روز محاسبه شده است. در صورتی که مقدار مجاز آب مصرفی همه چاه‌ها (به جز Tah9) برای کودکان کمتر از سه لیتر در روز محاسبه شده است. محاسبه حد مجاز مصرف آب (جدول ۴) با توجه به عوارض غیرسرطانی، استفاده از آب آبخوان ته‌لاب برای کودکان توصیه نمی‌شود.

جدول ۳- شاخص اشباع گونه‌های اورانیوم و فازهای کانیایی مختلف در نمونه‌های آبخوان ته‌لاب.

Table 3. Saturation index of different mineral phases and uranium species in the Tahlab aquifer samples.

Sample No.	Quartz	Calcite	Chalcedony	Fe(OH) ₃	Hematite	SiO ₂	Coffinite	U ₄ O ₉	UO ₂	Uraninite
Tah1	0.79	0.11	0.32	-0.75	11.26	-0.56	-1.55	-5.92	-5.55	-1.27
Tah2	0.38	0.05	0.35	-0.86	11.04	-0.53	-1.07	-4.29	-5.09	-0.82
Tah3	0.83	-0.12	0.36	-0.44	11.87	-0.52	-0.67	-2.93	-4.71	-0.43
Tah4	0.91	-0.04	0.44	-2.28	8.19	-0.44	0.15	-0.52	-3.96	0.31
Tah5	0.90	-0.40	0.42	-2.34	8.07	-0.46	1.06	2.41	-3.04	1.24
Tah6	0.58	-0.38	0.11	-2.01	8.74	-0.77	0.25	0.82	-3.54	0.74
Tah7	0.69	-0.28	0.22	-2.26	8.23	-0.67	0.23	0.50	-3.66	0.62
Tah8	0.67	-0.21	0.20	-1.30	10.13	-0.66	0.30	0.76	-3.60	0.68
Tah9	0.08	-0.39	-0.42	-1.61	9.54	-1.28	-1.47	-3.29	-4.75	-0.47
Tah10	0.48	-0.15	-0.02	-2.26	8.24	-0.88	-0.28	-0.49	-3.96	0.32
Tah11	0.61	-0.27	0.14	-2.24	8.28	-0.75	-0.17	-0.59	-3.98	0.30
Tah12	0.64	-0.29	0.16	-1.91	8.93	-0.72	-0.25	-0.85	-4.09	0.19
Tah13	0.77	-0.27	0.29	-1.91	8.94	-0.59	-0.26	-1.39	-4.23	0.05
Tah14	0.73	-0.19	0.26	-1.31	10.13	-0.63	-0.48	-2.12	-4.41	-0.13
Tah15	0.74	-0.48	0.27	-1.73	9.29	-0.62	0.23	0.51	-3.71	0.57
Tah16	0.75	-0.40	0.28	-1.73	9.29	-0.61	0.11	-0.05	-3.84	0.43



شکل ۴- نمودار شاخص اشباع گونه‌های مختلف اورانیوم در مقابل هدایت الکتریکی (EC) برای نمونه‌های آب زیرزمینی.

Fig. 4. Saturation index for various uranium species versus EC in the groundwater samples.

جدول ۴- مقدار مصرف مجاز آب با توجه به عوارض غیرسرطانی اورانیوم.

Table 4. Permissible limits of water consumption based on the non-carcinogenic effects of uranium.

CR _{lim}		HQ		ADD		RFD	C _m	Water Samples
Non-carcinogenic effects		Children	Adults	Children	Adults			
2.17	10.65	1.5	0.16	0.0009	0.0001	0.0006	0.004	Tah-1
1.45	7.10	2.16	0.33	0.0013	0.0002	0.0006	0.006	Tah-2
1.74	8.52	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.005	Tah-3
0.72	3.55	3.33	0.83	0.002	0.0005	0.0006	0.012	Tah-4
0.87	4.26	3.33	0.66	0.002	0.0004	0.0006	0.01	Tah-5
1.45	7.10	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.006	Tah-6
1.74	8.52	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.005	Tah-7
1.74	8.52	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.005	Tah-8
11.60	56.8	1.66	0.05	0.0001	0.0003	0.0006	<1.0	Tah-9
1.00	5.32	1.66	0.50	0.001	0.0003	0.0006	0.008	Tah-10
1.45	7.10	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.006	Tah-11
2.90	14.20	1.00	0.16	0.0006	0.0001	0.0006	0.003	Tah-12
1.45	7.10	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.006	Tah-13
2.90	14.20	1.00	0.16	0.0006	0.0001	0.0006	0.003	Tah-14
1.45	7.10	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.006	Tah-15
1.24	6.00	1.66	0.33	0.001	0.0002	0.0006	0.007	Tah-16

