Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Feasibility of rainwater harvesting as an alternative water supply method for rural areas in semi-arid climates

Mehdi Fard Davaji[1], Nader Jandaghi[*2], Mojtaba Ghareh Mahmoodlu[3], Amin Mohamadi Ostadkelaye[4], Mostafa Seyyed[5]

1. M.Sc., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, Email: m.farddavaji@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: nader.jandaghi@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: m.g.mahmoodlu@gmail.com
4. Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: amubaran@gmail.com
5. Lecturer, University of Applied Science and Technology, Golestan, Iran, E-mail: mostafa.seyyd1353@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article history

Received: 09 August 2025

Revised: 08 September 2025

Accepted: 13 September 2025

Published online: 12 November 2025

Keywords:

Rainwater Harvesting, Physicochemical Characteristics, Microbial Contamination, Gibbs Diagram, Chenaran Village.

ABSTRACT

In this study, the physicochemical and microbiological quality of six water sources, including three local sources in Chenaran village (a reservoir, a waterfall, and a spring) and three rainwater harvesting sources (collected from bitumen-coated roofs, asbestos roofs, and open surfaces), was evaluated over two time intervals (at the time of sampling and two months later). Sampling was conducted in three replications, and twelve quality parameters, including EC, TDS, pH, nitrate, phosphate, and alkaline metals, were measured using standard laboratory methods. The results were compared with the guidelines of the World Health Organization (WHO) and the Iranian National Standard (ISIRI 1053). The statistical analysis using the paired T-test indicated that the mean values of five quality parameters, including phosphate, nitrate, sodium, EC, and turbidity, exhibited significant differences between the two sampling periods (p-values: 0.015, 0.000, 0.013, 0.022, and 0.010; p-value<0.05). In contrast, the least variation between the two periods was observed for the quality factors Ca and TDS, with p-values of 0.562 and 0.508, respectively. The Gibbs diagram analysis indicated that the quality parameters of rainwater sources had an atmospheric origin, while the local sources were influenced by geochemical processes (rock–water interaction). The cationic trilinear diagram revealed that some sources, such as the reservoir and waterfall, exhibited sodium-type water, while others, like the bitumen-coated roof, showed calcium-type water. The microbial analyses revealed that the waterfall and spring water sources were contaminated in both sampling periods and therefore require disinfection before drinking, whereas rainwater and reservoir sources were free from microbial contamination. Overall, although most of the village's water sources met drinking water standards, preliminary microbial treatment remains essential to ensure safety for human consumption.

Citation: Fard Davaji, M., Jandaghi, N., Ghareh Mahmoodlu, M., Mohamadi Ostadkelaye, A., & Seyyed, M. (2025). Feasibility of rainwater harvesting as an alternative water supply method for rural areas in semi-arid climates .*Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 13(3), 37-54.

DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association

* **Corresponding author:** Nader Jandaghi
Address: Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Iran, Iran.
Tel: +989113716769
Email: nader.jandaghi@gmail.com

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Feasibility of rainwater harvesting as an alternative water supply method for rural areas in semi-arid climates

Mehdi Fard Davaji[1], Nader Jandaghi[*2], Mojtaba Ghareh Mahmoodlu[3], Amin Mohamadi Ostadkelaye[4], Mostafa Seyyed[5]

1. M.Sc., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, Email: m.farddavaji@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: nader.jandaghi@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: m.g.mahmoodlu@gmail.com
4. Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran, E-mail: amubaran@gmail.com
5. Lecturer, University of Applied Science and Technology, Golestan, Iran, E-mail: mostafa.seyyd1353@gmail.com

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: In recent decades, the shortage of freshwater resources, especially in the arid and semi-arid regions of Iran, has become one of the most serious environmental and social challenges. Population growth, urbanization, climate change, and reduced precipitation have placed increasing pressure on surface and groundwater resources, threatening water security in many rural areas. Under these circumstances, rainwater harvesting, as a traditional, low-cost, and environmentally friendly method, has attracted considerable attention. However, concerns remain regarding the chemical and microbial quality of harvested rainwater, particularly after contact with various collection surfaces, which may pose risks to consumer health. This study aims to comprehensively evaluate the physicochemical and hydrochemical characteristics of rainwater harvested from rooftop surfaces in Chenaran village, Maraveh Tappeh, and to assess the feasibility of using this method as a sustainable and safe solution for water supply in arid and semi-arid regions.

Methodology: To assess the water quality in the region, six types of water sources were selected, including three conventional sources (water reservoir, waterfall, and spring) and three rainwater-harvested sources (collected from bitumen-coated roofs, asbestos roofs, and open surfaces). Rooftop surfaces were thoroughly cleaned before rainfall, and rainwater sampling was conducted 5 to 10 minutes after the onset of precipitation to minimize initial contamination. Sampling was performed in three rounds, with two samples taken from each source and analyzed at two time intervals (immediately and two months post-sampling) to evaluate changes in physicochemical and microbial quality over time. Physicochemical parameters, including electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), salinity, turbidity, pH, total hardness, calcium, magnesium, phosphate, potassium, nitrate, and sodium, were measured according to WHO guidelines. Microbial quality was assessed using the presence/absence (P/A) method for indicator bacteria. All analyses were performed based on standard methods, and results were compared with the WHO and ISIRI 1053 standards. Paired t-tests were used to compare physicochemical properties between the two sampling intervals. Additionally, hydrochemical status and water types were evaluated using the cation ratio and Gibbs diagrams.

Results and Discussion: The results showed that rainwater collected in Chenaran village was the purest source in terms of physicochemical quality, with the lowest levels of ions, hardness, turbidity, and TDS, while conventional sources such as the reservoir and spring had higher values for these parameters but still remained within the permissible limits of national (ISIRI 1053) and WHO standards. The turbidity of rainwater and spring was within the desirable range, whereas rainwater collected from bitumen-coated rooftops required treatment due to high turbidity. The statistical analysis using the paired T-test indicated that the mean values of five quality parameters, including phosphate, nitrate, sodium, electrical conductivity, and turbidity, exhibited significant differences between the two sampling periods (p-values: 0.015, 0.000, 0.013, 0.022, and 0.010;

* **Corresponding author:** Nader Jandaghi
Address: Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Iran, Iran.
Tel: +989113716769
Email: nader.jandaghi@gmail.com

p-value<0.05). In contrast, the least variation between the two periods was observed for the quality factors Ca and TDS, with p-values of 0.562 and 0.508, respectively. The Gibbs diagram analysis indicated that the quality parameters of rainwater sources had an atmospheric origin, while the local sources were influenced by geochemical processes (rock–water interaction). The cationic triangular diagram indicated that the cationic type in some sources, such as the reservoir and waterfall, was sodic, while in others, such as bitumen-coated rooftops, it was calcic. Microbial results showed that the waterfall and spring were contaminated and high-risk for drinking in both periods, whereas rainwater and the reservoir were free of microbial contamination. Overall, with proper collection and storage practices, rainwater can be considered a suitable source for drinking water supply in arid regions, although mineral adjustment and initial treatment are recommended.

Conclusion: The results demonstrated that rainwater harvesting in Chenaran village, when proper collection and storage practices are observed, can serve as a pure and safe source for drinking water supply in arid and semi-arid regions. The collected rainwater exhibited higher quality in terms of physicochemical parameters such as ion concentrations, hardness, turbidity, and TDS compared to conventional local sources, and remained within the permissible limits of national and international standards. Furthermore, the atmospheric origin and absence of microbial contamination in rainwater highlighted its superiority over traditional sources such as springs and waterfalls, which were found to be contaminated and high-risk in both sampling periods. Therefore, the development of rainwater harvesting systems that adhere to health and technical standards, provide user education, and utilize appropriate treatment and storage technologies can play a significant role in enhancing water resilience, reducing dependence on groundwater resources, and improving water security in water-scarce regions of the country.

Ethical Considerations

Data availability statement: The data and results used in this study will be made available upon request from the corresponding author.

Funding: This research was financially supported as part of the first author's M.Sc. Thesis at Gonbad Kavous University.

Authors' contribution: **Mehdi Fard Davaji**: Data access and sampling, conducting experiments, data preparation, and participation in analyses. **Nader Jandaghi**: Research design and methodology, performing computations, statistical analysis and interpretation of results, project management, and overall supervision. **Mojtaba Ghareh Mahmoodlu**: Performed computations, revised and finalized the manuscript, and contributed to analyses. **Amin Mohamadi Ostadkelaye**: Reviewing the research background. **Mostafa Seyyed**: Participation in experiments and analyses.

Conflicts of interest: The authors declare that they have no conflict of interest regarding the preparation and publication of this paper.

Acknowledgment: The authors would like to thank Gonbad Kavous University for their valuable support during this research.

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی:۲۴۲۳-۵۹۷۰

امکان‌سنجی جمع‌آوری آب باران به عنوان یک روش جایگزین تأمین آب مناطق روستایی در آب و هوای نیمه‌خشک

مهدی فرد دوجی[۱]، نادر جندقی*[۲]، مجتبی قره‌محمودلو[۳]، امین محمدی استادکلایه[۴]، مصطفی سید[۵]

۱. کارشناس ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، ایران، m.farddavaji@gmail.com

۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، ایران، nader.jandaghi@gmail.com

۳. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، ایران، m.g.mahmoodlu@gmail.com

۴. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، ایران، amubaran@gmail.com

۵. مربی آموزشی، دانشگاه جامع علمی کاربردی، گلستان، ایران، mostafa.seyyd1353@gmail.com

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۸ مرداد ۱۴۰۴

بازنگری: ۱۷ شهریور ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۲ شهریور ۱۴۰۴

انتشار برخط: ۲۱ شهریور ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
استحصال آب باران، خصوصیات فیزیکوشیمیایی، آلودگی میکروبی، دیاگرام گیبس، روستای چناران.

چکیده

در این مطالعه، کیفیت فیزیکوشیمیایی و میکروبی شش منبع آبی شامل سه منبع محلی روستای چناران (مخزن، آبشار و چشمه) و سه منبع حاصل از جمع‌آوری آب باران (سطوح ایزوگام، ایرانیت و فضای باز) در دو بازه زمانی (همزمان با نمونه‌برداری و دو ماه پس از آن) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری در سه مرحله تکرار شد و ۱۲ پارامتر کیفی از جمله EC، TDS، pH، نیترات، فسفات و فلزات قلیایی مطابق با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی سنجش شدند. نتایج با استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) و استاندارد ملی ایران (ISIRI 1053) مقایسه شد. نتایج تحلیل آماری با استفاده از آزمون T زوجی نشان داد که میانگین پنج پارامتر فسفات، نیترات، سدیم، هدایت الکتریکی و کدورت در دو بازه زمانی مورد بررسی تفاوت معنی‌داری داشته است (مقادیر p-value به‌ترتیب ۰/۰۱۵، ۰/۰۰۰، ۰/۰۱۳، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۰؛ $p\text{-value} < 0.05$). همچنین، کم‌ترین تفاوت بین دو بازه زمانی مربوط به دو فاکتور کیفی Ca و TDS بود که مقادیر p-value آن‌ها به‌ترتیب ۰/۵۶۲ و ۰/۵۰۸ گزارش شد. بررسی دیاگرام گیبس نشان داد که پارامترهای کیفی در آب باران دارای منشأ جوی‌اند، در حالی‌که منابع محلی تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌شناختی (سنگ–آب) قرار گرفته‌اند. تحلیل مثلثی کاتیونی بیانگر آن است که تیپ کاتیونی در برخی منابع مانند آب مخزن و آبشار سدیک و در برخی دیگر مانند ایزوگام کلسیک است. نتایج میکروبی نشان داد که منابع آب آبشار و چشمه در هر دو بازه زمانی آلوده و برای شرب نیاز به ضدعفونی دارند، در حالی‌که آب باران و مخزن عاری از آلودگی میکروبی بودند. به‌طور کلی، هرچند بیش‌تر منابع آبی روستا از نظر استانداردهای شرب قابل قبول‌اند، تصفیه اولیه به لحاظ میکروبی برای مصرف انسانی ضروری است.

