

## استفاده از مدل‌های آماری و هیدروشیمیایی در تحلیل کیفی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مهربان آذربایجان شرقی)

زهرا جوانمرد<sup>۱</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۲

<sup>۱</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup>- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Moghaddam@tabrizu.ac.ir

### چکیده

دشت مهربان در استان آذربایجان شرقی ایران، ۶۰ کیلومتری شرق تبریز، واقع شده است و منابع آب زیرزمینی تمامی آب شرب و قسمت عمده‌ای از آب مصرفی کشاورزی آن را تامین می‌کند. این منابع تحت تأثیر سازندهای زمین‌شناسی، تبخیر زیاد از آب زیرزمینی و تغذیه از رودخانه‌های شور و برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی با افزایش شدید مقدار شوری مواجه است. طوری که میزان هدایت الکتریکی در قسمت‌های غربی دشت مخصوصاً در روستای اربطان به ۹۸۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر نیز می‌رسد. بنابراین در مطالعه حاضر سعی شده است تا با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های هیدروشیمیایی منشأ شوری آب‌های زیرزمینی و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت منابع آب منطقه، تعیین گردد. بدین‌منظور ۲۲ نمونه آب از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق منطقه مورد مطالعه در مهرماه سال ۱۳۹۲ جمع‌آوری و در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز تجزیه گردید. وضعیت هیدروژئوشیمیایی این منابع با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت. براساس روش تحلیل عاملی، ۸۴/۸۵ درصد از تغییرات کیفی آب توسط سه گروه عاملی کنترل می‌شود. به منظور شناسایی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان، نمودارهای ترکیبی، نسبت‌های یونی و اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به شدت تحت تأثیر تغذیه از رودخانه، رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان و تبخیر از آب زیرزمینی قرار گرفته است. نتایج نمودارهای ترکیبی نشان داد که فرآیندهایی نظیر انحلال هالیت، ژپس، دولومیت و تبادل یونی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، اندیس اشباع، نسبت‌های یونی، هیدروشیمی

## Using Statistical and Hydrochemical Models for Qualitative Analysis of Groundwater Resources (Case Study: Mehraban plain, In East Azerbaijan)

Z Javanmard<sup>1</sup>, A Asghari Moghaddam<sup>2\*</sup>

Received: 28 September 2015 Accepted: 2 July 2016

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Dept. of Geology, Faculty of Natural Sci, Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Geology, Faculty of Natural Sci. Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: Moghaddam@tabrizu.ac.ir

### Abstract

Mehraban Plain is located in the East Azarbaijan province of Iran, 60 kilometers from east of Tabriz, where groundwater resources supply its entire drinking and most of agricultural water demands. These resources are highly saline due to the effect of salty geological formations, high evaporation from groundwater resources and recharge of saline water from rivers and high withdrawal from fresh groundwater. As a result, the electrical conductivity of groundwater in the western parts of the plain, especially in the Arbatan village, is reached to about  $9800 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ . So, it is tried to use statistical and hydrochemical methods to determine sources of groundwater salinity and the effect of geological formation on the water quality of the study area. In this research 22 water samples were collected from deep and shallow abstraction wells and were chemically analyzed in hydrology lab of the Tabriz University. Hydrochemical conditions of the resources were analyzed by multivariate statistical methods. According to the factor analyzing methods, 84.85 percent of chemical variations are controlled by three groups of factors. For identifying, governing geochemical processes in the aquifer composite diagrams, ions ratios and saturation index of calcite, dolomite and gypsum were evaluated. The results showed that the chemical compositions of groundwater were highly effected by recharge from the rivers, sediments of the aquifer and evaporation from the groundwater. The composite diagrams results showed that the processes such as halite, gypsum and dolomite solution and ion exchange phenomenon affect the groundwater chemical quality.

**Keywords:** Groundwater, Hydrochemistry, Ionic ratio, Saturation index

### مقدمه

دارد که شامل روش‌های گرافیکی (نمودار پایپر، استیف، انگشتی و نمودارهای ترکیبی) و روش‌های آماری (آمار توصیفی، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای) است. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای به روش‌های متنوعی صورت می‌گیرد که شامل (HCA)<sup>۱</sup>، (KMC)<sup>۲</sup> و (FKM)<sup>۳</sup> می‌باشد. از این روش‌ها در بررسی اطلاعات کیفی آب و تقسیم‌بندی نمونه‌ها به گروه‌های

ترکیب شیمیایی یون‌های محلول در آب متأثر از واکنش‌های مختلفی است که در تقابل بین آب و مواد آبخوان اتفاق می‌افتد. به‌کارگیری یک روش طبقه‌بندی مناسب برای تقسیم‌بندی نمونه‌های آب از نظر شیمیایی به گروه‌های مختلف مشابه، ابزاری کارآمد برای توصیف محیط‌های هیدرولوژیکی است. امروزه روش‌های متنوعی برای رده‌بندی نمودارهای هیدروشیمیایی وجود

