

Investigating the hydrogeological behavior of the Sabzevaran fault using groundwater level data, water quality parameters, and environmental isotopes (^{18}O , ^3H , and ^{14}C)

Mohammad Faryabi 

Assistant Professor, Department of Ecological Engineering, College of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran

Extended Abstract

Introduction

Faults are among the important geological structures affecting groundwater flow and quality. The faults' function can increase the complexity of the groundwater flow in alluvial aquifers. Faults have different hydrogeological behaviors in various geological environments. Fault zones can act as a conduit for groundwater flow, a barrier to groundwater flow, or a complex conduit/barrier system. The displacement of rock and sedimentary layers around faults may lead to significant changes in the bedrock level, aquifer thickness, and groundwater depth. Faults can also channelize groundwater flow and solute transport. Determining the hydrological behavior of fault structures can play an important role in the sustainable management of water resources. The Sabzevaran fault system is one of the most important fault systems in southern Iran. This system is a right-lateral transverse fault with a length of 150 km. The Sabzevaran fault strikes N-S (from the west of Jiroft city to the southwest of Kahnuj city in Kerman province, Iran) and shows evidence of Quaternary deformation. Fault scarps, cutoff ridges, and tilted rivers indicate the activity of this fault. This study aims to investigate the hydrogeological behavior of the Sabzevaran fault and to evaluate its impact on water level fluctuations and groundwater quality.

Materials and Methods

Various data were used to investigate the hydrogeological behavior of the Sabzevaran fault. Geophysical surveys are among the best indirect methods for studying subsurface geological conditions. Geophysical studies were conducted by the geoelectric method by the Abkav-Louis Berger Company. The results were used to investigate the effect of the fault on aquifer geometry and the condition of the subsurface layers. Investigating groundwater level fluctuations is very important in water resource studies. These fluctuations were examined using water depth data from monitoring wells. Groundwater depth and isopotential maps were also plotted. Fault systems can affect groundwater quality. To evaluate the impact of the Sabzevaran fault on groundwater quality, 57 water samples were collected from abstraction wells, and their parameters such as electrical conductivity and the concentration of major cations (calcium, sodium, and magnesium) and anions (bicarbonate, sulfate, and chloride) were measured in the Kerman Regional Water Authority laboratory. The isotopic composition of water molecules is a useful tool in water resources studies. The isotopic signatures of oxygen-18 (^{18}O), tritium (^3H), and carbon-14 (^{14}C) were also analyzed in this research.

Results and Discussion

The geoelectrical results confirmed the activity of the Sabzevaran fault and its role in changing aquifer geometry. The Sabzevaran fault altered bedrock topography, aquifer thickness, and groundwater depth. A significant difference in water depth can be observed around the Sabzevaran fault. There was a significant difference in groundwater levels due to fault activity. The difference in water level on both sides of the fault ranged from 20 m to more than 30 m in different areas. The pattern of temporal fluctuations in groundwater was completely different on both sides of the fault. On the west side of the fault, the groundwater level exhibited a sinusoidal pattern, whereas on the east side, it showed a continue decline. The direction of groundwater flow also varied around the Sabzevaran fault. In the eastern part of the fault, groundwater flowed parallel to the fault line, whereas in the western part, it was channelized. The highest electrical conductivity values and the highest

concentrations of sulfate and chloride ions were recorded in the wells adjacent to the Sabzevaran fault. The highest concentrations of oxygen-18, tritium, and carbon-14 were observed in the central part of the fault. Also, groundwater in the fault zone exhibited distinct isotopic signatures compared to the eastern part of the aquifer. The difference in groundwater residence time and its recharge through the fault accounted for the isotopic difference.

Conclusion

The results of this study indicated that the Sabzevaran fault caused the hydraulic disconnection of the western part of the aquifer of the Jiroft plain aquifer. This disconnection has affected both groundwater flow and quality. Due to the action of the fault, significant changes in surface topography, bedrock level, aquifer thickness, groundwater level, hydraulic gradient, groundwater flow direction, and water quality have occurred. Examining groundwater fluctuations, water quality parameters, and isotopic signatures also confirmed these findings. This study showed that the Sabzevaran fault acts as a hydraulic barrier to groundwater flow in the Jiroft plain and leads to the channelization of groundwater flow, especially in the western margin of the aquifer. To better understand the effect of the Sabzevaran fault on the groundwater system, further geoelectrical studies should be conducted at the fault zone. Monitoring groundwater depth, water quality, and the isotopic composition of wells adjacent to the fault zone is very important. It is suggested that the hydrogeological behaviour of the Sabzevaran fault be considered in the development of mathematical models of the groundwater system and the formulation of aquifer management strategies.

Keywords: Groundwater fluctuations, Hydrochemistry, Environmental isotope, Sabzevaran fault, Jiroft plain.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

I would like to express my sincere gratitude to the University of Jiroft for the financial support, which significantly contributed to this research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Faryabi: Writing - original draft preparation, Resources, methodology, Conceptualization, Software, Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: Faryabi753@yahoo.com

Citation: Faryabi, M. (2025). Investigating the hydrogeological behavior of the Sabzevaran fault using groundwater level data, water quality parameters, and environmental isotopes (^{18}O , ^3H , and ^{14}C). *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 107-122.

DOI: 10.22098/mmws.2024.14759.1433

Received: 27 February 2024, Received in revised form: 08 April 2024, Accepted: 08 April 2024,
Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 107-122

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی گسل سبزواران با استفاده از داده‌های سطح آب‌زیرزمینی، پارامترهای کیفی و ایزوتوپ‌های محیطی (^{14}C و ^3H ، ^{18}O)

محمد فاریابی

استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

چکیده

گسل‌ها یکی از مهمترین ساختارهای زمین‌شناسی هستند که هندسهٔ آبخوان، جریان آب‌زیرزمینی و کیفیت آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. گسل‌ها در مناطق مختلف، رفتارهای هیدروژئولوژیکی متفاوتی دارند. آن‌ها می‌توانند باعث تسهیل جریان آب‌زیرزمینی شده و یا این‌که مانعی در مقابل جریان آب در آبخوان ایجاد کنند. گسل سبزواران یک گسل امتدادلغز با امتدادی شمالی - جنوبی است که آبخوان آبرفتی دشت جیرفت را تحت تأثیر قرار داده است. در این مطالعه رفتار هیدروژئولوژیکی این گسل بررسی شده است. به این منظور از داده‌های مختلفی مانند داده‌های سطح آب‌زیرزمینی، داده‌های کیفیت منابع آب‌زیرزمینی و نتایج حاصل از اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های محیطی (اکسیژن ۱۸، تریتمیم و کربن ۱۴) استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که گسل سبزواران تأثیر عمده‌ای بر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت جیرفت دارد. تغییرات شدیدی در عمق سنگ‌بستر و ضخامت آبخوان در اثر عملکرد گسل رخ داده است. جابه‌جایی لایه‌ها توسط گسل باعث کاهش ضخامت آبخوان در حاشیه غربی دشت جیرفت شده است. تفاوت عمق برخورد به سطح آب‌زیرزمینی و شیب هیدرولیکی در اطراف گسل کاملاً مشهود است. ناهنجاری‌هایی در تغییرات مکانی پارامترهای کیفی مانند هدایت الکتریکی و غلظت یون‌هایی مانند سولفات و کلراید در امتداد گسل مشاهده می‌شود. محتوی ایزوتوپی آب‌زیرزمینی نیز در اطراف گسل با مناطق اطراف آن متفاوت است. نتایج حاصل از این تحقیق موید این است که گسل سبزواران مانند یک مانع هیدرولیکی عمل کرده و باعث جریان آب‌زیرزمینی در مسیری موازی با امتداد گسل شده است. بالآمدگی رسوبات ریزدانه و صعود آب‌زیرزمینی توسط گسل عامل اصلی افزایش املاح در امتداد گسل سبزواران است.

واژه‌های کلیدی: نوسانات آب‌زیرزمینی، هیدروشیمی، ایزوتوپ‌های محیطی، گسل سبزواران، دشت جیرفت.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Faryabi753@yahoo.com

استناد: فاریابی، محمد. (۱۴۰۴). بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی گسل سبزواران با استفاده از داده‌های سطح آب‌زیرزمینی، پارامترهای کیفی و ایزوتوپ‌های محیطی (^{14}C و ^3H ، ^{18}O). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۱۰۷-۱۲۲.
DOI: 10.22098/mmws.2024.14759.1433



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۱۰۷ تا ۱۲۲
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

گسل‌ها یکی از پدیده‌های مهم زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی هستند که سیستم آب‌رزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. عملکرد گسل‌ها در آبخوان‌های آبرفتی می‌تواند باعث پیچیدگی سیستم جریان آب‌رزمینی و بی‌نظمی آن شود (Alijani et al., 2018). گسل‌ها رفتار هیدروژئولوژیکی متفاوتی دارند. مناطق گسلی می‌توانند به عنوان مجرای برای جریان آب‌رزمینی عمل کنند و یا مانعی برای جریان آب باشند. برخی مواقع یک گسل می‌تواند به عنوان یک سیستم مجرا/مانع^۱ پیچیده عمل کند (Bense et al., 2013). تغییرات شدید در توپوگرافی سنگ بستر، تغییر در ضخامت آبخوان و محدود شدن جریان آب‌رزمینی به یک مسیر خاص، ارتباط مستقیمی با عملکرد گسل‌ها دارد (Chitsazan and Manshadi, 2021). شیب هیدرولیکی آب‌رزمینی اطراف گسل به شدت توسط فرآیندهای هیدروژئولوژیکی مانند نرخ تغذیه آب‌رزمینی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی مانند استخراج آب و فرآیندهای عمیق مانند تراکم رسوب کنترل می‌شود (Deh Bozorgi and Rezaei, 2016). ایجاد سد هیدرولیکی یا برقراری ارتباط بین دو طرف گسل و ظهور چشمه‌ها نحوه عملکرد گسل را مشخص می‌کند. فعالیت گسل می‌تواند باعث اختلاط آب‌های فسیلی با آب‌های زیرزمینی کم‌عمق و تغییر در خواص شیمیایی آن‌ها (مانند هدایت الکتریکی، pH و املاح محلول) شود (Rajabpour et al., 2016).

