



Investigating the Effects of Stresses Caused by Recharge and Exploitation in Ghaemshahr-Juybar Coastal Aquifer on the Sea Saltwater Intrusion

M. Mohammad-Rezapour Tabari^{1*} and T. Azari²

Abstract

The development and management of aquifers in coastal belts is a significant contributor to sea saltwater intrusion. Therefore, tempo-spatial monitoring of the qualitative behavior of these aquifers is crucial for understanding the development of salinity, identifying its sources, and implementing measures to control this phenomenon. This study investigates the hydrochemical variations in coastal groundwater resources of the Ghaemshahr-Juybar plain by the Caspian Sea. For this purpose, a combination of statistical methods, principal component analysis, the saline water intrusion groundwater quality index, and hydrochemical facies evolution diagrams was utilized alongside GIS tools to compare, identify, and investigate the tempo-spatial changes of saltwater intrusion in this coastal alluvial aquifer. Based on analysis made on qualitative samples collected from three unconfined, perched, and saline aquifers during four time periods (2011, 2014, 2017, and 2020), saline water intrusion in these aquifers is certain but the sources of their salinity differ. The results indicated that the chemical composition of the groundwater in aquifers of this plain is primarily controlled by three main factors; the saltwater intrusion from the Caspian Sea and the fossil water from the bedrock, the reverse cation exchange process, and the influence of domestic sewage, agricultural activities, and the use of nitrate fertilizers. These factors, whether of natural or anthropogenic origin, have been exacerbated by human activities, including unauthorized and excessive exploitation of agricultural wells in the plain. The findings of the research indicated that the construction and operation of the water supply network from the Alborz Dam in the plain, and the use of surface water for irrigation instead of groundwater wells, significantly reduced the intrusion of saltwater from the sea and fossil water from the bedrock into the coastal aquifers. Therefore, considering the geological and lithological conditions of the studied area, it is essential to restrict water exploitation from the wells to prevent the intrusion of fossil saline water into the existing aquifers, thereby mitigating the saltwater upconing phenomenon. The proposed approach in this study for managing the salinity of coastal aquifers at risk of saltwater intrusion can be highly beneficial for both managers and researchers.

Keywords: Saline Water Intrusion, Coastal Aquifer, Principal Component Analysis, Groundwater Quality Index, Hydrochemical Facies Evolution Diagram, Qaemshahr-Juybar Aquifer.

Received: June 7, 2024

Accepted: July 22, 2024

بررسی اثرات تنش‌های ناشی از تغذیه و بهره‌برداری از آبخوان ساحلی قائمشهر-جویبار در میزان پیشروی آب شور دریا

محمود محمد رضا پور طبری^{۱*} و طاهره آذری^۲

چکیده

توسعه بهره‌برداری از آبخوان‌های واقع در کمربند ساحلی یکی از دلایل مهم پیشروی آب شور دریا محسوب می‌شود. بر این اساس پایش زمانی و مکانی رفتار کیفی این آبخوان‌ها به منظور شناخت نحوه ایجاد، تعیین منشأ شوری و کنترل این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. این تحقیق، تغییرات هیدروشیمیایی منابع آب زیرزمینی ساحلی در آبخوان قائمشهر-جویبار را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این منظور ترکیب روش‌های آماری و آنالیز مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی نفوذ آب شور (GQI swi) و دیاگرام تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی به همراه ابزار GIS جهت مقایسه، شناسایی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی نفوذ آب شور در این آبخوان آبرفتی ساحلی بکار گرفته شد. بر مبنای نمونه‌های کیفی جمع‌آوری شده از سه آبخوان آزاد، معلق و شور در طی چهار دوره زمانی (۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰) و تحلیل آن‌ها با استفاده از رویکردهای ذکر شده، می‌توان دریافت که نفوذ آب شور در این آبخوان‌ها کاملاً محرز است؛ اما منشأ شوری آن‌ها با هم متفاوت است. نتایج نشان داد که ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی آبخوان‌های موجود در این آبخوان اساساً توسط سه عامل اصلی کنترل می‌شوند: نفوذ آب شور دریای خزر و آب‌های شور فسیلی از طاق آب شور به آبخوان‌های موجود در آبخوان، فرآیند تبادلات کاتیونی معکوس، تغذیه فاضلاب‌های خانگی، فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی نیترات‌دار. این عوامل مستقل از نوع منشأشان (زمین‌زاد یا انسان‌زاد)، متأثر از فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری‌های غیرمجاز و بیش از حد از چاه‌های کشاورزی موجود در آبخوان تشدید شده‌اند. یافته‌های تحقیق بیانگر این است که راه‌اندازی شبکه آبرسانی سد البرز در سطح آبخوان و استفاده از آب‌های سطحی در آبیاری اراضی کشاورزی بجای برداشت از چاه‌ها، اثر قابل توجهی در کاهش میزان نفوذ آب‌های شور از دریا و سنگ کف به سمت آبخوان‌های ساحلی داشته است. لذا با توجه به شرایط زمین‌شناسی و لیتولوژی در محدوده مورد مطالعه، لازم است جهت جلوگیری از تهاجم آب شور فسیلی به آبخوان‌های موجود (در نتیجه پدیده بالاآمدگی آب شور لایه‌های زیرین)، بهره‌برداری از چاه‌های منطقه بشدت محدود شود. رویکرد پیشنهادی در این مطالعه جهت مدیریت شوری سفره‌های ساحلی در معرض خطر پیشروی آب شور می‌تواند برای مدیران و محققین بسیار کارا و مؤثر واقع شود.

کلمات کلیدی: نفوذ آب شور، آبخوان ساحلی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی، نمودار تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی، آبخوان قائمشهر-جویبار.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۳/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۵/۱

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran. Email: mrtabari@umz.ac.ir

2-Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, University of Kharazmi, Karaj, Iran. Email: t.azari@khu.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.461546.2762](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.461546.2762)

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



ارزیابی قرار دادند. تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان ساحلی Rhodope با استفاده از تحلیل نمونه‌های کیفی و روش‌های آماری چندمتغیره توسط Tziritis et al. (2023) مطالعه شد. از آنجا که هر کدام از رویکردهای ذکر شده در بررسی تداخل آب شور در سفره‌های ساحلی می‌تواند بخشی از فرآیند شناخت این پدیده را آشکار سازد، لذا استفاده یکپارچه از نتایج آن‌ها در شناسایی صحیح علل شوری و تعیین موقعیت مکانی تداخل آب شور در آبخوان‌های در معرض شوری بسیار کارآمد خواهد بود.

منطقه ساحلی شمال ایران واقع در کرانه جنوبی دریای خزر، به دلیل دارا بودن پوشش گیاهی متنوع و آب و هوای معتدل به عنوان یکی از بخش‌های مهم با کارکردهای کشاورزی و توریستی مطرح است. در این منطقه، آبخوان قائمشهر-جویبار به عنوان یکی از شش آبخوانی است که در مجاورت دریای خزر قرار دارد. این آبخوان به دلیل کاهش بارندگی در دهه اخیر و توسعه اراضی باغی و زراعی با افت قابل توجه در تراز سطح آب زیرزمینی مواجه است. بررسی سوابق مطالعاتی توسط مؤلفین نشان می‌دهد بر روی این آبخوان، که متأثر از پیشروی آب شور دریای خزر است، مطالعه دقیق و مشخصی جهت تعیین عوامل ایجادکننده شوری صورت نگرفته است. با توجه به پیچیدگی آبخوان مذکور و جهت بررسی همه‌جانبه رفتار هیدروژئوشیمیایی آبخوان در مواجهه با منشأ شوری، در این مطالعه تغییرات رفتاری وضعیت هیدروژئوشیمیایی و الگوی پتانسیل نفوذ آب شور در سه آبخوان آزاد، شور و معلق موجود در آبخوان مورد مطالعه در چهار بازه از یک دوره ده ساله (2017، 2014، 2011) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از تلفیق نتایج روش آماری و آنالیز مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از دیاگرام پایپر اصلاح شده، (GQIPiper) شاخص کیفیت آب زیرزمینی جهت تعیین نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی (GQI_{SWI}) و دیاگرام تکامل رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی (HFE-D) به همراه نرم‌افزار GIS که قبلاً مورد توجه محققین قرار نگرفته بود، استفاده شد. بر مبنای رویکرد پیشنهادی، وضعیت شوری و تغییرات کیفی آبخوان ساحلی در اثر نفوذ آب شور دریای خزر و سایر عوامل انسان‌زاده و یا زمین‌زاد مؤثر بر آن در طی یک دوره ده ساله با مقایسه و ارزیابی روش‌های مذکور، مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین مهمترین اهداف مطالعه حاضر عبارتند از:

- شناسایی و تمایز بین عوامل شورشدگی مختلف آبخوان‌های محدوده مورد مطالعه بر پایه تیپ کیفی غالب، نسبت‌های یونی، وضعیت همبستگی و آنالیز مؤلفه‌های اصلی؛

رشد جمعیت و تمرکز آن در نواحی ساحلی بسیاری از منابع آب زیرزمینی به ویژه آبخوان‌های واقع در کمربند ساحلی را در معرض نفوذ آب شور دریا (SWI)^۱ قرار داده است (Chandra Pal et al., 2022; Singh, 2015). پیشروی آب دریا علاوه بر ایجاد آلودگی در سفره آب شیرین، می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری را بر وضعیت اکوسیستم طبیعی نواحی ساحلی برجای بگذارد (Siddha and Sahu, 2020). یکی از عوامل مهم در هجوم آب شور دریا به آبخوان‌های ساحلی، برداشت بی‌رویه^۲ از آبخوان است که می‌تواند منجر به ایجاد محدودیت و کاهش کیفیت آب شود (Tabari and Abyar, 2022). ازدیاد شوری در آبخوان‌های ساحلی علاوه بر پیشروی آب دریا می‌تواند به عوامل طبیعی همانند کاهش تراز سطح آب زیرزمینی، افزایش تراز سطح آب دریا در نتیجه تغییرات اقلیمی، انحلال سنگ‌ها، هوازدگی، تبادل یونی، بالآمدگی لایه‌های آب شور فسیلی^۳ و یا عوامل انسان‌زاد همانند ورود پساب‌های کشاورزی، صنعتی و شهری مرتبط باشد (Barkat et al., 2021; Guo et al., 2021; Hajji et al., 2021; Larsen et al., 2017). جهت بررسی، پایش و تهیه نقشه پراکنش وضعیت هجوم آب شور در آبخوان‌های ساحلی رویکردهای متفاوتی ارائه شده است. برخی از روش‌های پرکاربرد در این بررسی عبارتند از: شناخت منشأ شوری بر اساس رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان با استفاده از دیاگرام‌هایی همانند پایپر، hydrochemical Stiff facies evolution (HFE) (Gibbs and Durov, 2010; Forcada, 2010; Biswas et al., 2023; Kelepertzis et al., 2023)، تحلیل‌های آماری چندمتغیره و استفاده از ضرایب همبستگی و روابط بین پارامترهای کیفی (Parisani et al., 2023; Tziritis et al., 2023)، روش‌های مبتنی بر ژئوفیزیک (Kura et al., 2014; Meyer et al., 2019)، استفاده از توپو در شناسایی منشأ و سن آب شور موجود در آبخوان (E Carol et al., 2009) و بررسی مکانی و زمانی تهاجم شوری با استفاده از GIS و مدل‌سازی (Kawo and Karuppannan, 2018; Xiong et al., 2023). از بین روش‌های ذکر شده، روش‌های مبتنی بر نمونه‌های کیفی جهت تحلیل وضعیت هیدروژئوشیمیایی نفوذ آب شور در سفره‌های ساحلی بیشتر مورد توجه واقع شده است. در این خصوص مطالعات زیادی صورت گرفته که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود: (Le et al., 2020) با استفاده از دیاگرام HFE-D و GIS، توزیع مکانی و روند تکامل هیدروژئوشیمیایی آب شور در آبخوان چهار لایه ساحلی در Southern Vietnam را مورد شناسایی قرار دادند. Ghezelsoufloo et al. (2021) هجوم آب شور به چاه‌های آبخوان ساحلی شهر کردکوی را با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی و مطالعات ژئوفیزیک مورد

