

## Source and Hydrogeochemical Mechanism of Fluoride in Groundwater in Southeast of Khuzestan

H. Mohammadi<sup>1</sup>, N. Kalantari<sup>2\*</sup>, F. Alijani<sup>3</sup>,  
and A. Mehrabinejad<sup>4</sup>

### Abstract

The permissible concentration of fluoride in water can play a crucial role in preventing dental caries and enhancing bone health. However, when fluoride level exceeds the permissible limit, adverse effects can occur such as dental fluorosis, bone demineralization, and potential impacts on children's cognitive development. Consequently, understanding the mechanisms and hydrogeochemical origins of fluoride in groundwater is critical from both environmental and public health perspectives. This study involves sampling from 48 water wells in Behbahan, Ramhormoz, and Zeidon aquifers in southeast of Khuzestan, during two distinct periods: November 2022 and June 2023. Major ions, bromide, and fluoride concentrations were analyzed to assess the hydrogeochemical behavior of fluoride in the studied aquifers. Various parameter composition diagrams of fluoride concentration and spatial distribution maps were constructed to identify patterns. The results reveal that the predominant groundwater type across these plains is calcium-sulfate, with notable variations in fluoride concentrations between Behbahan and Ramhormoz plains. In Behbahan plain, the highest fluoride concentrations are observed in the western region, whereas in Ramhormoz plain, fluoride levels decrease towards northwest, particularly near Aala River. In Zeidon plain, the central region exhibits the highest fluoride concentration. The bromide-to-chloride ratio (Br/Cl) in Behbahan aquifer suggests three distinct sources for the samples, while that of Zeidon plain indicates a marine origin for fluoride. Conversely, no marine source was identified for Ramhormoz plain.

**Keywords:** Fluoride, Hydrogeochemistry, Composition diagrams, Bromide, Aquifers of Southeastern Khuzestan.

Received: October 10, 2024

Accepted: December 18, 2024

## منشأ و سازوکار هیدروژئوشیمیایی فلوراید در آب‌های زیرزمینی جنوب شرق خوزستان

هادی محمدی<sup>۱</sup>، نصراله کلانتری<sup>۲\*</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۳</sup>  
و علی محرابی‌نژاد<sup>۴</sup>

### چکیده

مقدار مجاز فلوراید در آب می‌تواند برای جلوگیری از پوسیدگی دندان‌ها و تقویت استخوان‌ها کمک کند، ولی اگر بیش از حد مجاز باشد، اثر نامطلوبی همچون فلوروزیس دندان، تحلیل استخوان‌ها و تأثیر بر ضریب هوشی کودکان دارد. از این‌رو شناسایی سازوکار و منشأ هیدروژئوشیمی فلوراید در آب زیرزمینی اهمیتی زیادی به لحاظ زیست‌محیطی و تأثیر آن بر سلامت انسان دارد. نمونه‌برداری از چاه‌ها در آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در دو دوره آبان ۱۴۰۱ و خرداد ۱۴۰۲ از ۴۸ حلقه انجام شد و یون‌های عمده، بروماید و فلوراید مورد سنجش قرار گرفته است. به منظور شناسایی رفتار هیدروژئوشیمیایی فلوراید در آبخوان‌های مورد مطالعه، از نمودارهای ترکیبی پارامترهای مختلف در مقابل فلوراید و ترسیم نقشه توزیع مکانی فلوراید استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تیپ عمده آب زیرزمینی در این دشت‌ها، سولفات-کلسیک است و غلظت فلوراید در دشت بهبهان و رامهرمز دارای تفاوت‌هایی قابل ملاحظه‌ای است. در دشت بهبهان، بیشترین غلظت فلوراید در قسمت غربی دشت و در دشت رامهرمز، غلظت فلوراید در شمال غرب و در نزدیکی رودخانه اعلا کاهش می‌یابد و در دشت زیدون نیز بیشترین غلظت در بخش مرکزی است. نسبت بروماید به کلرید (Br/Cl) در آب‌های زیرزمینی دشت بهبهان منجر به شناسایی سه منشأ برای نمونه‌ها شده و در دشت زیدون بیانگر منشأ دریایی فلوراید است، در حالی که در دشت رامهرمز این منشأ وجود ندارد.

**کلمات کلیدی:** فلوراید، هیدروژئوشیمی، نمودارهای ترکیبی، بروماید، آبخوان‌های جنوب شرق خوزستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۷/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۹/۲۸

1- Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor of Hydrogeology, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: [n.kalantari@scu.ac.ir](mailto:n.kalantari@scu.ac.ir)

3- Assistant Professor of Hydrogeology, Department of Mineral and Ground Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4- Remote Sensing Graduate, Khuzestan Water and Power Authority, Ahvaz, Iran.

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.482792.2793](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.482792.2793)

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استادیار هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- دانش‌آموخته سنجش از دور، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۳ امکان‌پذیر است.



## ۱- مقدمه

هرگونه تغییر در ویژگی‌های هوا، آب و مواد غذایی که اثر نامطلوبی بر سلامت محیط‌زیست، فعالیت‌های انسانی و سایر جانداران داشته باشد، به‌عنوان آلودگی شناخته می‌شود (Miller et al., 1975). عوامل ایجاد آلودگی‌ها می‌توانند انسان‌زاد و یا منشأ طبیعی داشته باشند. کیفیت آب‌های زیرزمینی به علت حرکت در بستری از سازندهای زمین-شناسی، به مقدار زیادی از نوع و ترکیب لیتولوژی مسیر جریان متأثر می‌شوند (Daneshian et al., 2021; Anderson et al., 2005). فلئور (F) یکی از عناصری است که می‌تواند از این طریق وارد آب شده و کیفیت آن را تحت تأثیر قرار دهد. فلئور سیزدهمین عنصر فراوان در پوسته زمین و عنصری با بیشترین الکترونگاتیوی و واکنش-پذیری در جدول تناوبی است. به‌صورت فلورین (F) در طبیعت یافت نمی‌شود و تمایل شدیدی برای به دست آوردن بار منفی دارد. عمده-ترین راه جذب فلئور توسط انسان از راه آشامیدن است. طبق استاندارد دفتر آب و خاک سازمان حفاظت محیط‌زیست، حد مجاز یون فلوراید در منابع آبی ایران، ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر است. حد مجاز این یون مطابق استاندارد در ژاپن ۰/۸ بوده و بر اساس استاندارد USEPA چهار میلی‌گرم بر لیتر است. سازمان جهانی بهداشت، مقدار فلئور مناسب در آب آشامیدنی را ۲/۵-۱ میلی‌گرم بر لیتر توصیه می‌کند.

وجود فلوراید در آب به میزان مجاز آن می‌تواند به تقویت مینای دندان و ترمیم آن، جلوگیری از پوسیدگی دندان‌ها، تقویت استخوان و درمان پوکی استخوان کمک شایانی نماید؛ اما مقادیر بیشتر از حد مجاز آثار زیان‌باری را به همراه خواهد داشت؛ فلوروزیس دندانی، آسیب ساختمان دندان است که منجر به تشکیل مینایی با محتوی معدنی پایین و تخلخل بالا خواهد شد. فلوراید یک سم تجمعی است که می‌تواند بر روی رشد و تحلیل استخوان‌ها و همچنین بر روی تنظیم متابولیسم معدنی استخوان نیز اثرگذار باشد. استئواسکلروز، استئومالاسی و استئوپوروز به درجات مختلف و همچنین تشکیل آگزوستوز نشان‌دهنده ضایعات استخوانی ناشی از فلوروزیسمی باشند (Ayoob and Gupta, 2006; Narsimha and Rajitha, 2018; Edmunds and Smedley, 2013). از این‌رو شناسایی سازوکار و منشأ فلوراید در آب زیرزمینی اهمیت زیادی به لحاظ زیست‌محیطی و اثرات آن بر سلامت انسان دارد.

به‌طور کلی، استان‌های بوشهر، خراسان شمالی، آذربایجان غربی، یزد، سمنان، قم، لرستان و چهارمحال و بختیاری، استان‌هایی هستند که

آب زیرزمینی برای شرب حاوی مقادیر زیادتری از غلظت فلوراید در آب آشامیدنی است. میانگین وزنی غلظت فلوراید در آب شرب در ایران از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ حدود  $0.65 \pm 0.38$  میلی‌گرم در لیتر بوده است هر چند مقادیر تا بیش از ۷ میلی‌گرم بر لیتر نیز گزارش شده است (Taghipour et al., 2016). به طور کلی، غلظت فلوراید در بخش‌های جنوبی ایران و در برخی مناطق استان آذربایجان غربی در شمال غربی بالاتر بوده و در بقیه مناطق شمال غربی و مرکزی ایران کمتر است. در منطقه باغ لارستان علائم ابتلای با مشاهده ساکنین به فلوروزیس دندانی، منشأ فلوراید در آب زیرزمینی آزادسازی فلئوردار کانی‌های فلئوردار در خاک و رسوبات منطقه (کانی‌های فلئوردار رسی، میکا و فلئور و آپوفیلیت)، تشخیص داده شد (Aghnyai et al., 2016). نقش مهم سازندهای بازالتی و خاک‌های مرتبط در تغذیه فلوراید به آب‌های ناحیه، انتقال فلوراید از شرق ترکیه (بازالت‌های ناشی از آتشفشان آارات) به عنوان یک منبع مهم تغذیه فلوراید منابع آبی شمال غرب کشور به شمار می‌آید (Abbasnejad et al., 2018). مقادیر بیش‌ازحد مجاز فلوراید در منطقه زرنده استان کرمان خطر ابتلا به بیماری‌های فلوروزیس دندانی و اسکلتی برای ساکنان منطقه افزایش داده است (Derakhshani et al., 2014). محتمل‌ترین منشأ فلوراید در آب زیرزمینی ایران مرکزی، شیل، هوازگی شیمیایی، تبخیر و تبادل یونی، مهم‌ترین فرایندهای تأثیرگذار بر غنی‌شدگی فلوراید هستند (Dehbandi et al., 2018). بروز بیماری‌های فلوروزیس، اسکلتی، مشکلات باروری و تیروئیدی ناشی از وجود ۸۰ درصد چاه‌های آب شرب با غلظت فلوراید بیش از حد مجاز در منطقه لارستان استان فارس گزارش گردیده است (Dehghani et al., 2018). محققین مختلف (Ali et al., 2016, Amini et al., 2008, Dehbandi et al., 2018) منابع طبیعی اصلی فلوراید در خاک را کانی‌هایی مانند آپاتیت، کریولیت، فلئوریت، فلئوراسپار، توپاز (آلومینیوم سیلیکات حاوی F)، فلورمیکا (فلوگوپایت)، اپیدوت، فسفریت، ترمولیت و ویلوانیت (آلومینیوم سیلیکات حاوی F)، بیان نمودند. مقادیر کمی از فلورین در مواد خام می‌توانند فلوراید‌های گازی (HF, SiF<sub>4</sub>) و ذراتی (CaF<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, AlF<sub>3</sub>) تولید کنند که سطوح این یون محیطی را افزایش دهند. تولیدکنندگان آجر، کود آهن‌دار، تولیدکنندگان شیشه، نیروگاه‌های زغال‌سوز و کوره‌های آلومینیوم نیز منابع آلاینده‌ای هستند که بر روی افزایش فلوراید در محیط تأثیرگذار هستند. شکل ۱ تمامی منشأهای ممکن برای فلوراید را در محیط زیرسطحی نشان می‌دهد.