در رابطه با تأثیر گسل بر آب‌رزمینی پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. Yuan et al. (2011) با استفاده از تحلیل یون‌های اصلی آب‌رزمینی و ایزوتوپ‌های پایدار، مکانیزم تغذیه آب‌رزمینی در شمال چین را مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که گسل نرمال موجود در این منطقه باعث انتقال آب از آبخوان درز و شکافی^۲ به آبخوان آبرفتی شده است. در پژوهش دیگری (Deh Bozorgi and Rezaei, 2016) با مطالعه گسل‌های فعال و پراکندگی مکانی قنات‌ها و چاه‌ها در حوضه مهارلو، به روند نسبتاً خطی چاه‌ها در راستای گسل‌ها اشاره داشته و اختلاف فاحش آبدی چاه‌ها در پهنه گسلی را دلیل بر ارتباط بین گسل‌ها و منابع آبی منطقه دانسته‌اند. هم‌چنین، Rajabpour et al. (2016) نقش گسل شمال تبریز بر آبخوان آبرفتی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که این گسل به عنوان مانعی در برابر جریان آب‌رزمینی عمل می‌کند. عملکرد گسل باعث شده تا آب‌رزمینی در امتداد گسل جریان یابد. مطالعات Ashjari et al. (2016) نشان داد که گسل تبریز رفتارهای هیدروژئولوژیکی متفاوتی دارد. این گسل در برخی مناطق باعث

تسهیل جریان آب‌رزمینی شده و در برخی مناطق مانعی هیدرولیکی در مقابل جریان آب ایجاد کرده است. Kiani and Yousefi (2017) نقش گسل‌های فعال بر سطح آب‌رزمینی حوضه آبریز شهر چای را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی حرکت آب‌رزمینی کاملاً متأثر از گسل‌های کواترنری فعال در منطقه است. (Alijani et al., 2018) تأثیر گسل درود بر هیدروژئولوژی آبخوان درود- بروجرد را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد گسل با جابه‌جایی لایه‌های آبرفتی باعث تغییرات ناگهانی جنس و ضخامت آبخوان و تغییر در کیفیت شیمیایی آب‌رزمینی شده است. در پژوهش دیگری (Arjmand et al., 2019) تأثیر گسل توس بر آبخوان دشت مشهد را بررسی کردند. این محققان نشان دادند که گسل توس آبخوان را به دو بخش مجزا تبدیل کرده است. Azizkhani (2020) رفتار هیدرولیکی گسل قلعه‌حاتم در آبخوان دشت بروجرد را بررسی کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که گسل قلعه‌حاتم ضخامت و جنس رسوبات آبرفتی را تغییر داده است. عملکرد گسل باعث کاهش آبدی و عمر مفید چاه‌ها شده است. نقش گسل مهریز بر تکامل هیدرشیمیایی و جریان آب‌رزمینی آبخوان یزد توسط Chitsazan and Manshadi (2021) مطالعه شده است. این محققان بیان کردند که تغییرات مهمی در پارامترهای کیفی آب در اطراف گسل مشاهده می‌شود و گسل مهریز به عنوان یک سد هیدرولیکی عمل می‌کند. Wang et al. (2022) سیستم جریان آب‌رزمینی در منطقه گسلی تن‌لو^۳ در چین را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که گسل در این منطقه الگوی جریان آب‌رزمینی را تغییر داده و باعث ایجاد مسیر مشخصی برای جریان آب‌رزمینی شده است. عملکرد این گسل باعث ظهور چشمه‌های آب‌گرم در سطح زمین شده است. (Mohammadi et al., 2023) تأثیر گسل خشک‌رود بر آبخوان دشت زرنديه را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که گسل به عنوان یک سد هیدرولیکی در بخش غربی آبخوان، عمل کرده است اما در سایر بخش‌ها به عنوان مجرای برای جریان آب‌رزمینی رفتار می‌کند.

نگاهی به نتایج تحقیقات مختلف نشان‌دهنده اهمیت گسل‌ها بر سیستم جریان آب‌رزمینی و کیفیت آن است. تعیین رفتار هیدروژئولوژیکی گسل‌ها می‌تواند در مدیریت پایدار منابع آب نقش مهمی داشته باشد. سامانه گسلی سبزواران یکی از مهمترین سیستم‌های گسله در جنوب ایران است. این پژوهش برای اولین بار و به منظور بررسی تأثیر گسل سبزواران بر جریان آب‌رزمینی دشت جیرفت انجام شده است. بررسی رفتار

¹ Conduit/barrier system

² Fractured aquifer

³ Tan-Lu fault zone

۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش از داده‌های مختلفی برای بررسی رفتار هیدروژنولوژیکی گسل سبزواران استفاده شده است. یکی از بهترین روش‌های غیرمستقیم برای مطالعه وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی است (Faryabi, 2023). مطالعات ژئوفیزیک دشت جیرفت به روش ژئوالکتریک توسط شرکت آبکاو- لوئیس برگر^۱ انجام شده است. نتایج حاصل از این مطالعات برای بررسی نقش گسل در تغییر وضعیت سنگ‌بستر، تغییر ضخامت آبخوان و وضعیت لایه‌های زیرسطحی استفاده شده‌اند. بررسی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی در مطالعات منابع آب اهمیت بسیاری دارد (Sayadi Shahraki et al., 2023). نوسانات سطح آب‌زیرزمینی با توجه به داده‌های عمق برخورد به سطح آب‌زیرزمینی در ۲۸ چاه مشاهده‌ای (مربوط به شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان) بررسی شده است. موقعیت این چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۱ ارائه شده است. یکی از جنبه‌های مهم عملکرد هیدروژنولوژیکی گسل‌ها، تأثیر آن‌ها بر کیفیت منابع آب است (Bense et al., 2006). برای بررسی تأثیر گسل سبزواران بر کیفیت آب‌زیرزمینی، از نتایج تحلیل نمونه‌های آب‌زیرزمینی استفاده شده است. ۵۷ نمونه از چاه‌های بهره‌برداری موجود تهیه شده و پارامترهایی مانند هدایت الکتریکی و غلظت کاتیون‌های اصلی (کلسیم، سدیم و منیزیم) و آنیون‌های اصلی (بی‌کربنات، سولفات و کلراید) برای آن‌ها در آزمایشگاه شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان اندازه‌گیری شده است. استفاده از پارامترهای ایزوتوپی مولکول‌های آب به روشی مفید و نوین در مطالعات منابع آب تبدیل شده است (Vreca and Kern, 2020). ایزوتوپ‌ها اتم‌های مربوط به یک عنصر هستند که عدد اتمی یکسان ولی عدد جرمی متفاوتی دارند (Clark and Fritz, 1997). ایزوتوپ‌های محیطی شامل ایزوتوپ‌های پایدار و ناپایدار (رادیواکتیو) هستند که به صورت طبیعی در آب وجود دارند. ایزوتوپ‌های پایدار اغلب به منظور تعیین منشأ آب و ایزوتوپ‌های رادیواکتیو برای تعیین سن آب به کار برده می‌شوند (Mirzavand et al., 2019). از مهمترین ایزوتوپ‌های پایدار که در مطالعات منابع آب کاربرد دارند، می‌توان به اکسیژن-۱۸ (^{18}O) و دوتریم (^2H) اشاره کرد. پرکاربردترین ایزوتوپ‌های ناپایدار نیز شامل تریتم (^3H) و کربن-۱۴ (^{14}C) هستند (Clark and Fritz, 1997). نتایج تحلیل ایزوتوپ‌های اکسیژن-۱۸، تریتم و کربن-۱۴ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ایزوتوپ‌ها توسط موسسه تحقیقات منابع آب ایران (تماب) در دشت جیرفت اندازه‌گیری شده‌اند.

هیدروژنولوژیکی گسل سبزواران، تأثیر گسل بر سیستم آبخوان، نوسانات سطح آب‌زیرزمینی و کیفیت آب از مهمترین اهداف این پژوهش هستند.

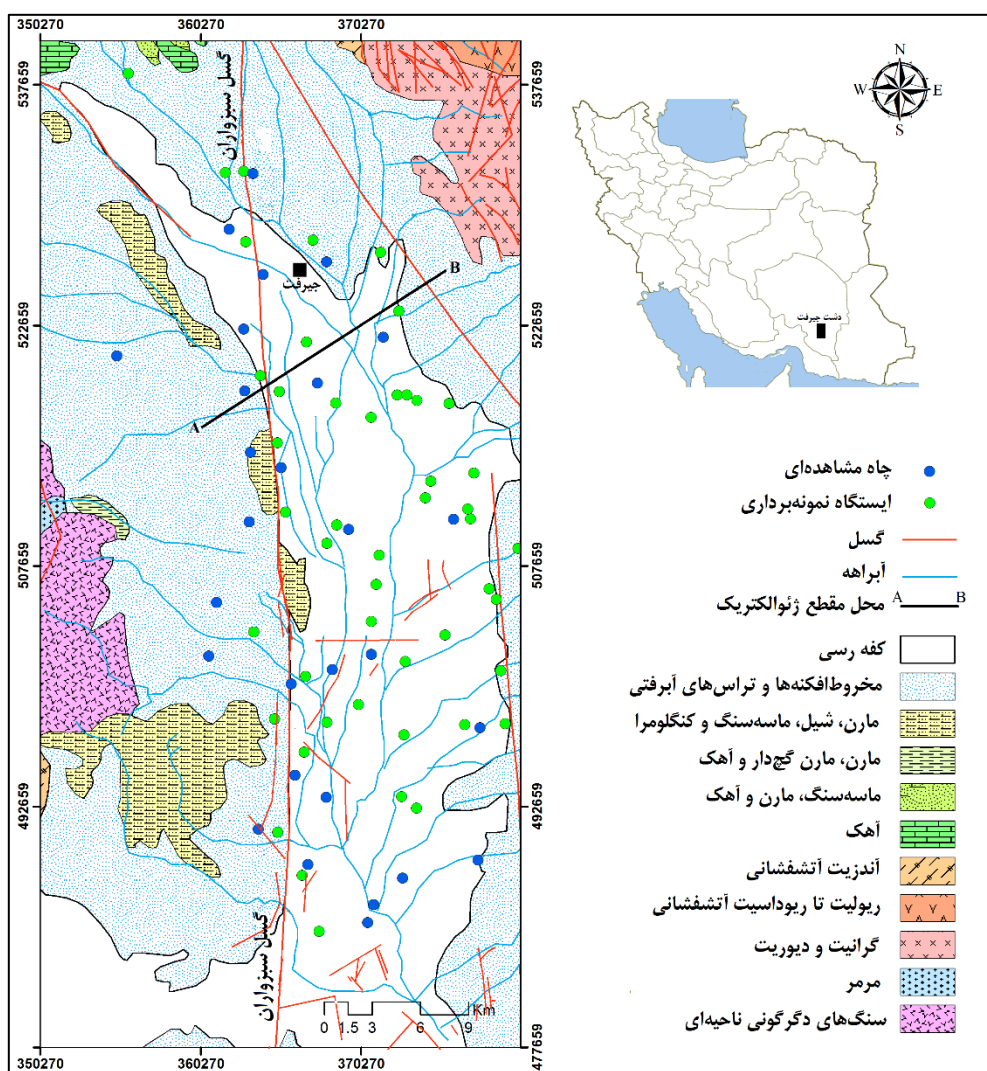
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