- بررسی زمانی و مکانی تغییرات غلظت یون‌های اصلی مرتبط با تکامل ژئوشیمیایی در طول فرآیند نفوذ آب شور با استفاده از شاخص GQI_{SWI} ، دیاگرام پایپر اصلاح شده و HFE-D؛
- تعیین منابع طبیعی (زمین‌زاد) و مصنوعی (انسان‌زاد) ایجادکننده شوری در لایه‌های مختلف آبخوان

مطابق بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین این مطالعه، تحقیقات انجام شده در زمینه نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی بر اساس یکی از روش‌های مذکور است که در این تحقیق با هم‌پوشانی نتایج حاصل از تمامی روش‌های موجود به عنوان جنبه‌های جدید مطالعه حاضر، اقدام به تعیین نفوذ آب شور و منشأ آن شد. لذا این تحقیق نقشه راهبردی جامعی برای محققین موضوع نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی فراهم می‌نماید. همچنین، نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان مرتبط با تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی آبخوان ساحلی مورد مطالعه دید مثبتی در جهت آگاهی از خطرات ناشی از شورشدگی برای اخذ تصمیمات صحیح ارائه نماید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مشخصات محدوده مورد بررسی

محدوده مورد مطالعه قائمشهر-جویبار با مساحت حدود $3536/9$ کیلومتر مربع، نمونه‌ای از آبخوان ساحلی در معرض خطر نفوذ آب شور است که در کمر بند ساحلی دریای خزر واقع شده است. با توجه به اهمیت این منطقه در تولید محصولات کشاورزی (به خصوص مرکبات و برنج)، بررسی تغییرات و دلایل تخریب کیفی منابع آب زیرزمینی این آبخوان، ضروری و درخور توجه است. رسوبات آبرفتی ساحلی محدوده مورد مطالعه، یک سیستم آبخوان چندلایه‌ای را ایجاد نموده است. بالاترین لایه، آبخوان آزاد است که جهت مصارف کشاورزی، شرب، صنعت و آبی‌پروری استفاده می‌شود. این لایه در بخش‌هایی از حاشیه دریای خزر به دلیل قرار گرفتن لایه‌های رسی ریزدانه در زیر آن تشکیل آبخوان معلق را داده که دارای کیفیت خوبی جهت مصارف شرب و کشاورزی است. در فاصله بین آبخوان معلق و آزاد، آب‌های شور فسیلی در لایه آبرفتی به دام افتاده و تشکیل آبخوان شور با کیفیت پایین جهت مصارف کشاورزی و شرب را داده‌اند.

۲-۲- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی محدوده مورد مطالعه

در محدوده مطالعاتی قائمشهر-جویبار سازندهای زمین‌شناسی مختلفی از کربونیفر پیشین تا کواترنر رخنمون دارند. با توجه به بررسی‌های

بعمل آمده، یک سوم ارتفاعات را سازند شمشک (ماسه سنگ، ماسه سنگ کواترنری، شیل‌های زغال‌دار و سنگ‌های رسی) به خود اختصاص داده است که این سازند بدلیل وجود گسل‌های متعدد ارتباط کمی و کیفی با آبخوان آبخوان دارد. سازندهای کربناتی الیکا، دلیچای (مارن‌های آهکی و آهک‌های مارنی) و لار (آهک و آهک دولومیتی)، بیشترین تأثیر را بر روی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان از نظر انحلال‌پذیری دارند. سازند تیزکوه کرتاسه، آهک همراه با سنگ‌های آتشفشانی) در مرز کوه و دشت مشاهده می‌شود. با پیشروی به سمت آبخوان رسوبات کواترنری شامل سازند آپشرون که از رس‌های سخت، مارن، ماسه، لایه‌های گراوال و لایه نازک خاکسترهای آتشفشانی در شرایط دریاچه‌ای بوجود آمده است، دیده می‌شود. آب بجا مانده از عقب‌نشینی دریای خزر در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی بر روی رسوبات آپشرون و سپس پوشانده شدن این آب‌ها بوسیله رسوبات جدید خزر باعث تشکیل آبخوان شور فسیلی شده است (Geological Survey of Iran, 2003). سازند آپشرون با رسوبات دریاچه‌ای شامل ماسه، گل سخت نشده (کاسپین جدید) و رسوبات ناپیوسته پوشانده شده که آبخوان آزاد با نفوذپذیری نسبتاً خوب آبخوان قائمشهر-جویبار را ایجاد نموده است (شکل ۱). در واقع در محدوده مورد مطالعه جنس سنگ کف مشخص نشده است و طاق آب شور در این دشت‌ها نقش سنگ کف را ایفا می‌نماید. گسترش آبخوان شور یا آبخوان دارای کیفیت نامناسب نیز بر اساس داده‌های کیفی آب زیرزمینی در بخش شمالی آبخوان شناسایی شده است. آبرفت در شمال پهنه آبخوان قائمشهر-جویبار و در حاشیه دریای خزر ریزدانه‌تر به همراه رس است که تشکیل سفره معلق را در این بخش داده است. بنابراین در محدوده مورد مطالعه ۳ سفره معلق، شور و آزاد ایجاد شده است که مرزهای این سفره‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. در این آبخوان، آبرفت در نواحی جنوبی در بخش‌های سطحی ریزدانه بوده و در اعماق مقداری درشت دانه‌تر می‌شود. همچنین، بیشترین ضخامت آبخوان در بخش میانی قرار دارد. وسعت آبخوان آبرفتی آزاد $614/24$ کیلومتر مربع است و توان آبدهی مخزن آب زیرزمینی موجود در این آبخوان برابر با $342/91$ هزار متر مکعب در سال در کیلومتر مربع است. در این محدوده ۲۹ حلقه پیژومتر در آبخوان آزاد، 26679 حلقه چاه بهره‌برداری، ۲۵ دهنه چشمه و ۳ رشته قنات وجود دارد. در آبخوان قائمشهر-جویبار ضریب قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی با راستای شرقی-غربی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر مربع در روز و ضخامت آبخوان بین ۱۰ تا ۱۵۰ متر متغیر است. در جدول ۱ بیلان کلی آبخوان قائمشهر-جویبار که مرتبط با آخرین مطالعات در این خصوص است، ارائه شده است (Ab-khak-Consulting-Engineers, 2013).

Table 1- Groundwater balance of Ghaemshahr-Juybar alluvial aquifer (MCM)

جدول ۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی قائمشهر-جویبار (MCM)

Water balance component	Input	Output
GW inflow	42.49	
Infiltration from rainfall	39.41	
Penetration from surface water	45.96	
Recharge from agriculture wastewater	69.85	
Recharge from industrial and domestic wastewater	29.4	
Discharge by wells, springs, and qanats		210.63
GW outflow		2
Drainage from aquifer		10.78
Discharge by Evaporation		4.1
Changes in the aquifer storage volume		-0.4

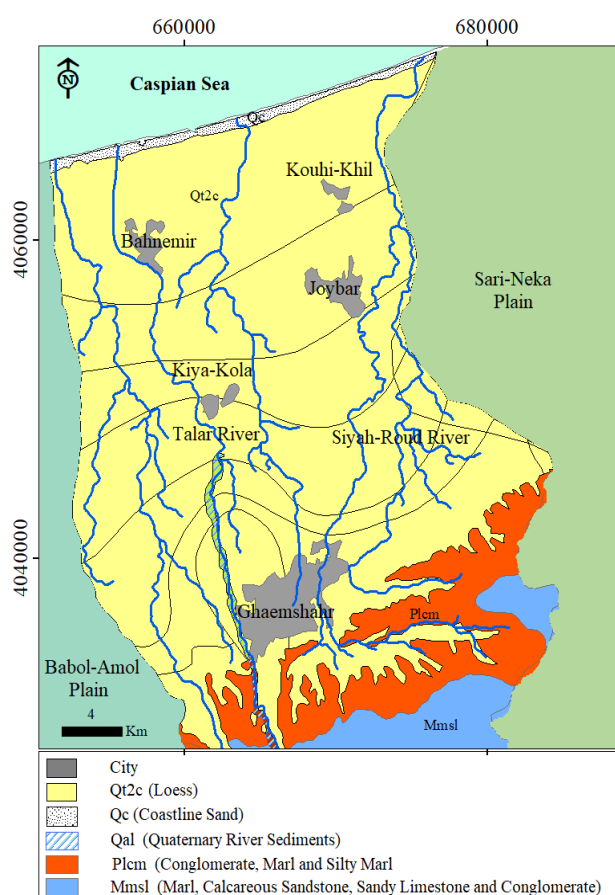


Fig. 1- Geological map of the study area

شکل ۱- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

افزایش تعداد چاه‌های مشاهده‌ای و نمونه‌برداری‌های منظم، مجموعه داده‌های هیدروشیمیایی کاملی جهت مطالعه کیفی دشت و مدیریت آبخوان ساحلی فراهم شده است. در این مطالعه، در طی سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ به ترتیب تعداد ۶۴، ۳۱، ۳۰ و ۳۰ نمونه

۳-۲- نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های آب

تا اوایل سال ۲۰۰۰، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای و داده‌های هیدروشیمیایی در آبخوان‌های موجود در محدوده مورد مطالعه جهت پایش وضعیت کیفی بسیار کم و محدود بوده است. از سال ۲۰۱۰ با

۴-۲- ابزارهای ارزیابی پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی

۴-۲-۱- رویکردهای آماری

درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و ژئوشیمیایی در آبخوان‌های ساحلی به دلیل پیچیدگی آنها بسیار دشوار است. لذا روش‌های آمار توصیفی می‌تواند با استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی و تحلیل ماتریس همبستگی بین دو یا چند متغیر، در تحلیل فرآیندهای پیچیده هیدروشیمیایی آبخوان بسیار موثر واقع شود (Li et al., 2020). در این مطالعه، ضریب همبستگی پیرسون جهت تعیین درجه وابستگی یک پارامتر به سایر پارامترهای کیفی آبخوان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین روش‌های آماری چندمتغیره در دستیابی به اطلاعات قابل توجه از مجموعه داده‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌ها از کارایی مناسبی برخوردار هستند. در این تحقیق از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) جهت تعیین روابط بین متغیرها به کار گرفته شد تا فرآیندهایی که شیمی آب را کنترل می‌کنند، تعیین گردند (Elemile et al., 2021; Nemati et al., 2023).