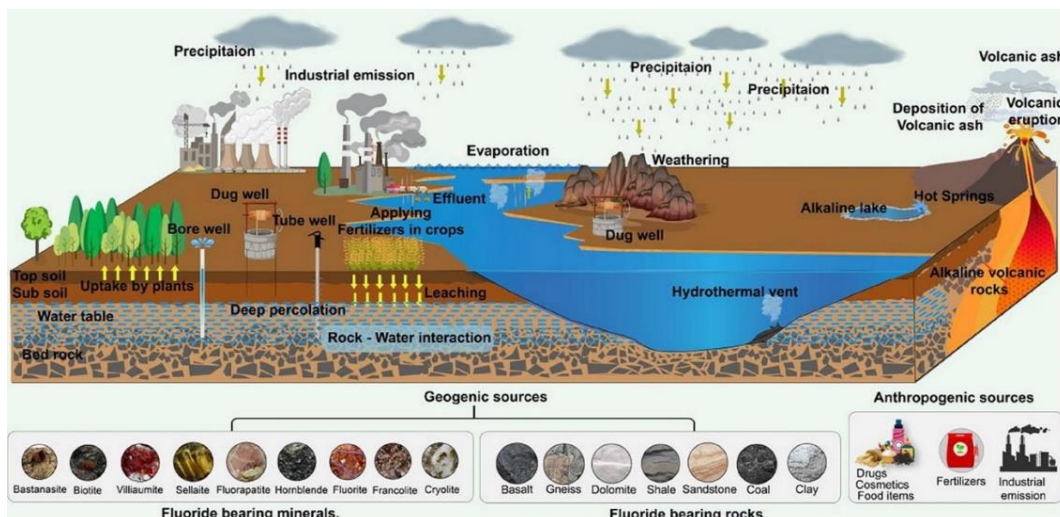


Fig. 1- Different sources of fluoride in groundwater systems (Shaji et al., 2024)

شکل ۱- منشأهای مختلف فلوراید در سیستم‌های آب زیرزمینی (Shaji et al., 2024)

منابع آب زیرزمینی، بررسی میزان فلوراید در این دشت‌ها و شناسایی مناطق احتمالی آلوده به فلوراید و حفظ سلامت انسانی و همچنین تأمین منشأ و سازوکار فلوراید جهت مدیریت و برنامه‌ریزی‌های آینده اهمیت دارد. این مقاله از این دیدگاه که به طور همزمان هیدروژئوشیمی فلوراید در سه دشت اصلی در جنوب شرق خوزستان را با یکدیگر در نظر می‌گیرد حائز اهمیت است. در مطالعات پیشین در ایران عمدتاً به توصیف تغییرات مکانی غلظت فلوراید در یک آبخوان و بدون بررسی ارتباطات هیدروژئوشیمی آن با سایر یون‌ها پرداخته شده است (Sarai et al., 2024; Aghnyai et al., 2016;). در این مقاله سعی شده است از دیدگاه هیدروژئوشیمی منطقه‌ای به ارتباطات فلوراید با غلظت یون‌های دیگر را در سه آبخوان پرداخته شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شامل آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در شرق و جنوب شرق استان خوزستان هستند (شکل ۲). آبخوان بهبهان با مساحت ۴۸۵ کیلومترمربع، در شرق امیدیه و بین طول جغرافیایی ۵۰° ۰۴' تا ۵۰° ۲۴' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۰' تا ۳۰° ۵۱' شمالی واقع است. سنگ کف آبخوان بهبهان دارای تنوع است و از سازندهای بختیاری، آغاچاری و گچساران تشکیل شده است. با توجه به تنوع لیتولوژیکی سازندهای مجاور، نوع رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان نیز متنوع است (شکل ۳). رودخانه مارون نیز بخشی از رسوبات آبرفتی این دشت را تأمین کرده است. رسوبات

در مناطق مختلف دنیا از جمله هندوستان، غنا، چین، ایتالیا، آفریقای جنوبی و مغولستان محققین هیدروژئوشیمی فلوراید در آب‌های زیرزمینی را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Adimalla and Qian, 2019; Hossain and Kumar Patra, 2020; Zango et al., 2021; Fuoco et al., 2021; Liu et al., 2021; Su et al., 2021; Tossou et al., 2021). در این مطالعات وجود فلوراید در آبخوان‌های لاتریتی، گرانیتی-گنایسی، گرانیتوئیدی، سنگ‌های دگرگونی و آبرفت‌ها در اثر انحلال کانی‌های فلورایددار مانند فلوریت و بیوتیت؛ ارتباط معکوس غلظت فلوراید با مقادیر یون‌های کلسیم و منیزیم و ارتباط مستقیم آن با سدیم، بی‌کربنات و pH آب، تبخیر و شوری زیاد؛ تأثیر فرایندهای هوازدگی سیلیکات‌ها و تبادل کاتیونی بر غلظت فلوراید؛ استفاده از ممبران‌های نفوذپذیری انتخابی برای کاهش غلظت فلوراید در آب‌های زیرزمینی؛ و وجود فلوراید کمتر در نواحی از آبخوان با سرعت جریان آب زیرزمینی بیشتر مورد تأکید قرار گرفته است.

استفاده از روش ترکیبی هیدروژئوشیمی یکی از روش‌های مهم در شناسایی منشأ و سازوکار افزایش فلوراید در آب‌های زیرزمینی است. در این مقاله سعی بر آن است تا هیدروژئوشیمی فلوراید در منابع آب زیرزمینی جنوب شرق خوزستان (آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون) در ارتباط با تغییرات مکانی فلوراید در آب‌های زیرزمینی مشخص شود. منشأ و سازوکار غلظت فلوراید در آبخوان‌های مذکور با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمی مشخص شود. همچنین، با استفاده از یافته‌ها، مناطق بحرانی به لحاظ غلظت فلوراید، شناسایی و معرفی شده تا نسبت به استفاده از آب چاه‌های مناطق بحرانی برای شرب تجدیدنظر شود. با توجه به تأمین آب شرب از منابع آب زیرزمینی در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون و احتمال وجود فلوراید در

آبرفتی دشت بهبهان از فرسایش رسوبات تبخیری و کنگلومرای هستند و در حاشیه رودخانه مارون به رسوبات رودخانه‌ای تبدیل می‌شوند. لایه آبرفت سطحی از رسوبات دانه ریز تشکیل شده است که به سمت نواحی غرب و شمال غرب دانه درشت شده است و شامل قلوه‌سنگ، شن و ماسه دانه درشت است. رسوبات آبرفتی جوان، آبرفت‌های رودخانه‌ای و مخروط افکنه‌ای ناشی از فرسایش مکانیکی نیز به علت انفصال و درشتی دانه‌ها، قابلیت هدایت هیدرولیکی بالایی داشته و تشکیل‌دهنده اصلی مخزن آب زیرزمینی دشت بهبهان هستند. آبخوان رامهرمز با مساحتی در حدود ۷۳۹ کیلومترمربع در ۴۵ کیلومتری شرق اهواز واقع شده است. از لحاظ جغرافیایی، این آبخوان بین طول جغرافیایی ۱۱' ۴۹° تا ۴۱' ۴۹° شرقی و عرض جغرافیایی ۰۹' ۳۱° تا ۳۶' ۳۱° شمالی قرار گرفته است. رخنمون سازندهای منطقه شامل گچساران، لهری، میشان و سازند بختیاری است. آبخوان آبرفتی رامهرمز در بخش شمالی تا مرکز به جز در برخی نقاط در شمال که در نزدیکی سازند بختیاری واقع شده است، عمدتاً متشکل از رسوبات ریز دانه سیلت و رسی است، این رسوبات در ناحیه جنوبی با نزدیک شدن به سازند بختیاری درشت دانه شده و عمدتاً از ماسه و کنگلومرا تشکیل شده‌اند. سنگ کف آبخوان رامهرمز در بخش‌های شمال غربی از سازند آغاچاری و در بخش‌های جنوب شرقی از سازند

آبرفتی دشت بهبهان از فرسایش رسوبات تبخیری و کنگلومرای هستند و در حاشیه رودخانه مارون به رسوبات رودخانه‌ای تبدیل می‌شوند. لایه آبرفت سطحی از رسوبات دانه ریز تشکیل شده است که به سمت نواحی غرب و شمال غرب دانه درشت شده است و شامل قلوه‌سنگ، شن و ماسه دانه درشت است. رسوبات آبرفتی جوان، آبرفت‌های رودخانه‌ای و مخروط افکنه‌ای ناشی از فرسایش مکانیکی نیز به علت انفصال و درشتی دانه‌ها، قابلیت هدایت هیدرولیکی بالایی داشته و تشکیل‌دهنده اصلی مخزن آب زیرزمینی دشت بهبهان هستند. آبخوان رامهرمز با مساحتی در حدود ۷۳۹ کیلومترمربع در ۴۵ کیلومتری شرق اهواز واقع شده است. از لحاظ جغرافیایی، این آبخوان بین طول جغرافیایی ۱۱' ۴۹° تا ۴۱' ۴۹° شرقی و عرض جغرافیایی ۰۹' ۳۱° تا ۳۶' ۳۱° شمالی قرار گرفته است. رخنمون سازندهای منطقه شامل گچساران، لهری، میشان و سازند بختیاری است. آبخوان آبرفتی رامهرمز در بخش شمالی تا مرکز به جز در برخی نقاط در شمال که در نزدیکی سازند بختیاری واقع شده است، عمدتاً متشکل از رسوبات ریز دانه سیلت و رسی است، این رسوبات در ناحیه جنوبی با نزدیک شدن به سازند بختیاری درشت دانه شده و عمدتاً از ماسه و کنگلومرا تشکیل شده‌اند. سنگ کف آبخوان رامهرمز در بخش‌های شمال غربی از سازند آغاچاری و در بخش‌های جنوب شرقی از سازند