نتیجه گیری

آبخوان تهابلاد زمین‌زاد است. با توجه به تیپ غالب سولفات‌ها - کلروره بودن آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان توسط حوزه آبریز تفتان و چرخش عمیق آب در محدوده آتشفشان تفتان، می‌توان گفت که فعالیت هیدروترمالی آتشفشان تفتان نقش مهمی در تحرک‌پذیری یون‌های اصلی و عناصر بالقوه سمناک (Shakeri et al., 2008 and 2015) مانند اورانیوم و ورود آنها به آبخوان تهابلاد دارد. نتایج ارزیابی ریسک سلامت عنصر اورانیوم در نمونه‌های آب بر اساس محاسبه ضریب خطر و عوارض غیرسرطانی نشان داد، که کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد پژوهش تا حدودی هشدار دهنده و نیازمند پایش مداوم عناصر سنگین بویژه اورانیوم و برنامه‌ریزی مناسب برای حفظ زیست بوم منطقه است.

در این پژوهش نمونه‌های آب زیرزمینی دشت تهابلاد به منظور مطالعه هیدروژئوشیمیایی و ارزیابی ریسک سلامت عناصر اورانیوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هیدروژئوشیمی آبهای زیرزمینی نشان داد که تیپ آب آبخوان سولفات‌ها - کلروره و رخساره غالب آن سدیک است. نتایج نمودارهای ترکیبی نشان داد که سیستم هیدروترمالی تفتان و واکنش آب - سنگ روند غالبی در تکامل شیمی آبخوان تهابلاد داشته است. نتایج شاخص اشباع نشان می‌دهد که اورانیوم بیشتر به صورت ترکیب اورانیت از آب خارج می‌شود. نبود فعالیت صنعتی در محدوده مطالعاتی و محدود بودن فعالیت‌های کشاورزی در تایید نتایج تحلیل مولفه اصلی نشان می‌دهد که منشاء اصلی اورانیوم در

منابع

- APHA, 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th ed. APHA, Washington, DC.
- Brugge, D., Buchner, V., 2011. Health effects of uranium: new research findings. Reviews on Environmental health 26(4), 231-249.
- Eftekharneshad, J., Samimi-namin, M., Arshadi, S., 1977. Khash and Narreh-now quadrangle maps 1:250000, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Garcia, J.H., Li, W.W., Arimoto, R., Okrasinski, R., Greenlee, J., Walton, J., Schloesslin, C., Sage, S., 2004. Characterization and implication of potential fugitive dust sources in the Paso del Norte region. Science of the Total Environment 325(1-3), 95-112.
- Gemici, Ü., Filiz, Ş., 2001. Hydrochemistry of the Çeşme geothermal area in western Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research 110(1-2), 171-187.