استناد: فرد دوجی، مهدی، جندقی، نادر، قره‌محمودلو، مجتبی، محمدی استادکلای، امین و سید، مصطفی. (۱۴۰۴). امکان‌سنجی جمع‌آوری آب باران به عنوان یک روش جایگزین تأمین آب مناطق روستایی در آب و هوای نیمه‌خشک. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۳(۳)، ۳۷-۵۴.

DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

* **نویسنده مسئول:** نادر جندقی

نشانی: گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، ایران.

تلفن: ۰۹۱۱۳۷۱۶۷۶۹

پست الکترونیکی: nader.jandaghi@gmail.com

مقدمه

یکی از چالش‌های فزاینده قرن حاضر، کمبود منابع آب شیرین است که آثار آن به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌وضوح قابل مشاهده است (Imteaz et al., 2012). این موضوع به‌دلیل رشد فزاینده جمعیت، توسعه فرهنگ شهرنشینی، تغییر چرخه‌های هیدرولوژیکی مرتبط با تغییر اقلیم و غیره مرتبط بوده است (Nnaji et al., 2017). این مشکلات به‌ویژه برای مناطق آسیب‌پذیر در کشورهای در حال توسعه، مانند مناطق روستایی، که کمبود آب معیشت مردم را محدود می‌کند، بسیار مهم است (UNESCO, 2020). بر اساس پژوهش‌های بین‌المللی، در سال ۲۰۲۵ بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان به منابع پایدار و مقرون به‌صرفه آب دسترسی نداشته و بیش از دو سوم جمعیت جهان با بحران کم‌آبی مواجه می‌شوند (IPCC, 2022). ایران نیز با وجود قرارگیری در کمربند خشک زمین، با کاهش چشم‌گیر سرانه آب تجدیدپذیر و رشد جمعیت، وارد دوره‌ای بحرانی از نظر تأمین آب شده است (Abbaspour et al., 2009).

در چنین شرایطی، یافتن راهکارهای جایگزین و پایدار برای تأمین آب، بیش از پیش اهمیت می‌یابد. یکی از روش‌های مؤثر و نسبتاً کم‌هزینه، استحصال آب باران است که سابقه‌ای دیرینه در تمدن‌های انسانی داشته و در بسیاری از مناطق جهان، به‌عنوان روشی بومی و پایدار برای تأمین آب در دوره‌های خشک مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، با تکیه بر جمع‌آوری مستقیم بارش از سطوح قابل‌دسترس نظیر پشت‌بام‌ها، امکان استفاده از رواناب را برای مصارف مختلف فراهم می‌سازد (Chiu et al., 2020; Tabatabaee & Han, 2010). استفاده از آب باران به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت شدید منابع آب روبه‌رو هستند، می‌توانند بخشی از تقاضای آب را پاسخ دهد و فشار بر منابع زیرزمینی را کاهش دهد. مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی این روش باعث شده است تا توجه نهادهای بین‌المللی و سیاست‌گذاران داخلی به آن جلب شود. علاوه‌بر آن، سادگی پیاده‌سازی، هزینه پایین نگهداری و قابلیت استفاده در مقیاس‌های کوچک تا بزرگ، استحصال آب باران را به راهکاری قابل اتکا در مدیریت منابع آب در کشورهایی مانند ایران تبدیل کرده است (Prieto-Jiménez et al., 2024).

امروزه استحصال آب باران به‌عنوان یک راهکار جایگزین و پایدار برای تأمین منابع آب، به‌ویژه در مناطق دارای تنش آبی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. هرچند مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی این سامانه‌ها به‌خوبی شناخته شده است، اما نگرانی‌ها درباره کیفیت آب جمع‌آوری‌شده، یکی از موانع اصلی در مسیر گسترش و پذیرش عمومی آن‌ها محسوب می‌شود. آب باران پس از تماس با سطوح جمع‌آورنده، مخازن ذخیره‌سازی و یا حتی از طریق ته‌نشست‌های جوی، ممکن است به انواع آلاینده‌ها آلوده شود؛ از این‌رو، ارزیابی جامع پارامترهای کیفی آن، به‌ویژه پیش از مصرف خانگی یا شرب، ضرورتی انکارناپذیر است (Campisano et al., 2017; Hamilton et al., 2019). افزون بر این، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اجزای سامانه‌های استحصال آب باران از جمله جنس مصالح مخزن، شرایط نگهداری، و مواجهه با عوامل محیطی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت میکروبی و شیمیایی آب ذخیره‌شده تأثیرگذار باشند (Abbasi & Abbasi, 2011; Alim et al., 2020). در زیر به برخی از مطالعات که در این زمینه تحقیق کرده‌اند، اشاره می‌شود:

ظفرزاده (۱۳۸۵) در پژوهشی بر روی آب‌انبارهای سنتی در شهرستان مینودشت، نشان داد که با وجود مطلوب بودن برخی پارامترهای شیمیایی مانند pH، EC، سختی، نیترات و کلراید در مقایسه با استانداردهای ملی آب شرب، غلظت عناصر سنگین نظیر سرب، آهن و کروم در برخی نمونه‌ها فراتر از حد مجاز بوده و همچنین آلودگی میکروبی قابل توجهی نیز مشاهده شده است. در مطالعه‌ای مشابه، سعدالدین و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی کیفیت آب باران جمع‌آوری‌شده از پشت‌بام‌های دانشگاه علوم کشاورزی گرگان، به افزایش غلظت پارامترهایی چون سختی، EC، پتاسیم و آلودگی میکروبی در طی زمان اشاره کرده‌اند که لزوم پایش مستمر کیفیت را برجسته می‌سازد. دیانتی‌تیلکی و همکاران (۱۳۹۴) نیز در بررسی میکروبی آب‌انبارهای ذخیره آب باران در گمیشان، درصد بالایی از آلودگی میکروبی را گزارش کردند که نشان‌دهنده ریسک بهداشتی مصرف این آب‌ها است. نصرتی و همکاران (۱۳۹۷) بیان کرده‌اند که جنس سطوح پشت‌بام، به‌ویژه ایزوگام و موزاییک، به‌دلیل ترکیبات اولیه سازنده آن‌ها، موجب تغییر در میزان برخی پارامترهای کیفی آب باران استحصالی در شهر تهران شده است. هم‌چنین مشخص شد که در ابتدای بارش، اغلب پارامترهای آب باران دارای بار آلودگی بیش‌تری بوده‌اند. غلامی سفیدکوهی و باقری خلیلی (۱۴۰۱) نیز استفاده مستقیم از آب جمع‌آوری شده باران را برای مصارف شرب دارای محدودیت اعلام کرده‌اند. معماریان (۱۴۰۳) گزارش کرده است که به‌کارگیری سامانه‌های آبگیر باران می‌تواند رویکردی کارآمد در تأمین منابع آب پایدار، به‌ویژه در مناطق کم‌آب، باشد؛ به‌گونه‌ای که این سامانه‌ها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و از نظر زیست‌محیطی دارای اثرات مثبت ارزیابی شده‌اند.

در سطح بین‌المللی، Varghese و Jaya (۲۰۰۸) در هند نیز نشان داده‌اند که با وجود مناسب بودن ویژگی‌های شیمیایی آب باران با استانداردهای WHO، آلودگی میکروبی به‌ویژه در فصول خشک و گرم بالا بوده است. Lee و همکاران (۲۰۱۰) کیفیت شیمیایی آب باران را مناسب ارزیابی کرده‌اند، اما تأکید کرده‌اند که کیفیت میکروبی آن در بسیاری از نمونه‌ها پایین‌تر از حد مطلوب است. Carpio-Vallejo و همکاران (۲۰۲۴) نیز در مطالعه‌ای بر روی آب باران جمع‌آوری‌شده در هانوفر آلمان، با وجود انطباق ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی با

استانداردهای اتحادیه اروپا، آلودگی میکروبی را عاملی نگران‌کننده در استفاده از این منبع برای شرب گزارش کرده‌اند.

تفاوت در کیفیت آب باران استحصالی در مناطق مختلف جغرافیایی کاملاً محسوس است. به‌عنوان مثال، Rahman و همکاران (۲۰۱۴) در بنگلادش کیفیت مناسبی را گزارش کردند، اما در مقابل، Leong و همکاران (۲۰۱۷) در مالزی نشان دادند که آب جمع‌آوری شده حتی برای مصارف غیرآشامیدنی نیز ممکن است مناسب نباشد. عوامل متعددی مانند جنس پوشش سقف، موقعیت جغرافیایی، آلودگی های شهری یا کشاورزی بر کیفیت نهایی آب تأثیرگذارند (Thomas & Greene, 1993). هم‌چنین، آلودگی میکروبی ناشی از فضولات پرندگان و حیوانات در پشت‌بام‌ها در چندین مطالعه مستند شده و به‌عنوان یک منبع بالقوه خطر بیماری‌های ناشی از آب مطرح شده است (Denissen et al., 2021; Man et al., 2014; Nwogu et al., 2024). بنابراین، به‌کارگیری آب باران برای مصارف شرب نیازمند ارزیابی دقیق، پایش مستمر و اقدامات تصفیه‌ای مناسب است.

با توجه به وضعیت بحرانی منابع آبی در کشور و محدودیت‌های ناشی از پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش، ضرورت بررسی و توسعه سیستم‌های استحصال آب باران در مقیاس شهری و روستایی بیش از پیش احساس می‌شود. روستای چناران در شمال‌شرق استان گلستان، از توابع شهرستان مراوه‌تپه و یکی از مناطق خشک و کم‌برخوردار استان محسوب می‌شود. منابع سنتی تأمین آب در این منطقه نظیر آبشار بالی‌قایه و چشمه‌های محلی، در سال‌های اخیر به‌دلیل خشکسالی‌های مداوم به‌شدت کاهش یافته‌اند. در فصل‌های خشک، به‌ویژه تابستان، افت شدید منابع آبی موجب وابستگی کامل ساکنان به تانکرهای آب‌رسانی شده است. این شرایط، لزوم ارزیابی و بهره‌گیری از منابع جایگزین مانند استحصال آب باران را به‌عنوان راهکاری پایدار برای تأمین آب برجسته می‌سازد.. لذا هدف اصلی این پژوهش، بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و هیدروشیمی آب باران استحصال شده از سطوح پشت‌بام واقع در روستای چناران مراوه‌تپه و امکان‌سنجی این روش در زمینه بهره‌برداری مؤثر از آب باران در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با تأکید بر صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش تاب‌آوری در برابر تغییر اقلیم است.

مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

روستای چناران با جمعیت حدود ۱۵۰۰ نفر در جنوب شهرستان مراوه‌تپه، واقع در استان گلستان و در شمال‌شرق ایران قرار دارد. این روستا در مختصات جغرافیایی عرض شمالی ´۴۸ °۳۷ و طول شرقی ´۵۷ °۵۵ در نزدیکی مرز ایران و ترکمنستان واقع شده است (شکل ۱). بر اساس اطلاعات ایستگاه تحقیقات مراوه‌تپه میانگین بارندگی سالیانه منطقه حدود ۳۵۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه حدود ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه به‌طور کلی خشک تا نیمه‌خشک بوده و از بارندگی سالیانه نسبتاً کم و نرخ تبخیر بالایی برخوردار است (فتحی‌فرد و همکاران، ۱۴۰۳). این ویژگی‌ها موجب شده است که تأمین منابع آب شرب پایدار به یکی از مهم‌ترین چالش‌های منطقه تبدیل شود. منابع آب مورد استفاده ساکنین روستا شامل آب چشمه، مخزن محلی و آبشار بالی‌قایه است که این منابع به‌دلیل خشکسالی های متوالی، کاهش کیفیت و کمیت، و نبود زیرساخت‌های مناسب با محدودیت مواجه هستند. منابع آب موجود نه تنها آب مورد نیاز روستای چناران را تأمین می‌کنند، بلکه به سه روستای مجاور شامل باباشملک (۳۸۰ نفر)، قره‌قل‌تپه (۳۰۰ نفر) و دکلی‌داش (۲۶۰ نفر) نیز آبرسانی دارند.

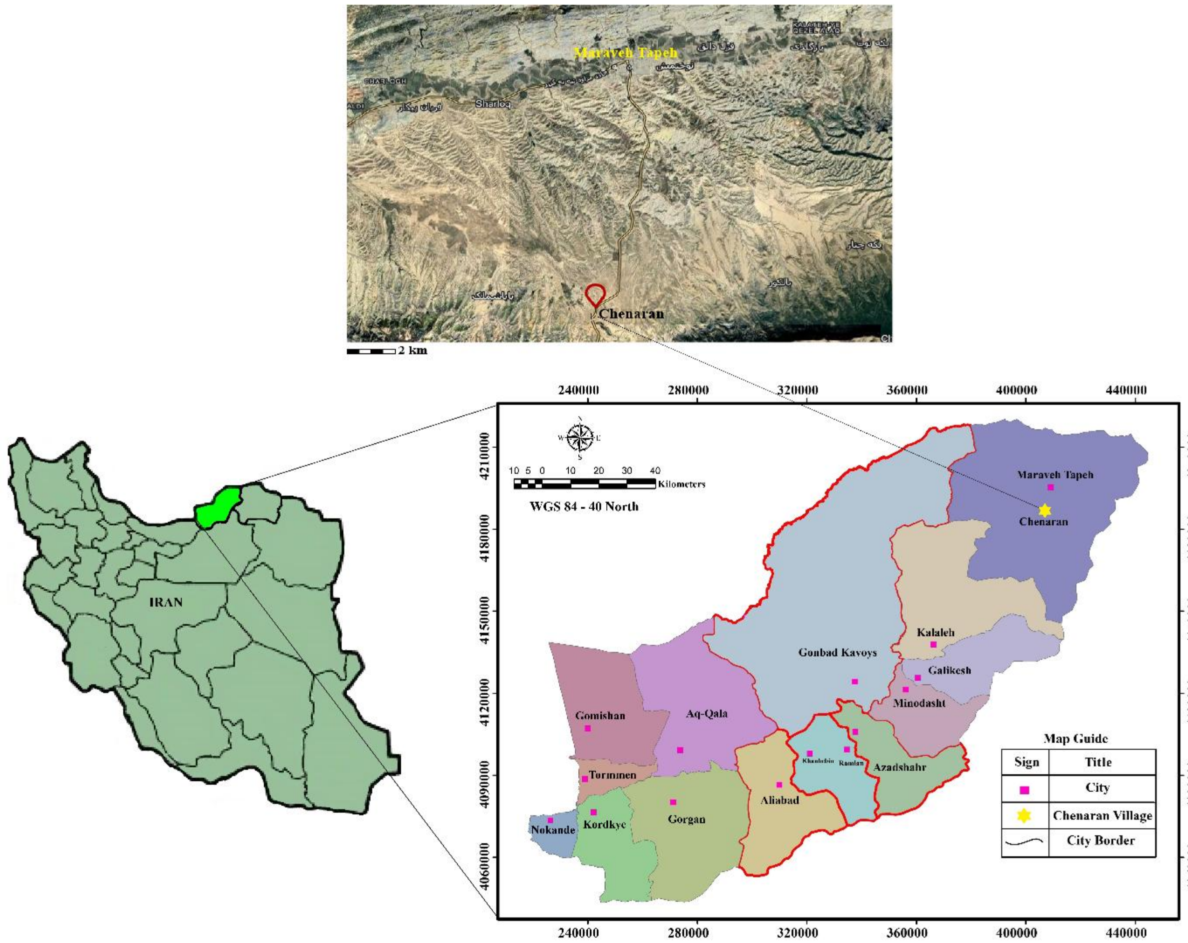
روش تحقیق

در این پژوهش، به‌منظور بررسی کیفیت منابع آبی در منطقه مورد مطالعه، شش نوع منبع آب به‌عنوان شرایط آزمایشی انتخاب شد. سه مورد از این منابع شامل آبشار بالی‌قایه، چشمه و مخزن آب بودند که به‌عنوان منابع آبی رایج در روستا مورد بررسی قرار گرفتند. سه منبع دیگر مربوط به آب باران بوده که شامل: باران جمع‌آوری‌شده از پشت‌بام‌های ایرانیتی، پشت‌بام‌های دارای ایزوگام، و باران جمع‌آوری‌شده مستقیم از فضای باز بودند. با توجه به نوع پوشش متداول پشت‌بام‌ها در منطقه، دو نوع سطح (ایرانیت و ایزوگام) به‌صورت جداگانه انتخاب شده و پیش از آغاز بارندگی به‌طور کامل تمیز شدند. هم‌چنین آب باران شاهد بدون تماس با هرگونه سطح و به‌صورت مستقیم از فضای باز جمع‌آوری شد (سعدالدین و همکاران، ۱۳۹۳). نمونه‌برداری از تمامی منابع در شرایط یکسان و مطابق با اصول استاندارد انجام شد.

پیش از وقوع بارندگی، زمان دقیق بارش‌ها از منابع معتبر هواشناسی استخراج شد و سطوح پشت‌بام‌ها (با پوشش ایزوگام و ایرانیت) به‌طور کامل پاک‌سازی شد. نمونه‌برداری از آب باران در هنگام بارش، با استفاده از تشت‌های پلاستیکی تمیز انجام شد. به‌منظور حذف آلودگی‌های اولیه ناشی از گردوغبار، نمونه‌گیری بین ۵ تا ۱۰ دقیقه پس از شروع بارش انجام و آب جمع‌آوری‌شده در بطری‌های یک‌بارمصرف منتقل شد. به‌صورت هم‌زمان، از سه منبع آب محلی شامل آبشار بالی‌قایه، چشمه و مخزن نیز نمونه‌برداری انجام گرفت. از

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

هر منبع، دو نمونه برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی نمونه‌های اول بلافاصله پس از بارش و نمونه‌های دوم، دو ماه بعد مورد بررسی قرار گرفت. این طراحی امکان ارزیابی هم‌زمان کیفیت اولیه آب و تغییرات آن در گذر زمان را فراهم ساخت. شایان ذکر است که نمونه‌برداری در این پژوهش در سه نوبت و در ماه‌های اسفند، فروردین و خرداد انجام شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی روستای چناران در ایران، استان گلستان و شهرستان مراوه‌تپه

Figure 1- Geographical location of Chenaran village in Iran, Golestan Province, and Maraveh Tapeh city

در این مطالعه، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC) بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر، کل جامدات محلول (TDS) به میلی‌گرم بر لیتر، شوری (PPT)، کدورت (NTU)، اسیدیته (pH)، دمای آب (°C)، سختی کل، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، فسفات (PO_4^{3-}) ، پتاسیم (K)، نیترات (NO_3^-) و سدیم (Na) به‌عنوان شاخص‌های کیفی منابع آب مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها مطابق با راهنمای سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2022) انتخاب شده‌اند و می‌توانند بر طعم، بو، ظاهر و در نهایت پذیرش آب توسط مصرف‌کنندگان تأثیرگذار باشند. برای بررسی کیفیت میکروبی نمونه‌ها، از روش تشخیص حضور/عدم حضور (P/A) استفاده شد. روش (P/A) یکی از روش‌های ساده، کیفی و پرکاربرد در ارزیابی میکروبی کیفیت آب است که برای تشخیص باکتری‌های شاخص آلودگی میکروبی مانند *Coliforms* و *Escherichia coli* به‌کار می‌رود. در این روش، نمونه آب در محیط کشت انتخابی تلقیح می‌شود. پس از انکوباسیون در دمای ۳۵±۰/۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴–۴۸ ساعت، تغییر رنگ یا فلورسانس محیط نشان‌دهنده وجود میکروارگانیسم هدف خواهد بود (WHO, 2022). در پژوهش حاضر، کلیه نمونه‌برداری‌ها و تحلیل‌های آزمایشگاهی بر اساس دستورالعمل‌های مندرج در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمون‌های آب و فاضلاب انجام شد.

در آزمایشگاه، به‌منظور اندازه‌گیری نیترات و فسفات از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR/2000 استفاده شد (Mustapha, 2014). سختی کل و سختی کلسیم با روش تیتراسیون بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد APHA تعیین شد (Gudzenko, 2023). هدایت الکتریکی (EC)، کل جامدات محلول (TDS) و شوری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه EC متر مدل CO150 مطابق با استاندارد APHA

اندازه‌گیری شد (Gapparov & Isakova, 2023). مقدار pH توسط دستگاه pHمتر و کدورت با استفاده از دستگاه کدورت‌سنج مدل P2100 اندازه‌گیری شد. هم‌چنین، برای تعیین غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم، از فلیم‌فتومتر مدل PFP7 ساخت شرکت JENWAY استفاده شد (Banerjee & Prasad, 2020).

پس از انجام آزمایشات همزمان و دو ماه بعد از نمونه‌برداری، نتایج با استاندارد آب WHO و استاندارد پارامترهای کیفی آب شرب در ایران (ISIRI 1053) مقایسه شد (Mohammadi et al., 2018). استاندارد ملی ایران (ISIRI 1053) عملاً بر پایه دستورالعمل‌های WHO تدوین شده، اما برخی مقادیر (مثل TDS یا EC) در ایران کمی متفاوت تعریف شده‌اند. هم‌چنین در این استانداردها مقادیر حد مطلوب با مقادیر حداکثر مجاز تفاوت دارند. حد مطلوب عبارت است از ویژگی‌های مختلف آب آشامیدنی، به‌طوری‌که بیش‌تر از آن حد (تا مقدار حداکثر مجاز)، برای شرب مطلوب نیست، اما قابل آشامیدن است. اما حداکثر مجاز ویژگی‌هایی از آب آشامیدنی است کـه مصـرف آن در کوتاه‌مدت یا درازمدت، سبب ایجاد عارضه سوء برای سلامت انسان نشود.