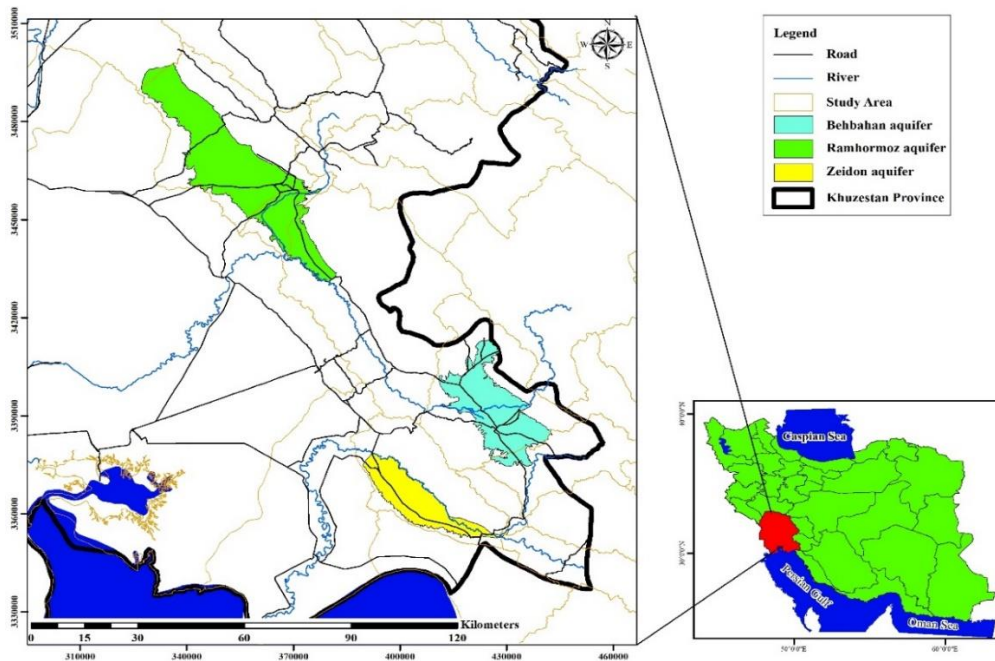


Fig. 2- Location of the studied aquifers in southeast of Khuzestan Province

شکل ۲- نقشه موقعیت آبخوان‌های مورد مطالعه در جنوب شرق خوزستان

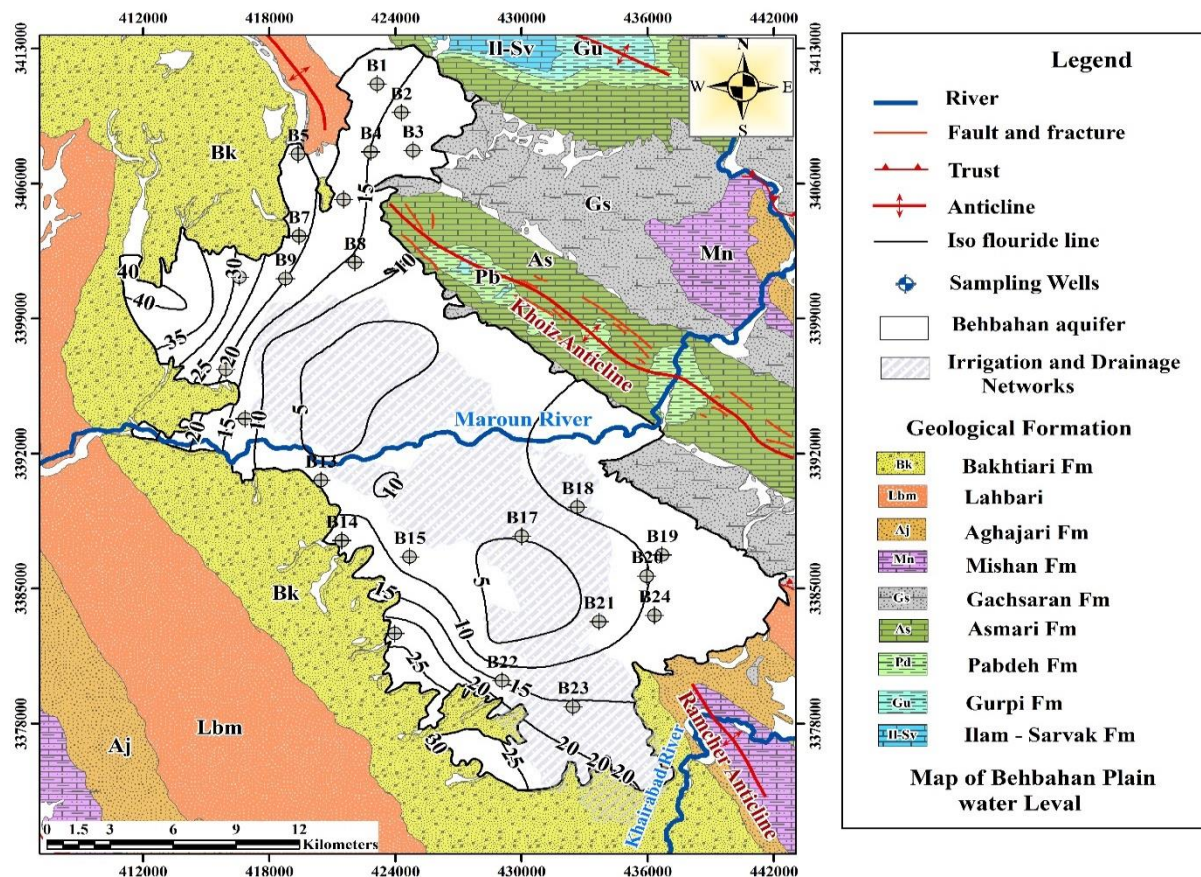


Fig. 3- Map of underground water level for Behbahan Plain (October 2022) and the hydrochemical sampling points

شکل ۳- نقشه هم تراز سطح آب زیرزمینی دشت بهبهان (مهرماه سال ۱۴۰۱) و نقاط نمونه برداری هیدروشیمی

## ۲-۲- جمع آوری داده

به منظور به بررسی و تعیین منشأ فلوراید و ارتباط آن با پارامترهای هیدروشیمی در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون استان خوزستان، از منابع آب زیرزمینی (چاه) و آب سطحی (رودخانه) در طی دو دوره (آبان ۱۴۰۱ و خرداد ۱۴۰۲) نمونه برداری صورت گرفته است. ایستگاه‌های نمونه برداری با توجه به توزیع مکانی چاه‌های بهره برداری در دشت‌های مذکور، به نحوی انتخاب شدند که بهترین پراکنش را در سطح دشت داشته باشند. سنجش نمونه‌های آب از طریق سنجش‌های صحرائی (اندازه‌گیری پارامترهای دما، هدایت الکتریکی و pH) و آزمایشگاهی هیدروشیمی یون‌های عمده، بروماید، فلوراید و ید در آزمایشگاه زاگرس آب شناس شیراز انجام شده است. در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون به ترتیب ۲۴، ۱۲ و ۱۲ حلقه چاه در دو فصل نمونه برداری شدند (شکل‌های ۳ تا ۵).

## ۳-۲- روش شناسی

پس از صحت‌سنجی داده‌های هیدروشیمیایی، از نمودار پایپر جهت تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی و توصیف تفاوت‌ها در ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی محدوده مورد مطالعه توسط نرم‌افزار AqQA استفاده شد. پس از توصیف هیدروشیمی آبخوان‌های مورد مطالعه، توزیع مکانی غلظت فلوراید آب زیرزمینی در دشت‌ها تهیه شده است. نقشه‌های هیدروشیمیایی به منظور شناسایی ناهنجاری نمونه‌ها جهت تعیین روندهای شیمیایی<sup>۱</sup> استفاده می‌شوند. درون‌یابی نقاط به روش Kriging در نرم‌افزار Surfer انجام شده و خروجی نقشه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده است. در محیط آب زیرزمینی نمودارهای ترکیبی<sup>۲</sup> به منظور فهم سیستم هیدروشیمی و شناخت فرایندهای فعال استفاده می‌شود. تغییرات ژئوشیمیایی در غلظت‌های یونی آب زیرزمینی هنگامی که در مختصات کارترین ترسیم شود، می‌تواند تشخیص داده شود (Güler et al., 2002). یکی از روش‌های تفسیر فرآیندهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، تعیین رابطه

تبادل یونی و یا اختلاط قرار گرفته باشد. بر این اساس نمودارهای ترکیبی همیشه باید با در نظر گرفتن سیستم هیدروشیمی و هیدرودینامیک آبخوان تفسیر شود. به منظور شناسایی رفتار هیدروژئوشیمیایی فلوراید در آبخوان‌های مورد مطالعه نمودارهای ترکیبی پارامترهای مختلف در مقابل فلوراید تهیه و مورد تفسیر قرار گرفته است.