- Giggenbach, W.F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development 119-144.
- Ghoreyshinia, S.K., Shakeri, A., Mehrabi, B., Tassi, F., Mehr, M.R. Deshaee, A., 2020. Hydrogeochemistry, circulation path and arsenic distribution in Tahlab aquifer, East of Taftan Volcano, SE Iran. Applied Geochemistry 119, 104629.
- Halim, M.A., Majumder, R.K., Nessa, S.A., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B.B., Saepuloh, A., Jinno, K., 2010. Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: spatial variability on arsenic and boron enrichment. Journal of Hazardous Materials 180(1-3), 50-62.
- Han, D.M., Liang, X., Jin, M.G., Currell, M.J., Song, X.F., Liu, C.M., 2010. Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin. Journal of Volcanology and Geothermal Research 189(1-2), 92-104.
- Jousma, G., Roelofsen, F.J., 2004. World-wide inventory on groundwater monitoring. International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC). Report nr. GP, 1.
- Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B., 2007. Trace elements from soil to human. Springer Science & Business Media.
- Kortatsi, B.K., Anku, Y.S.A., Anornu, G.K., 2009. Characterization and appraisal of facets influencing geochemistry of groundwater in the Kulpawn sub-basin of the White Volta Basin, Ghana. Environmental Geology 58(6), 1349-1359.
- Kurtio, P., Komulainen, H., Leino, A., Salonen, L., Auvinen, A., Saha, H., 2005. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. Environmental Health Perspectives 113(1), 68-72.
- Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental. Geochemistry Prentice Hall, NJ, 600.
- Langmuir, D., 1978. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. Geochimica et Cosmochimica Acta 42(6), 547-569.
- López-Chicano, M., Cerón, J.C., Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., 2001. Geochemistry of thermal springs, Alhama de Granada (southern Spain). Applied geochemistry 16(9-10), 1153-1163.
- López, D.L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M.A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., Ormachea, M., 2012. Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. Science of the Total Environment 429, 57-75.
- Mahanta, C., Enmark, G., Nordborg, D., Sracek, O., Nath, B., Nickson, R. T., Herbert, R., Jacks, G., Mukherjee, A., Ramanathan, A. L., Choudhury, R., Choudhury, R., 2015. Hydrogeochemical controls on mobilization of arsenic in groundwater of a part of Brahmaputra river floodplain, India. Journal of Hydrology: Regional Studies 4, 154-171.
- Mukherjee, A., Scanlon, B.R., Fryar, A.E., Saha, D., Ghosh, A., Chowdhuri, S., Mishra, R., 2012. Solute chemistry and arsenic fate in aquifers between the Himalayan foothills and Indian craton (including central Gangetic plain): influence of geology and geomorphology. Geochimica et Cosmochimica Acta 90, 283-302.
- Murphy, W.M., Shock, E., 1999. Environmental aqueous geochemistry of actinides. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 38, 221-253.
- Norton, J., Petersen, C., Early, L.E.T., Largey, J., Mills, S.K., Johnson, N., Bearard, T., Parker, T.K., Duguid, A., Lamel, A., Roulet, C., 2009. Potential Groundwater Quality Impacts Resulting from Geologic Carbon Sequestration. Washington, US A: Water Research Foundation.
- Nowak, B., 1998. Contents and relationship of elements in human hair for a non-industrialised population in Poland. Science of the Total Environment 209(1), 59-68.
- Oremland, R.S., Stolz, J.F., 2005. Arsenic, microbes and contaminated aquifers. Trends in Microbiology 13(2), 45-49.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99(4259), 312.
- Shakeri, A., Ghoreyshinia, S., Mehrabi, B., 2015. Surface and groundwater quality in Taftan geothermal field, SE Iran. Water Quality, Exposure and Health 7(2), 205-218.
- Shakeri, A., Moore, F., Kompani-Zare, M., 2008. Geochemistry of the thermal springs of Mount Taftan, southeastern Iran. Journal of Volcanology and Geothermal Research 178(4), 829-836.

- Shakeri, A., Shakeri, R., Mehrabi, B., 2015. Potentially toxic elements and persistent organic pollutants in water and fish at Shahid Rajaei Dam, north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(7), 2201-2212.
- Smedley, P.L., Smith, B., Abesser, C., Lapworth, D., 2006. Uranium occurrence and behaviour in British groundwater. British Geological Survey, Groundwater Programme Commissioned Report CR/06/050N.
- EPA, U., 2005. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/630/P-03/001F.
- US EPA, 2005. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. EPA/630/P-03/001F. Washington, DC: Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency.
- Wanty, R.B., Schoen, R., 1992. A review of the chemical processes affecting the mobility of radionuclides in natural waters, with applications. *Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water*, 183.
- World Health Organization, 2011. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th edition. WHO, Geneva, Switzerland.