در این پژوهش برای مقایسه نتایج آزمایشات همزمان و دو ماه بعد از نمونه‌برداری علاوه بر دو استاندارد ذکر شده، از آزمـون T زوجـی که یک روش پارامتریک است برای مقایسه میانگین دو گروه وابسته استفاده شد. در این آزمون فرض صفر (H_0) بیان می‌کند کـه تفـاوت معنی‌داری بین میانگین دو گروه وجود ندارد. در آزمون T زوجی چنان‌چه مقدار p-value محاسبه شده کوچک‌تر از ۰/۰۵ شـود بـا احتمـال ۹۵ درصد فرض H_0 یعنی برابر بودن میانگین‌های دو جامعه مورد بررسی رد شده و فرض H_1 یا وجود اختلاف معنی‌دار پذیرفتـه مـی‌شـود. قبل از انجام این آزمون، فرض نرمال بودن اختلاف داده‌ها با استفاده از آزمون اندرسون دارلینگ بررسی شد (Rietveld & Hout, 2017).

به‌منظور بررسی وضعیت هیدروشیمیایی منابع آبی منطقه شامل آب باران، چشمه، آبشار و مخزن ذخیره، و شناسـایی عوامـل مـؤثر بـر ترکیب شیمیایی آب، از نمودار نسبت‌های کاتیونی $\left(Na^+ + K^+ / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+}\right)$ در برابر کل جامـدات محلـول (TDS) اسـتفاده شـد (Mazani et al., 2024). بر اساس طبقه‌بندی گیبس (Gibbs, 1970)، منشأ املاح محلول در آب‌های طبیعی می‌تواند ناشـی از واکـنش بین آب و سنگ، ورودی‌های جوی، یا فرایند تبخیـر و تمرکـز در منـاطق خشـک و نیمه‌خشـک باشـد (Su et al., 2009; Xing et al., 2013). در این پژوهش برای تعیین تیپ منابع آبی مورد مطالعه از دیاگرام مثلثی (سه‌تایی) استفاده شـد (Sadeghi-Kordqojeh Biglou et al., 2024; Darwesh et al, 2019).

نتایج و بحث

بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی بلافاصله و دو ماه بعد از نمونه‌برداری

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل کیفی شش منبع آبی در روستای چناران شامل آبشار، چشمه، مخزن آب، آب باران جمع‌آوری‌شده از پشت‌بام‌های ایزوگام و ایرانیت، و آب باران که بلافاصله بعد از بارش نمونه‌برداری و آزمایش شد نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این منابع دارای تفاوت‌های قابل‌توجهی هستند (جدول ۱). از نظر هدایت الکتریکی (EC) که شاخصی از غلظت یون‌های محلول در آب است، بالاترین مقدار مربوط به مخزن آب با ۱۱۰۱/۳ و سپس چشمه با ۹۴۰/۳ (µmho/cm) بوده است. در مقابل، آب باران با EC بسیار پایین ۳۲/۷ (µmho/cm) دارای کم‌ترین بار یونی بوده که آن را به منبعی بسیار خالص تبدیل کرده است. با توجه به این‌که حد مجاز مقدار (EC) برای مصارف شرب بر اساس استاندارد ملی ایران ۲۰۰۰ (µmho/cm) تجویز شده است، می‌توان اظهار داشت که از لحاظ فاکتور (EC) همه منابع آبی مورد استفاده برای شرب مناسب هستند، با این وجود، نمونه‌های جمع‌آوری شده از آب باران کیفیت مناسب تری نسبت به سایر منابع آب موجود در روستا دارند.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

جدول ۱- میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی منابع آب روستا در سه نوبت نمونه‌برداری بلافاصله پس از نمونه‌برداری

Table 1- Mean physicochemical parameters of village water sources in three sampling rounds immediately after sampling

Parameters	Unit	WHO standard	Iranian National Standard (ISIRI 1053)	Village water sources					
				Rain	Asbestos-cement rooftop	Bitumen-coated rooftop	Spring	Waterfall	Water source
Water temperature (during testing)	°C	---	---	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Electrical Conductivity (EC)	µmhos/cm	1000	2000	32.7	78.3	42.0	940.3	711.7	1101.3
Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	1000	1500	26.3	36.7	19.7	452.3	342.0	533.3
Salinity	Ppt (%)	---	---	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.6
Turbidity	NTU	5	5	3.5	12.9	24.3	4.7	9.1	9.1
pH	---	6.5-8.5	6.5-9	7.7	7.5	7.7	7.5	8.2	7.8
Total Hardness	mg/L	200	500	21.3	74.7	34.7	345.3	242.7	321.3
Calcium (Ca)	mg/L	200	300	5.3	12.8	8.5	82.7	50.1	89.1
Magnesium (Mg)	mg/L	50	30	1.9	10.2	3.2	33.3	28.2	23.8
Phosphate (PO_4)	mg/L	---	0.5	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Nitrate (NO_3)	mg/L	50	50	7.0	11.0	7.9	8.9	10.9	10.3
Sodium (Na)	mg/L	200	200	5.0	5.3	4.0	97.3	89.0	118.0
Potassium (K)	mg/L	12	30	0.6	0.6	0.6	3.4	2.4	3.2

در مورد کل مواد جامد محلول (TDS) که مقدار زیاد آن بر مزه و پذیرش حسی آب تأثیر دارد، آب آبشار ۵۳۳/۳ (mg/L) مقدار بالایی داشته که اندکی بالاتر از حد مطلوب استاندارد ملی ایران (500 mg/L) است در حالی‌که آب باران، چشمه و پشت‌بام‌ها همگی TDS کم‌تر از این حد داشته و در محدوده مطلوب مصارف شرب قرار گرفتند. قابل ذکر است که غلظت (TDS) بر اساس استاندارد ملی ۱۰۵۳ حداکثر تا ۱۵۰۰ (mg/L) مجاز است و می‌تواند برای شرب مورد استفاده قرار گیرد. مقدار شوری نمونه‌ها (Salinity) نیز در همه منابع پایین و قابل چشم‌پوشی بود (بین ۰ تا ۰/۶ ‰)، که نشان می‌دهد این منابع از نظر نمک‌زدگی مشکل خاصی ندارند.

کدورت (Turbidity) یکی از مهم‌ترین فاکتورهای بهداشتی آب است که تاثیر مستقیم بر ظاهر آب دارد. در این زمینه، آب باران و چشمه به‌ترتیب با مقدار ۳/۵ و ۴/۷ NTU تنها منابعی بودند که کدورتی کم‌تر از حداکثر مجاز ر اساس هر دو استاندارد WHO و استادارد ملی ایران (5 NTU) داشته و سایر منابع به‌ویژه پشت‌بام ایزوگام با ۲۴/۳ NTU به‌طور قابل‌توجهی از این حد فراتر رفتند. شایان ذکر است که بر اساس هر دو استاندارد که حد مطلوب این فاکتور کیفی ۱ NTU تعریف کرده‌اند، هیچ‌کدام از منابع آبی در حد مطلوب برای شرب نیستند. کدورت بالا معمولاً نشان‌دهنده وجود ذرات معلق، آلودگی سطحی، یا رشد میکروبی است و نیاز به تصفیه فیزیکی و میکروبیولوژیکی دارد.

از نظر pH، تمامی منابع آبی روستا در بازه استاندارد ۶/۵ تا ۸/۵ قرار داشتند، که نشان می‌دهد از نظر اسیدیته و قلیاییت بر اساس هر دو استاندارد، مشکلی برای مصارف شرب وجود ندارد. در این بازه از pH، از نظر مزه و خوردگی لوله‌ها مشکلی وجود نخواهد داشت. در بررسی سختی کل، چشمه، مخزن آب و آبشار به‌ترتیب با ۳۴۵/۳، ۳۲۱/۳ و ۲۴۲/۷ (mg/L) در محدوده سختی بالا قرار گرفتند، با این وجود، طبق استاندارد ملی ایران، مقادیر بالای mg/L۵۰۰ می‌توانند برای مصارف شرب استفاده شوند. سختی بالا می‌تواند منجر به طعم نامطلوب آب و رسوب‌گذاری در لوله‌ها شده و حتی برای افرادی با مشکلات کلیوی خطرآفرین باشد. در مقابل، آب باران با سختی بسیار پایین ۲۱/۳ (mg/L) در گروه آب‌های نرم قرار می‌گیرد.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

یون‌های کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) نیز به‌عنوان عوامل اصلی سختی آب مورد ارزیابی قرار گرفتند. یون کلسیم در مخزن آب و چشمه به‌ترتیب با غلظت ۸۹/۱ و ۸۲/۷ mg/L بالاتر از حد مطلوب برای شرب (75mg/L) بوده اما برای یون Mg فقط آب چشمه با ۳۳/۳ mg/L، کمی بالاتر از حد مطلوب شرب (30mg/L) شناسایی شد. با این وجود، بر اساس هر دو استاندارد ملی ایران و WHO، یون‌های کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) منابع آبی روستای چناران برای مصارف شرب در حد مجاز قرار دارند. یون فسفات (PO_4) نیز در تمامی منابع در غلظت‌های بسیار پایین یافت شد که نشان‌دهنده عدم آلودگی فاضلابی یا شوینده‌ای است.

از لحاظ نیترات (NO_3)، تمام منابع از نظر هر دو استاندارد مورد استفاده زیر حدمجاز (50 mg/L) بودند؛ بیش‌ترین مقدار مربوط به پشت‌بام ایرانیتی ۱۱ و کم‌ترین مربوط به باران ۷/۰ (mg/L) بود. با توجه به این‌که نیترات شاخص مهمی از آلودگی ناشی از کودهای شیمیایی یا فاضلاب است، این نتایج قابل قبول تلقی می‌شوند. یون سدیم (Na) نیز در مخزن آب ۱۱۸/۰ و چشمه ۹۷/۳ (mg/L) به‌طور قابل توجهی بالا بود، ولی هنوز کم‌تر از حد مجاز توصیه‌شده (200 mg/L) از منظر هر دو استاندارد مورد استفاده قرار داشت. یون پتاسیم (K) نیز در همه منابع پایین و تقریباً مشابه هم بود و از نظر هر دو استاندارد مورد استفاده در حد مطلوب برای مصارف شرب قرار داشتند.