بین پارامترهای نمونه‌های آب از طریق رسم آن‌ها بر روی نمودارهای دو متغیره است که به نمودارهای ترکیبی معروف هستند. با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را تعیین کرد. در این نمودارها موقعیت نقاط داده با نوع آب زیرزمینی مرتبط است و موقعیت نمونه‌هایی که از مابقی نمونه‌ها جدا هستند، می‌تواند تحت تأثیر فرایندهای مختلفی از قبیل

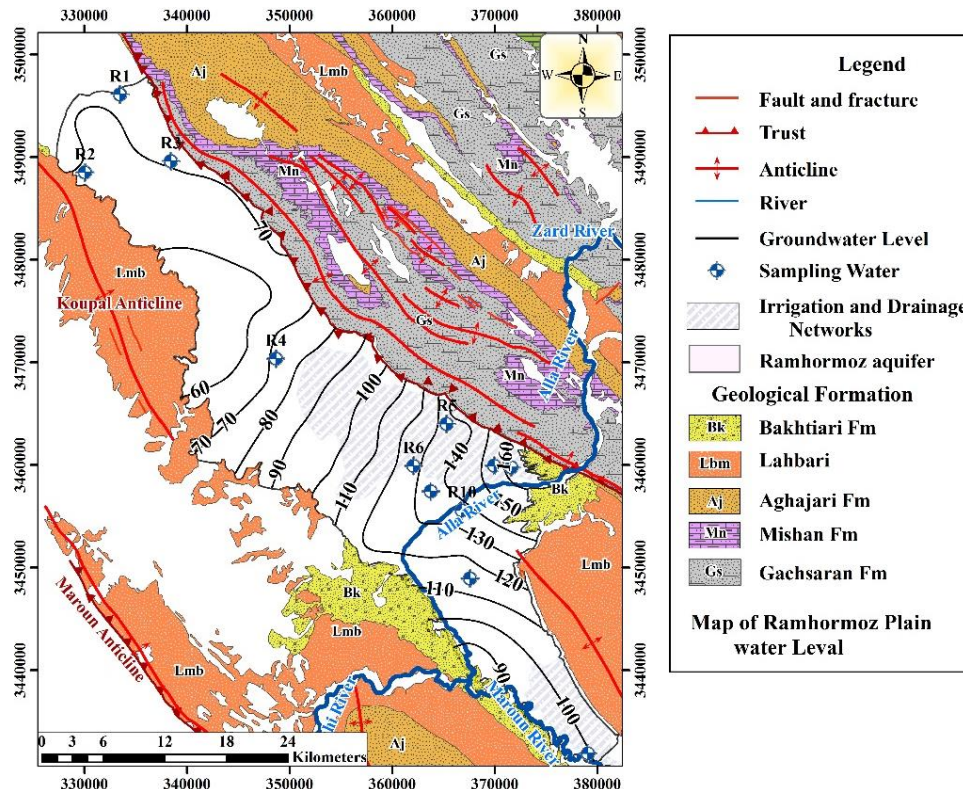


Fig. 4- Map of underground water level for Ramhormoz Plain (October 2022) and the hydrochemical sampling points

شکل ۴- نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی دشت رامهرمز (مهرماه سال ۱۴۰۱) و نقاط نمونه‌برداری هیدروشیمی

شمال غربی دشت تیپ آب زیرزمینی بی‌کربناته- کلسیک است که ناشی از نزدیکی به منطقه تغذیه دشت و همچنین رخنمون سازند کنگلومرای بختیاری است. تیپ آب‌های B9, B7, B6 نیز دارای تیپ کلروره- سدیک هستند که علت آن احتمالاً عمق کم آب زیرزمینی و پدیده مداوم تبخیر است. تیپ غالب آب در دشت رامهرمز نیز همانند دشت بهبهان سولفات-کلسیک است که متأثر از سازند گچساران در قسمت شرق و شمال شرقی دشت است. نمونه‌های R2 در قسمت شمال غربی و R12 در قسمت جنوبی دشت و نزدیک رودخانه مارون دارای تیپ سولفات- سدیک است که متأثر از سازند گچساران و به احتمال وجود شبکه آبیاری در منطقه است. تیپ غالب آب در دشت زیدون کلروره- کلسیک بوده که می‌تواند در رابطه با

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

نمودار پایبر نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان‌های جنوب شرق خوزستان در دوره خشک آبان سال ۱۴۰۱ در شکل ۶ ارائه شده است. در این پژوهش آبان ماه به‌عنوان دوره خشک و خردادماه به‌عنوان دوره مرطوب در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در استان خوزستان اکثر بارشها از دی‌ماه شروع شده است و تا فروردین ادامه دارد و فاصله بین بارش تا نفوذ آب سطحی به درون آبخوان، ماه خرداد به‌عنوان دوره مرطوب در نظر گرفته شده است. تیپ عمده آب زیرزمینی در دشت بهبهان سولفات- کلسیک است که به دلیل سازند گچساران و رسوبات حاصل از فرسایش آن در منطقه مورد مطالعه است که نقش زیادی در تشکیل آبرفت دشت بهبهان داشته است. البته در قسمت

دشت واقع شده و انحلال سازند گچساران در افزایش سولفات منطقه و انحلال سازند بختیاری و گچساران در افزایش کلسیم منطقه دخالت دارد. در دوره مرطوب با اندکی اختلاف به واسطه رخداد ترقیق و تغذیه از بارش، تیپ و رخساره نمونه‌های آب در دشت‌های مورد مطالعه از روند دوره خشک تبعیت می‌نماید.

رخداد تبادل کاتیونی به واسطه منابع تغذیه مختلف و به ویژه رودخانه زهره باشد. این رخساره در ارتباط با انحلال کانی‌های تبخیری موجود در سازند گچساران و میان لایه‌های سازند آغاچاری است. تیپ سولفات-کلسیک که در نمونه Z11 مشاهده می‌شود در حاشیه سازند بختیاری و نزدیک رودخانه واقع شده است. این نمونه در منطقه تغذیه

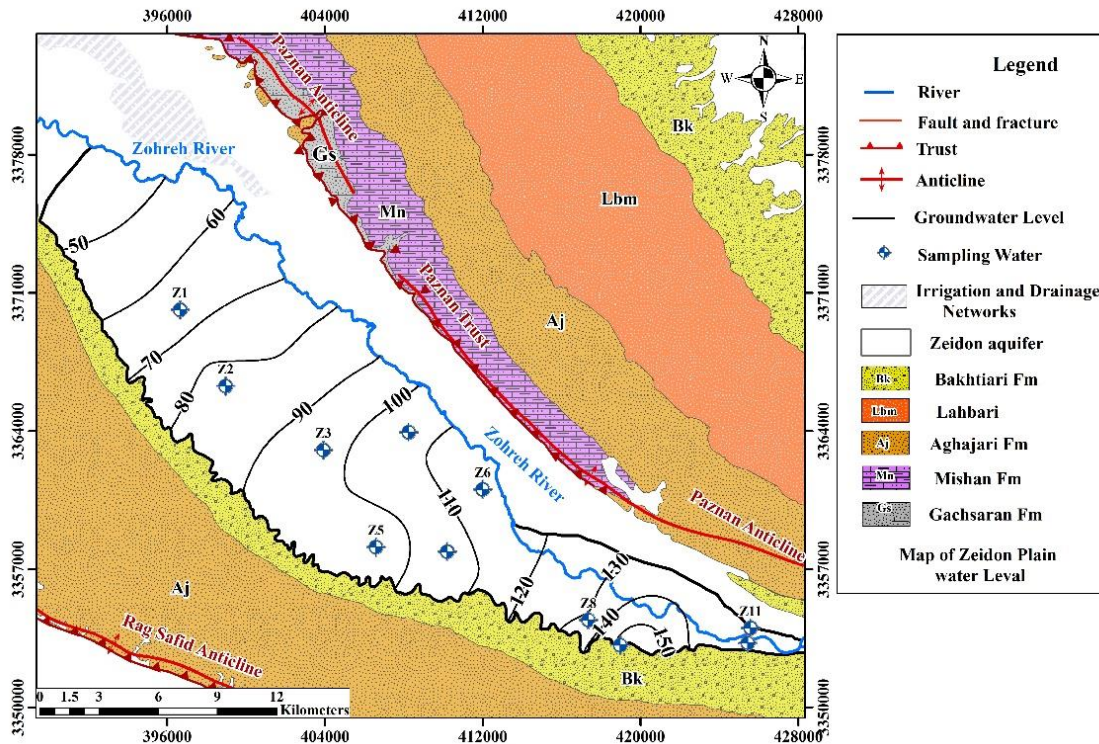
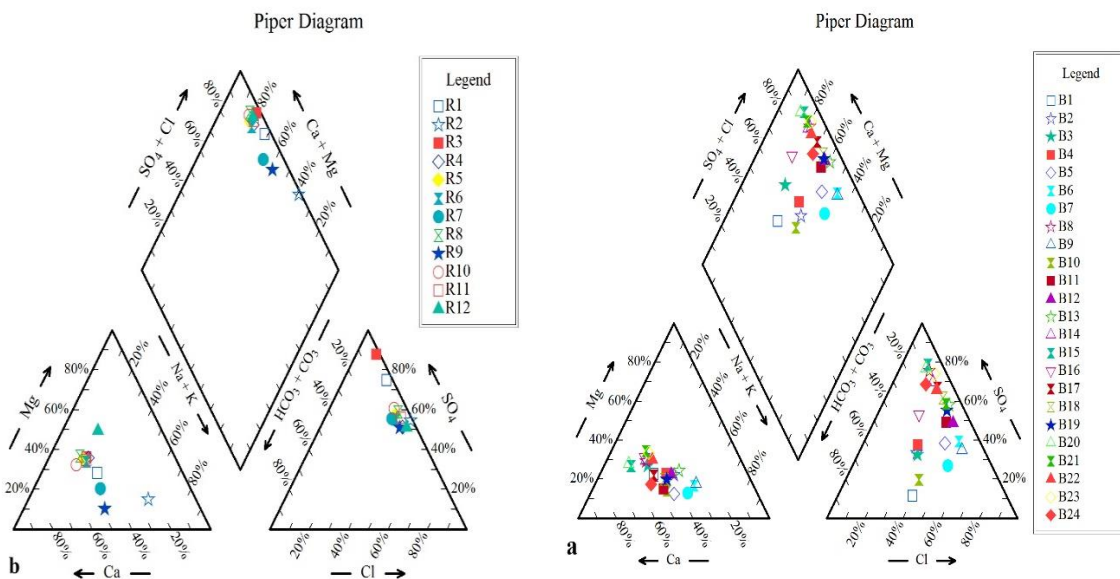


Fig. 5- Map of Groundwater water level for Zeidon Plain (October 2022) and the hydrochemical sampling points

شکل ۵- نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی دشت زیدون (مهرماه سال ۱۴۰۱) و نقاط نمونه‌برداری هیدروشیمی



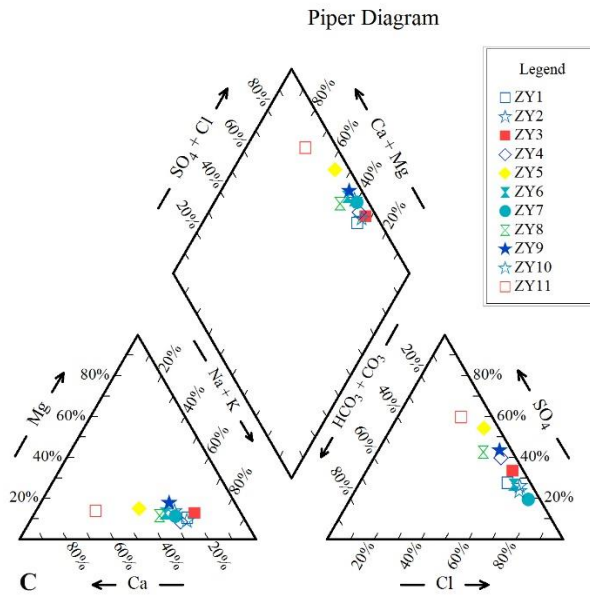


Fig. 6- Piper diagram of water samples from plains in southeast of Khuzestan, a) Behbahan, b) Ramhormoz, and c) Zidon in November 2022