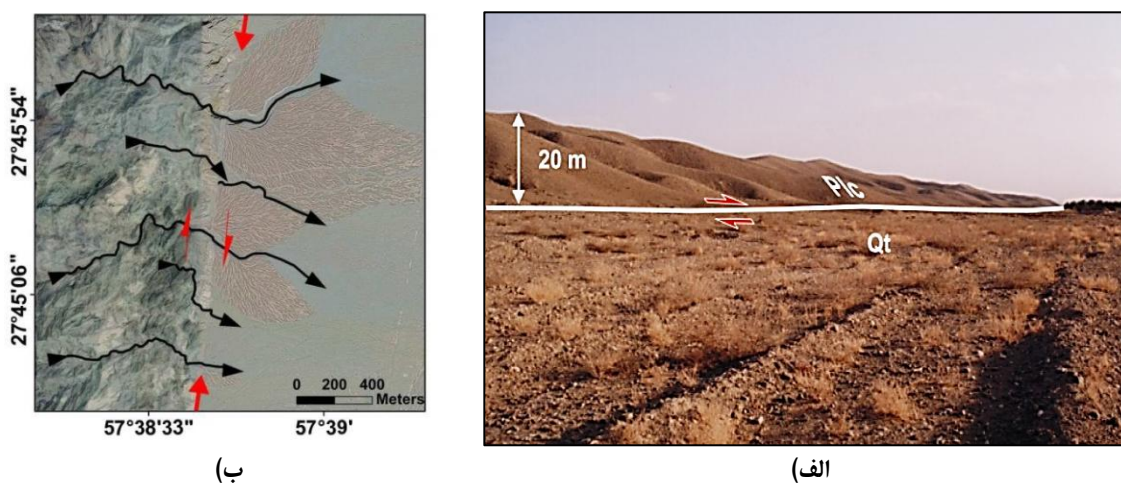
گسل سبزواران یک گسل مرکب (امتدادلغز راست‌لغز با مولفه معکوس) به طول نزدیک به ۱۵۰ کیلومتر است. این گسل با امتدادی شمالی - جنوبی از غرب شهر جیرفت عبور می‌کند (شکل ۱). پرتگاه‌های گسلی، دامنه‌های بریده شده و تغییر مسیر رودخانه‌ها، شواهدی از فعالیت این گسل در دوره کواترنری است (شکل ۲). گسل سبزواران نهشته‌های پلیوسن-کواترنری را جایجا کرده است. شیب گسل سبزواران عمودی و حرکت امتدادلغز آن همراه با یک مولفه معکوس است (Shafei et al., 2009). جابه‌جایی گسل سبزواران در ۴۲۰۰۰ سال گذشته حدود ۱۳۰ متر و میزان جابه‌جایی سالانه آن $0.7 \pm 2/98$ میلی‌متر برآورد شده است (Shafei et al., 2009). این گسل باعث جابه‌جایی رسوبات کواترنری و تغییراتی در تراز ارتفاعی سنگ بستر آبخوان شده است. این تغییرات، سیستم جریان آب‌زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است. بالا آمدگی رسوبات ریزدانه و تبخیری نیز تغییراتی در کیفیت آب ایجاد کرده است.

دشت جیرفت در حوزه رسوبی-ساختاری ایران مرکزی واقع شده است. نیروهای زمین‌ساختی، شکستگی‌ها و گسل‌های فراوانی را در این ناحیه به وجود آورده‌اند. این گسل‌ها و شکستگی‌ها باعث ایجاد یک دره فروافتاده در دشت جیرفت شده‌اند (Faryabi et al., 2010). رسوبات حاصل از فرسایش ارتفاعات اطراف این دره در آن نهشته شده و با گذشت زمان آبخوان دشت جیرفت به‌وجود آمده است. در حاشیه دشت جیرفت سنگ‌های آذرین (گرانیت، دیوریت، آندزیت و ریولیت)، سنگ‌های رسوبی (مارن، آهک، ماسه‌سنگ و کنگلومرای نئوژن)، سنگ‌های دگرگونی (مرمر و سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای)، مخروط‌افکنه‌های دوره کواترنری و تراس‌های آبرفتی مشاهده می‌شوند (شکل ۱). رسوبات آبرفتی مهمترین واحد رسوبی دشت جیرفت بوده و بخش بزرگی از دشت جیرفت را به خود اختصاص داده‌اند. آبخوان دشت جیرفت یک آبخوان چندلایه است و از رسوبات آبرفتی دوره کواترنری تشکیل شده است. رودخانه هلیل‌رود مهمترین جریان سطحی دشت جیرفت است که در بخش‌هایی از سال دارای آب بوده و آبخوان دشت جیرفت را تغذیه می‌کند.

¹ Abkav-Louis Berger



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه، گسل سبزواران، چاه‌های مشاهده‌ای و ایستگاه‌های نمونه‌برداری
Figure 1- Location of the study area, Sabzevaran fault, monitoring wells, and sampling stations



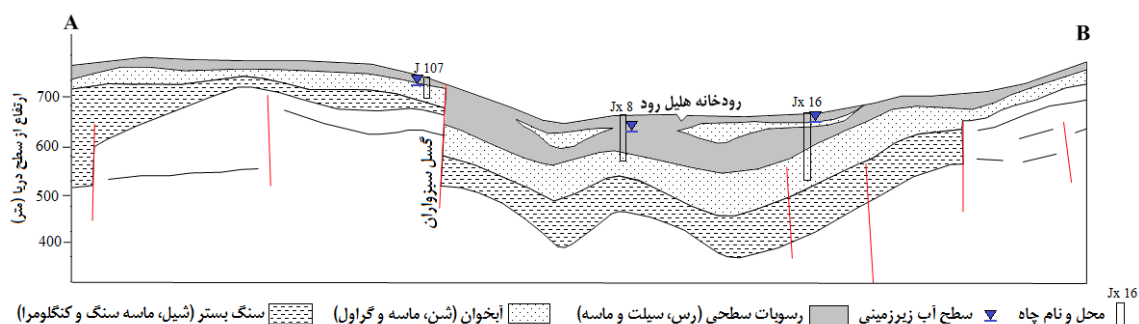
شکل ۲- (الف) یکی از پرتگاه‌های گسلی ایجاد شده توسط گسل سبزواران (Qt و Plc به ترتیب نشان‌دهنده نهشته‌های پلیستوسن و کواترنری هستند) و (ب) تصویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده تغییر مسیر آبراهه‌ها در امتداد گسل (Rashidi et al. 2020)
Figure 2- (a) A fault scarp related to Sabzevaran fault (Plc and Qt are Pleistocene and Quaternary deposits, respectively), and (b) Satellite image showing of the diversion of drainage along the fault (Rashidi et al. 2020)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ژئوالکتریک

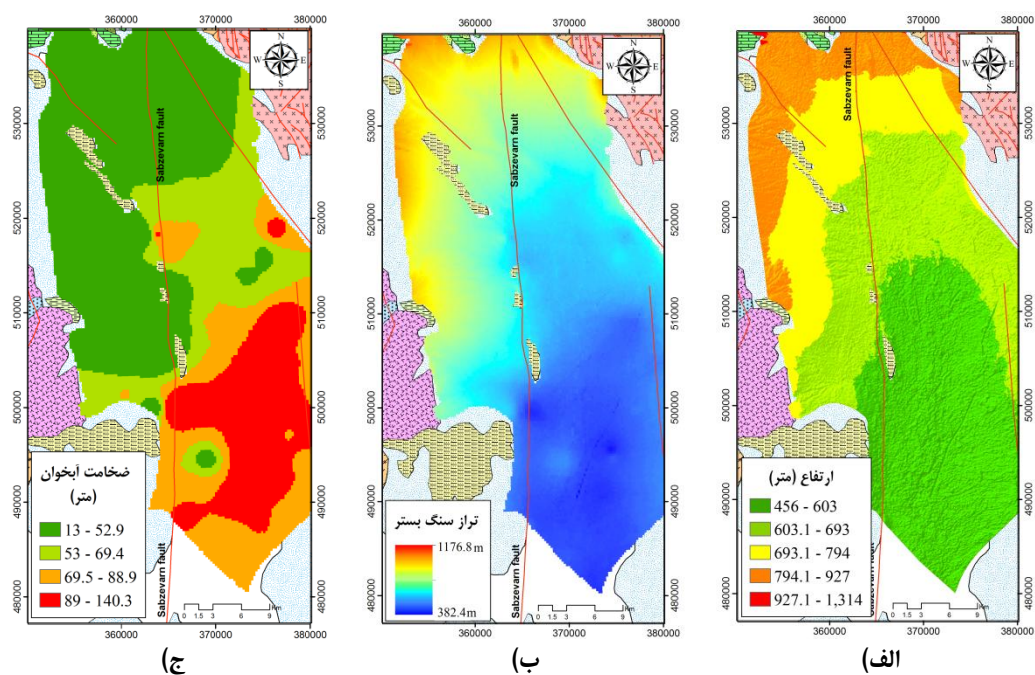
مطالعات ژئوالکتریک انجام شده در دشت جیرفت، فعالیت گسل سبزواران و نقش آن در تغییر ضخامت آبخوان را تایید کرده است. این گسل باعث بی‌نظمی‌هایی در سنگ بستر آبخوان شده و مخزن آب‌زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است. عملکرد گسل سبزواران باعث جابه‌جایی لایه‌های زیرسطحی و پیچیدگی هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت جیرفت شده است (Abkav- Louis Berger, 1976). شکل ۳ یک مقطع زمین‌شناسی را نشان می‌دهد که با استفاده از نتایج مطالعات ژئوالکتریک و اطلاعات حاصل از حفاری چاه‌های دشت جیرفت تهیه شده است. موقعیت این مقطع روی شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، گسل سبزواران باعث تغییر در توپوگرافی سطحی، ضخامت و عمق آبخوان شده است.