در جمع‌بندی از بین شش منبع آب مورد بررسی، آب باران از نظر شیمیایی خالص‌ترین منبع بوده و مقادیر بسیار پایینی از یون‌ها، سختی و کدورت دارد. آب چشمه، با پارامترهای نسبتاً متعادل، می‌تواند گزینه‌ای مطمئن برای آب شرب محسوب شود. در مقابل، آب پشت‌بام ایزوگام به‌دلیل کدورت بالا نیاز به تصفیه کامل دارد. نتایج این بررسی با مطالعات سعدالدین و همکاران (۱۳۹۳)، نصرتی و همکاران (۱۳۹۷)، معماریان (۱۴۰۳)، Varghese و Jaya (۲۰۰۸)، Lee و همکاران (۲۰۱۰)، Rahman و همکاران (۲۰۱۴) و Carpio-Vallejo و همکاران (۲۰۲۴) که در آن‌ها به مناسب بودن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب باران باذعان داشته‌اند، همسویی دارد. تفاوت‌های مشاهده‌شده، مانند مقادیر بالاتر سدیم در چشمه و مخزن یا کدورت بالای آب پشت‌بام ایزوگام، نشان‌دهنده اثرات محلی منابع و نیاز به تصفیه موضعی است.

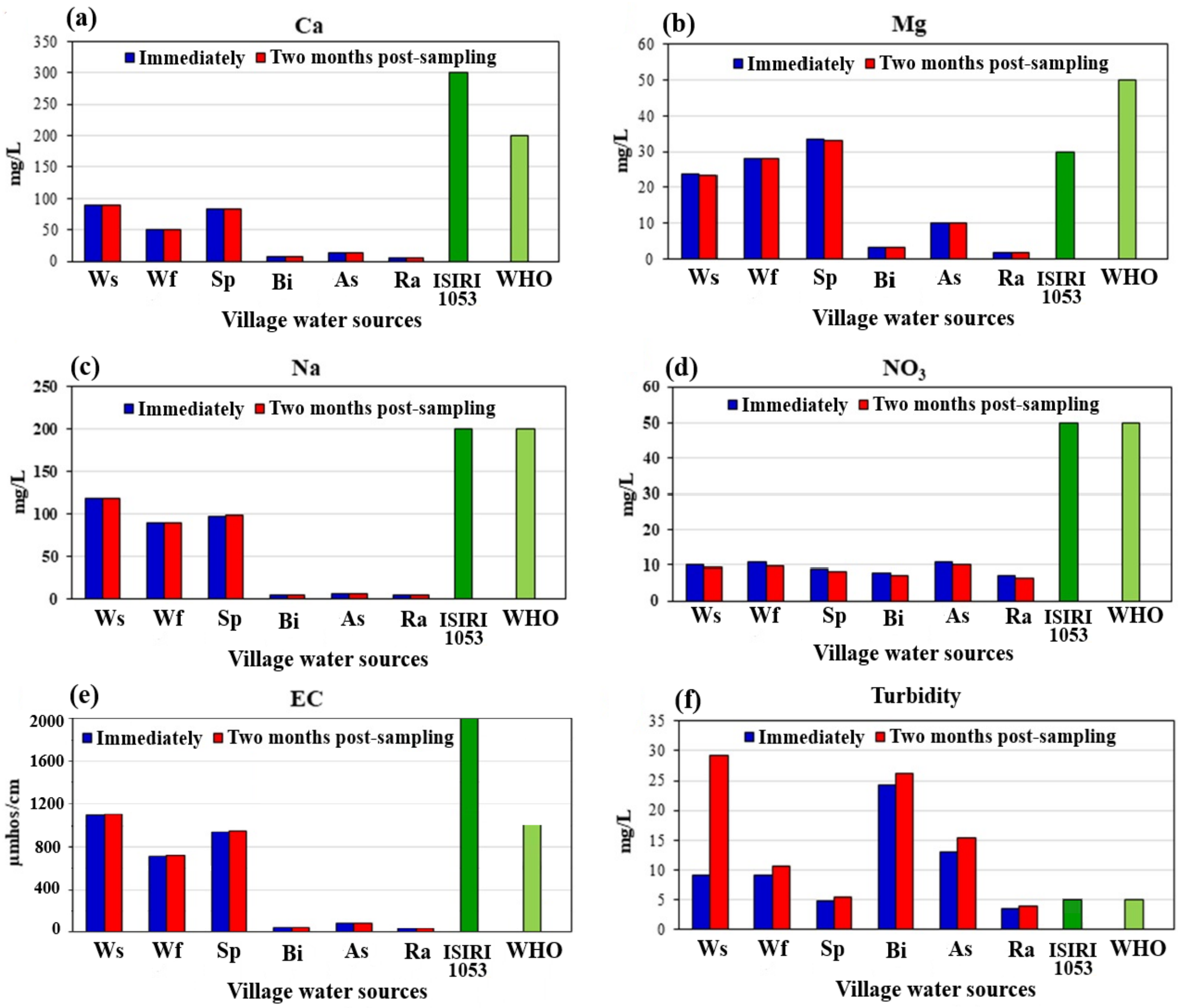
جدول (۲) میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی در سه نوبت نمونه‌برداری برای منابع مختلف آبی روستای چناران را نشان می‌دهد که دو ماه پس از نمونه‌برداری، آزمایش شده‌اند. از لحاظ هدایت الکتریکی (EC) که نشان‌دهنده غلظت کلی یون‌های محلول است، میزان آن در چشمه و مخزن در هر دو بازه زمانی بالا بود. هم‌چنین مقدار EC هر شش منبع آبی مورد بررسی در بازه بعد از بارش اندکی افزایش داشته‌اند. مطابق استاندارد ملی ایران، EC مجاز کم‌تر از ۲۰۰۰ µmho/cm است و لذا همه منابع آبی روستا از لحاظ این فاکتور برای مصارف شرب مجاز هستند (شکل ۲).

جدول ۲- میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی منابع آب روستا در سه نوبت نمونه‌برداری، دو ماه بعد از نمونه‌برداری

Table 2- Mean physicochemical parameters of village water sources in three sampling rounds, two months after sampling

Parameters	Unit	WHO standard	Iranian National Standard (ISIRI 1053)	Village water sources					
				Rain	Asbestos-cement rooftop	Bitumen-coated rooftop	Spring	Waterfall	Water source
Water temperature (during testing)	°C	---	---	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Electrical Conductivity (EC)	µmho s/cm	1000	2000	33.3	81.0	43.3	948.3	716.7	1108.7
Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	1000	1500	17.0	37.7	29.7	456.0	344.0	537.0
Salinity	Ppt (%)	---	---	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.6
Turbidity	NTU	5	5	3.9	15.4	26.2	5.4	10.6	9.9
pH	---	6.5-8.5	6.5-9	7.6	7.7	7.7	8.0	8.3	8.3
Total Hardness	mg/L	200	500	21.3	74.7	34.7	344.0	242.7	320.0
Calcium (Ca)	mg/L	200	300	5.3	12.8	8.5	82.7	50.1	89.1
Magnesium (Mg)	mg/L	50	30	1.9	10.2	3.2	33.0	28.2	23.4
Phosphate (PO_4)	mg/L	---	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
Nitrate (NO_3)	mg/L	50	50	6.5	10.0	7.2	8.2	9.8	9.4
Sodium (Na)	mg/L	200	200	5.0	5.7	4.3	98.0	89.3	118.7
Potassium (K)	mg/L	12	30	0.6	0.6	0.6	3.3	2.4	3.1

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]



شکل ۲- هیستوگرام مقایسه‌ای پارامترهای فیزیکوشیمیایی منابع آبی روستای چناران، اندازه‌گیری شده بلافاصله و دو ماه بعد از نمونه‌برداری. باران (Ra)، ایرانیت (As)، ایزوگام (Bi)، چشمه (Sp)، مخزن آب (Ws) و آبشار (Wf)

Figure 2– Comparative histogram of physicochemical parameters in water sources of Chenaran village, measured immediately and two months post-sampling. Rain (Ra), Asbestos-cement rooftop (As), Bitumen-coated rooftop (Bi), Spring (Sp), Water source (Ws), and Waterfall (Wf)

در مورد TDS، به‌جز آب باران، سایر مقادیر در بازه زمانی دوم بالاتر گزارش شد. به‌عنوان نمونه، مقدار TDS در مخزن آب از ۵۳۳/۳ به ۵۳۷ mg/L افزایش یافته است که از حد مطلوب توصیه‌شده استاندارد ملی ایران (500 mg/L) برای مصارف شرب عبور کرده است اما هم چنان در محدوده مجاز قرار دارد. کدورت نمونه‌ها در بازه دوم نسبت به زمان نمونه‌برداری افزایش یافته است به‌طوری‌که در پشت‌بام ایزوگام از ۲۴/۳ به ۲۶/۲ NTU رسیده است (شکل ۲). هر دو استاندارد ملی ایران و WHO کدورت آب را برای مصارف شرب حداکثر ۵ NTU توصیه کرده‌اند و بنابراین در هر دو بازه، بیش‌تر منابع آبی روستا نیازمند فیلتراسیون هستند.

مقدار pH آب در تمامی منابع در بازه قابل‌قبول هر دو استاندارد WHO و استاندارد ملی ایران یعنی بین ۶/۵ تا ۸/۵ قرار داشته و نوسانات کمی داشته است. به‌عنوان مثال، در مخزن آب مقدار pH از ۷/۸ در هنگام بارش به ۸/۳ پس از بارش رسیده است که نشان‌دهنده تمایل آب به خاصیت قلیایی خفیف و پایدار است. میزان سختی کل نیز در دو بازه بدون تغییر بوده و فقط در مخزن آب و چشمه به‌طور نامحسوس کاهش یافته است. اگرچه این مقادیر زیر حد مجاز استاندارد ملی ایران (۵۰۰ mg/L) هستند، اما در دسته آب‌های سخت قرار می‌گیرند. در بررسی یون‌های کلسیم و منیزیم، مشابه سختی کل، در دو بازه تغییر چندانی مشاهده نشد و فقط غلظت یون منیزیم در مخزن آب و چشمه به‌طور نامحسوس کاهش یافته است (شکل ۲). اگرچه غلظت این دو یون در محدوده مجاز هر دو استاندارد قرار دارند اما یون کلسیم در مخزن آب و چشمه و یون Mg چشمه بالاتر از حد مطلوب استاندارد ملی ایران برای شرب شناسایی شدند.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

نیترات در هر دو بازه در همه منابع زیر حد مجاز ۵۰ mg/L بوده است، ولی کاهش اندکی داشته است. این موضوع بیانگر ثبات نسبتاً خوب این پارامتر و نبود منابع عمده آلودگی نیتروژنی (مانند کودها) است. یون‌های سدیم (Na) و پتاسیم (K) در بازه دوم آزمایش که دو ماه بعد انجام شده است اندکی افزایش یافته‌اند ولی هم‌چنان کم‌تر از حد مطلوب استاندارد ملی ایران و WHO است. پتاسیم در تمامی منابع زیر ۴ mg/L بوده است و نگرانی خاصی ایجاد نمی‌کند. در نهایت، مشخص شد آب باران در هر دو بازه دارای کم‌ترین مقادیر EC، TDS، سختی، یون‌های محلول و کدورت بوده که نشان‌دهنده خلوص بالای آن است. با این حال، مصرف آن بدون تصفیه و تنظیم مواد معدنی برای مصارف شرب توصیه نمی‌شود. نتایج این بررسی با مطالعات سعدالدین و همکاران (۱۳۹۳) که اثر گذر زمان در تغییر خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب باران استحصال شده اشاره کرده‌اند، هم‌راستایی دارد. هم‌چنین یافته‌های حاضر در مورد تأثیر جنس پشت‌بام بر کیفیت فیزیکوشیمیایی آب باران، با مطالعات نصرتی و همکاران (۱۳۹۷)، سعدالدین و همکاران (۱۳۹۳) و Thomas & Greene (۱۹۹۳) همسو است و نشان می‌دهد که آب باران از نظر فیزیکوشیمیایی خالص و پایدار است. تفاوت‌های مشاهده شده، مانند افزایش یون‌های سدیم و پتاسیم در منابع محلی می‌تواند ناشی از جنس مواد اولیه تشکیل دهنده سطوح پشت‌بام، تأثیر شرایط محلی و فرآیندهای محیطی خاص آن منطقه باشد.