شکل ۶- نمودار پایپر نمونه‌های آب دشت‌های جنوب شرق خوزستان، الف) بهبهان، ب) رامهرمز، ج) زیدون در آبان ۱۴۰۱

گچساران و بخش لهری در منطقه مورد مطالعه است. بیشترین و کمترین میزان غلظت این عنصر در آبان ماه ۱۴۰۱ با ۴/۶ و ۰/۷۸ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه آب R2 (واقع در بخش شمال غربی دشت) و R4 (واقع در قسمت مرکزی دشت) وجود دارد. در خردادماه ۱۴۰۲ نیز بیشترین و کمترین غلظت این عنصر با ۴/۴ و ۰/۵۷ میلی‌گرم در لیتر در نمونه آب‌های R2 و R10 (واقع در بخش غربی دشت) وجود دارد. بیشترین میزان غلظت فلوراید در بخش مرکزی دشت زیدون مشاهده می‌شود (شکل ۹) و در بخش جنوب شرقی دشت نزدیک به رودخانه زهره میزان این یون کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین میزان غلظت این عنصر در آبان ماه ۱۴۰۱ با ۱/۸ و ۰/۳۰ میلی‌گرم در لیتر در نمونه آب Z3 (واقع در مرکز دشت) و Z11 (واقع در بخش جنوب شرقی دشت) وجود دارد. در خرداد ماه ۱۴۰۲ بیشترین و کمترین غلظت این عنصر با ۲/۱، ۱/۹ و ۰/۵۷ در نمونه آب‌های Z10، Z11 و Z2 وجود دارد.

هیدروژئوشیمی فلوراید در آبخوان‌ها به مطالعه رفتار فلوراید در ارتباط با سایر یون‌ها در آب‌های زیرزمینی، بررسی همبستگی غلظت و توزیع فلوراید با سایر یون‌ها در آب زیرزمینی و محیط آبخوان، اثرات زیست‌محیطی فلوراید، فرآیندهای حذف و کنترل متغیرهای زمین‌شناسی و زیست‌محیطی بر غلظت فلوراید می‌پردازد. هیدروژئوشیمی فلوراید به مطالعه و بررسی فرآیندهای شیمیایی از جمله تبادل یونی، حذف، انحلال و رسوب‌گذاری و به‌طور کلی شرایط

توزیع و حرکت فلوراید در زون خاک و آب زیرزمینی پیچیده است. نقشه‌های هم‌مقدار فلوراید در دشت‌های بهبهان رامهرمز و زیدون در دو دوره نمونه‌برداری به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. بیشترین میزان غلظت فلوراید در دشت بهبهان در قسمت غربی دشت و در محل تخلیه آب زیرزمینی دشت مشاهده می‌شود و تا حدودی با میزان کلرید همخوانی دارد. در قسمت جنوب غربی دشت واقع در شبکه آبیاری زهکشی بنه باشت نیز میزان این یون بالا است. بیشترین غلظت فلوراید در آبان ۱۴۰۱ با ۲/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر مربوط به نمونه آب B12 (واقع در بخش غربی دشت) و کمترین میزان آن با ۰/۴۷ میلی‌گرم در لیتر متعلق به نمونه آب B10 است. در نمونه‌های خرداد ماه ۱۴۰۲ نیز بیشترین و کمترین میزان غلظت فلوراید به ترتیب با ۲/۰۶ و ۰/۳۸ میلی‌گرم بر لیتر مربوط به نمونه‌های آب B10 و B18 است. نمونه‌های چاه‌های آب شرب در دشت بهبهان همگی دارای میزان فلوراید کمتر از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر و در حد استاندارد هستند و نمونه‌های که دارای میزان فلوراید بیش از ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر هستند جهت مصارف کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشترین میزان غلظت فلوراید در بخش شمال غربی دشت رامهرمز رخ می‌دهد (شکل ۸) و در بخش‌های جنوبی و شرقی دشت نزدیک به رودخانه اعلا میزان این یون کاهش می‌یابد. غلظت فلوراید با هدایت الکتریکی و همچنین کلرید و سولفات منطبق است. دلیل این موضوع به احتمال زیاد واکنش آب و سنگ و نهشته‌های حاوی فرسایش سازند

فیزیکوشیمیایی سیستم در ارتباط با فلوراید می‌پردازد. به‌منظور بررسی منشأ یون فلوراید در آب زیرزمینی دشت‌های بهبهان، زیدون و رامهرمز نمودارهای ترکیبی فلوراید در مقابل پارامترهای هیدروشیمیایی (Ca, Mg, Na, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, Br, Br/Cl) ترسیم شده است که شکل ۱۰ ارائه می‌شود.

فیزیکوشیمیایی سیستم در ارتباط با فلوراید می‌پردازد. به‌منظور بررسی منشأ یون فلوراید در آب زیرزمینی دشت‌های بهبهان، زیدون و رامهرمز نمودارهای ترکیبی فلوراید در مقابل پارامترهای هیدروشیمیایی (Ca, Mg, Na, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, Br, Br/Cl) ترسیم شده است که شکل ۱۰ ارائه می‌شود.

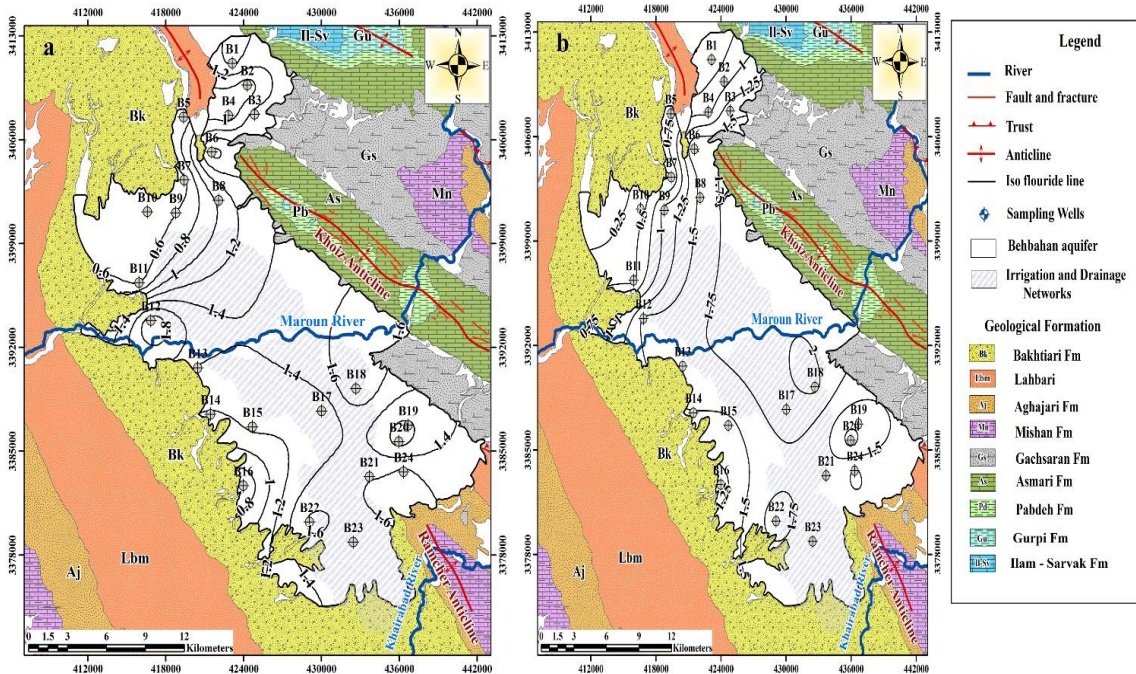


Fig. 7- The map of fluoride values in Behbahan Plain for a) November 2022 and b) June 2023  
شکل ۷- نقشه هم‌مقدار فلوراید دشت بهبهان: الف) آبان ۱۴۰۱ و ب) خرداد ۱۴۰۲

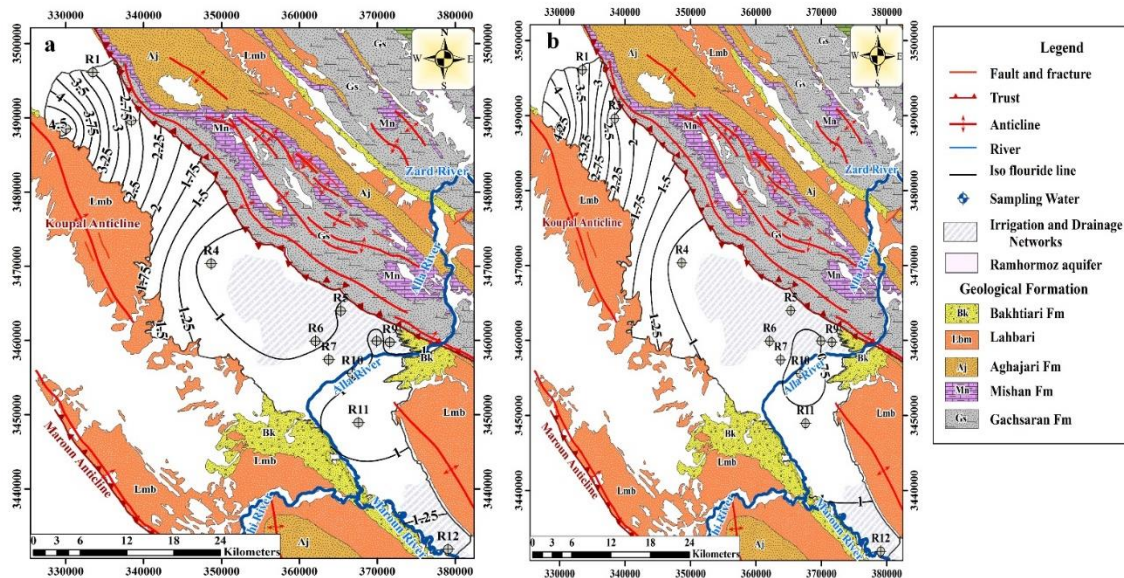


Fig. 8- The map of fluoride values in Ramhormoz Plain for a) November 2022 and b) June 2023  
شکل ۸- نقشه هم‌مقدار فلوراید دشت رامهرمز: الف) آبان ۱۴۰۱ و ب) خرداد ۱۴۰۲