گسل سبزواران باعث تغییر ضخامت رسوبات غیراشباع بالای آبخوان نیز شده است (شکل ۳). مدل رقمی-ارتفاعی منطقه مورد مطالعه در شکل ۴-الف ارائه شده است. اختلاف توپوگرافی زمین در دو سمت گسل سبزواران با توجه به این شکل مشخص است. شکل ۴-ب نقشه تراز سنگ‌بستر آبخوان را نشان می‌دهد. در این نقشه، تأثیر گسل سبزواران بر ارتفاع سنگ‌بستر مشخص است. سنگ بستر آبخوان در بخش غربی گسل، ارتفاع بیشتری نسبت به بخش شرقی آن دارد. نقشه ضخامت آبخوان دشت جیرفت در شکل ۴-ج ارائه شده است. در این شکل نیز تفاوت ضخامت آبخوان در اطراف گسل سبزواران مشاهده می‌شود. جابه‌جایی در امتداد گسل باعث شده تا آبخوان در حاشیه غربی دشت جیرفت ضخامت کمتری نسبت به بخش شرقی گسل داشته باشد.



شکل ۳- مقطع زمین‌شناسی تهیه شده با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک و لوگ چاه‌ها (Abkav-Louis Berger, 1976)

Figure 3- Geological section prepared using geoelectric data and well logs (Abkav-Louis Berger, 1976)



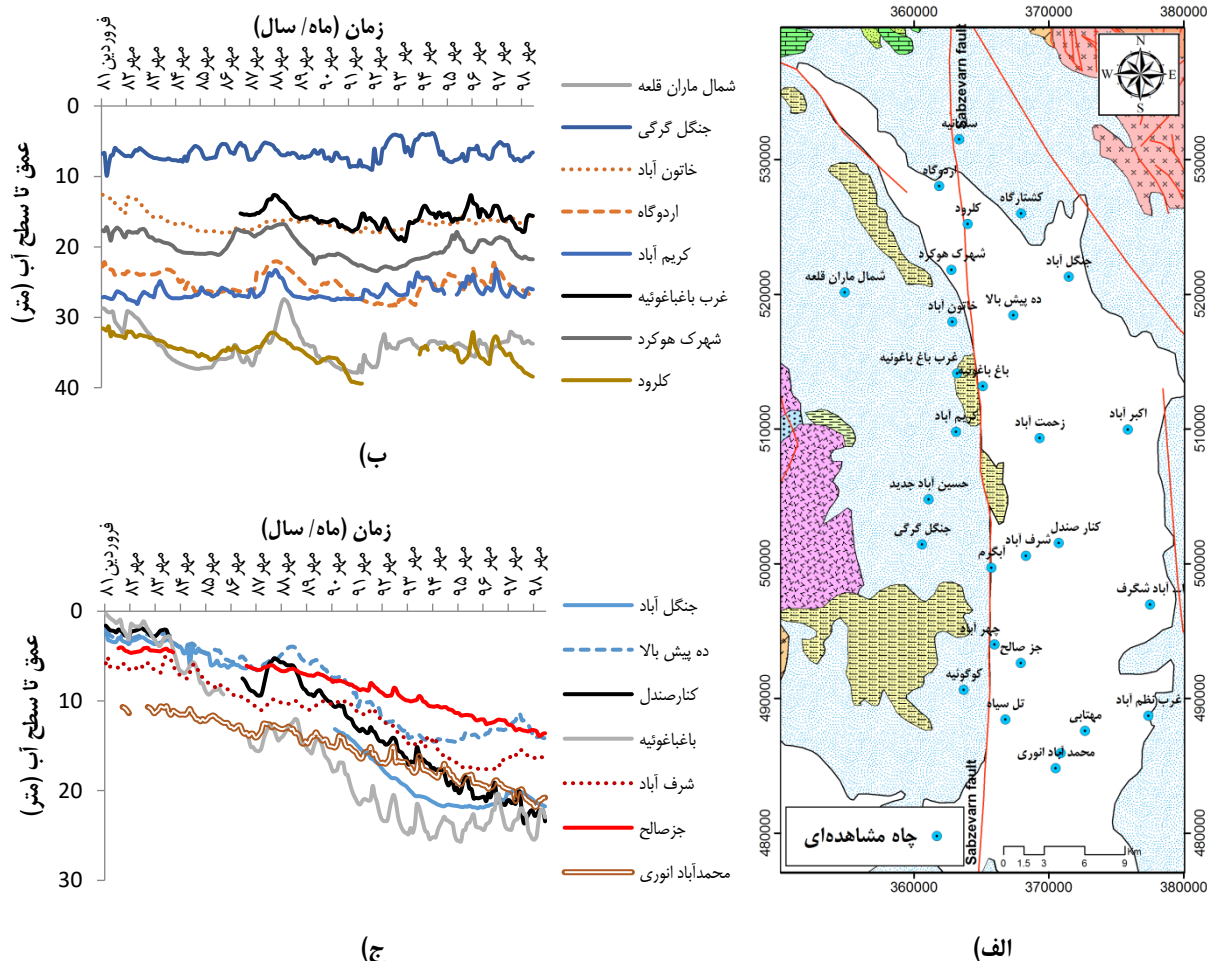
شکل ۴- (الف) مدل رقمی-ارتفاعی، (ب) تراز سنگ بستر و (ج) ضخامت آبخوان دشت جیرفت

Figure 4- (a) Digital elevation model, (b) Bedrock elevation, and (c) Aquifer thickness of the Jiroft plain

۲-۳- نوسانات سطح آب

یکی از مهمترین اثرات هیدروژئولوژیکی گسل‌ها، تغییر الگوی سطح آب‌زیرزمینی است. جابه‌جایی واحدهای زمین‌شناسی توسط گسل باعث تغییراتی در عمق برخورد به آب و الگوی جریان آب‌زیرزمینی می‌شود. شکل ۵ نوسانات عمق برخورد به سطح آب‌زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای در دو سمت گسل سبزوآران را نشان می‌دهد. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۵-الف و نوسانات زمانی عمق آب در آن‌ها در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوی نوسانات آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل سبزوآران کاملاً متفاوت است. در سمت غرب گسل، الگوی نوسانات زمانی سطح آب‌زیرزمینی تقریباً یک الگوی سینوسی است و در برخی از چاه‌های مشاهده‌ای روند صعودی سطح آب نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب). در سمت غرب گسل سبزوآران الگوی متفاوتی از نوسانات سطح آب مشاهده می‌شود. چاه‌های مشاهده‌ای موجود در شرق

گسل یک روند کاملاً نزولی برای سطح آب را نشان می‌دهند و عمق برخورد به سطح آب در آن‌ها با گذشت زمان افزایش یافته است (شکل ۵-ج). البته تراکم چاه‌های بهره‌برداری در بخش شرقی گسل سبزوآران بیشتر است، اما عملکرد گسل باعث شده تا افت ناشی از پمپاژ چاه‌های بخش شرقی گسل سبزوآران، تأثیری بر سطح آب‌زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای واقع در بخش غربی گسل نداشته باشد. مطالب بالا به عدم ارتباط هیدرولیکی آبخوان دو سمت گسل اشاره دارد. مطالعات (Arjmand et al. 2019) نیز نشان داد که گسل توس آبخوان دشت مشهد را به دو بخش مجزا تبدیل کرده است. (Mohammadi et al. 2023) نیز نتایج مشابهی را در مورد گسل خشک‌رود در دشت زرن‌دیه ارائه کرده‌اند. این محققان با توجه به عدم شباهت روند افت سطح آب‌زیرزمینی در اطراف گسل خشک‌رود، رفتار هیدروژئولوژیکی این گسل به عنوان یک مانع هیدرولیکی را شناسایی کردند.

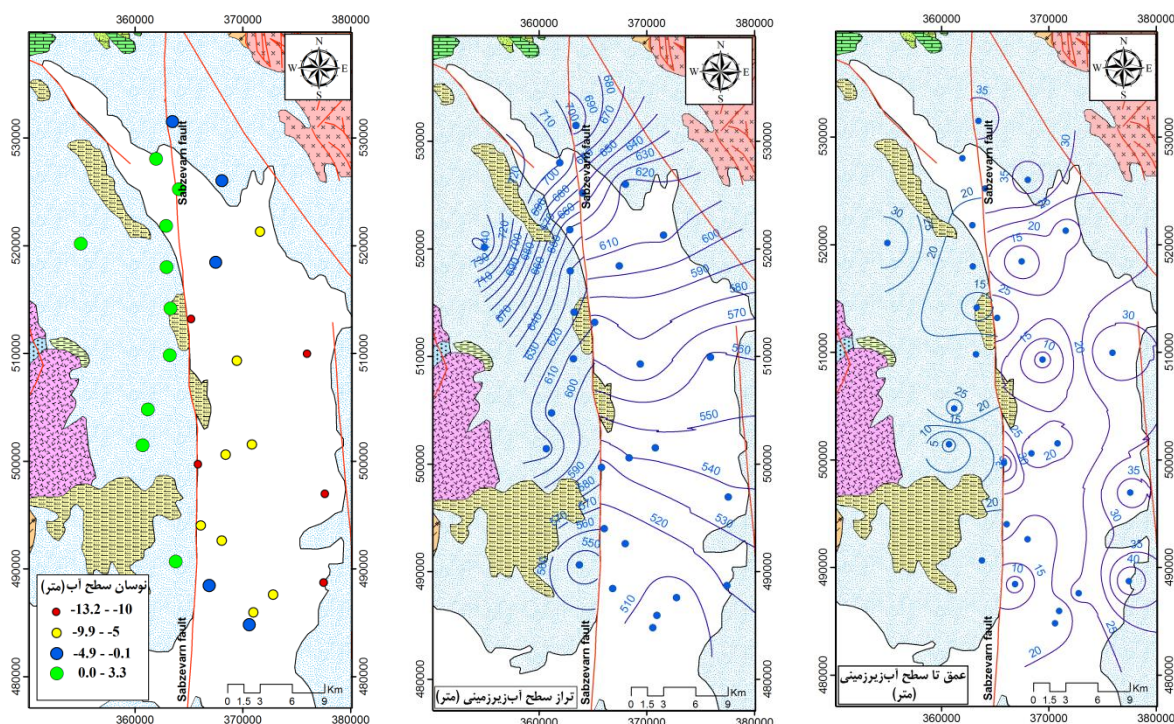


شکل ۵- (الف) موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، (ب) نوسانات عمق برخورد به آب در چاه‌های مشاهده‌ای غرب گسل سبزوآران و (ج) نوسانات عمق برخورد به آب در چاه‌های مشاهده‌ای شرق گسل سبزوآران
 Figure 5- (a) Location of monitoring wells, (b) Water level fluctuations in observation wells west of Sabzevaran fault, and (c) Water level fluctuation in observation wells east of Sabzevaran fault