آب زیرزمینی از چاه‌های نیمه عمیق آبخوان آزاد، تعداد ۱۳، ۵ و ۲ نمونه از آبخوان شور و تعداد ۲ نمونه از آبخوان معلق (در هر ۴ سال نمونه‌برداری) بر اساس روش نمونه‌برداری استاندارد (APHA (2005)) جمع‌آوری شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده در جعبه یخ قرار داده شده و با حفظ دمای ۴ درجه سانتیگراد در یخچال جهت آنالیز به آزمایشگاه آب شرکت آب منطقه ای مازندران، ایران انتقال داده شدند. غلظت یون‌های اصلی در این آزمایشگاه بر اساس APHA standard methods (APHA, 2005) تعیین شدند. غلظت سدیم و پتاسیم با استفاده از روش شعله‌سنجی تعیین شدند. همچنین غلظت کلسیم و منیزیم با استفاده از روش Titration with EDTA, Murexide and Eriochrome Black-T and به عنوان معرف مشخص شد. آلکانیتی (HCO₃) با روش تیتراسیون حجمی با استفاده از HCL و orange به عنوان معرف، کلراید با روش Mohr Titration و سولفات با روش اسپکترومتری تعیین شدند.

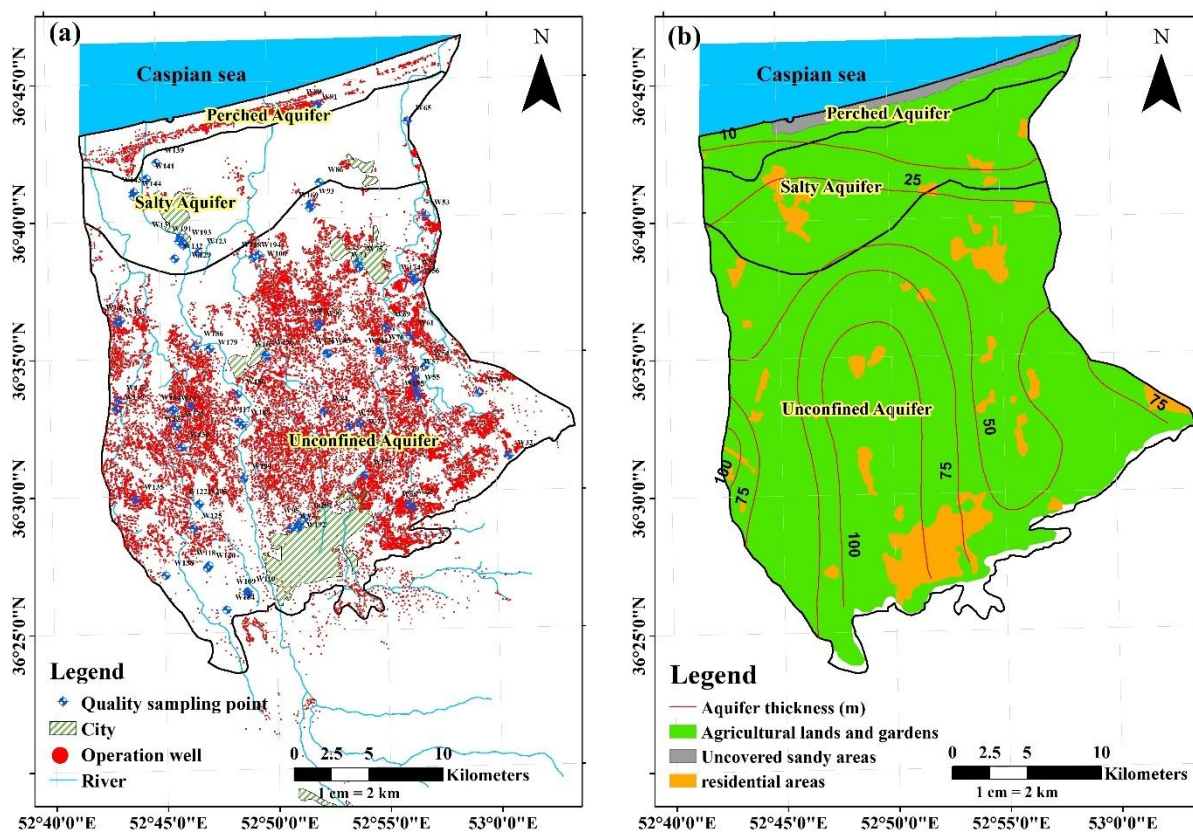


Fig. 2- (a) Location of the perched, saline and unconfined aquifers in Ghaemshahr-Juybar plain (b) The state of land use along with the iso-lines of aquifer thickness

شکل ۲- (a) موقعیت آبخوان‌های معلق، شور و آزاد در آبخوان قائمشهر-جویبار (b) وضعیت کاربری اراضی همراه با خطوط هم‌ضخامت آبخوان

$$GQI_{SWI} = \frac{GQI_{\text{piper(mix)}} + GQI_{\text{flake}}}{2} \quad (۴)$$

در این روابط: $C_{Cl, \text{sample}}$ و $C_{Cl, \text{fresh}}$ به ترتیب غلظت کلراید در نمونه برداشت شده از آب زیرزمینی و غلظت کلراید در دریای خزر (۶۵۰۰ mg/l) است و $C_{Cl, \text{fresh}}$ غلظت کلراید آب زیرزمینی محلی است. وضعیت تیپ آب از نظر اختلاط آب شور و شیرین بر اساس شاخص GQI_{SWI} را می‌توان به صورت جدول ۲ ارائه نمود (Gimenez-Forcada, 2010; 2014, 2019; Le et al., 2020).

۲-۴-۳- نمودار تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی (HFE-D)

جهت بررسی پیشرفت نفوذ آب شور و شیرین

در آبخوان‌های ساحلی متأثر از نفوذ آب دریا، در هنگام جایگزینی آب شیرین با آب دریا یک سری واکنش‌های ژئوشیمیایی رخ می‌دهد که این تغییرات شیمیایی می‌تواند ناشی از تفاوت در مشخصه‌های شیمیایی منبع تغذیه، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، نوسانات جریان آب زیرزمینی باشد. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده قبلی، روش نمودار تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی (HFE-D) می‌تواند روند این تغییرات را بسیار مفیدتر نسبت به روش دیاگرام پایپر ارائه دهد (Hajji et al., 2021). این نمودار که اولین بار توسط Gimenez-Forcada (2010) پیشنهاد شد، روشی ساده و قدرتمند جهت شناسایی وضعیت آبخوان‌های ساحلی در معرض پیشروی آب دریا، درصد اختلاط آب شور و شیرین و بررسی موقعیت‌های تداخل آب شور دریا با استفاده از توزیع درصد‌های آنیون و کاتیون در قالب نموداری مشخص ارائه می‌نماید. در طی فرآیند تداخل آب شور دریا با آبخوان، آبخوان متأثر از دو فرآیند همزمان قرار می‌گیرد: افزایش شوری متأثر از تبادل سریع Na با Ca و واکنش‌های تبدیلی معکوس (خطوط II و VI شکل ۳). در نتیجه این فرآیندها، رخساره Ca-Cl توسعه می‌یابد. پس از آن ترکیب کیفی آب زیرزمینی به دلیل حرکت به سمت آب شور دریا دارای رخساره Na-Cl می‌شود (خط III در شکل ۳). در طی فرآیند Freshening، تغذیه آب شیرین منجر به واکنش‌های تبادل مستقیم (خطوط V و IV در شکل ۳) و در نتیجه تشکیل رخساره Na-HCO₃ می‌شود. در نهایت آب به دلیل اختلاط با آبخوان ترکیب آب شیرین پیدا می‌کند (خط I) (Amiri et al., 2016; Gimenez-Forcada, 2010).

جهت آگاهی از فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های ساحلی و منشأ آنیون‌ها و کاتیون‌های مهم در آن، داده‌های هیدروژئوشیمی بر اساس رویکرد PCA و با توجه به مشخصه‌های کیفی که از سفره آب زیرزمینی و یا آب شور به ارث برده‌اند، گروه‌بندی می‌شوند.

۲-۴-۲- شاخص کیفی تداخل آب شور

یکی از نمودارهای پرکاربرد و بسیار مفید برای تعیین روابط بین غلظت یون‌های مختلف حل شده در آب و نیز طبقه‌بندی آب بر اساس خصوصیات شیمیایی‌شان، دیاگرام پایپر است. با استفاده از دیاگرام پایپر امکان تعیین چهره هیدروژئوشیمیایی آب بر اساس مشخصه‌های نسبی یون‌های غالب موجود در نمونه‌های برداشت شده، فراهم می‌شود (Mohammadi Arasteh and Shoaee, 2020). با قرارگیری پارامترهای کیفی مرتبط با نمونه‌های اندازه‌گیری شده بر روی این نمودار و تعیین موقعیت آن‌ها، می‌توان وضعیت پیشروی آب شور دریا، احتمال اختلاط آب شور و شیرین و به طور کلی رخساره هیدروشیمی آب زیرزمینی را تعیین نمود. جهت تعیین وضعیت اختلاط آب دریا با آب شیرین آبخوان، از خط افقی که در مرکز نمودار و بر اساس شاخص $GQI_{\text{piper(mix)}}$ تعریف می‌شود، می‌توان استفاده نمود (Tomaszkiewicz et al., 2014):

$$GQI_{\text{piper(mix)}} = \left[\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{\sum \text{Cations}} + \frac{(HCO_3^-)}{\sum \text{Anions}} \right] \times 50(\text{meq/l}) \quad (۱)$$

با استفاده همزمان از شاخص‌های $GQI_{\text{piper(mix)}}$ و $GQI_{\text{piper(dom)}}$ می‌توان به جزئیات بیشتری از سایر مناطق ایجاد شده در نمودار پایپر دست یافت.

$$GQI_{\text{piper(dom)}} = \left[\frac{Na^+ + K^+}{\sum \text{Cations}} + \frac{(HCO_3^-)}{\sum \text{Anions}} \right] \times 50(\text{meq/l}) \quad (۲)$$

به منظور تعیین میزان نفوذ آب شور دریا ترکیبی از شاخص‌های GQI_{flake} و $GQI_{\text{piper(mix)}}$ تحت عنوان شاخص GQI_{SWI} توسط Tomaszkiewicz et al. (2014) پیشنهاد شد. این شاخص با استفاده از نقاط قوت دو شاخص ترکیب شده و جبران نقاط ضعف آن‌ها، اختلاط آب دریا با آبخوان را بهتر نشان می‌دهد.

$$GQI_{\text{flake}} = \left(1 - \frac{C_{Cl, \text{sample}} - C_{Cl, \text{fresh}}}{C_{Cl, \text{lake}} - C_{Cl, \text{fresh}}} \right) \times 100 \quad (۳)$$

Table 2- Qualitative description of GQI_{SWI} index to assess the state of salt and fresh water mixing

Range of GQI_{SWI} index	جدول ۲- توصیف کیفی شاخص GQI_{SWI} جهت بررسی وضعیت اختلاط آب شور و شیرین			
	0-10	10-50	50-75	75-100
Water type	Freshwater	Mixed groundwater	Saline groundwater	Seawater