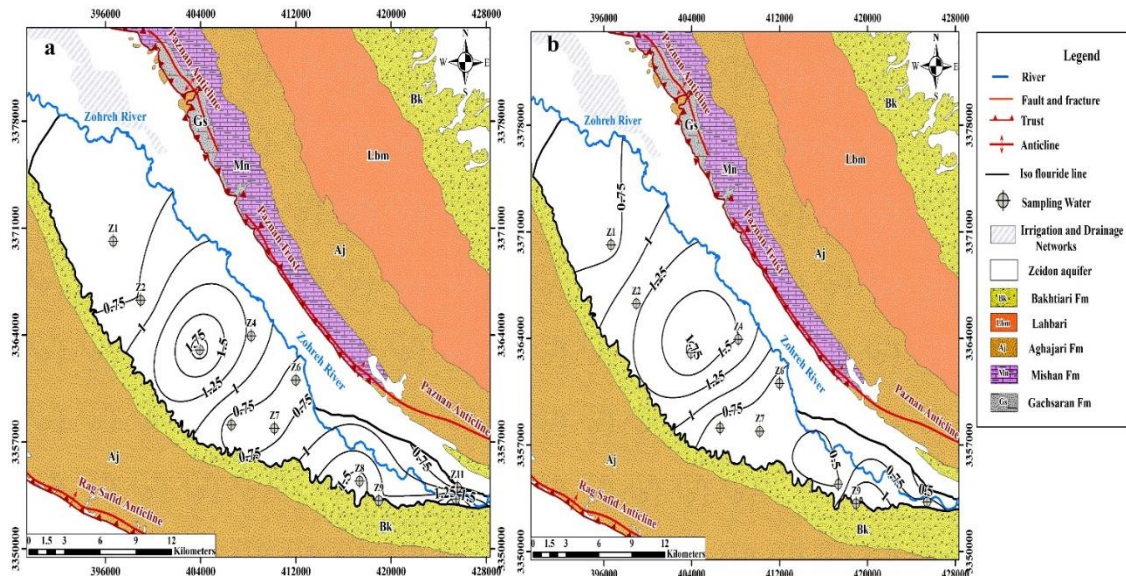


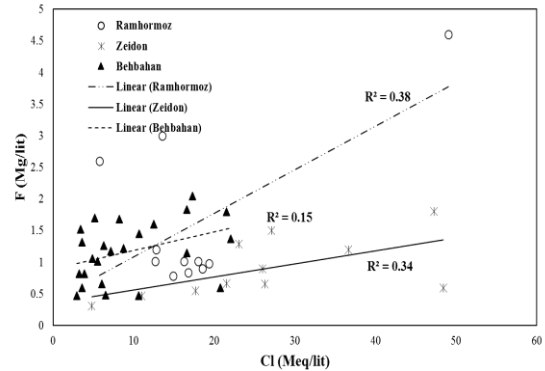
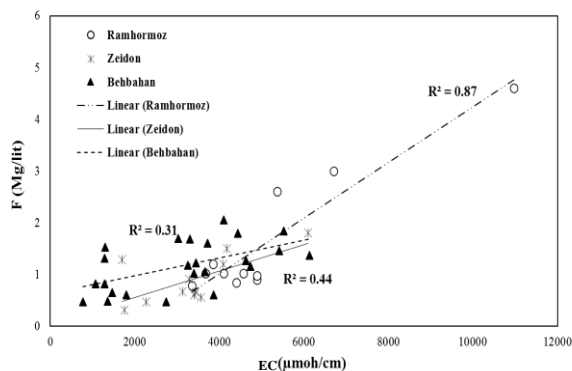
Fig. 9- The map of fluoride values in Zeidon Plain for a) November 2022 and b) June 2023

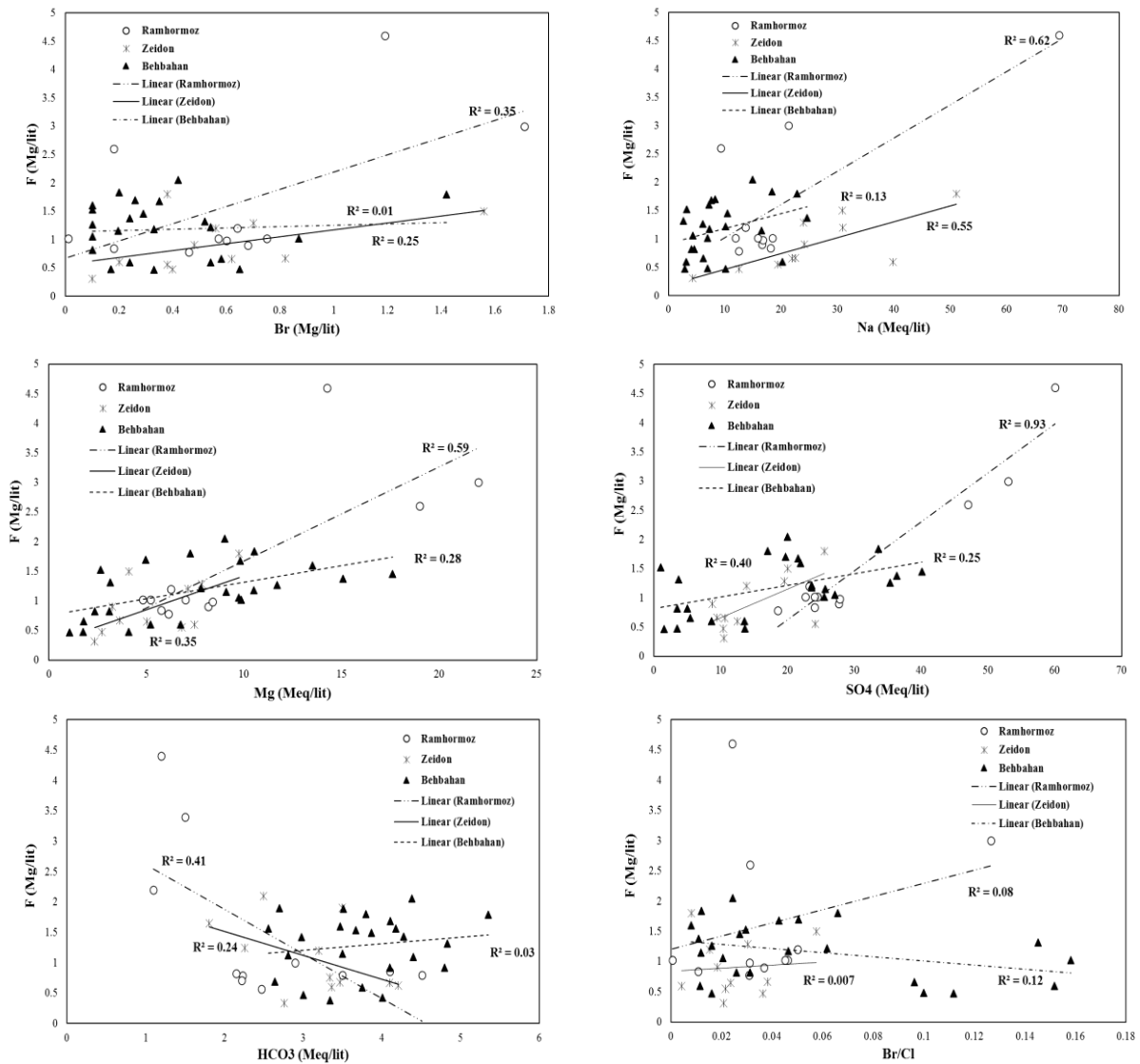
شکل ۹- نقشه هم‌مقدار فلوراید دشت زیدون: الف) آبان ۱۴۰۱ و ب) خرداد ۱۴۰۲

دشت زیدون غلظت فلوراید نمونه‌ها با هدایت الکتریکی کمتر از ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر ارتباط معنی‌داری نشان نمی‌دهد ولی از این میزان شوری بیشتر، غلظت فلوراید به طور خطی از ۰.۵ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر (منطبق با هدایت الکتریکی ۶۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) افزایش می‌یابد.

فلوراید نمونه‌های آب زیرزمینی دشت بهبهان با کلرید به عنوان یون پایستار هیدروژن‌شیمی آب زیرزمینی رابطه خطی با همبستگی متوسط و مثبت نشان می‌دهند که می‌تواند انطباق انحلال‌هالیت با انحلال کانی‌های منشأ فلوراید را نشان دهد. در دشت رامهرمز به جز سه نمونه رابطه کاملاً خطی نشان می‌دهند، بقیه نمونه‌ها کلاً ارتباطی بین کلرید با فلوراید نشان نمی‌دهند. این حالت در نمونه‌های دشت زیدون هم مشخص است، بر این اساس عملاً می‌توان نتیجه گرفت که در دشت‌های مورد مطالعه تکامل هیدروژن‌شیمی منطبق بر انحلال‌هالیت تأثیری در فرآیندهای منشأ فلوراید ندارد.