نتایج آزمون T زوجی

مقایسه آماری داده‌های فیزیکوشیمیایی منابع آبی روستای چناران بلافاصله و دو ماه پس از نمونه‌برداری (جدول ۳) با استفاده از آزمون T زوجی نشان داد که از مجموع ۱۲ پارامتر بررسی‌شده، ۵ پارامتر شامل فسفات(PO_4) ، نیترات(NO_3) ، سدیم(Na) ، هدایت الکتریکی (EC) و کدورت دارای تفاوت معنی‌دار ($p\text{-value} < 0.05$) بین دو دوره نمونه‌برداری بودند. در مقابل، ۷ پارامتر دیگر شامل pH، سختی کل، TDS، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و شوری تغییرات معنی‌داری از نظر آماری نشان ندادند ($p\text{-value} > 0.05$) و ترکیب یونی آن‌ها در دو دوره نسبتاً پایدار باقی ماند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در حالی‌که ترکیب کلی آب در مدت زمان کوتاه نسبتاً ثابت مانده است، برخی از پارامترهای حساس‌تر به شرایط محیطی، دچار نوسان شده‌اند و این موضوع بر اهمیت پایش دوره‌ای کیفیت منابع آب در مناطق روستایی و نیمه‌خشک تأکید دارد.

جدول ۳- نتایج آزمون T زوجی جهت ارزیابی تفاوت معنی‌داری خصوصیات فیزیکوشیمیایی بلافاصله و دو ماه بعد از نمونه‌برداری

Table 3 – Results of paired t-test for evaluating significant differences in physicochemical properties immediately and two months post-sampling

Parameters	p-value	Parameters	p-value	Parameters	p-value
EC	0.022	pH	0.093	PO_4	0.015
TDS	0.508	Total Hardness	0.175	NO3	0.000
Salinity	0.363	Ca	0.562	Na	0.013
Turbidity	0.010	Mg	0.181	K	0.111

نتایج کیفیت میکروبی منابع آب

بررسی کیفیت میکروبی منابع آب روستای چناران در دو بازه زمانی (همزمان و دو ماه پس از نمونه‌برداری) با استفاده از روش تشخیص حضور/عدم حضور (P/A) انجام شد. به دلیل اهمیت ویژه این پارامتر در سلامت آب شرب، نتایج آن برای هر ۳ نمونه‌برداری در جدول (۴) ارایه شد. در این جدول نتایج آزمایش‌ها بر اساس مثبت (P) یا منفی (A) بودن آلودگی میکروبی ثبت شده است.

جدول ۴- نتایج وضعیت میکروبی نمونه‌ها بلافاصله و دو ماه بعد از نمونه‌برداری با استفاده از روش حضور/عدم‌حضور (P/A)

Table 4– Results of microbiological analysis of samples immediately and two months post-sampling using the Presence/Absence (P/A) test method

Experiment time	Sample number	Village water sources					
		Rain	Asbestos-cement rooftop	Bitumen-coated rooftop	Spring	Waterfall	Water source
Immediately after sampling	1	(A)	(P)	(P)	(P)	(P)	(A)
	2	(A)	(A)	(A)	(P)	(P)	(A)
	3	(A)	(P)	(A)	(P)	(P)	(A)
Two months post-sampling	1	(A)	(P)	(P)	(P)	(P)	(A)
	2	(A)	(A)	(A)	(P)	(P)	(A)
	3	(A)	(P)	(P)	(P)	(P)	(A)

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

بررسی نتایج آزمایش میکروبی بلافاصله بعد از نمونه‌برداری نشان داد که آب چشمه و آبشار در هر سه نمونه‌گیری به‌طور مداوم آلودگی میکروبی نشان دادند (جدول۴). این امر احتمالاً به‌دلیل تماس این منابع با محیط باز و ورود آلاینده‌های میکروبی از خاک، گیاهان یا حیوانات یا فقدان سیستم‌های محافظتی در این منابع مرتبط باشد. این نتیجه نشان‌دهنده نیاز فوری به اقدامات محافظتی یا تصفیه‌ای برای این منابع است. در مقابل، منبع ایزوگام تنها در نمونه‌برداری اول آلودگی داشت و در نمونه‌های دوم و سوم منفی بود، که نشان‌دهنده ناپایداری کیفیت میکروبی این منبع است. منبع ایرانیت نیز نتایج متفاوتی داشت؛ آلودگی در نمونه‌های اول و سوم مثبت و در نمونه دوم منفی بود، که دلیل آن می‌تواند به شرایط محیطی در زمان نمونه‌برداری و یا تأثیر بارش‌های مختلف مرتبط باشد. آب باران و مخزن آب در تمام نمونه‌گیری‌ها منفی بود و کیفیت میکروبی بالایی را نشان داد.

بررسی نتایج آزمایش میکروبی دو ماه پس از نمونه‌برداری نشان داد که آب آبشار و چشمه همچنان در هر سه نمونه‌گیری آلودگی میکروبی داشتند، که نشان‌دهنده پایداری آلودگی در این منابع است (جدول۴). منبع ایزوگام و ایرانیت الگوی مشابهی داشتند به‌طوری که در نمونه‌های اول و سوم مثبت و در نمونه دوم منفی بود، که ناپایداری کیفیت آن‌ها را تأیید می‌کند. آب باران و مخزن آب نیز مانند بازه قبلی، در تمام نمونه‌گیری‌ها منفی بود و کیفیت بالای خود را حفظ کرد.

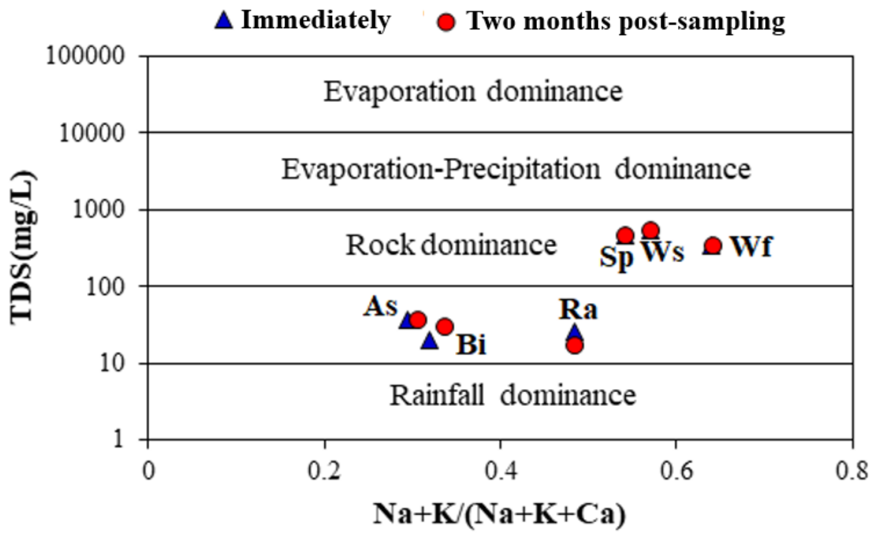
مقایسه نتایج دو بازه زمانی نشان می‌دهد که آبشار و چشمه به‌طور مداوم آلوده هستند و حتی پس از دو ماه، کیفیت میکروبی آن‌ها بهبود نیافته است. این موضوع بیانگر آن است که گذشت زمان (دو ماه) تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش آلودگی میکروبی نداشته است. این امر ضرورت تصفیه این منابع برای استفاده به‌عنوان آب آشامیدنی را نشان می‌دهد. منابع ایزوگام و ایرانیت به دلیل نتایج متغیر، غیرقابل اعتماد هستند و نیاز به بررسی دقیق‌تر شرایط نگهداری و ذخیره‌سازی دارند. آب باران و مخزن آب به‌دلیل عدم آلودگی در هر دو بازه، می‌تواند به‌عنوان منبعی پاک و مرجع مورد استفاده قرار گیرد. کیفیت بالای آب باران نشان می‌دهد که با سرمایه‌گذاری در سیستم‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی مناسب (مانند مخازن ضدمیکروبی)، می‌توان از آن به‌عنوان منبعی پایدار و ایمن به‌ویژه در فصول بارانی استفاده کرد. نتایج این بررسی با مطالعات دیانتی‌تیلکی و همکاران (۱۳۹۴)، غلامی سفیدکوهی و باقری خلیلی (۱۴۰۱)، Varghese و Jaya (۲۰۰۸)، Lee و همکاران (۲۰۱۰)، Rahman و همکاران (۲۰۱۴) و Carpio-Vallejo و همکاران (۲۰۲۴) و Leong و همکاران (۲۰۱۷) که به وجود آلودگی‌های میکروبی در آب استحصال شده در سطوح پشت‌بام اشاره داشته‌اند، هم‌راستایی دارد، با این وجود، آب استحصال شده مستقیم باران که بدون برخورد با سطوح مختلف جمع‌آوری شده است، فاقد هر گونه آلودگی میکروبی بوده است. این همسویی ناشی از ماهیت مشابه منابع تماس و نبود سیستم‌های محافظتی در بسیاری از این مطالعات است که زمینه ورود میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کند. هم‌چنین عدم وجود آلودگی میکروبی در نمونه آب باران می‌تواند به‌دلیل شرایط محیطی خاص منطقه مطالعه، نبود آلودگی جوی یا زیستی گسترده، و استفاده از روش جمع‌آوری مستقیم بدون تماس با سطوح آلوده باشد.

با توجه به درصد آلودگی منابع آبی روستای چناران مشخص شد که آب آبشار و چشمه پرخطرترین منابع از نظر آلودگی میکروبی برای مصارف شرب هستند، در حالی که ایزوگام و ایرانیت ریسک متوسطی دارند. آب باران و مخزن آب نیز به‌عنوان یک منبع ایمن شناسایی شدند. آلودگی مداوم در آبشار و چشمه می‌تواند خطرات جدی برای سلامت ساکنان روستا ایجاد کند، به‌ویژه اگر این منابع بدون تصفیه برای آشامیدن استفاده شوند.