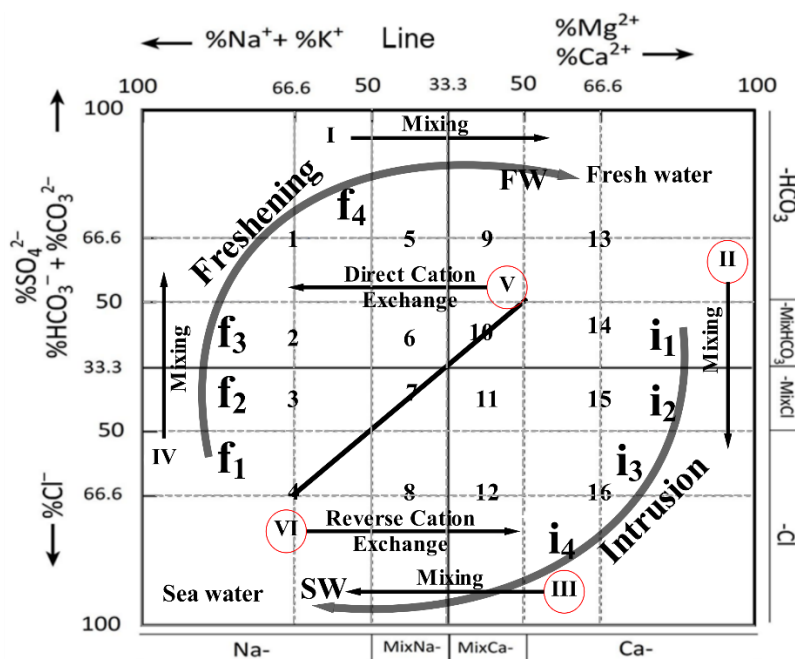


Fig. 3- Hydrochemical Facies Evolution Diagram (HFE-D) (Le et al. (2020))

شکل ۳- نمودار تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی (Le et al., 2020)

سفره‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، با منشأ مختلط دریایی- آبرفتی به همراه میان لایه‌هایی از رس، سیلت، ماسه و شن درشت تا ریز می‌باشند. کانی‌های رسی موجود در رسوبات، شرایط شیمیایی مناسب برای تبادلات کاتیونی مستقیم و معکوس را فراهم می‌آورند. در این مطالعه جهت نشان دادن توزیع مکانی رخساره‌های حاکم در فرایندهای intrusion و freshening، به هر یک از مجموعه‌ها از ۱ تا ۱۰ امتیاز داده شد. در این امتیازدهی، حداقل امتیاز (۱) به آب شیرین (FW)، حداکثر امتیاز (۱۰) برای آب دریا (SW) در نظر گرفته شد. همچنین برای زیرمجموعه‌های f_1 ، f_2 ، f_3 ، f_4 امتیازات در بازه ۲ تا ۵ و برای زیرمجموعه‌های i_1 ، i_2 ، i_3 و i_4 امتیاز ۶ تا ۹ لحاظ گردید. با توجه به امتیازات هر یک از زیرمجموعه‌ها و استخراج توزیع مکانی تیپ‌های مختلف آب در محیط ArcGIS 10.8، امکان شناسایی هر یک از زیرمرحله‌های مرتبط با فرایندهای intrusion و freshening فراهم می‌شود.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- تیپ شیمیایی نمونه‌های کیفی آبخوان‌ها و منشأ آن‌ها

بر مبنای نتایج بدست آمده از شاخص‌های نمودار پایپر اصلاح شده با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرهای کیفی، که مقادیر متوسط آن‌ها در طی دوره مورد بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است، می‌توان دریافت که تیپ آب غالب در سفره آزاد و معلق Mixed Ca-

بر این اساس، زمانی که تغذیه آب شیرین در سفره‌های ساحلی غالب است، Na جایگزین Ca شده و رخساره‌های هیدروشیمیایی از Na-Cl به Na-HCO₃ تغییر می‌یابد. بر این اساس و بر مبنای درصد یون‌های اصلی، می‌توان نمونه‌های کیفی آبخوان را به ۱۶ رخساره هیدروشیمیایی و در صورتی که منیزیم و سولفات نیز در نظر گرفته شود، تعداد رخساره‌های هیدروشیمیایی به ۳۲ افزایش می‌یابد. در صورتی که درصد یون‌های محاسبه شده بزرگتر از ۵۰ درصد باشد، در نمودار HFE-D چهار رخساره اصلی قابل شناسایی است که عبارتند از: Na-HCO₃ (آب شور تحت تأثیر تبادلات کاتیونی مستقیم)، Na-Cl (آب دریا)، Ca-HCO₃ (آب شیرین) و Ca-Cl (آب شور تحت تأثیر تبادلات کاتیونی معکوس). در صورتی درصد محاسبه شده برای برخی از آنیون‌ها و کاتیون‌های ذکر شده، کمتر از ۵۰ درصد باشد اما در همان زمان برای برخی دیگر بیشتر از ۵۰ درصد باشد، رخساره با پیشوند Mix مورد شناسایی قرار می‌گیرد (Le et al., 2020). بر روی نمودار HFE-D، خطی که جداکننده آب شور دریا و آب شیرین آبخوان است است به عنوان خط اختلاط پایدار (CML)^۵ در نظر گرفته می‌شود که موقعیت آن با استفاده از ترکیبات شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان تعیین می‌شود (Gimenez-Forcada, 2010). دو فلشی که در اطراف خط CML قرار دارد، بیانگر واکنش‌های تکاملی تغییرات هیدروژئوشیمیایی آب در طی فرآیند intrusion (واکنش‌های تبادلات معکوس) و freshening (واکنش‌های تبادل مستقیم) است. رسوبات

علاوه بر پیشروی آب شور دریا است (Asare et al., 2021). بررسی‌ها بر روی تعداد نمونه‌های با نسبت سدیم به کلر بزرگتر از یک نشان می‌دهد که این تعداد در آبخوان آزاد از ۴۸ درصد در سال ۲۰۱۱ به ۶۰ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. این مطلب بیانگر توسعه فعالیت‌های انسان‌زاد در ایجاد آلودگی آبخوان و ازدیاد نسبت Na/Cl است. بررسی نمودار پراکندگی Ca در مقابل Na سفرفه‌های مورد مطالعه بیانگر روند اختلاط بین آب شیرین آبخوان و آب شور دریای خزر می‌باشد. لذا آب زیرزمینی در سفرفه‌های موجود، غنی‌شدگی بیشتری در Ca^{2+} نسبت به Na^+ نشان می‌دهند که این مسئله منعکس‌کننده نفوذ آب شور (Shin et al., 2020) و انجام تبادلات کاتیونی معکوس در سفرفه‌ها است. اما با توجه به همبستگی پایین بین کلر و کلسیم، علاوه بر پیشروی آب دریا، عوامل دیگری نیز در کاهش کیفیت این سفرفه ساحلی دخالت دارد.

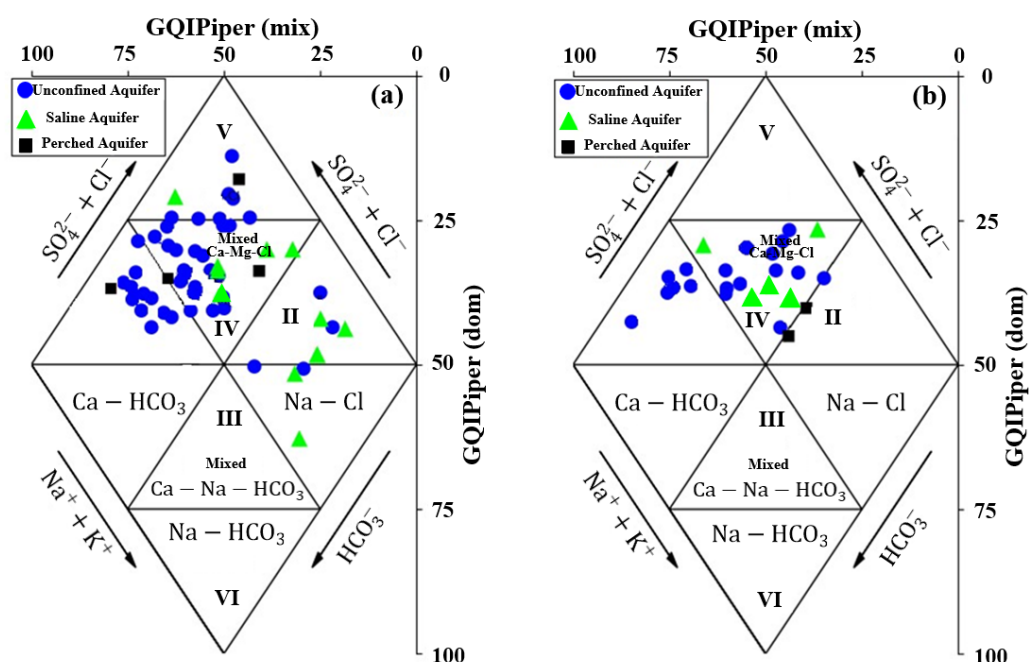
Mg-Cl و $Ca-HCO_3$ و در سفرفه شور Mixed Ca-Mg-Cl است (شکل ۴ و ۵). در منطقه مورد مطالعه، مقدار کاتیون Ca^{2+} در سفرفه‌های آزاد و معلق بیشتر از مقدار Na^+ است در حالی که در سفرفه شور مقدار Na^+ در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ بیشتر از مقدار Ca^{2+} است. جهت بررسی دلایل تغییر غلظت یون‌ها و منبع آزادسازی آن‌ها در آب زیرزمینی، از نمودارهای پراکندگی یون‌های مختلف در مقابل یون کلراید و نیز نسبت جفت یون‌های مختلف نسبت به هم استفاده شد.

نتایج نشان می‌دهد که Cl^- همبستگی مثبت قوی با TDS، EC و Na^+ دارد و بیانگر این است که یون کلر، کنترل‌کننده EC در سفرفه ساحلی مورد مطالعه است (ES Carol and Kruse, 2012). میزان همبستگی یون Mg^{2+} با Na^+ ، K^+ و Ca^{2+} مثبت بوده اما قوی نیست که این دلیلی است بر دخالت سایر منابع تشدیدکننده شوری آبخوان

Table 3- Average physicochemical variables of groundwater samples from Ghaemshahr-Juybar aquifer in mg/l (Mazandaran Regional Water Organization, 2021)

جدول ۳- میانگین متغیرهای فیزیکیوشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان آزاد قائمشهر-جویبار (mg/l) (Mazandaran Regional Water Organization, 2021)

Year	Ec ($\mu S/cm$)	TDS (mg/L)	PH	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
2011	1849.92	1228.58	7.48	6.29	4.08	7.9	0.11	8.38	8.02	1.86
2014	1572.45	1040.65	7.15	7.24	2.20	6.06	0.10	7.83	5.98	1.67
2017	1376.15	905.85	7.36	6.08	2.71	4.70	0.10	6.80	4.35	2.44
2020	1394.48	921.08	7.01	6.08	2.89	4.76	0.103	7.40	4.07	2.23