غلظت فلوراید در نمونه‌های آب زیرزمینی مورد مطالعه تا مقادیر هدایت الکتریکی حدود ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر (حد انتهای حد تعادلی انحلال ژپیس) نسبتاً ثابت است (شکل ۱۰). هر چند دو نمونه در آبخوان بهبهان با مقدار هدایت الکتریکی کمتر از ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، دارای غلظت فلوراید حدود ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر هستند. به هر حال روند خطی افزایش فلوراید با تکامل هیدروژن‌شیمی در آبخوان‌ها را می‌توان به صورت تقریباً خطی در نمونه آب‌های با شوری زیاد دشت رامهرمز مشاهده نمود، به طوری که شورت‌ترین نمونه آب با هدایت الکتریکی حدود ۱۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، غلظت فلوراید بیش از ۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر دارد. در دشت رامهرمز غلظت فلوراید عمده نمونه‌ها دارای غلظت فلوراید کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر هستند. در دشت بهبهان به جز چند نمونه، عمده نمونه‌های با هدایت الکتریکی بین ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارای فلوراید با غلظت ۱/۵ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر هستند. در





**Fig. 10- Composition diagrams of fluoride concentration and hydrochemical parameters for plains in southeast of Khuzestan Province in June 2023**

شکل ۱۰- نمودارهای ترکیبی غلظت فلوراید در مقابل پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت های جنوب شرق خوزستان در خرداد ۱۴۰۲

باعث افزایش غلظت فلوراید در آبخوان شده است. با این حال در دشت رامهرمز به جر نمونه‌های حاوی آب شور در شمال دشت، ارتباط معنی‌داری بین غلظت فلوراید و منیزیم دیده نمی‌شود. چهار نمونه با غلظت بروماید بیش از ۱ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت‌های فلوراید بیش از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهند، به طوری که نمونه با حداکثر غلظت فلوراید در دشت رامهرمز دارای چهارمین ترتیب کاهش غلظت بروماید در بین همه نمونه‌ها است. با توجه دشت‌های مورد مطالعه که تحت تأثیر فرآیند غالب انحلالی ژئیس (ناشی از سازند گچساران و رسوبات فرسایش یافته آن در آبرفت‌ها) هستند، بر این اساس غلظت

در نمودار غلظت سدیم در مقابل فلوراید نیز در این نتیجه با عدم ارتباط غلظت فلوراید با دیگر هالوژن یعنی بروماید نیز مشخص است. با این حال اختلاف غلظت تعادلی سدیم و کلرید تا حدودی با افزایش فلوراید همراه شده است که می‌تواند مبین آزادسازی فلوراید در طی عدم موازنه بار در حین فرآیند تبادل یونی سدیم با کلسیم و منیزیم بین آب زیرزمینی و رس‌ها به ویژه در محدوده رامهرمز و تا حدودی در نمونه‌های حاشیه شرقی زیدون است. در دشت بهبهان روند خطی افزایش فلوراید با منیزیم می‌تواند در ارتباط با فرآیندهای واکنش آب / سنگ با تأکید بر رخداد دلدومیتیزیشن باشد. این فرآیند در آبخوان زیدون نیز

را تا حدی نشان دهد. هر چند در نتایج مطالعه Zhang et al. (2024) در یک دلتا ساحلی در شمال چین نشان داد که غلظت فلوراید آب‌های زیرزمینی به وسیله انحلال و رسوب‌گذاری کانایی کنترل می‌شود و رسوخ آب دریا و تبخیر، اثر کمی بر روی غلظت فلوراید در آب زیرزمینی کم‌عمق دارند که این بر خلاف یافته Su et al. (2023) است که اتفاقاً عمق کم آب زیرزمینی و رخداد تبخیر را در افزایش غلظت فلوراید موثر دانسته است. در دشت رامهرمز با تغییر نسبت Br/Cl تا 0.13 تا 0.08 غلظت فلوراید تغییرات خاصی را نشان نمی‌دهد و حدود 1 میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. از بین سه نمونه شورابه رامهرمز با غلظت فلوراید بیش از 2/5 میلی‌گرم بر لیتر، نمونه‌های با نسبت Br/Cl کمتر از 0.05 بیانگر عدم ارتباط منشأ دریایی در افزایش شوری و غلظت فلوراید این نمونه‌ها است، درحالی‌که نمونه با نسبت  $Br/Cl=0.13$  مقدار فلوراید حدود 3 میلی‌گرم در لیتر دارد. با توجه به بررسی نمودارهای ترکیبی، ضرایب همبستگی یون فلوراید با پارامترهای هیدروشیمیایی دشت‌های مورد مطالعه محاسبه و در جدول 1 ارائه شده است. بیشترین همبستگی پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت رامهرمز مشاهده می‌شود. همبستگی یون سولفات با فلوراید در دشت رامهرمز با ضریب 0.96، خیلی خوب بوده و در دشت‌های زیدون و بهبهان با ضریب 0.63 و 0.50 در محدوده متوسط هستند. پس از یون سولفات، یون سدیم و منیزیم بهترین همبستگی با یون فلوراید در دشت‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند. در دشت رامهرمز این همبستگی خوب بوده و ضریب آن‌ها به ترتیب برابر با 0.79 و 0.77 است و در دشت زیدون 0.74 و 0.59 بوده و در دشت بهبهان 0.36 و 0.53 و دارای همبستگی متوسط هستند. کمترین همبستگی با یون فلوراید در دشت رامهرمز مربوط به بی‌کربنات با 0.77- بوده و در دشت‌های زیدون و بهبهان نسبت یون بروماید به کلرید ضعیف‌ترین همبستگی با یون فلوراید دارند.

**Table 1- Correlation coefficient of fluoride ion with hydrochemical parameters in Ramhormoz, Zeidon and Behbahan plains**

**جدول ۱- ضریب همبستگی یون فلوراید با پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت‌های رامهرمز، زیدون و بهبهان**

Parameter	Ramhormoz	Zeidon	Behbahan
Br	0.59	0.50	0.08
Ec	0.93	0.70	0.56
Mg	0.77	0.59	0.53
Na	0.79	0.74	0.36
HCO <sub>3</sub>	-0.77	0.29	0.34
SO <sub>4</sub>	0.96	0.63	0.50
Cl	0.61	0.59	0.38
Br/Cl	0.29	0.08	-0.34

سولفات، شاخص هیدروژئوشیمی مناسبی در شناسایی سازوکارهای غلظت فلوراید است. بر خلاف این یافته، Lee et al. (2023) انحلال ژپیس و رسوبگذاری کلسیت را به عنوان یکی از سازوکارهای حذف فلوراید به صورت  $CaF_2$  از آب زیرزمینی بیان نمودند.

در دشت بهبهان عملاً می‌توان سه گروه آب‌ها را در نمودار سولفات-فلوراید تشخیص داد. گروه اول عمدتاً شامل نمونه‌های واقع در قسمت شرقی دشت و تحت تأثیر شبکه آبیاری و زهکشی با غلظت سولفات کمتر از 10 میلی‌اکی والان بر لیتر است که غلظت فلوراید کمتر از 1 میلی‌گرم بر لیتر دارند و احتمالاً تحت تأثیر رقیق‌شدگی، کاهش غلظت فلوراید پیدا کرده‌اند. گروه دوم در غلظت سولفات بین 20 تا 30 میلی‌اکی والان بر لیتر همبستگی شدیداً منفی با غلظت فلوراید نشان می‌دهند که بیانگر عدم تأثیر انحلال ژپیس بر روی غلظت فلوراید در این نمونه‌ها است. نمونه‌های با غلظت سولفات بیش از 35 میلی‌اکی والان بر لیتر در دشت بهبهان، غلظت فلوراید بیش از 1/5 میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهند. بر حسب انتظار با توجه به اهمیت کم غلظت انحلال کانی‌های آهکی در تکوین هیدروژئوشیمی آبخوان‌های مورد مطالعه، غلظت فلوراید همبستگی با بی‌کربنات نشان نمی‌دهد که این بخصوص در سه نمونه با شوری زیاد در دشت رامهرمز که حداقل مقادیر بی‌کربنات و حداکثر مقادیر فلوراید را دارند، تایید شده است. با این حال Lone et al. (2024) در مطالعه‌ای بر روی آب‌های زیرزمینی حاوی فلوراید زیاد در اقلیم کاملاً مرطوب حوضه هند شمالی در پای هیمالیا، بیان نمودند که آب‌های زیرزمینی با pH، بی‌کربنات و سدیم زیاد و کلسیم کم، افزایش غلظت فلوراید در آب‌های زیرزمینی را باعث شده‌اند. برخلاف نظر Lone et al. (2024)، در مطالعه‌ای که در منطقه نیمه‌خشک شمال چین انجام شد Su et al. (2023) بیان می‌نمایند که آب‌های با قلیابیت و pH کم، تبادل کاتیونی Ca-Na و تبخیر با غنی‌شدگی فلوراید در آب‌های زیرزمینی همراه هستند. این مشخص می‌سازد که بسته به شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی غالب و هیدروژئولوژی غالب در هر منطقه احتمالاً نتیجه متفاوتی در ارتباط با رفتار فلوراید می‌تواند به دست آید که این یافته توسط Shahji et al. (2024) نیز تأیید شده است.

نسبت بروماید به کلرید به‌عنوان یکی از نسبت‌های مهم تفکیک منشأ فلوراید در نمونه‌های آب زیرزمینی مورد مطالعه، سه گروه آب را در دشت بهبهان مشخص ساخته است. نمونه‌های با نسبت  $Br/Cl < 0.05$  همبستگی مثبت با فلوراید نشان می‌دهند. سه نمونه با نسبت  $Br/Cl$  حدود 0.1 تا 0.15 غلظت فلوراید بین 0.5 تا 1 میلی‌گرم بر لیتر دارند. روند همبستگی خطی فلوراید با نسبت  $Br/Cl$  در نمونه‌های دشت زیدون می‌تواند افزایش غلظت فلوراید با منشأ دریایی در رسوبات دشت زیدون

با جمع‌بندی موارد مختلف، با توجه به آنکه در مناطق گرم و خشک همانند دشت‌های جنوب شرقی خوزستان که ورودی آب زیرزمینی روزانه به بدن زیاد است، آب‌های شرب با غلظت فلوراید بیش از ۱/۴ میلی‌گرم در لیتر برای بزرگسالان (هرچند برای نوزادان با توجه به اثر منفی فلوراید بر روی ضریب هوشی دوران رشد سریع اولیه مغزی غلظت فلوراید بیش از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر نیز می‌تواند مضر باشد) نامناسب هستند، می‌بایست در ارتباط با غلظت فلوراید چاه‌های آب شرب در این دشت‌ها دقت نظر زیادی داشت. با این حال Sunkari et al. (2024) اشاره کردند که فلوراید بیش از حد مجاز در آب شرب بر سلامتی نوزادان، کودکان، و نوجوانان تأثیر منفی دارد و عمدتاً به اثرات فلوروزیس دندانی ارتباط داده شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله هیدروژئوشیمی فلوراید در آب‌های زیرزمینی دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون مورد بررسی قرار گرفته است. در دشت‌های جنوب شرقی خوزستان، تیپ عمده آب‌های زیرزمینی، سولفات-کلسیک است که تحت تأثیر حضور سازند گچساران و رسوبات فرسایشی آن قرار دارد. همچنین، تیپ‌های کلروه-سدیک، سولفات-سدیک و کلروه-کلسیک نیز در برخی مناطق مشاهده می‌شود. بیشترین میزان غلظت فلوراید در دشت بهبهان در قسمت غربی و در محل خروجی آب زیرزمینی به رودخانه مارون مشاهده شد. در دشت رامهرمز، غلظت فلوراید در شمال غربی بیشتر است و در نزدیکی رودخانه اعلا کاهش می‌یابد. دشت زیدون نیز دارای بالاترین غلظت فلوراید در بخش مرکزی و کاهش آن در نزدیکی رودخانه زهره است. نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت فلوراید تا مقادیر هدایت الکتریکی ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر (حد انتهایی حد تعادلی انحلال ژپیس) نسبتاً ثابت است و سپس به طور خطی از ۰/۵ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر افزایش می‌یابد. در دشت بهبهان، فلوراید رابطه مثبتی با کلرید نشان داد که ممکن است نشانه‌ای از افزایش فلوراید همراه با انحلال هالیت باشد. در قسمت جنوب غربی دشت واقع در شبکه آبیاری زهکشی بنه باشت نیز میزان این یون بالا است. از سوی دیگر، در دشت‌های رامهرمز و زیدون، چنین رابطه‌ای وجود ندارد، که نشان‌دهنده عدم تأثیر انحلال هالیت بر منشأ فلوراید در این مناطق است. در دشت‌های بهبهان و زیدون روند خطی افزایش فلوراید با منیزیم می‌تواند در ارتباط با فرآیندهای واکنش آب / سنگ با تأکید بر رخداد دلدومیتیزیشن باشد ولی در دشت رامهرمز به جز نمونه‌های حاوی آب شور در شمال دشت، ارتباط معنی‌داری بین غلظت فلوراید و منیزیم دیده نمی‌شود. بر حسب انتظار با توجه به اهمیت کم غلظت انحلال کانی‌های آهکی در تکوین هیدروژئوشیمی آبخوان‌های مورد