تعیین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب

به‌منظور تفسیر دقیق‌تر، وضعیت هیدروشیمیایی شش منبع آبی مورد مطالعه در روستای چناران و شناسایی عوامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب، از دیاگرام گیبس بر پایه نسبت کاتیون‌های اصلی $Na^{+}+K^{+}/(Na^{+}+k^{+}+Ca^{2+})$ در مقابل TDS استفاده شد (شکل ۳). بر اساس پراکندگی نمونه‌ها در این نمودار، تمامی نمونه‌های مربوط به منابع آب باران ـ شامل آب باران مستقیم، آب جمع‌آوری‌شده از سطوح ایرانیت و ایزوگام ـ در ناحیه‌ای قرار گرفتند که معرف منشاء جوی آب است؛ امری که با توجه به ماهیت این منابع، کاملاً قابل انتظار است. این هم‌پوشانی نشان‌دهنده ماهیت نسبتاً خالص و فاقد تعامل قابل‌توجه این منابع با زمین و سازندهای زیرسطحی است.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]



شکل ۳- دیاگرام گیبس منابع آبی مورد مطالعه بلافاصله و دو ماه بعد از نمونه‌برداری. باران (Ra)، ایرانیت (As)، ایزوگام (Bi)، چشمه (Sp)، مخزن آب (Ws) و آبشار (Wf)

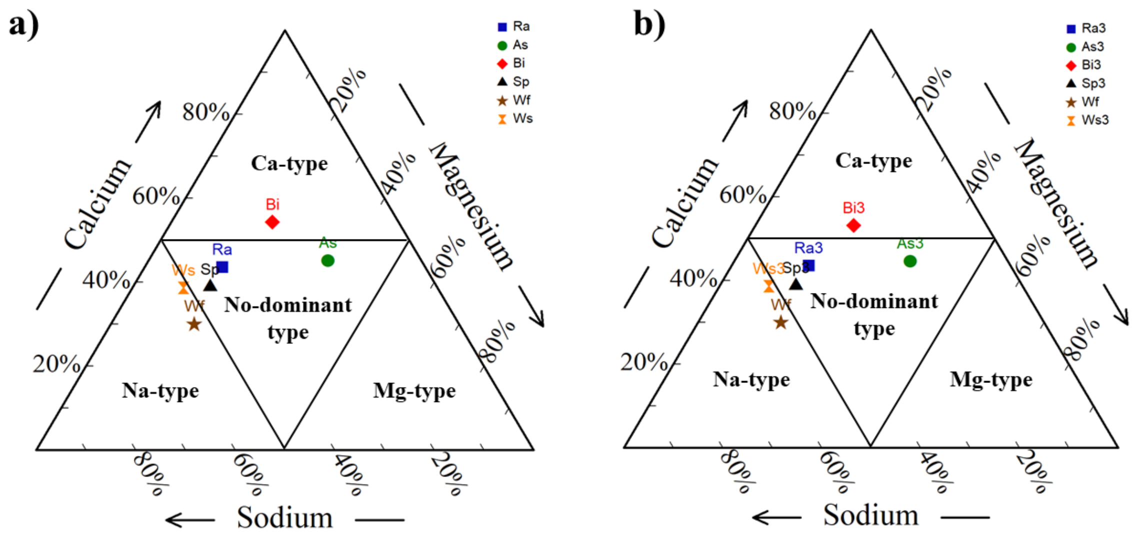
Figure 3- Gibbs diagram of the studied water sources immediately and two months post-sampling. Rain (Ra), Asbestos-cement rooftop (As), Bitumen-coated rooftop (Bi), Spring (Sp), Water source (Ws), and Waterfall (Wf)

در مقابل، سه منبع دیگر شامل آب مخزن، آبشار و چشمه تحت تأثیر فرایندهای سنگ–آب قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده نقش غالب لیتولوژی در کنترل ترکیب شیمیایی این منابع است. چنین فرآیندهایی می‌توانند منجر به افزایش شوری و غلظت یونی شوند، به‌ویژه در شرایطی که آب به مدت طولانی‌تری در تماس با سنگ بماند یا نرخ تجدید آن پایین باشد. نحوه پراکنش نمونه‌های مربوط به این منابع در دیاگرام هم‌چنین بیانگر گرایش تدریجی آن‌ها به سمت شورشدگی است. علاوه‌براین، مقایسه ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در دو بازه زمانی (هم‌زمان با بارندگی و دو ماه پس از ذخیره‌سازی) نشان داد که به‌جز منبع ایزوگام، در سایر نمونه‌ها تغییر معنی‌داری در ترکیب شیمیایی مشاهده نشد و ترکیب آن‌ها در طول زمان نسبتاً پایدار باقی مانده است. این موضوع حاکی از پایداری نسبی منابع آبی روستای چناران در مقابل تغییرات محیطی کوتاه‌مدت است.

تعیین تیپ هیدروشیمیایی

برای تعیین تیپ منابع آبی مورد مطالعه از دیاگرام مثلثی (سه تایی) استفاده شد (شکل ۴). این دیاگرام براساس غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها تیپ غالب آب مشخص می‌شود که با توجه به نداشتن تحلیل شیمیایی مربوط به آنیون‌های اصلی، تیپ آب فقط براساس کاتیون‌ها تفسیر شد. نتایج حاصل از تحلیل دیاگرام نشان داد که نمونه‌های مربوط به مخزن آب و آبشار در هر دو دوره زمانی، دارای غلبه کاتیونی سدیم بوده و در نتیجه در گروه آب‌های تیپ سدیک (Sodic-type) قرار می‌گیرند. این موضوع می‌تواند ناشی از فرآیندهای تبادل یونی و انحلال کانی‌های سدیم‌دار در مسیر جریان آب باشد. در مقابل، نمونه مربوط به آب چشمه، همراه با نمونه‌های آب باران و سطوح ایرانیت، فاقد کاتیون غالب مشخصی بوده‌اند. بنابراین نمی‌توان تیپ مشخصی را برای آن‌ها در هر دو دوره زمانی تعیین کرد. این پدیده احتمالاً نشان‌دهنده منشأ ترکیبی یا تأثیر محدود تبادل ژئوشیمیایی این منابع با محیط پیرامونی است. از سوی دیگر، آب جمع‌آوری‌شده از سطح ایزوگام برخلاف سایر منابع مرتبط با بارندگی، دارای غلبه کاتیونی کلسیم بوده و در رده آب‌های کلسیک (Calcic-type) قرار گرفته است. این تفاوت می‌تواند به ترکیب سطح ایزوگام یا واکنش‌های خاص سطحی مرتبط باشد که منجر به افزایش کلسیم در آب شده است.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]



شکل ۴- دیاگرام مثلثی منابع آبی مورد مطالعه بلافاصله (a) و دو ماه بعد از نمونه‌برداری (b). باران (Ra)، ایرانیت (As)، ایزوگام (Bi)، چشمه (Sp)، مخزن آب (Ws) و آبشار (Wf)

Figure 4- Triangular diagram of the studied water sources immediately (a) and two months post-sampling (b). Rain (Ra), Asbestos-cement rooftop (As), Bitumen-coated rooftop (Bi), Spring (Sp), Water source (Ws), and Waterfall (Wf)

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی و بر اساس نتایج این پژوهش، مشخص شد که استحصال آب باران، در صورت رعایت اصول جمع‌آوری، نگهداری و پایش مستمر، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و قابل اتکا برای تأمین آب شرب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد. آب باران جمع‌آوری‌شده در روستای چناران از نظر پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، سختی، کدورت و غلظت یون‌ها، در مقایسه با منابع متداول منطقه نظیر مخزن آب و چشمه، کیفیت بالاتری داشته و عمدتاً در محدوده مجاز استانداردهای ملی (ISIRI 1053) و بین‌المللی (WHO) قرار گرفت. منشأ جوی آب باران و عدم آلودگی میکروبی آن، برتری این منبع را نسبت به منابع سنتی که در هر دو بازه زمانی مورد بررسی آلوده و پرخطر بودند، به‌خوبی نشان داد. همچنین، تحلیل‌های هیدروشیمیایی و آماری بیانگر آن بود که برخی پارامترهای کیفی آب در گذر زمان دچار تغییر معنی‌دار می‌شوند که این موضوع اهمیت پایش مستمر و مدیریت صحیح سامانه‌های استحصال آب باران را برجسته می‌کند. با وجود این، نتایج نشان داد که آب جمع‌آوری‌شده از برخی سطوح مانند پشت‌بام‌های ایزوگام به‌دلیل کدورت بالا و احتمال آلودگی‌های سطحی، نیازمند تصفیه فیزیکی و میکروبی پیش از مصرف است و همچنین مصرف مستقیم آب باران بدون تنظیم مواد معدنی توصیه نمی‌شود. بنابراین، توسعه سامانه‌های استحصال آب باران با رعایت استانداردهای بهداشتی و فنی، آموزش بهره‌برداران و استفاده از فناوری‌های مناسب تصفیه و ذخیره‌سازی، می‌تواند نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری آبی، کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و ارتقای امنیت آبی در مناطق کم‌آب کشور ایفا کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیش‌تری در زمینه ارزیابی بلندمدت کیفیت آب باران و بررسی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی این سامانه‌ها در مقیاس‌های مختلف انجام گیرد تا زمینه بهره‌برداری گسترده‌تر و ایمن‌تر از این منبع ارزشمند فراهم شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، پایش کیفی منابع آب باران و محلی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و مناطق جغرافیایی متنوع انجام گیرد تا قابلیت تعمیم مکانی زمانی داشته و دقت نتایج افزایش یابد.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

حمایت مالی: این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشگاه گنبد کاووس حمایت مالی دریافت نموده است.

مشارکت نویسندگان: **مهدی فرد دوجی:** دسترسی به داده‌ها و نمونه‌برداری، انجام آزمایشات، آماده‌سازی داده‌ها، مشارکت در تحلیل‌ها. **نادر جندقی:** طرح پژوهش و روش‌شناسی، انجام محاسبات، تحلیل آماری و تفسیر نتایج، مدیریت پروژه و نظارت کلی. **مجتبی قره‌محمودلو:** انجام محاسبات، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله و مشارکت در تحلیل‌ها. **امین محمدی استادکلایه:** مرور پیشینه پژوهش. **مصطفی سید:** مشارکت در انجام آزمایشات و تحلیل‌ها.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مایلند از دانشگاه گنبد کاووس به خاطر حمایت ارزشمندشان در طول این تحقیق تشکر کنند.