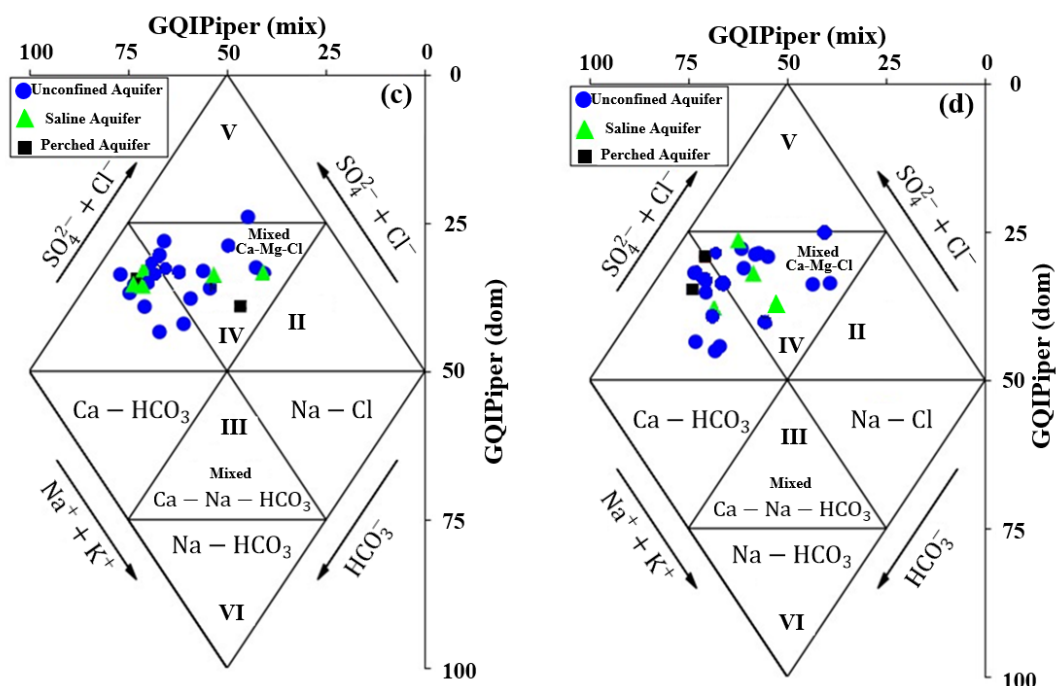


Fig. 4- Representation of groundwater samples from 3 aquifers in (a) 2011, (b) 2014, (c) 2017 and (d) 2020 on Piper diagram

شکل ۴- نمونه‌های آب زیرزمینی مربوط به سه آبخوان در سال‌های (a) ۲۰۱۱، (b) ۲۰۱۴، (c) ۲۰۱۷ و (d) ۲۰۲۰ بر روی نمودار پایپر

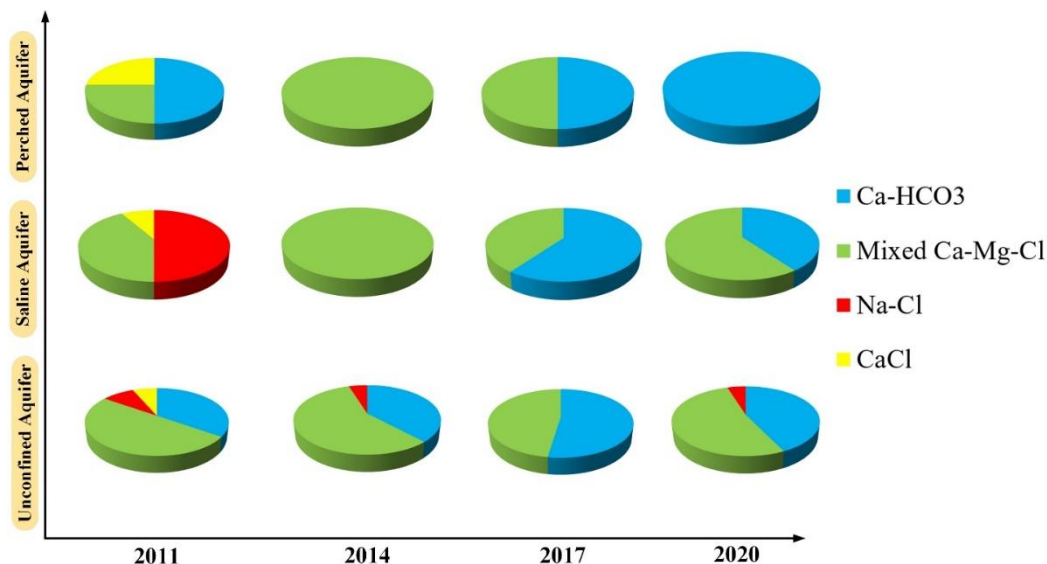


Fig. 5- The long-term variation of water type in operation wells in the three studied aquifer

شکل ۵- تغییرات بلندمدت تیپ آب در چاه‌های بهره‌برداری سه آبخوان مورد مطالعه

۳-۲- تعیین عوامل اصلی کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب

زیرزمینی

جهت تعیین عوامل اصلی کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آبخوان‌های مورد بررسی، تحلیل ماتریس همبستگی پیرسون و آنالیز مؤلفه‌های اصلی بر روی نمونه‌های کیفی برداشت شده از آبخوان‌ها در طی چهار دوره زمانی انجام شد. با توجه به همبستگی قوی EC با Na, K, Cl, TDS, HCO₃ می‌توان دریافت که این عناصر منابع اصلی شوری در محدوده مورد مطالعه است. همچنین، این پارامترها با هم نیز همبستگی قوی نشان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که آب نمونه‌های مختلف، خواص ژئوشیمیایی مشابهی دارند. همچنین، همبستگی قوی این پارامترها با Cl حاکی از اندرکنش اندک آب با سنگ‌های محیط متخلخل از زمان ورود آب به داخل سفره‌ها است. بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی اعمال شده بر روی نمونه‌های کیفی، ابعاد ۱۳ پارامتر فیزیکوشیمیایی به دو مؤلفه اصلی، که در این سفره‌ها در طی سال‌های مختلف تقریباً ۸۵ درصد از واریانس مجموعه کل داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهند، کاهش یافت (جدول ۴). لازم به ذکر است آنالیز مؤلفه‌های اصلی در سفره‌های شور و معلق به دلیل تعداد بسیار محدود نمونه‌ها قابل اجرا نبوده است. در مؤلفه اول، همبستگی مثبت بالایی بین پارامترهای EC, TDS, Na, K, Cl با هم و عدم همبستگی معنادار Cl با Ca, Mg, SO₄ بیان‌کننده این مسئله است که منشأ اول شوری آب زیرزمینی سفره آزاد در سال ۲۰۱۱، نفوذ آب شور فسیلی از سنگ کف و نیز ورود آب شور دریا به سفره ساحلی آزاد است. در مؤلفه دوم با توجه به اینکه کلراید همبستگی

معنادار قوی با این پارامترها نشان نداده است؛ لذا منشأ این پارامترها از آب دریا و یا آب شور فسیلی نمی‌تواند باشد. بر اساس شواهد موجود می‌توان نتیجه گرفت که منشأ دوم شوری آب زیرزمینی در این سال، انجام فرایندهای تبدلات کاتیونی معکوس به دلیل شرایط لیتولوژیکی مساعد موجود در سفره (وجود کانی‌های رسی و مواد آلی کربن‌دار) است. در سال ۲۰۱۴، همبستگی مثبت بالای بین پارامترهای Cl, SO₄, TDS, EC, K و Na با هم و عدم همبستگی معنادار Cl با HCO₃, NO₃ بیانگر این است که منشأ اول شوری آب زیرزمینی سفره آزاد در سال ۲۰۱۴، آب شور دریا و آب شور فسیلی به دام افتاده در لابلای رسوبات سفره آزاد ساحلی است. در واقع از سال ۲۰۱۳، به دلیل راه‌اندازی شبکه آبرسانی سد البرز در سطح آبخوان، نیاز به بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی جهت کشاورزی را کاهش داده و در نتیجه از ورود آب شور دریا و آب شور فسیلی از سنگ کف به سفره جلوگیری نموده است و در نتیجه آب‌های شوری که از قبل در لابلای رسوبات باقیمانده عامل اول شوری در این سال محسوب می‌شوند. بر مبنای عامل دوم این سال، با توجه به همبستگی ضعیف بین Ca²⁺ و Ca²⁺ + Mg²⁺ در مقابل HCO₃⁻، عامل تولید HCO₃⁻ انحلال کانی‌هایی مانند کلسیت، دولومیت و ژپس نمی‌تواند باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که منشأ دوم شوری آب زیرزمینی در این سال، حجم بالایی مصرف کود اوره شکر (دارای ۴۶٪ ماده ازته قابل جذب) در اراضی کشت برنج و نفوذ نترات در آب سفره توسط آب برگشتی کشاورزی و تحت تأثیر راه‌اندازی شبکه آبرسانی البرز از سال ۲۰۱۳ است.

Table 4- Varimax loading of the physicochemical variables for each principal component

جدول ۴- چرخش بار عاملی متغیرهای فیزیکوشیمیایی هر مؤلفه اصلی

Parameter	2011		2014		2017			2020	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2
Cl ⁻	.966		.951		.922			.915	
TDS	.951		.938		.974			.973	
EC	.952		.938		.974			.973	
K ⁺	.825		.809		.731			.810	
Na ⁺	.976		.940		.947			.914	
Mg ⁺		.839				0.673			
Ca ²⁺		.889							
SO ₄ ²⁻		.710	.817		0.657				.829
HCO ₃ ⁻				.837		0.898		.827	
NO ₃ ⁻				.902			0.961		.866
Eigenvalue	5.04	1.76	5.47	1.30	4.96	1.49	1.05	5.18	1.466
% Variance explained	55.86	29.14	62.14	22.50	52.61	18.70	12.08	62.97	20.06
Cum. % Var. explained	55.86	85.01	62.14	84.64	52.61	71.31	83.39	62.97	83.03

در سال ۲۰۱۷، با توجه به همبستگی مثبت بالای بین پارامترهای SO_4 ، TDS، EC، Cl، K و Na با هم و عدم همبستگی معنادار Cl با سایر پارامترها در مؤلفه اصلی اول، می‌توان بیان نمود که ادامه به‌کارگیری آب شبکه آبرسانی سد البرز در سطح آبخوان و کاهش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، نفوذ آب‌های شور از دریا و سنگ کف به سمت سفره ساحلی متوقف شده است و لذا منشأ اول شوری آب زیرزمینی سفره آزاد در این سال ۲۰۱۷ همانند سال ۲۰۱۴، آب‌های شور دریا و فسیلی به دام افتاده در لابلای رسوبات سفره ساحلی آزاد است. بر مبنای مؤلفه دوم بدست آمده در این سال، عامل دوم شوری، انجام تبادلات کاتیونی معکوس در سفره است. مؤلفه اصلی سوم بار عاملی مثبت معنادار و بالایی را با NO_3 نشان می‌دهد. وجود نیترات می‌تواند ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و مصرف بالای کودهای نیتراته و نفوذ آنها در آب سفره از طریق آب برگشتی کشاورزی باشد. از طرفی راه‌اندازی شبکه آبرسانی البرز از سال ۲۰۱۳ در انتقال بهتر نیترات موجود در کودهای شیمیایی به آب سفره زیرزمینی مؤثر بوده است. در سال ۲۰۲۰ نیز بر اساس مؤلفه اصلی اول، منشأ اول شوری آب زیرزمینی سفره آزاد، همچنان آب‌های شور دریا و فسیلی به دام افتاده در لابلای رسوبات سفره ساحلی آزاد است. همبستگی ضعیف بین Ca و SO_4 در مؤلفه دوم نشان‌دهنده این است که تنها عامل افزایش‌دهنده میزان NO_3 و SO_4 ، استفاده از حجم بالای کودهای شیمیایی نیترات دار، سوپر فسفات تریپل (ترکیبی از اسید سولفوریک و فسفات طبیعی) و سولفات دو پتاس در زمین‌های کشاورزی است. نتایج بدست آمده از تحلیل عاملی مؤلفه‌های بدست آمده نشان می‌دهد که ورود آب شور دریای خزر به سفره آزاد ساحلی و بالآمدگی آب شور فسیلی از سنگ کف به آبخوان تحت تأثیر افزایش بهره‌برداری از چاه‌های کشاورزی به عنوان عامل اول شوری در تمامی سال‌های مورد بررسی است. در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ فرآیند تبادلات کاتیونی معکوس و در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۰ تأثیر فاضلاب‌های خانگی، فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی نیترات‌دار به عنوان عامل دوم شوری و تغییرات ترکیب شیمیایی آب سفره آزاد تشخیص داده شد.