مطالعه، غلظت فلوراید همبستگی با بی‌کربنات نشان نمی‌دهد که این خصوصاً در سه نمونه با شوری زیاد در دشت رامهرمز که حداقل مقادیر بی‌کربنات و حداکثر مقادیر فلوراید را دارند تأیید شده است. نسبت بروماید به کلرید (Br/Cl) به عنوان عامل مهمی در شناسایی منشأ فلوراید در آب‌های زیرزمینی دشت بهبهان، سه گروه آب را مشخص کرده است. نمونه‌های با نسبت Br/Cl کمتر از ۰/۰۵ همبستگی مثبت با فلوراید دارند. نسبت معادل ۰/۱ نشان‌دهنده حداقل مقادیر فلوراید و نسبت حدود ۰/۱۵ غلظت‌های بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌گرم بر لیتر است. در دشت زیدون، افزایش غلظت فلوراید با منشأ دریایی در رسوبات نشان‌دهنده یک روند همبستگی خطی با نسبت Br/Cl است. در دشت رامهرمز، تغییرات نسبت Br/Cl تا ۰/۰۵ تأثیری بر غلظت فلوراید نداشته و این غلظت حدود ۱ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. نمونه‌های شورابه با غلظت فلوراید بالای ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهند که نسبت Br/Cl کمتر از ۰/۰۵ به عدم ارتباط منشأ دریایی در افزایش شوری و غلظت فلوراید مربوط می‌شود، در حالی که یک نمونه با نسبت ۰/۱۳ دارای مقدار ۳ میلی‌گرم بر لیتر فلوراید است. با جمع‌بندی نتایج حاصل در این مقاله می‌توان دریافت غلظت فلوراید به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر فرایندهای زمین‌شناسی مانند انحلال، واکنش‌های تبادل یونی، و نیز فعالیت‌های انسانی قرار دارد. در دشت بهبهان، فعالیت‌های کشاورزی و منبع تغذیه‌ای از کنگلومرای بختیاری بالاترین تأثیر را دارند. در دشت‌های رامهرمز و زیدون نیز آب‌های شور و بقایای فرسایشی ناشی از سازند گچساران به عنوان منشأ فلوراید شناسایی شد. این مطالعه تلاش نموده است تا آگاهی بیشتری نسبت تعیین به منشأ و توزیع فلوراید در سه دشت اصلی جنوب شرق استان خوزستان با روابط هیدروژئوشیمی ایجاد کند و تأکید بر انجام تحقیقات بیشتر به‌ویژه در زمینه تأثیرات فعالیت‌های انسانی روی منابع آب زیرزمینی دارد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

مؤلفین این تحقیق از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و شرکت سازمان آب و برق خوزستان که تسهیلات لازم و پشتیبانی مالی این تحقیق را فراهم آورده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Chemical Trends
- 2- Composition Diagrams

## ۶- مراجع

- Abbasnejad A, Alipour S, David K (2018) Evaluation and comparison of anomalous fluoride distribution in rock, soil and water bodies in the northern axis of Zangmar River, North West Azerbaijan, North West Iran. *Ecohydrology* 6(4):969-982 (In Persian)
- Adimalla N, Qian H (2019) Hydrogeochemistry and fluoride contamination in the hard rock terrain of central Telangana, India: Analyses of its spatial distribution and health risk. *SN Applied Sciences* 1(202)
- Aghnyai F, Zarei M, Asadi S (2016) Investigation of the origin of fluoride in underground water in southern Iran, Bagh Larestan desert. *Journal of Advanced Applied Geology* 7(2):38-48 (In Persian)
- Ali S, Thakur SK, Sarkar A, Shekhar S (2016) Worldwide contamination of water by fluoride. *Environmental Chemistry Letters* 14(3):291-315
- Amini M, Mueller K, Abbaspour KC, Rosenberg T, Afyuni M, Møller KN, Sarr M, Johnson CA (2008) Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental Science & Technology* 42(10):3662-3668
- Andersen MS, Nyvang V, Jakobsen R, Postma D (2005) Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69(16):3979-3994
- Ayoob S, Gupta AK (2006) Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 36(6):433-487
- Daneshian H, Kalantari N, Alijani F (2021) Hydrochemistry and stable isotopes characteristics of groundwater in an urban aquifer, southwest of Iran. *Geopersia* 11(1):81-100
- Dehbandi R, Moore F, Keshavarzi B (2018) Geochemical sources, hydrogeochemical behavior, and health risk assessment of fluoride in an endemic fluorosis area, central Iran. *Chemosphere* 193:763-776
- Derakhshani R, Tavallaie M, Raoof M, Mohammadi TM, Abbasnejad A, Haghdoost AA (2014) Occurrence of fluoride in groundwater of Zarand region, Kerman province, Iran. *Fluoride* 47(2):133-138
- Edmunds WM, Smedley PL (2013) Fluoride in natural waters. In *Essentials of Medical Geology*. Springer: Dordrecht, The Netherlands 311-336
- Fuoco I, Apollaro C, Criscuoli A, De Rosa R, Velizarov S, Figoli A (2021) Fluoride polluted groundwaters in Calabria region (Southern Italy): natural source and remediation. *Water* 13(12):1626
- Hossain M, Patra PK (2020) Hydrogeochemical characterisation and health hazards of fluoride enriched groundwater in diverse aquifer types. *Environmental Pollution* 258:113646
- Lee TC, Tong Y, Fu WC (2023) Advances in continuous flow fluorination reactions. *Chemistry—An Asian Journal* 18(21): e202300723
- Liu J, Peng Y, Li C, Gao Z, Chen S (2021) A characterization of groundwater fluoride, influencing factors and risk to human health in the southwest plain of Shandong Province, North Chin. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207:111512
- Lone SA, Jeelani G, Mukherjee A (2024) Elevated fluoride levels in groundwater in the Himalayan aquifers of upper Indus basin, India: Sources, processes and health risk. *Groundwater for Sustainable Development* 25:101096
- Mahmoodlu GM, Raghimi M, Ramezani M (2023) Estimating the relationship between the fluoride concentration in groundwater and spatial distribution of loess deposits in the Gorgan Plain. *Journal of Research in Environmental Health* 8(4):378-391 (In Persian)
- Miller RL, Brickman P, Bolen D (1975) Attribution versus persuasion as a means for modifying behavior. *Journal of Personality and Social Psychology* 31(3):430-441
- Narsimha A, Rajitha S (2018) Spatial distribution and seasonal variation in fluoride enrichment in groundwater and its associated human health risk assessment in Telangana State, South India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 24(8):2119-2132
- Sarai TM, Jamdar M, Yousefi SH (2024) Assessment of groundwater quality in Hashtgerd aquifer using fuzzy method. *Journal of Hydrogeology* 9(1):16-27 (In Persian)
- Seifabadi SF, Taheri A, Ebrahimi A, Farajy F (2022) Groundwater quality variations with reference to fluoride in KabudarAhang plain of Hamadan province. *New Findings in Applied Geology* 17(34):99-113 (In Persian)
- Shaji E, Sarath KV, Santosh M, Krishnaprasad PK, Arya BK, Babu MS (2024) Fluoride contamination in groundwater: A global review of the status,

- processes, challenges, and remedial measures. *Geoscience Frontiers* 15(2):101734
- Su C, Wang M, Xie X, Han Z, Jiang J, Wang Z, Xiao D (2023) Natural and anthropogenic factors regulating fluoride enrichment in groundwater of the Nansi Lake Basin, Northern China. *Science of The Total Environment* 904:166699
- Su HK, Weidong K, Ning L, Jingtao Li Z (2021) Hydrogeochemistry and health hazards of fluoride-enriched groundwater in the Tarim Basin, China. *Environmental Research* 200:111476
- Sunkari ED, Hudu A, Fosu S, Gyimah E, Oppong O (2024) Hydrogeochemistry, sources, enrichment mechanism and human health risk assessment of groundwater fluoride in Saboba District in the White Volta River Basin, northern Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* 25:101132
- Taghipour N, Amini H, Mosafieri M, Yunesian M, Pourakbar M, Taghipour H (2016) National and sub-national drinking water fluoride concentrations and prevalence of fluorosis and of decayed, missed, and filled teeth in Iran from 1990 to 2015: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research* 23(6):5077–5098
- Tossou YYJ, Yessoufou S, Orban P, Vander A, Jacqueline Boukari M, Brouyère S (2021) Bedrock petrology controls on hydrogeochemistry and fluoride concentrations in Precambrian aquifers of central Benin, Western Africa. *Journal of African Earth Sciences* 182:104301
- Zango M, Pelig-Ba KB, Anim-Gyampo M, Gibrilla A, Sunkari ED (2021) Hydrogeochemical and isotopic controls on the source of fluoride in groundwater within the Veaa catchment, northeastern Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* 12:100526
- Zhang Z, Liu F, Jiang W, Chen S, Zhang H, Gao Z, Zhang J, Niu X, Cao W, Shan Q (2024) Quantifying the factors controlling groundwater fluoride and associated health risks in the coastal river delta, northern China. *Journal of Asian Earth Sciences* 259:105929