<sup>3</sup>Fuzzy K-means clustering

<sup>1</sup>Q-mode hierarchical cluster analysis

<sup>2</sup>K-means clustering

استفاده از روش‌های آماری چند متغیره و معکوس و نیز با استفاده از مدل PHREEQC به تعیین عوامل اصلی و مکانیسم‌های کنترل‌کننده شیمی آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. تحلیل خوشه‌ای براساس یون‌های اصلی سه گروه آب را تعریف می‌کند، گروه اول دارای شوری کمتر (متوسط  $EC=937$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و ترتیب فراوانی یون‌ها  $Ca^{+2}>Na^{+}>Mg^{+2}>K^{+},HCO_3^{-}>Cl^{-}>SO_4^{-2}>NO_3^{-2}$  گروه‌های ۲ و ۳ شورتر می‌باشند و تغییر تیپ آب به سمت  $Cl-HCO_3-Ca$  و  $Cl-Ca-Na$  می‌باشد. عوامل مؤثر در تکامل هیدروشیمیایی عبارتند از: (۱) انحلال کانی‌های تبخیری (۲) ته نشین‌سست کانی‌های کربناتی، کوارتز، کائولینیت و اسمکتیت (۳) تعویض یونی.

دولتی و همکاران (۱۳۹۳)، برای بررسی فرآیندهای کنترل‌کننده و تعیین منشأ کاتیون‌ها و آنیون‌های آب زیرزمینی آبخوان زاهدان، با استفاده از روش تحلیل عاملی مشخص کردند که دو عامل اصلی طبیعی و انسانی در مهرماه، به ترتیب ۶۵/۲۵ و ۱۸/۵ درصد و در بهمن ماه ۵۸/۸۲ و ۱۵/۵۶ درصد تغییرات کیفی آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند. که عامل اول مرتبط با فرآیندهای تبادل یونی و انحلال است و عامل دوم به فعالیت انسانی بستگی دارد. همچنین شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، ژیپس و دولومیت حالت تحت اشباع دارد و این نشان‌دهنده کافی نبودن زمان ماندگاری آب در آبخوان برای انحلال کانی‌ها می‌باشد. هدف این مطالعه، تعیین منشأ شوری آب‌های زیرزمینی و ارتباط سازندهای زمین‌شناسی با کیفیت منابع آب منطقه دشت مهربان با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های هیدروشیمیایی می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

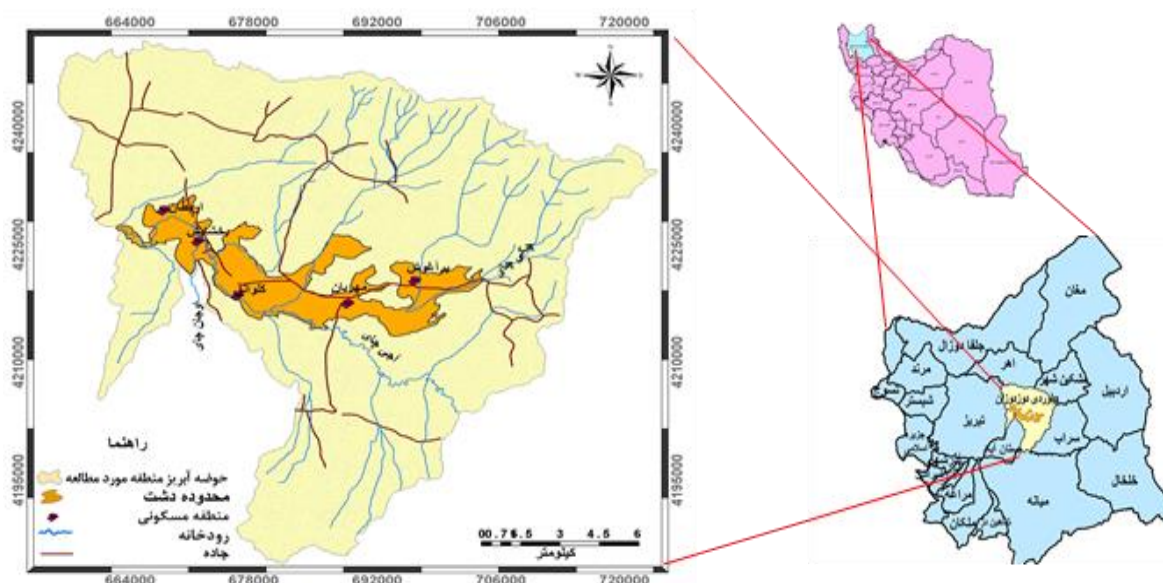
##### معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت مهربان، با مساحت ۲۱۹ کیلومتر مربع، در ۶۰ کیلومتری شرق تبریز و در مرکز