۳-۳- بررسی پتانسیل نفوذ آب شور بر اساس شاخص GQI_{SWI}

محاسبه مقادیر شاخص GQI_{SWI} نمونه‌های آب زیرزمینی ۳ سفره موجود در محدوده مورد مطالعه در یک دوره ده ساله نشان می‌دهد که هیچ نمونه‌ای در گروه آب شور و آب زیرزمینی شور قرار نمی‌گیرد (شکل ۶) و تنها در دو گروه آب شیرین و آب زیرزمینی مخلوط طبقه‌بندی می‌شوند. در سفره آزاد با بهبود کیفیت آبخوان، ترکیب آب

شیرین در طی چهار سال روند افزایشی را تجربه کرده است. همچنین در این آبخوان با کاهش تدریجی میزان پیشروی آب شور دریا، در طی چهار دوره به ترتیب ۲۱، ۳۳، ۲۲ و ۱۷ درصد از نمونه‌ها حاوی ترکیب آب زیرزمینی مخلوط شده‌اند.

در سفره شور نیز متأثر از آب شیرین شبکه آبیاری البرز که تغذیه‌کننده آبخوان است، به ترتیب در طی چهار سال منجر به ایجاد ترکیب آب شیرین در ۴۲، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد از نمونه‌ها شده است. لازم به ذکر است اثرات مثبت احداث شبکه‌های آبیاری بر روی افزایش تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان قائمشهر-جویبار در مطالعات YariPilmaraei et al. (2011) نیز تأیید شده است. بررسی ترکیبات کیفی نمونه‌های آبخوان بر مبنای شاخص GQI_{SWI} نشان می‌دهد که فرآیند تداخل و نفوذ آب شور در تمامی سفره‌ها به دلیل افزایش بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این محدوده جهت مصارف کشاورزی از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۱۴ روند افزایشی داشته است. این روند افزایش شوری و کاهش کیفیت منابع آب سفره‌های آزاد، شور و معلق متأثر از راه‌اندازی شبکه آبرسانی البرز جهت تخصیص آب سطحی به مصارف کشاورزی از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰ تا حد زیادی متوقف شده و منجر به بهبود شرایط کیفی آبخوان‌های ذکر شده شد.

۳-۴- شناسایی پدیده نفوذ آب شور به آب شیرین بر مبنای رویکرد HFE-D

جهت تدقیق روند توالی تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی در طول فرآیندهای شیرین‌شدگی و تهاجم آب شور، نمودار HFE مرتبط با سه آبخوان مورد مطالعه سفره وجود در آبخوان قائمشهر-جویبار ترسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در طی این دوره ده ساله به رخساره‌های امتداد خط اختلاط تعلق دارند که نشان‌دهنده اختلاط ساده آب شیرین و شور با تأثیر کم یا بدون تأثیر تبادلات کاتیونی است. موقعیت خط اختلاط در سفره آزاد نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۱، بیشتر شرایط شوری در سفره غالب است. مشاهده دو تیپ غالب $MixCa-Cl$ و $MixCa-HCO_3/SO_4$ در سفره در این سال بیانگر این است که آبخوان تحت تأثیر دو عامل بارش و نفوذ آب شور است. مقایسه این وضعیت در سال ۲۰۱۴ نسبت به سال ۲۰۱۱ بیانگر شیرین‌تر شدن سفره، تحت تأثیر تغذیه با آب‌های سطحی شیرینی که با راه‌اندازی شبکه آبرسانی البرز در سطح آبخوان وارد شده، است. در این حالت آبخوان در حال احیای خود بوده و با واکنش‌های تبادلات کاتیونی مستقیم، فرآیند شیرین‌شدگی در حال پیشرفت و غلبه بر فاز تهاجم آب شور در سفره رخ داده است.

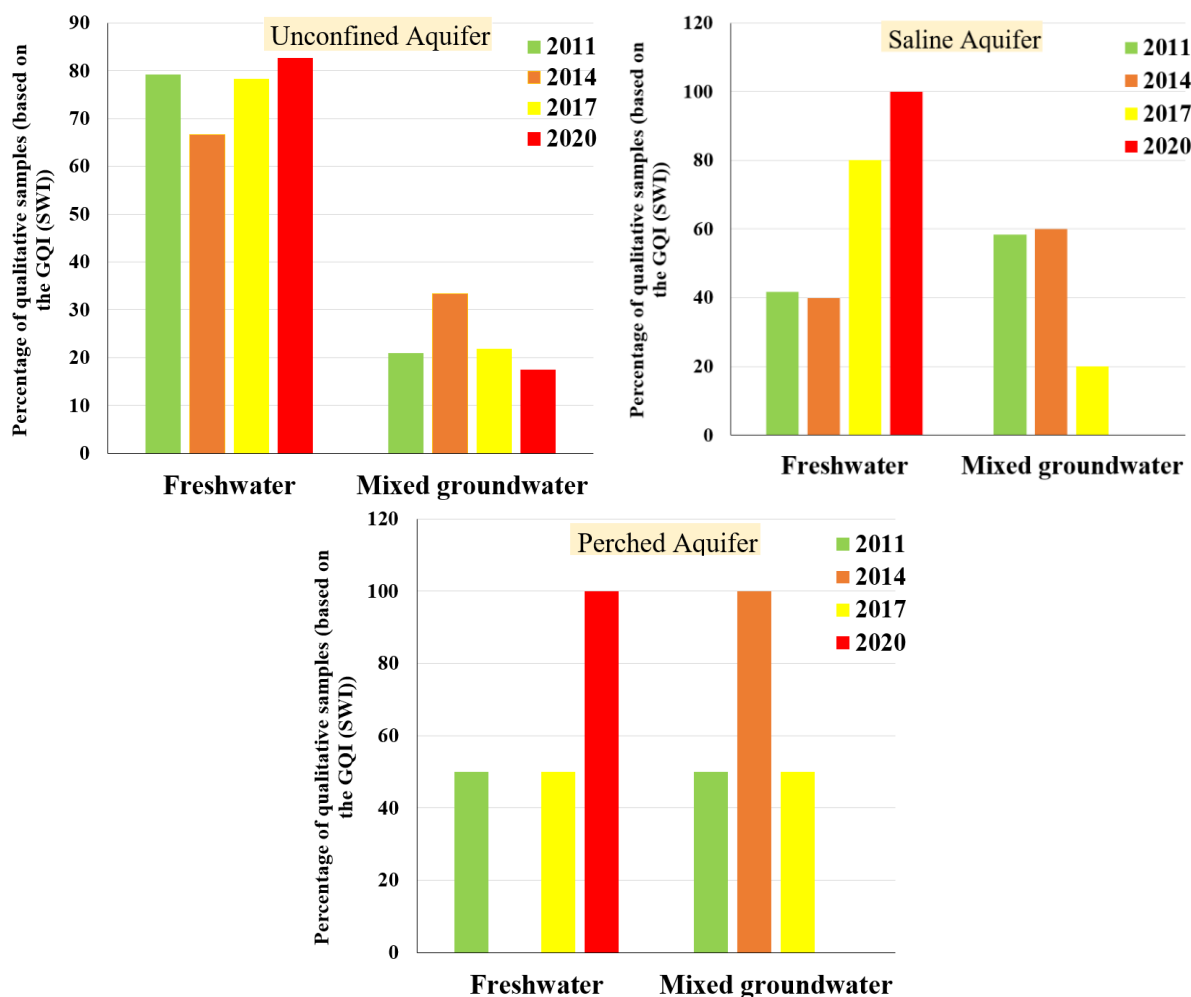


Fig. 6 The placement status of qualitative samples in the classification done by GQI_{SWI} index

شکل ۶- وضعیت قرارگیری نمونه‌های کیفی در طبقه‌بندی انجام شده توسط شاخص GQI_{SWI}

می‌کند که این منطقه به دلیل برداشت بی‌رویه جهت مصارف کشاورزی، متأثر از نفوذ آب شور دریا قرار گرفته است.

سفره معلق حاوی آب شیرین که در مجاورت دریای خزر قرار دارد مشابه سفره‌های آزاد و شور در طی این دوره ده ساله بهبود کیفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۱، نمونه‌ها در بالای خط اختلاط و حاوی ترکیب $MixNa-MixCl$ و $MixCa-MixHCO_3/MixSO_4$ هستند. این مسئله بیان‌کننده این موضوع است که این سفره تحت تأثیر اختلاط ساده آب شیرین و شور با تأثیر کم یا بدون تأثیر تبادلات کاتیونی است. در سال ۲۰۱۴ با راه‌اندازی شبکه آبرسانی سد البرز در سطح آبخوان و با قوی‌تر شدن جبهه آب شیرین سفره آزاد و حرکت آن در جهت گرادیان هیدرولیکی از جنوب آبخوان به سمت شمال (دریای خزر) و وارد نمودن فشار به جبهه آب شور موجود در سفره شوری که در مجاورت سفره معلق قرار دارد،

این نتیجه با یافته‌های بدست آمده از بررسی Shahnazari Et Al. (2018) که افزایش تراز سطح آب زیرزمینی را پس از اجرای طرح احداث شبکه آبیاری البرز تأیید می‌کند، هم‌خوانی دارد. در سال ۲۰۱۷ فاز تهاجم آب شور و تبادلات کاتیونی معکوس به فاز شیرین‌شدگی تغییر می‌یابد. علت این امر، ادامه فرآیند شیرین‌شدگی و انجام واکنش‌های تبادلات کاتیونی مستقیم در سفره تحت تأثیر تغذیه با آب سطحی شیرین رها شده از شبکه آبرسانی البرز است. در سال ۲۰۲۰ با انتقال خط اختلاط از فاز تهاجم به موقعیت استاندارد، جبهه شیرین‌شدگی قوی‌تر شده و توانسته بر فاز شورشدگی غلبه نماید. در سفره شور واقع در حد فاصل سفره معلق و آزاد، فقدان تغذیه کافی با آب شیرین منجر به غلبه تهاجم آب شور در طی این دوره ده ساله شده است و اکثر نمونه‌ها در پایین خط اختلاط قرار گرفته‌اند. نمونه‌های برداشت شده از این سفره توسط Heidari Cherati (2020) نیز اثبات

اختلاط آب شیرین سفره معلق با آب شور انجام شده و در نتیجه، تیپ Na-MixCl و Na-Cl رخنمون پیدا می‌نمایند. این سفره در نهایت در سال ۲۰۱۷ با ادامه تغذیه سفره‌های آزاد و شور با آب‌های شیرین سطحی و پیشرفت فاز شیرین‌شدگی ترکیب خود را به MixNa-Cl و $Ca-HCO_3/SO_4$ تغییر داده که بیانگر قوی‌تر شدن جبهه آب شیرین و پس زدن زبانه آب شور از سفره معلق است. از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰، فرآیند شیرین‌شدگی ادامه می‌یابد به طوری که در سال ۲۰۲۰، تنها تیپ $Ca-HCO_3/SO_4$ در این سفره مشاهده می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده پیشرفت فرآیند شیرین‌شدگی و تبادلات کاتیونی مستقیم در سفره معلق است.