فاصله خطوط هم‌پتانسیل کمتر است). در سمت شرقی گسل، منحنی‌های هم‌پتانسیل آب‌زیرزمینی تقریباً عمود بر امتداد گسل قرار گرفته‌اند. از آنجایی که خطوط جریان آب‌زیرزمینی عمود بر منحنی‌های هم‌پتانسیل در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین در بخش شرقی گسل سبزوآران، جهت جریان آب‌زیرزمینی موازی با امتداد گسل است. این وضعیت نشان‌دهنده عملکرد هیدروژئولوژیکی گسل سبزوآران به‌عنوان یک مانع هیدرولیکی است. در بخش غربی گسل، وضعیت توپوگرافی سطحی به‌گونه‌ای است که باعث می‌شود تا جهت کلی جریان آب‌زیرزمینی در آبخوان به سمت گسل باشد، اما در مجاورت گسل، جهت جریان آب تقریباً موازی با امتداد گسل است (شکل ۶-ب). با توجه به این الگوی جریان آب‌زیرزمینی می‌توان گفت که عملکرد گسل سبزوآران باعث هدایت جریان آب‌زیرزمینی به موازات گسل به خصوص در بخش غربی گسل شده است. (Rajabpour et al. (2016 نتایج مشابهی در مورد عملکرد گسل شمال تبریز ارائه کردند. بر اساس نتایج این محققان، عملکرد هیدرولیکی گسل به صورت یک مانع هیدرولیکی باعث حرکت آب‌زیرزمینی به موازات گسل شده است. مطالعات Alijani et al. (2018 نیز نشان داد که گسل درود در بروجرد نیز باعث هدایت جریان آب‌زیرزمینی در مسیری موازی با امتداد گسل شده است.

نقشه عمق برخورد به سطح آب‌زیرزمینی در اطراف گسل سبزوآران در شکل ۶-الف ارائه شده است. این نقشه بر اساس داده‌های عمق آب چاه‌های مشاهده‌ای در مهرماه ۱۳۹۶ تهیه شده است. با توجه به شکل ۶-الف، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در عمق آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل سبزوآران مشاهده می‌شود. میزان این اختلاف در بخش‌های مختلف گسل نیز متفاوت است. اختلاف عمق آب در بخش شمالی گسل در حدود ۱۰ متر است و در بخش‌های مرکزی به حدود ۲۰ متر می‌رسد (شکل ۶-الف). دلیل این تفاوت عمق آب‌زیرزمینی، جابه‌جایی لایه‌های تشکیل‌دهنده آبخوان در اثر عملکرد گسل است. البته تفاوت توپوگرافی سطحی نیز در این مورد نقش دارد.

شکل ۶-ب نقشه تراز سطح آب‌زیرزمینی آبخوان را در مهرماه ۱۳۹۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، عملکرد گسل سبزوآران باعث اختلاف قابل ملاحظه تراز سطح آب‌زیرزمینی شده است. اختلاف تراز سطح آب در دو سمت گسل بین ۲۰ تا بیش از ۳۰ متر در بخش‌های مختلف متغیر است. شیب هیدرولیکی و جهت جریان آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل سبزوآران نیز متفاوت است. در بخش شرقی گسل، به علت شیب ملایم سطح زمین و ضخامت بیشتر آبخوان، شیب هیدرولیکی کمتر است، اما در بخش غربی گسل، به دلیل شیب بیشتر سطح زمین و ضخامت کمتر آبخوان، شیب هیدرولیکی بیشتر است



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۶- نقشه (الف) عمق تا سطح آب، (ب) تراز سطح آب‌زیرزمینی و (ج) نوسانات سطح آب‌زیرزمینی
Figure 6- Map of (a) groundwater depth, (b) groundwater level, and (c) groundwater level fluctuations

آب در سایر بخش‌های آبخوان عموماً کمتر از ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است و مقادیر بیشتر هدایت الکتریکی (۱۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) در نمونه‌هایی ثبت شده که در اطراف گسل واقع شده‌اند. عملکرد گسل باعث تماس نهشته‌های ریزدانه مانند مارن، مارن‌های حاوی گچ و شیل با آب‌زیرزمینی شده است. انحلال این رسوبات دانه‌ریز میزان املاح محلول و هدایت الکتریکی آب‌زیرزمینی را افزایش داده است. تغییر غلظت کاتیون‌های محلول در آب‌زیرزمینی مانند کلسیم، منیزیم و سدیم نیز در اطراف گسل مشاهده می‌شود (شکل‌های ۷-ب تا ۷-د). البته غلظت این یون‌ها در دشت جیرفت تحت تأثیر فرآیندهای تبادل کاتیونی نیز قرار گرفته است (Faryabi et al., 2010). فرآیند تبادل کاتیونی باعث تغییر غلظت یون‌های کلسیم، سدیم و منیزیم در آب می‌شود. غلظت آنیون‌هایی مانند سولفات و کلراید نیز در اطراف گسل سبزوآران افزایش یافته است (شکل‌های ۷-و و ۷-ز). البته این روند افزایشی در مورد یون سولفات مشخص‌تر است و غلظت سولفات در اطراف گسل تفاوت مشخصی با سایر بخش‌های آبخوان دارد. دلیل این موضوع وجود ترکیبات حاوی گچ (مانند ژپس و اندریت) در نهشته‌های ریزدانه‌ای است که توسط گسل جابجا شده و در تماس با آب‌زیرزمینی قرار گرفته‌اند. بر اساس مطالعات Mahabghods (1988) گسل سبزوآران باعث حرکت صعودی آب‌زیرزمینی و انتقال آب‌های عمیق به آبخوان دشت جیرفت می‌شود. این آب‌های نفوذی کیفیت خوبی ندارند و یا کیفیت آن‌ها در مسیر جریان کاهش می‌یابد. بنابراین نفوذ این آب‌ها در اطراف گسل باعث افزایش املاح آب‌زیرزمینی شده است. مطالعات Chitsazan and Manshadi (2021) در دشت یزد نشان داد که ورود آب‌های با کیفیت نامناسب از طریق گسل مهریز باعث تخریب کیفیت آبخوان در اطراف گسل شده است. Alijani et al. (2018) نیز آنومالی‌های افزایش املاح آب‌زیرزمینی در اثر عملکرد گسل درود را گزارش کرده‌اند که با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر مشابه است.

میزان نوسان سطح آب برخی از چاه‌های مشاهده‌ای دشت جیرفت در بازه زمانی مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۶ در شکل ۶-ج نشان داده شده است. نوسان سطح آب در بازه زمانی مذکور بین ۱۳/۲- تا ۳/۳ متر متغیر است. تفاوت میزان نوسان سطح آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل سبزوآران کاملاً مشهود است. سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در غرب گسل سبزوآران یک روند کاملاً صعودی را نشان می‌دهد. میزان بالاآمدگی سطح آب‌زیرزمینی در این چاه‌ها بین ۰ تا ۳/۳ متر است. نوسان سطح آب‌زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در شرق گسل به‌صورت نزولی است. میزان افت سطح آب این چاه‌ها بین ۰/۱- تا ۱۳/۲- متر متغیر است. این الگوهای متفاوت نیز تأییدی بر عدم ارتباط هیدرولیکی آبخوان در دو سمت گسل است. Lapperre et al. (2022) نیز الگوهای متفاوتی برای نوسان سطح آب‌زیرزمینی در اطراف چند سیستم گسلی در شمال هلند گزارش کرده‌اند، که موید نتایج این تحقیق است. مطالعات Ashjari et al., 2016 نیز نشان‌دهنده الگوی متفاوت نوسان آب در اطراف گسل تبرته در دشت اراک است.