[DOI: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

منابع

۱. دیانتی تیلکی، رمضانعلی، کر، یوسف، و فیروزیان، قربان. (۱۳۹۴). بررسی کیفیت میکروبی آب باران ذخیره‌شده در آب‌انبارهای مناطق روستایی شهرستان گمیشان در سال ۱۳۹۲. *دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، ۲۵(۱۳۴)، ۹۸-۱۰۴. **URL: http://jmums.mazums.ac.ir/article-1-7226-fa.html**

۲. سعدالدین، امیر، بای، محبوبه، و نعیمی، اصغر. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی فنی و اقتصادی جمع‌آوری آب باران از سطح بام ساختمان‌ها (مطالعه موردی: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۱(۶)، ۲۷-۵۰. **doi: 10.1001.1.23222069.1393.21.6.2.7**

۳. ظفرزاده، علی. (۱۳۸۵). تعیین کیفیت شیمیایی آب در آب‌انبارهای روستایی استان گلستان. *دانشگاه علوم پزشکی گرگان*، ۸(۱)، ۵۱-۵۵. **URL: http://goums.ac.ir/journal/article-1-53-fa.html**

۴. غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، و باقری خلیلی، زهرا. (۱۴۰۱). ارزیابی کمی و کیفی آب باران استحصال‌شده از پشت‌بام برای مصارف شرب در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۲(۳)، ۶۵۹-۶۷۳. **doi: 10.22059/jwim.2022.340638.979**

۵. فتحی‌فرد، میتراسادات، راهدان، عباس، و توحیدفر، مهسا. (۱۴۰۳). واکاوی تغییرات دما، پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق و خشکسالی مبتنی بر مدل‌سازی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ و شاخص‌های هواشناسی (مطالعه موردی: شهرستان مراوه‌تپه). *اکولوژی سرزمین*، ۲(۳)، ۱۹۶-۲۰۶. **doi: 10.22034/el.2023.424546.1016**

۶. مازنی، حسن، قره‌محمودلو، مجتبی، جندقی، نادر، رقیمی، مصطفی، و حشمت‌پور، علی. (۱۴۰۳). ارزیابی پتانسیل خورندگی و ترسیب در چاه‌های تأمین‌کننده آب شرب شهر گرگان. *مهندسی منابع آب*، ۱۷(۶۱)، ۵۲-۶۴. **doi: 10.30495/wej.2024.31749.2383**

۷. معماریان، هادی. (۱۴۰۳). مروری بر تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های جمع‌آوری آب باران از سطوح پشت‌بام. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۲(۴)، ۱۰۹-۱۲۲. **URL: http://jircsa.ir/article-1-566-fa.html**

۸. نصرتی، کاظم، مالیان، پریسا، و درفشی، خه‌بات. (۱۳۹۷). تأثیر جنس پشت‌بام و زمان استحصال بر کیفیت آب باران استحصال‌شده از سطوح آبگیر منازل مسکونی شهری. *آبیاری و آب ایران*، ۹(۱)، ۱۹۸-۲۱۳. **doi: 10.22125/iwe.2018.93444**

References

1. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097-2167. doi: 10.1080/10643389.2010.497438
2. Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10), 1-16. doi: 10.1029/2008WR007615
3. Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2020). Suitability of roof harvested rainwater for potential potable water production: A scoping review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119226. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119226
4. Banerjee, P., & Prasad, B. (2020). Determination of concentration of total sodium and potassium in surface and ground water using a flame photometer. *Applied Water Science*, 10, 113. doi: 10.1007/s13201-020-01188-1
5. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195-209. doi: 10.1016/j.watres.2017.02.056
6. Carpio-Vallejo, E., Düker, U., Waldowski, J., & Nogueira, R. (2024). Contribution of rooftop rainwater harvesting to climate adaptation in the city of Hannover: Water quality and health issues of rainwater storage in cisterns and ponds. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 256, 114320. doi: 10.1016/j.ijheh.2024.114320
7. Chiu, Y.-R., Aghaloo, K., & Mohammadi, B. (2020). Incorporating rainwater harvesting systems in Iran's potable water saving scheme by using a GIS simulation based decision support system. *Water*, 12(3), 752. doi: 10.3390/w12030752
8. Darwesh, N., Alam, M., Meng, Q., Helfdhallah, A., Naser Ramzy, S. M., Kharrim, K., Al Maliki, A., & Belghyti, D. (2019). Using Piper trilinear diagrams and principal component analysis to determine variation in hydrochemical facies and understand the evolution of groundwater in Sidi Slimane Region, Morocco. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 23(5, Special Issue), 17-30. doi: 10.21608/ejabf.2019.63248

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]

9. Denissen, J. K., Reyneke, B., Waso, M., Khan, S., & Khan, W. (2021). Human pathogenic bacteria detected in rainwater: Risk assessment and correlation to microbial source tracking markers and traditional indicators. *Frontiers in Microbiology*, 12, 659784. doi: 10.3389/fmicb.2021.659784
10. Dianati Tilaki, R., Kor, Y., & Firoozian, G. (2016). Bacteriological quality of rainwater samples in cisterns in rural areas of Gomishan. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 25(134), 98-104. http://jmums.mazums.ac.ir/article-1-7226-fa.html [In Persian]
11. Fathifard, M. S., Rahdan, A., & Tohidfar, M. (2023). Analysis of temperature changes, vegetation, evapotranspiration, and drought based on modeling of Landsat 5 and 8 satellite imagery and meteorological indicators. *Human Ecology*, 2(3), 196-206. doi: 10.22034/el.2023.424546.1016 [In Persian]
12. Gapparov, A., & Isakova, M. (2023). Study on the characteristics of water resources through electrical conductivity: A case study of Uzbekistan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1142, 012057. doi: 10.1088/1755-1315/1142/1/012057
13. Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. doi: 10.1126/science.170.3962.1088
14. Gholami Sefidkouhi, M., & Bagheri Khalili, Z. (2022). Quantity and quality assessment of rainwater extracted from the roof for drinking water. *Journal of Water and Irrigation Management*, 12(3), 659-673. doi: 10.22059/jwim.2022.340638.979 [In Persian]
15. Gudzenko, L. V. (2023). Test method for determining the total hardness of natural and potable water. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 45(4), 383-387. doi: 10.3103/S1063455X23040033
16. Hamilton, K. A., Reyneke, B., Waso, M., Clements, T., Ndlovu, T., Khan, W., DiGiovanni, K., Rakestraw, E., Montalto, F., Haas, C. N., & Ahmed, W. (2019). A global review of the microbiological quality and potential health risks associated with roof-harvested rainwater tanks. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 256, 114320. doi: 10.1038/s41545-019-0030-5
17. Imteaz, M. A., Adeboye, O. B., Rayburg, S., & Shanableh, A. (2012). Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. *Resources, Conservation & Recycling*, 62, 51-55. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.02.007
18. IPCC Working Group II. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (Summary for Policymakers).* Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.001
19. Lee, A., Yang, A., Han, B., & Choi, A. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment*, 408(4), 896-905. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.070
20. Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Hermawan, A., & Talei, A. (2017). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*, 143, 64-75. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.149
21. Man, H. D., Heederik, D. D. J., Leenen, E. J. T. M., de Roda Husman, A. M., Spithoven, J. J. G., & van Knapen, F. (2014). Human exposure to endotoxins and fecal indicators originating from water features. *Water Research*, 51, 198-205. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.057
22. Mazani, H., Qarah Mahmoudlou, M., Jandaghi, N., Raghimi, M., & Heshmatpour, A. (2024). Evaluation of corrosion and scaling potential in drinking water supply wells of Gorgan city. *Journal of Water Resources Engineering*, 45(5), 52-64. doi: 10.30495/wej.2024.31749.2383 [In Persian]
23. Mohammadi, P., Lotfi, S., Moussavi, S. P., Mousazadeh, M., & Rostami, R. (2018). Studying quality of drinking water and determining sustainable indicators for water resources of villages of Harsin town of Iran. *Journal of Health Research & Technology*, 4(2), e83508. doi: 10.5812/ijhls.83508
24. Memarian, H. (2024). A review on the reliability analysis of rainwater harvesting systems from rooftop catchments. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(4), 109-122. http://jircsa.ir/article-1-566-fa.html [In Persian]
25. Mustapha, M. U. (2014). An analysis of physicochemical parameters in some rivers in Yobe State. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(5), 68-72. doi: 10.9790/2402-08536872
26. Nnaji, C. C., Emenike, P. C., & Tenebe, I. T. (2017). An optimization approach for assessing the reliability of rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 31, 2011-2024. doi: 10.1007/s11269-017-1630-9
27. Nosrati, K., Maliyan, P., & Derafshi, Kh. (2018). Effect of roof type and harvesting time on the quality of water harvested from impervious surfaces in urban residential areas. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(1), 198-213. doi: 10.22125/iwe.2018.93444 [In Persian]

28. Nwogu, F. U., Ubuoh, E. A., & Kanu, S. C. (2024). Chemical characteristics and microbiological loads of harvested rainwater run-off from rooftops in South Eastern Nigeria. *Discover Sustainability*, 5, 177. doi: 10.1007/s43621-023-00177-z
29. Prieto-Jiménez, D., Oviedo-Ocaña, E. R., Gómez-Isidro, S., & Domínguez, I. C. (2024). A multicriteria decision analysis for selecting rainwater harvesting systems in rural areas: A tool for developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 42476-42491. doi: 10.1007/s11356-024-33734-8
30. Rahman, S., Khan, M. T. R., Akib, S., Din, N. B. C., Biswas, S. K., & Shirazi, S. M. (2014). Sustainability of rainwater harvesting systems in terms of water quality. *The Scientific World Journal*, 721357. doi: 10.1155/2014/721357
31. Rietveld, T., & van Hout, R. (2017). The paired t-test and beyond: Recommendations for testing the central tendencies of two paired samples in research on speech, language and hearing pathology. *Journal of Communication Disorders*, 69, 44-57. doi: 10.1016/j.jcomdis.2017.07.002
32. Saadoddin, A., Bai, M., & Naeimi, A. (2015). Technical and economic feasibility study of rooftop rainwater harvesting system: Case study of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(6), 27-50. doi: 10.1001.1.23222069.1393.21.6.2.7 [In Persian]
33. Sadeghi Kordqojeh Biglou, M., Mahmoodlu, M. G., Jandaghi, N., Farasati, M., & Tahmasebi, A. (2024). Effect of salt domes on hydrochemical characteristics and water quality deterioration of Firuzabad River, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83, 147. doi: 10.1007/s12665-024-11450-3
34. Su, Y. H., Zhu, G. F., Feng, Q., Li, Z. Z., & Zhang, F. P. (2009). Environmental isotopic and hydrochemical study of groundwater in the Ejina Basin Hydrogeology, northwest China. *Environmental Geology*, 58(3), 601-614. doi: 10.1007/s00254-008-1533-3
35. Tabatabaee, J., & Han, M. Y. (2010). Rainwater harvesting potentials for drought mitigation in Iran. *Water Science and Technology*, 62(4), 816-821. doi: 10.2166/wst.2010.298
36. Thomas, P. R., & Greene, G. R. (1993). Rainwater quality from different roof catchments. *Water Science and Technology*, 28(3-5), 291-299. doi: 10.2166/wst.1993.0430
37. UNESCO, ONU-Agua. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: Agua y Cambio climático*. Paris: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 243 pages.
38. Varghese, J., & Jaya, D. S. (2008). Drinking water quality assessment of rainwater harvested in ferrocement tanks in Alappuzha District, Kerala (India). *Journal of Environmental Science & Engineering*, 50(2), 115-120. PMID: 19295094
39. WHO, World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition, incorporating the first and second addenda*. Geneva: World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064
40. Xing, L., Guo, H., & Zhan, Y. (2013). Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70, 250-260. doi: 10.1016/j.jseaes.2013.03.017
41. Zafarzadeh, A. (2006). The determination of water chemical quality of cisterns in rural areas of Golestan province. *Journal of Gorgan University of Medical Sciences*, 8(1), 51-54. http://goums.ac.ir/journal/article-1-53-fa.html [In Persian]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.3.3.7]