جهت ارزیابی توزیع مکانی و زمانی رخساره‌های هیدروشیمیایی بر اساس رویکرد HFE-D، نقاط نمونه‌برداری بر مبنای موقعیت‌شان در نمودار HFE-D امتیازدهی شده و نقشه‌های آسیب‌پذیری سفره‌ها نسبت به پیشروی آب شور در ۴ سال انتخابی ترسیم شد (شکل ۷). داده‌ها با استفاده از روش kriging interpolation تبدیل به نقشه‌های پهنه‌بندی شدند. روابط بین سفره‌های ساحلی و آب دریا یک بالانس دینامیکی است که به میزان تغییرات تغذیه-تخلیه در طی زمان بستگی دارد و با مرز بین freshening و intrusion بر روی شکل ۳ مشخص شده است. این مرز در سفره آزاد در سال ۲۰۱۱ به دلیل برداشت بی‌رویه از چاه‌های موجود جهت مصارف کشاورزی، تا محدوده وسیعی از سفره آزاد، بخش قابل توجهی از محدوده سفره شور و قسمت‌های محدودی از شرق سفره معلق پیشروی کرده و تنها محدوده کوچکی در جنوب و شمال آبخوان از تهاجم آب شور در امان بوده است.

این موضوع نشان می‌دهد که تغذیه سفره از طریق بارش و رواناب به اندازه کافی نبوده که شیرین‌شدگی بتواند بر تهاجم آب شور غلبه کند. همچنین، از آنجایی که رودخانه‌های جاری در دشت (رودخانه تالار و سیاه رود) در بخش جنوبی دشت نقش تغذیه‌کننده و در بخش میانی و شمالی دشت نقش زهکش را دارند، لذا سفره آزاد در بخش جنوبی توسط این رودخانه‌ها تغذیه می‌شود که این عامل بیانگر این است که تغذیه محلی، تکامل رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی در سفره آزاد را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. همچنین، عملکرد زهکشی رودخانه‌های موجود در دشت در سفره شور می‌تواند عامل تشدید فاز تهاجم در این بخش از سفره محسوب شود. این امر نشان‌دهنده ارتباط هیدرولیکی مؤثر بین رودخانه و آبخوان‌های سطحی است. لازم به ذکر است تیپ آب رودخانه‌های تالار و سیاه رود به ترتیب در بالادست بی‌کربنات کلسیم، میان‌دست سولفات کلسیم و در پایین دست و نزدیک به خط ساحلی کلراید کلسیم و کلراید سدیم است. بر اساس اطلاعات بدست

آمده از سازمان آب منطقه‌ای مازندران، در طی دوره زمانی مورد بررسی، مقدار EC و TDS آب رودخانه‌های تالار و سیاه‌رود در بالادست کمترین مقدار خود را دارد و در میانه دشت مقدار آن افزایش می‌یابد و در پایین دست دشت افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۴ به دلیل تغذیه آب شیرین توسط شبکه آبرسانی سد البرز، جبهه آب شیرین از جنوب دشت قوی شده و به مرز بین دو منطقه شور و شیرین فشار آورده و این مرز را در سفره آزاد به قسمت‌های نزدیک به مرکز دشت می‌رساند. همچنین فشار جبهه آب شیرین از جنوب دشت در جهت گرادیان هیدرولیکی به آب شور سفره شور وارد شده و زبانه آب شور را به سفره معلق رسانده است. در نتیجه اگرچه کیفیت سفره آزاد و شور نسبت به سال ۲۰۱۱ بهبود یافته اما کیفیت سفره معلق نسبت به سال ۲۰۱۱ کاهش پیدا کرده است. این نتایج بیانگر تکامل رخساره هیدروشیمیایی در سفره آزاد تحت تأثیر تغذیه آب شیرین است. در اثر تداوم و افزایش میزان تغذیه، در سال ۲۰۱۷، جبهه قوی آب شیرین در جهت گرادیان هیدرولیکی از جنوب به سمت شمال دشت به حرکت درآمده و منطقه آب شور را شکافته است و تنها در بخش‌هایی از شرق و جنوب غرب سفره شور و نواحی شرقی و شمال غربی سفره آزاد، اثرات تهاجم آب شور مشاهده می‌شود و شیرین‌شدگی به طور کامل در سفره معلق غالب می‌شود. افزایش این میزان تغذیه آب شیرین در سال ۲۰۲۰ و تأثیر آن بر قوی‌تر شدن جبهه آب شیرین و پس زدن زبانه آب شور موجود در بخش‌های شرقی و غربی دشت، تأییدکننده این موضوع است که الگوی رخساره‌های هیدروشیمیایی در این سه سفره بیشتر به عامل مقدار تغذیه وابسته است و عواملی مانند لیتولوژی سفره و مقدار افت آب زیرزمینی از اهمیت کمتری برخوردارند.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

این تحقیق تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی حاکم بر آبخوان سطحی ساحلی قائمشهر-جویبار در نتیجه پیشروی آب شور دریای خزر و سایر منابع آب شور را با استفاده از روش‌های آماری، شاخص GQI_{SWI} و دیاگرام HFE-D در یک دوره ده ساله و ۴ سال انتخابی ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار می‌دهد. با تلفیق نتایج رویکردهای مورد اشاره، تکامل زمانی و مکانی مراحل تهاجم آب شور و شیرین‌شدگی در سه سفره آبرفتی آزاد، معلق و شور مورد شناسایی قرار گرفت. بر مبنای نتایج بدست آمده، می‌توان دلایل شوری و تغییر کیفیت آب در این آبخوان‌ها را به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

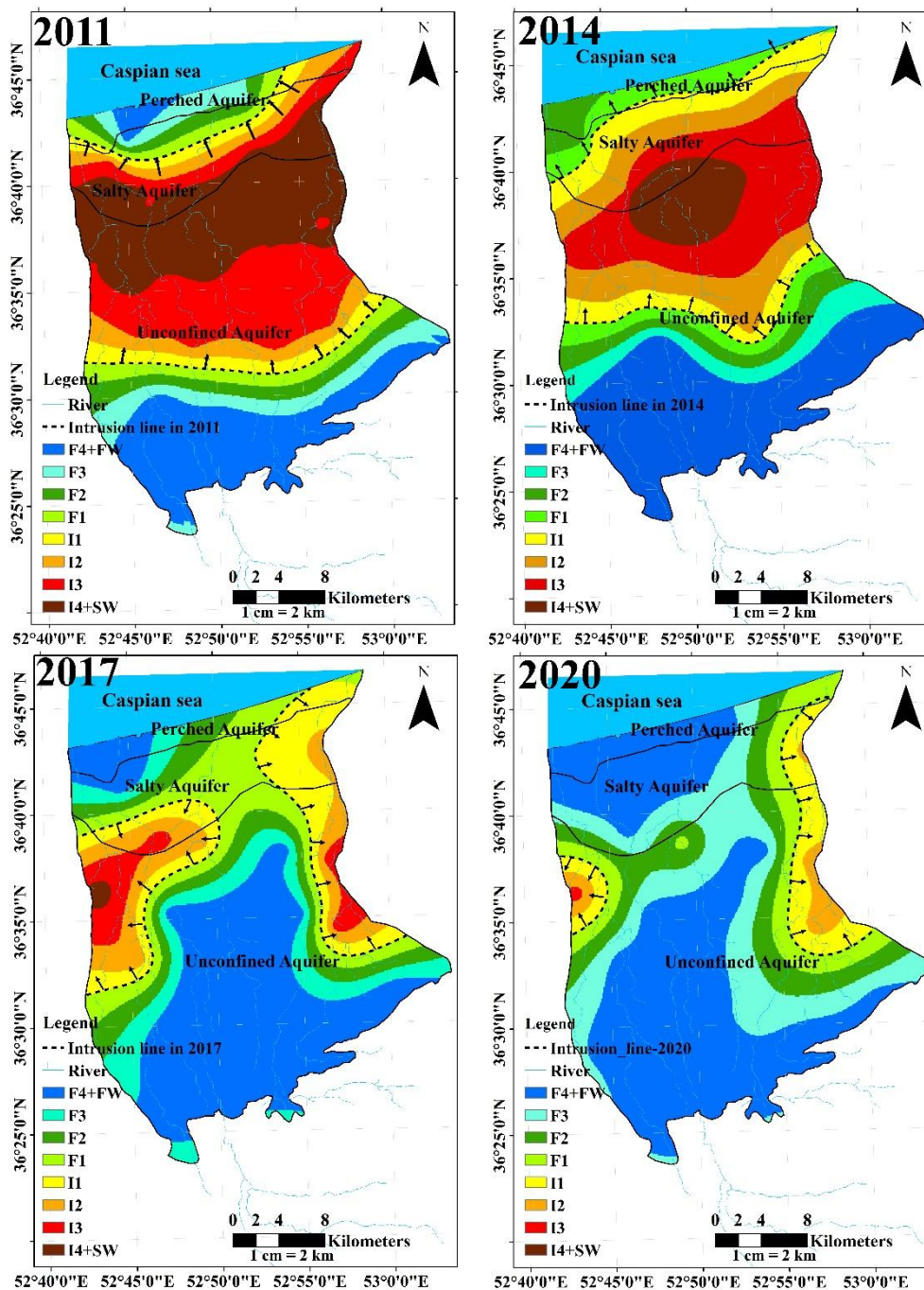


Fig. 7- Spatial distribution of hydrochemical facies of the three aquifers during 2011-2020

شکل ۷- توزیع مکانی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی سه آبخوان در طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

GQI_{SWI} و داشتن ترکیب MixNa-MixCl و MixCa- بر مبنای دیاگرام HFE-D بیانگر متأثر بودن این سفره از اختلاط ساده آب شیرین و شور با تأثیر کم یا بدون تأثیر تبدلات کاتیونی است. روند تغییرات مکانی و زمانی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های کیفی این آبخوان نیز

در بخش‌های شمالی دشت و نزدیکی سواحل دریای خزر، سفره معلق آب شیرین وجود دارد. علی‌رغم موقعیت نزدیک این آبخوان به دریا، اما به دلیل قرارگیری لایه ابرفتی بر روی لنزهای رسی در تمامی سال‌ها حاوی شیرین بوده است (تیپ غالب Ca-HCO₃). وجود ترکیب آب زیرزمینی مخلوط با استفاده از شاخص

نمونه‌های کیفی با استفاده از دیاگرام HFE-D بیانگر غالب بودن مرحله تهاجم آب شور نسبت به مرحله شیرین‌شدگی به دلیل فقدان تغذیه آب شیرین به میزان کافی در کل ۴ دوره زمانی مورد بررسی است. عامل مهم شوری این آبخوان، اثر مستقیم تهاجم آب شور و تبدلات کاتیونی معکوس به دلیل عوامل زمین‌زاد و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم بر سفره است. این آبخوان نیز همانند آبخوان آزاد متأثر از راه‌اندازی شبکه آبرسانی البرز در سطح دشت قرار گرفته و کاهش شدید میزان شوری و بهبود کیفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

بر اساس رویکرد توسعه داده شده در این مطالعه می‌توان دریافت که تحلیل همزمان نتایج روش‌های آماری، شاخص‌های توسعه داده شده در دیاگرام پایپر اصلاح شده و استفاده از دیاگرام HFE-D می‌تواند در شناسایی دلایل و شناخت فرآیندهای تبدلی، تغییرات رفتاری مکانی و زمانی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی پدیده اندرکنش آب‌های شور، با منشأ دریا و یا غیردریایی، با آب شیرین آبخوان‌های ساحلی بسیار کارا عمل نماید. یافته‌های تحقیق حاضر می‌تواند مبنایی جهت تدوین دستورالعمل‌های کمی و کیفی بهره‌برداری از این سفره ساحلی در جهت احیاء، حفاظت و مدیریت از منابع آب زیرزمینی سفره‌های ساحلی در معرض خطر پیشروی آب شور در نظر گرفته شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Seawater Intrusion
- 2- Over Exploitation
- 3- Palaeo-Saline Water
- 4- Principal Component Analysis
- 5- Conservative Mixing Line

مشابه آبخوان آزاد نشان‌دهنده قوی‌تر شدن جبهه آب شیرین و پس زدن زبانه آب شور از سفره معلق در نتیجه تغذیه سفره توسط آب شیرین شبکه البرز در آبیاری اراضی کشاورزی و باغات است.