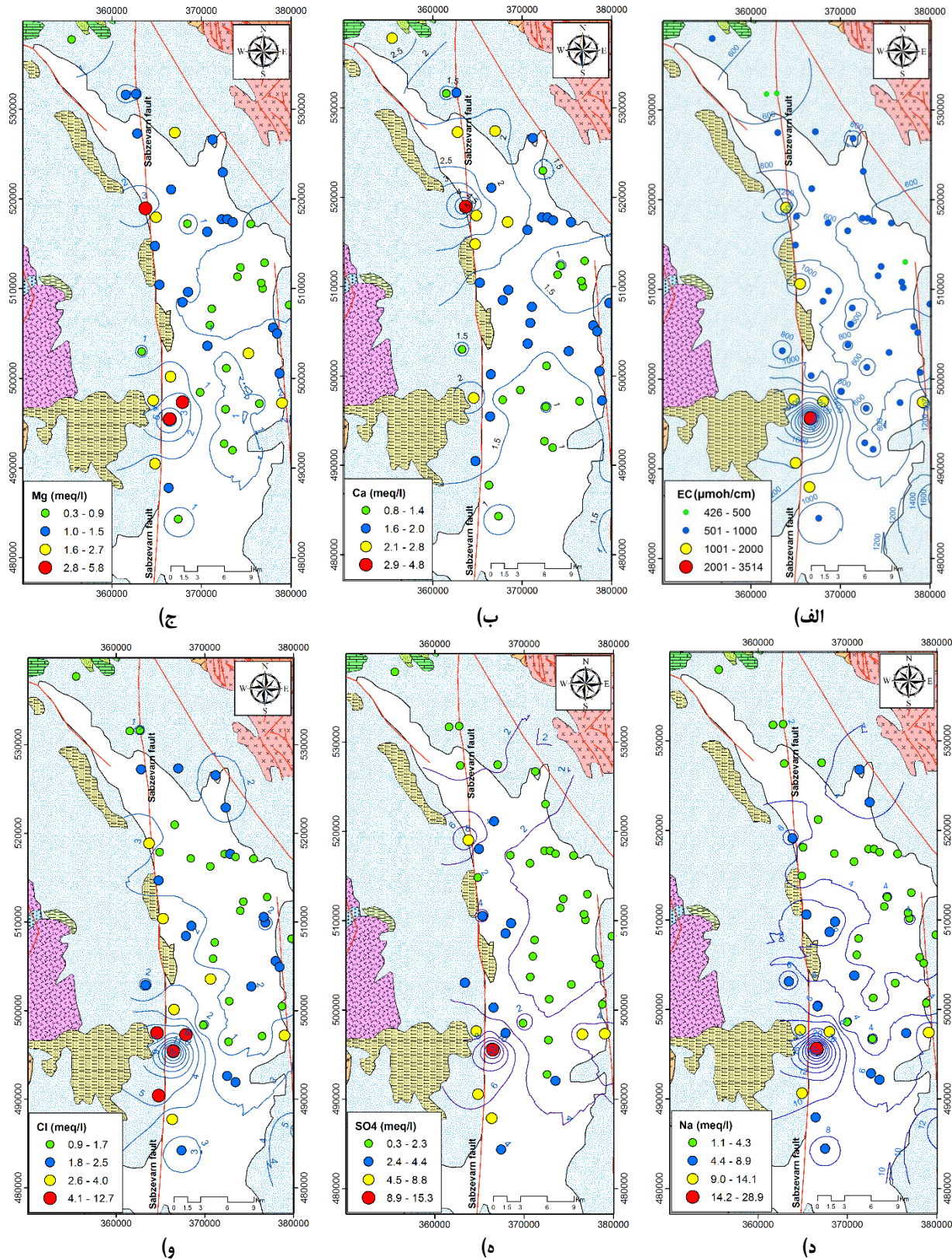
۳-۳- پارامترهای کیفی

جابه‌جایی لایه‌هایی با جنس متفاوت در اطراف گسل‌ها معمولاً با تغییرات کیفی آب همراه است. جهت بررسی تغییرات کیفی آب‌زیرزمینی در اطراف گسل سبزوآران از نتایج تحلیل کیفی ۵۷ نمونه آب‌زیرزمینی در تیرماه ۱۳۹۶ استفاده شده است. ویژگی‌های آماری پارامترهای کیفی این نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، میزان هدایت الکتریکی نمونه‌های آب بین ۲۳۷ تا ۳۵۱۴ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. میانگین این پارامتر نیز ۸۵۸/۷ میکروموس بر سانتی‌متر است. نقشه تغییرات هدایت الکتریکی آب‌زیرزمینی در شکل ۷-الف ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در چاه‌های اطراف گسل سبزوآران ثبت شده است. میزان هدایت الکتریکی

جدول ۱- پارامترهای آماری ویژگی‌های کیفی نمونه‌های آب‌زیرزمینی

Table 1- Statistical parameters of groundwater quality characteristics

Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	Mg	Ca	pH	هدایت الکتریکی (میلی‌موس بر سانتی‌متر)	مواد جامد محلول (میلی‌گرم بر لیتر)	پارامتر آماری
2.45	2.86	3.50	5.75	1.37	1.71	7.66	858.75	535.00	میانگین
0.90	0.31	2.10	1.11	0.35	0.84	7.00	426.00	237.20	حداقل
12.65	15.33	7.55	28.89	5.82	4.82	8.20	3514.00	2461.00	حداکثر
11.75	15.02	5.45	27.78	5.47	3.98	1.20	3088.00	2223.80	دامنه تغییرات
1.82	2.48	1.19	4.38	0.96	0.61	0.30	488.13	347.67	انحراف معیار
0.74	0.87	0.34	0.76	0.70	0.36	0.04	0.57	0.65	ضریب تغییرات



شکل ۷- نقشه توزیع مکانی (الف) هدایت الکتریکی، (ب) یون کلسیم، (ج) یون منیزیم، (د) یون سدیم، (ه) یون سولفات و (و) یون کلراید
 Figure 7- Spatial distribution map of (a) Electrical conductivity, (b) Calcium ion, (c) Magnesium ion, (d) Sodium ion, (e) Sulphate ion, and (f) Chloride ion.

۴-۳- ایزوتوپ‌های محیطی

غلظت ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸، ترتیم و کربن ۱۴ توسط موسسه تحقیقات منابع آب ایران (تاماب) در سال ۱۹۸۷ اندازه‌گیری شده است. خلاصه نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، غلظت اکسیژن ۱۸ نمونه‌های آب‌زیرزمینی بین ۶/۴۹- تا ۱/۸۸- درصد تغییر می‌کند. محتوی ایزوتوپی آب باران در دشت جیرفت درصد ۱/۲۸۲ گزارش شده است (Tamab, 1987). نمونه‌های آب‌زیرزمینی نسبت به آب باران تهی‌شدگی ایزوتوپی زیادی را نشان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد عامل دیگری علاوه بر بارندگی در تغذیه آبخوان نقش دارد. تغذیه از سنگ‌بستر و آب صعود یافته از طریق گسل‌های موجود به عنوان عوامل تغذیه‌کننده آبخوان معرفی شده‌اند (Tamab, 1987). شکل ۸-الف پراکندگی مکانی غلظت اکسیژن ۱۸ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین غلظت اکسیژن ۱۸ (۳/۸۸- تا ۱/۸- درصد) در بخش میانی گسل مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۷، بیشترین غلظت املاح آب‌زیرزمینی نیز در همین منطقه ثبت شده است. تفاوت محتوی ایزوتوپی مشخصی بین آب‌زیرزمینی در اطراف گسل و بخش شرقی آبخوان مشاهده می‌شود. مطالب بالا بیانگر منشأ متفاوت آب، تفاوت زمان اقامت آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل و ورود آب‌هایی با کیفیت نامناسب از طریق گسل به آبخوان است. مطالعات Yuan et al. (2011) با استفاده از تحلیل ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریم در شمال چین نیز نشان داد که آب موجود در آبخوان درز و شکافی عمیق از طریق یک گسل نرمال به سمت بالا حرکت کرده و آبخوان آبرفتی را تغذیه می‌کند.

شکل ۸-ب توزیع مکانی غلظت ترتیم در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. غلظت ترتیم آب‌زیرزمینی در امتداد گسل سبزواری بین ۷/۶Tu تا ۵۰/۱Tu متغیر است. این مقادیر ایزوتوپی نشان‌دهنده آب‌های جوان در چرخه هیدرولوژی هستند.

غلظت‌های کمتر ترتیم عموماً در آب‌زیرزمینی موجود در بخش شرقی گسل سبزواری اندازه‌گیری شده‌اند و نشان‌دهنده آب‌های قدیمی‌تر هستند (شکل ۸-ب). (Wannous et al. (2021) نیز با استفاده از تحلیل ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸، دوتریم و ترتیم در آبخوانی در شرق مصر نشان دادند که گسل موجود به صورت یک مانع هیدرولیکی عمل می‌کند و سن آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل متفاوت است.

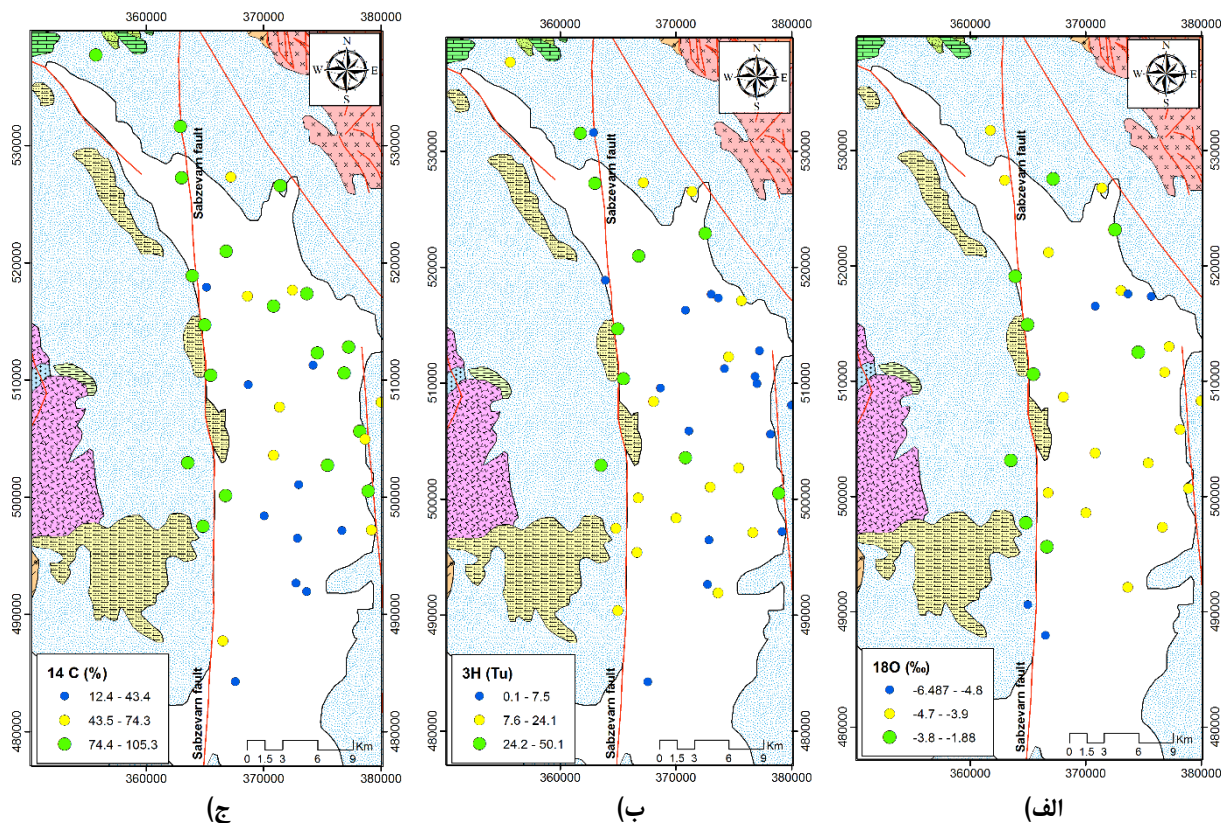
پراکندگی مکانی محتوی ایزوتوپی کربن ۱۴ آب‌زیرزمینی در شکل ۸-ج ارائه شده است. مشابه با الگوی مکانی اکسیژن ۱۸ و ترتیم، نمونه‌های آب در اطراف گسل سبزواری غلظت کربن ۱۴ بالایی دارند. غلظت کربن ۱۴ در یک روند خطی دیگر (شمال‌غربی- جنوب‌شرقی) در بخش شرقی آبخوان نیز بالا است. این روند می‌تواند مؤید حضور و فعالیت گسل‌های مدفونی باشد که در مطالعات ژئوفیزیک منطقه (Abkav-Louis Berger, 1976) به آن‌ها اشاره شده است. در شکل ۳ نیز برخی از این گسل‌های مدفون نشان داده شده‌اند. در بخش مرکزی آبخوان، غلظت کمتری از کربن ۱۴ ثبت شده است. سن بیشتر آب، زمان اقامت بیشتر آب‌زیرزمینی و تغذیه آبخوان از سنگ‌بستر باعث کاهش غلظت کربن ۱۴ در این مناطق شده است. مطالعات Tamab, 1987 نشان داده که سنگ بستر آبخوان در این بخش احتمالاً از جنس آهک است. تبادل ایزوتوپی کربن ۱۴ آب‌زیرزمینی و سنگ آهک در کاهش محتوی کربن ۱۴ آب‌زیرزمینی مؤثر است. تبادل ایزوتوپی، کربن ۱۴ را به‌طور مساوی بین بی‌کربنات محلول در آب و سنگ آهک تقسیم می‌کند (Clark and Fritz, 1997). مطالعات آزمایشگاهی Wendt (1971) نیز نشان داد که تبادل ایزوتوپی در حین عبور آب از سنگ‌های آهکی نقش مهمی در کاهش محتوی ایزوتوپی کربن ۱۴ آب‌زیرزمینی دارد.

جدول ۲- پارامترهای آماری ایزوتوپ‌های محیطی نمونه‌های آب‌زیرزمینی

Table 2- Statistical properties of environmental isotopes in groundwater samples

$\delta^{14}\text{C}$ (pmC)	$\delta^3\text{H}$ (Tu)	$\delta^{18}\text{O}$ درصد (SMOW)	پارامتر آماری
47	50	38	تعداد نمونه‌ها
65.84	13.61	-4.24	میانگین
12.38	0.10	-6.49	حداقل
105.31	50.10	-1.88	حداکثر
92.93	50.00	4.61	دامنه تغییرات
25.45	12.42	0.72	انحراف معیار
0.39	0.91	-0.17	ضریب تغییرات

SMOW: استاندارد متوسط آب اقیانوس، Tu: واحد ترتیم، pmC: درصد کربن جدید.

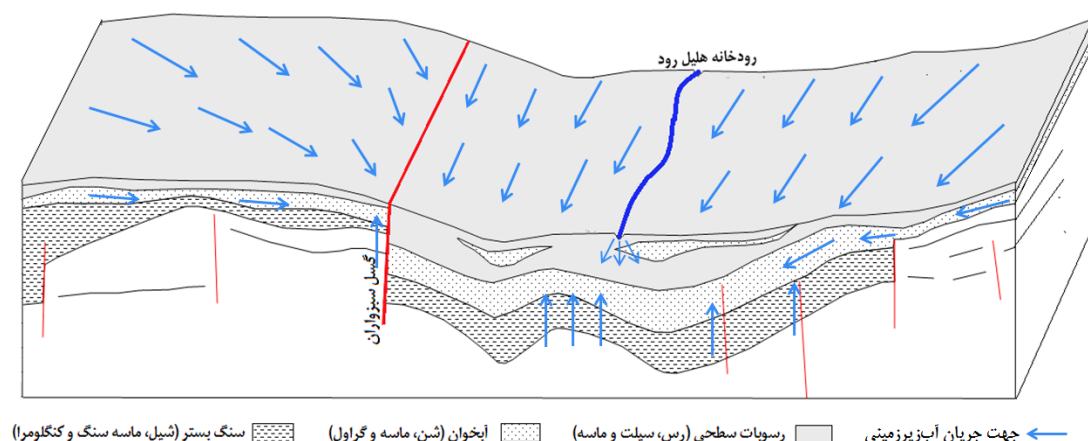


شکل ۸- نقشه توزیع مکانی ایزوتوپ‌های محیطی: (الف) اکسیژن ۱۸، (ب) تریتیوم و (ج) کربن ۱۴
 Figure 8- Spatial distribution map of environmental isotopes: (a) ^{18}O , (b) ^3H , and (c) ^{14}C

۵-۳- مدل مفهومی

طریق سنگ‌بستر در تغذیه آبخوان دشت جیرفت نقش مهمی دارند. رودخانه هلیل‌رود نیز یکی از منابع مهم تغذیه آبخوان دشت جیرفت است. بستر این رودخانه از رسوبات دانه‌درشت (شن، ماسه، گراول و قلوه‌سنگ) تشکیل شده است. با توجه به این که ارتفاع بستر رودخانه هلیل‌رود بالاتر از تراز سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان است، این رودخانه باعث تغذیه آبخوان می‌شود. Faryabi (2021) نیز با بررسی تغییرات دبی رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی موجود و مقایسه نوسانات زمانی سطح آب رودخانه و تراز آب‌زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای مجاور رودخانه نشان داد که رودخانه هلیل‌رود باعث تغذیه آبخوان دشت جیرفت می‌شود. با توجه به مطالب مذکور مدل مفهومی جریان آب‌زیرزمینی و رفتار هیدروژنولوژیکی گسل سبزوآران تهیه و در شکل ۹ ارائه شده است.

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک، داده‌های سطح آب‌زیرزمینی، پارامترهای کیفی و محتوی ایزوتوپی نمونه‌های آب، رفتار هیدروژنولوژیکی گسل سبزوآران بررسی شده است. مطالعات ژئوفیزیکی نشان‌دهنده جابه‌جایی لایه‌ها و تغییر هندسه آبخوان توسط گسل است. عمق آب‌زیرزمینی، جهت جریان و الگوی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی در دو سمت گسل متفاوت است. ناهنجاری‌هایی در غلظت املاح و محتوی ایزوتوپی آب‌زیرزمینی نیز در اطراف گسل مشاهده می‌شود. این موارد نشان می‌دهد که گسل سبزوآران به صورت یک مانع هیدرولیکی عمل کرده و باعث عدم ارتباط هیدرولیکی آبخوان موجود در حاشیه غربی منطقه مورد مطالعه و آبخوان اصلی دشت جیرفت شده است. آب‌زیرزمینی از طریق گسل سبزوآران به سمت بالا حرکت می‌کند. این آب صعودیافته، کیفیت خوبی نداشته و باعث تخریب کیفیت آب‌زیرزمینی در اطراف گسل می‌شود. آب‌های نفوذی از



شکل ۹- مدل مفهومی رفتار هیدروژئولوژیکی گسل سبزوآران (بدون مقیاس)
Figure 9- Conceptual model of hydrogeological behavior of the Sabzevaran fault (Not to scale)

زون گسلی نیز ضروری است. لزوم توجه به رفتار هیدروژئولوژیکی گسل در مطالعات منابع آب منطقه، تهیه مدل‌های ریاضی جریان و انتقال مواد محلول و تدوین استراتژی‌های مدیریت آبخوان اهمیت بسیار زیادی دارد.

سپاسگزاری

از آقایان احمد نگارستانی و روح‌الله شجاع‌حیدری (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان) جهت تهیه داده‌ها و گزارشات مورد استفاده در این پژوهش سپاسگزاری می‌شود. از دانشگاه جیرفت جهت حمایت مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

محمد فاریابی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر گسل سبزوآران بر سیستم آب‌زیرزمینی دشت جیرفت بررسی شد. برای این کار از داده‌های مختلفی مانند داده‌های ژئوفیزیکی، نوسانات سطح آب‌زیرزمینی، پارامترهای کیفی آب و محتوی ایزوتوپی آب‌زیرزمینی استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعات ژئوالکترونیک نشان داد که گسل سبزوآران باعث جابه‌جایی لایه‌های زیرسطحی و تغییر ضخامت آبخوان شده است. بررسی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای نشان‌دهنده الگوهای متفاوتی از نوسان سطح آب در اطراف گسل است. عمق برخورد به سطح آب‌زیرزمینی، شیب هیدرولیکی و جهت جریان آب‌زیرزمینی نیز در دو سمت گسل متفاوت است. در اثر عملکرد گسل و صعود آب‌های با کیفیت نامناسب از طریق گسل، تغییرات کیفی واضحی در امتداد گسل سبزوآران رخ داده است. بررسی محتوی ایزوتوپی اکسیژن ۱۸، ترتیب و کربن ۱۴ نمونه‌های آب نشان داد که عملکرد گسل باعث ایجاد تفاوت‌هایی در محتوی ایزوتوپی آب‌زیرزمینی شده است. همچنین تغذیه آبخوان از طریق سنگ بستر آن نیز رخ می‌دهد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که رفتار هیدروژئولوژیکی گسل سبزوآران در دشت جیرفت به صورت یک مانع هیدرولیکی است و باعث ایجاد مسیری مشخص برای جریان آب‌زیرزمینی به‌ویژه در حاشیه غربی آبخوان شده است. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر گسل سبزوآران بر آبخوان دشت جیرفت نیاز است تا مطالعات ژئوالکترونیک در زون گسلی در جهت امتداد گسل و عمود بر امتداد آن به صورت بسیار دقیق انجام شود. اندازه‌گیری عمق برخورد به سطح آب و پارامترهای کیفی و ایزوتوپی آب در تعداد بیشتری از چاه‌های اطراف