➤ بر مبنای آنالیز مؤلفه‌های اصلی، عوامل اولیه شوری در آبخوان آزاد، فرآیندهای زمین‌زاد، تبادل هیدروژئوشیمیایی بین آبخوان و دریای خزر در نتیجه پیشروی آب دریا (نسبت Ca/Mg بزرگتر از یک و قرارگیری تیپ کیفی نمونه‌های برداشت شده در محدوده آب‌های مخلوط $Ca-Mg-Cl$) و آب شور (دیاگرام پایپر)) و آب‌های شور فسیلی‌گیرافتاده در بین رسوبات هستند. دومین عامل تأثیرگذار در ایجاد تغییرات کیفی آبخوان، که افزایش غلظت نیترات تأییدکننده آن است، توسعه بی‌رویه اراضی کشاورزی و در نتیجه افزایش استفاده از کود اوره ازت‌دار و تغذیه قابل توجه پساب‌های ناشی از آن است. لازم به ذکر است ازدیاد نسبت Na/Cl گویای توسعه فعالیت‌های انسان‌زاد در ایجاد آلودگی آبخوان در نتیجه تبدلات کاتیونی مستقیم است. البته پساب‌های شهری و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی با منشأ طبیعی (تبدلات کاتیونی معکوس) نیز در این تخریب کیفی آبخوان مؤثر بوده‌اند. نتایج بدست آمده از روند تکامل رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان آزاد و تغییرات موقعیت خط اختلاط نسبت به موقعیت استاندارد در دیاگرام HFE-D نشان می‌دهد که راه‌اندازی شبکه آبرسانی سد البرز در سطح دشت و استفاده از آب‌های سطحی در آبیاری اراضی کشاورزی اثر قابل توجهی در کاهش میزان نفوذ آب‌های شور از دریا و سنگ کف (آب فسیلی) به سمت سفره آزاد داشته است.

➤ آبخوان شور محدوده مورد مطالعه، که در حدفاصل آبخوان‌های معلق نزدیک به ساحل و آبخوان آزاد قرار دارد، نتایج تحلیل

۵- مراجع

- Ab-khak-Consulting-Engineers (2013) Updating the balance of water resources-The report of the balance of water resources of Ghaemshahr-Juybar study area. Iran Water Resources Management Company-Mazandaran Regional Water Company 5:1-97 (In Persian)
- Amiri V, Nakhaei M, Lak R, Kholghi M (2016) Assessment of seasonal groundwater quality and potential saltwater intrusion: a study case in Urmia coastal aquifer (NW Iran) using the groundwater quality index (GQI) and hydrochemical facies evolution diagram (HFE-D). Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 30:1473-1484
- APHA (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. In: 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.
- Asare A, Appiah-Adjei EK, Ali B, Owusu-Nimo F (2021) Assessment of seawater intrusion using ionic ratios: The case of coastal communities along the Central Region of Ghana. Environmental Earth Sciences 80:1-14
- Barkat A, Bouaicha F, Bouteraa O, Mester T, Ata B, Balla D, Rahal Z, Szabó G (2021) Assessment of complex terminal groundwater aquifer for different use of Oued Souf Valley (Algeria) using multivariate statistical methods, geostatistical modeling, and water quality index. Water 13(11):1609
- Biswas T, Pal SC, Saha A (2023) Hydro-chemical assessment of coastal groundwater aquifers for human health risk from elevated arsenic and fluoride in West Bengal, India. Marine Pollution Bulletin 186:114440
- Carol E, Kruse E, Mas-Pla J (2009) Hydrochemical and isotopic evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. Journal of Hydrology 365(3):335-345
- Carol ES, Kruse EE (2012) Hydrochemical characterization of the water resources in the coastal environments of the outer Río de la Plata estuary, Argentina. Journal of South American Earth Sciences 37:113-121
- Chandra Pal S, Towfiqul Islam ARM, Chakraborty R, Islam MS, Saha A, Shit M (2022) Application of data-mining technique and hydro-chemical data for evaluating vulnerability of groundwater in Indo-Gangetic Plain. Journal of Environmental Management 318:115582
- Elemile OO, Ibitogbe E, Folorunso O, Ejiboye P, Adewumi J (2021) Principal component analysis of groundwater sources pollution in Omu-Aran Community, Nigeria. Environmental Earth Sciences 80:1-16
- Geological Survey of Iran MoIMaT (2003) A geological map with a scale of 1: 100000 and a topographic map of 1: 50000 and 1: 25000. Tehran (Iran) (In Persian)
- Ghezelsofloo E, Raghimi M, Mahmoodlu MG, Rahimi-Chakdel A, Khademi SMS (2021) Saltwater intrusion in drinking water wells of Kordkuy, Iran: An integrated quantitative and graphical study. Environmental Earth Sciences 80(16):520
- Gimenez-Forcada E (2010) Dynamic of seawater interface using hydrochemical facies evolution diagram. Ground Water 48(2):212-216
- Giménez-Forcada E (2014) Space/time development of seawater intrusion: A study case in Vinaroz coastal plain (Eastern Spain) using HFE-Diagram, and spatial distribution of hydrochemical facies. Journal of Hydrology 517:617-627
- Giménez-Forcada E (2019) Use of the Hydrochemical Facies Diagram (HFE-D) for the evaluation of salinization by seawater intrusion in the coastal Oropesa Plain: Comparative analysis with the coastal Vinaroz Plain, Spain. HydroResearch 2:76-84
- Guo Q, Zhao Y, Hu Z, Li M (2021) Contamination transport in the coastal unconfined aquifer under the influences of seawater intrusion and inland freshwater recharge-laboratory experiments and numerical simulations. International Journal of Environmental Research and Public Health 18(2):762
- Hajji S, Allouche N, Bouri S, Aljuaid AM, Hachicha W (2021) Assessment of seawater intrusion in coastal aquifers using multivariate statistical analyses and hydrochemical facies evolution-based model. International Journal of Environmental Research and Public Health 19(1):1-18
- Heidari Cherati S (2020) Geochemical evolution of groundwater in the alluvial aquifer of Qaemshahr-Juybar. M.Sc. Thesis in Hydrogeology, Shahrood University of Technology (In Persian)
- Kawo NS, Karuppanan S (2018) Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. Journal of African Earth Sciences 147:300-311
- Kelepertzis E, Matiatos I, Botsou F, Antonopoulou C, Lappas I, Dotsika E, Chrastný V, Boeckx P, Karavoltos S, Komárek M (2023) Assessment of natural and anthropogenic contamination sources in

- a Mediterranean aquifer by combining hydrochemical and stable isotope techniques. *Science of the Total Environment* 858:159763
- Kura NU, Ramli MF, Ibrahim S, Sulaiman WNA, Zaudi MA, Aris AZ (2014) A preliminary appraisal of the effect of pumping on seawater intrusion and upconing in a small tropical island using 2D resistivity technique. *The Scientific World Journal* 2014(1):796425
- Larsen F, Tran LV, Van Hoang H, Tran LT, Christiansen AV, Pham NQ (2017) Groundwater salinity influenced by Holocene seawater trapped in incised valleys in the Red River delta plain. *Nature Geoscience* 10(5):376-381
- Le TTV, Lertsirivorakul R, Bui TV, Schulmeister MK (2020) An application of HFE-D for evaluating sea water intrusion in coastal aquifers of Southern Vietnam. *Ground Water* 58(6):1012-1022
- Li Q, Zhang H, Guo S, Fu K, Liao L, Xu Y, Cheng S (2020) Groundwater pollution source apportionment using principal component analysis in a multiple land-use area in southwestern China. *Environmental Science and Pollution Research* 27(9):9000-9011
- Mazandaran Regional Water Organization (2021) Physicochemical variables of groundwater samples of Ghaemshahr-Juybar aquifer. In: Ministry of Energy (In Persian)
- Meyer R, Engesgaard P, Sonnenborg TO (2019) Origin and dynamics of saltwater intrusion in a regional aquifer: Combining 3-D Saltwater modeling with geophysical and geochemical data. *Water Resources Research* 55(3):1792-1813
- Mohammadi Arasteh S, Shoaie SM (2020) An assessment of the effects of excessive groundwater abstraction on the quality of groundwater resources of the Zanjan Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* 79(23):523
- Nemati M, Tabari M, Hosseini SA, Javadi S (2023) Identification of factors affecting nitrate contamination in Ardabil Plain Aquifer using statistical methods. *Water and Irrigation Management* 13(2):527-550
- Parisi A, Alfio MR, Balacco G, Güler C, Fidelibus MD (2023) Analyzing spatial and temporal evolution of groundwater salinization through multivariate statistical analysis and hydrogeochemical facies evolution-diagram. *Science of the Total Environment* 862:160697
- shahnazari A, Ghorbani Z, Gholami Sefidkahi MA, Janatrostami S (2018) Simulation of groundwater from Qaemshahr- Juibar Catchment under performance of Alborz irrigation and drainage network. *Journal of Watershed Management Research* 9(17):246-257
- Shin K, Koh D-C, Jung H, Lee J (2020) The hydrogeochemical characteristics of groundwater subjected to seawater intrusion in the Archipelago, Korea. *Water* 12(6):1542
- Siddha S, Sahu P (2020) Status of seawater intrusion in coastal aquifer of Gujarat, India: a review. *SN Applied Sciences* 2:1726
- Singh A (2015) Managing the environmental problem of seawater intrusion in coastal aquifers through simulation–optimization modeling. *Ecological Indicators* 48:498-504
- Tabari MMR, Abyar M (2022) Development a novel integrated distributed multi-objective simulation-optimization model for coastal aquifers management using NSGA-II and GMS models. *Water Resources Management* 36:75–102
- Tomaszkiewicz M, Abou Najm M, El-Fadel M (2014) Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers. *Environmental Modelling & Software* 57:13-26
- Tziritis E, Sachsamanoğlu E, Aschonitis V (2023) Assessing groundwater evolution with a combined approach of hydrogeochemical modelling and data analysis: Application to the Rhodope Coastal Aquifer (NE Greece). *Water* 15(2):230
- Xiong G, Zhu X, Wu J, Liu M, Yang Y, Zeng X (2023) Seawater intrusion alters nitrogen cycling patterns through hydrodynamic behavior and biochemical reactions: Based on Bayesian isotope mixing model and microbial functional network. *Science of the Total Environment* 867:161368
- YariPilmaraei E, Shaeri Karimi S, Dadmehr R (2011) Reaction models of groundwater resource system in Zarineroud plain of the factor charging and discharging through irrigation and drainage network plain. Paper Presented at the 4th Conference of Iran Water Resource Management, Tehran, Iran (In Persian)