منابع

- ده‌بزرگی، مریم، و رضایی، محسن (۱۳۹۰). تأثیر گسل‌های فعال کواترنری بر فراوانی منابع آب‌زیرزمینی حوضه مهارلو، زاگرس مرکزی. *کواترنری ایران*، ۱(۴)، ۲۸۱-۲۹۱. doi:10.22034/irqua.2016.701877
- شفیعی بافتی، امیر، جعفری، حمیدرضا، و شاهپسندزاده، مجید (۱۳۸۸). زمین‌ساخت جنباً و برآورد خطر زمین لرزه در منطقه سبزواران. *زمین‌شناسی ژئوتکنیک*، ۵(۳)، ۲۳۰-۲۳۹.
- صیادی شهرکی، عاطفه، صیادی شهرکی، فهیمه، و بختیاری چهل‌چشمه، شقایق (۱۴۰۲). پایش شبکه تراز آب‌زیرزمینی دشت دزفول-اندیمشک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۳۲۶-۳۳۷. doi:10.22098/mmws.2023.12414.1239
- عزیزخانی، فرشید (۱۴۰۰). تأثیر گسل قلعه‌حاتم بر خصوصیات کمی و کیفی آب‌زیرزمینی در آبخوان غرب بروجرد. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- علی‌جانی، فرشاد، ناصری، حمیدرضا، امیرافضلی، میلاد، و شماسی، عبدالوهاب (۱۳۹۷). تأثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی دشت دورود - بروجرد، لرستان. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴(۲)، ۱۶۷-۱۸۱.
- فاریابی، محمد (۱۴۰۰). بررسی تأثیر سیلاب‌های بزرگ رودخانه هلیل‌رود بر تراز آب‌زیرزمینی آبخوان دشت جیرفت. دهمین کنفرانس بین‌المللی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، دانشگاه سندج.
- Earth Science Reviews*, 127, 171-192. doi:10.1016/j.earscirev.2013.09.008
- Bense, V.F., & Person, M. (2006). Faults as conduit barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, 42(05), 1-18. doi:10.1029/2005WR004480
- Chitsazan, M., & Dehghan Manshadi, B. (2021). Role of Mehriz Fault in hydrochemical evolution and groundwater flow of Yazd aquifer, central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 560. doi:10.1007/s12517-020-06395-3
- Clark, I.D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, 322 pages.
- Deh Bozorgi, M., & Rezaei, M. (2016). Quaternary active faults effect on the abundance of underground water resources in Maharlou Basin, Central Zagros. *Quaternary Journal of Iran*, 1(4), 281-291. doi:10.22034/irqua.2016.701877 [In Persian]
- Faryabi, M. (2021). Investigating the effect of extreme floods of Halilroud River on water level of Jiroft plain aquifer. Proceedings of the 10th International Rainwater Catchment Systems Conference, Sanandaj, Iran, Pp. 1-8.
- Faryabi, M. (2023). Delineating the source and mechanism of groundwater salinization in a semi-arid region of southeastern Iran using
- فاریابی، محمد (۱۴۰۲). تعیین منشأ و مکانیزم شوری آب‌زیرزمینی یک منطقه نیمه‌خشک در جنوب شرق ایران با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک و هیدروشیمی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱۱۱-۹۳. doi:10.22098/mmws.2022.11298.1119
- فاریابی، محمد، کلانتری، نصراله، و نگارستانی، احمد (۱۳۸۹). ارزیابی عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب‌زیرزمینی دشت جیرفت با استفاده از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. *علوم زمین*، ۲۰(۷۷)، ۱۱۵-۱۲۰. doi: 10.22071/gsj.2010.55355
- کیانی، طیبه، و یوسفی، زهرا (۱۳۹۶). نقش گسل فعال در سطح تراز آب‌زیرزمینی حوضه شهرچای ارومیه. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۷(۴۷)، ۶۱-۷۵. doi:20.1001.1.22287736.1396.17.47.4.6
- محمدی، محمدکاظم، کریمی، حاجی، و حسینی، علی (۱۴۰۲). بررسی نقش گسل خشک‌رود بر رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت زرننده ساوه. *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، ۱۷(۳۴)، ۱۸۴-۲۰۳. doi: 10.22084/nfag.2023.26975.1534
- مهتاب قدس، (۱۳۶۷). مطالعات آب‌زیرزمینی دشت جیرفت. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران، ایران.
- میرزاوند، محمد، قاسمیه، هدی، ساداتی‌نژاد، سید جواد، و باقری، رحیم (۱۳۹۸). تعیین سن منابع آب زیرزمینی دشت کاشان با استفاده از رادیویزوتوپ های ^3H و ^{14}C . *اکوهیدرولوژی*، ۶(۴)، ۱۱۰۸-۱۰۹۹. doi:10.22059/ije.2020.286642.1178

References

- Abkav-Louis Berger, (1976). Groundwater and agricultural feasibility study Jiroft-Minab project. Abkav-Louis Berger Company, Tehran, Iran.
- Alijani, F., Nasery, H., Amirafzali, M., & Shamasi, A. (2018). Effect of Doroud fault on hydrogeology of Doroud-Boroujerd alluvial aquifer, Lorestan province. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 167-181 [In Persian].
- Arjmand, M.R., Kangi, A., & Hafezi Moghadas, N. (2019). The effect of Tous fault on groundwater resources in northern parts of Mashhad plain. *Iranian Journal of Earth Science*, 11(3), 205-214. doi:10.30495/IJES.2019.667380
- Ashjari, J., Noori, M., Azimi, R., & Nakhaei, M. (2016). Hydrogeological assessment of the Tabarteh fault zone by physicochemical analysis and multivariate statistical methods. *Arabian Journal of Geoscience*, 9, 227. doi:10.1007/s12517-015-2176-x
- Azizkhani, F.(2020). The effect of the Ghale Hatem fault on the quantitative and qualitative characteristics of groundwater in the Borujerd aquifer. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University of Tehran. [In Persian]
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., & Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology.

- geophysical and hydrochemical approaches. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 93-111. doi:10.22098/mmws.2022.11298.1119 [In Persian]
- Faryabi, M., Kalantari, N., & Negarestani, A. (2010). Evaluation of factors influencing groundwater chemical quality in Jiroft plain using statistical and hydrochemical methods. *Journal of Geosciences*, 20(77), 115-120. doi: 10.22071/gsj.2010.55355 [In Persian]
- Kiani, T., & Yousefi, Z. (2017). Effect of active faults in the groundwater level of Shaharchay basin in Urmia. *Journal of Applied Research in Geographical Science*, 17(47), 61-75. doi: 20.1001.1.22287736.1396.17.47.4.6 [In Persian]
- Lapperre, R.E., Bense, V.F., Kasse, C., & T. van Balen, R. (2022). Temporal and spatial variability of cross-fault groundwater-level differences: the impact of fault-induced permeability reduction, precipitation and evapotranspiration. *Hydrogeology Journal*, 30, 1233-1257. doi:10.1007/s10040-022-02465-w
- Mahabghods, (1988). Groundwater studies of Jiroft plain. Mahabghods company, Tehran, Iran. [In Persian]
- Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J., & Bagheri, R. (2019). Groundwater dating using radioisotopes of ^3H and ^{14}C in Kashan Plain aquifer. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(4), 1099-1108. doi:10.22059/ije.2020.286642.1178 [In Persian]
- Mohammadi, M. K., Karimi, H., & Hasani, A. (2023). The role of Khoshkarud fault on hydrogeological behavior of Zarandieh Saveh aquifer. *New Findings in Applied Geology*, 17(34), 184-203. doi:10.22084/nfag.2023.26975.1534 [In Persian]
- Rajabpour, H., Vaezihir, A., & Sedghi, M.H. (2016). The North Tabriz fault, a barrier to groundwater flow in an alluvial aquifer northwest of Tabriz, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 1-13. doi:10.1007/s12665-016-5663-9
- Rashidi, A., Abbasi, M. R., Nilfouroushan, F., Shafiei, S., Derakhshani, R., & Nemat, M. (2020). Morphotectonic and earthquake data analysis of interactional faults in Sabzevaran Area, SE Iran. *Journal of Structural Geology*, 139. doi:10.1016/j.jsg.2020.104147
- Sayadi Shahraki, A., Sayadi Shahraki, F., & Bakhtiari Chahelcheshmeh, S. (2023). Monitoring of groundwater level network of Dezful-Andimeshk plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(1), 326-337. doi:10.22098/mmws.2023.12414.1239 [In Persian]
- Shafei Bafti, A., Jafari, H.R., & Shahpasandzadeh M. (2009). Dynamic tectonics and earthquake hazard estimation in Sabzevaran region. *Geotechnical Geology*, 5(3), 229-238. [In Persian]
- Tamab, (1987). Isotopic study of groundwater resources of Jiroft plain. Iran Water Resource Research Organisation, Tehran, Iran.
- Vreca, P., & Kern, Z. (2020). Use of water isotopes in hydrological processes. *Water*, 12, 2227. doi: 10.3390/w12082227
- Wang, D., Qian, J., & Zhao, W. (2022). Distribution characteristics and processes along flow paths of shallow groundwater in the Tan-Lu fault zone in Anhui province, China. *Geoscience Journal*, 26, 529-543. doi:10.1007/s12303-022-0004-3
- Wannous, M., Jahnke, C., Troeger, U., Falk, M., & Bauer, F. (2021). Hydrochemistry and environmental isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , $^3\text{He}/^4\text{He}$) of groundwater and foodwater in the great area of Hurghada, Eastern Desert of Egypt. *Environmental Earth Science*, 80, 407. doi:10.1007/s12665-021-09487-9
- Wendt, I. (1971). Carbon and oxygen isotope exchange between HCO_3 in saline solution and solid CaCO_3 . *Earth and Planetary Science Letters*, 12(4), 439-442. doi:10.1016/0012-821X(71)90030-6
- Yuan, R., Song, X., Zhang, Y., Han, D., Wang, S., & Tang, C. (2011). Using major ions and stable isotopes to characterize recharge regime of a fault-influenced aquifer in Beiyishui River Watershed, North China Plain. *Journal of Hydrology*, 405, 3-4. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.048