متمایزی که از نظر زمین‌شناسی و آماری معنی‌دار باشند استفاده می‌شود (استوسل ۱۹۹۷). اغلب روش‌های گرافیکی مورد استفاده محدودیت تعداد نمونه و پارامتر (T, pH, ...) را دارند. از طرفی هیچ یک از روش‌های گرافیکی قدرت تمایز بین گروه‌ها و آزمایش میزان شباهت بین گروه‌ها را ندارند. برخلاف روش‌های گرافیکی، روش‌های آماری قابلیت استفاده از تمامی پارامترها را دارا بوده و استفاده از روش‌های گرافیکی در مقایسه با روش‌های چند متغیره با مجموعه اطلاعات زیاد محدود می‌باشد و در این حالت، کارآمدترین روش گروه‌بندی برای درک و تفسیر شیمی نمونه‌های آب، روش خوشه‌بندی آماری است (گولر و همکاران ۲۰۰۲). در مطالعات متعددی استفاده از روش‌های تحلیل عاملی چندمتغیره همچون ضریب همبستگی، آمار توصیفی، تحلیل عاملی و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای مورد توجه بوده‌است (ادت و همکاران ۲۰۱۲). ضریب همبستگی یک ابزار مفید در تعیین درجه وابستگی و یا ارتباط خطی بین متغیرها می‌باشد (بو و همکاران ۲۰۱۰). تحلیل خوشه‌ای شامل تعدادی روش و الگوریتم‌های مختلف بوده که به منظور گروه‌بندی داده‌های آماری مشابه و قرارگیری آنها در گروه‌های مناسب به کار می‌رود که داده‌های متعلق به یک گروه دارای بیشترین درجه شباهت خواهند بود. تکنیک‌های خوشه‌بندی مختلفی وجود دارند که تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در علوم زمین است (تیلی‌زلی و همکاران ۲۰۱۲). روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی روشی مناسب برای تحلیل داده‌های نمونه‌های آبی هستند که برای ارزیابی داده‌های کیفی آب و امکان گروه‌بندی هیدروشیمیایی نمونه‌ها به کار برده می‌شوند و از نقطه نظر آماری در هیدرولوژی و زمین‌شناسی دارای اهمیت خاصی هستند (ژانگ و همکاران ۲۰۱۲). در این زمینه تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در ذیل به چند مورد از آنها اشاره می‌شود: لازهر و همکاران (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ای با

آجی‌چای، که از دامنه رشته کوه‌های سیلان، بزغوش و جنوب‌شرق سهند سرچشمه گرفته و به‌علت گذر از رسوب‌های نمک‌دار میوسن دارای مقادیر زیادی نمک به صورت محلول است و در نهایت پس از طی مسافت طولانی و دریافت شاخه‌های فرعی متعدد به دریاچه ارومیه می‌ریزد. این رودخانه از سمت جنوب‌شرقی وارد محدوده مورد مطالعه شده، در داخل محدوده در جهت جنوب‌شرقی - شمال‌غربی جریان یافته و از شمال‌غربی آن خارج می‌شود. در بخش غربی محدوده مورد مطالعه، جریان‌ات سطحی خروجی از دشت بستان‌آباد توسط رودخانه اوجان‌چای به آجی‌چای پیوسته و همراه با جریان آب آن، بعد از طی مسافتی در داخل محدوده مطالعاتی از آن خارج می‌شود. علاوه بر جریان‌ات سطحی ورودی به محدوده مطالعاتی توسط رودخانه‌های آجی‌چای و اوجان‌چای، آب سطحی در رودخانه‌های فرعی با جریان تقریباً دائمی و مسیل‌های فصلی متعدد جریان دارد (جوانمرد ۱۳۹۳).

استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این دشت بخشی از محدوده مطالعاتی بیلوردی - دوزدوزان به‌شمار می‌رود که از نظر تقسیمات هیدرولوژیکی، قسمتی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه و زیر حوضه رودخانه آجی‌چای محسوب می‌شود (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه منطقه مورد مطالعه دارای رقم ارتفاعی ۱۸۲۰ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه ۱۵۲۰ متر می‌باشد. این منطقه از نظر اقلیمی بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد می‌باشد. عوامل آب و هوایی شامل درجه حرارت، بارندگی، رطوبت نسبی هوا و تبخیر به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم بر کیفیت و کمیت منابع آب منطقه تأثیر می‌گذارند. براساس داده‌های هواشناسی موجود، برای یک دوره ۲۰ ساله، میانگین دمای سالانه و بارش این دشت به‌ترتیب ۸/۲۵ درجه سلسیوس و ۳۶۱/۴۲ میلی‌متر می‌باشد (۱۳۷۱-۱۳۹۱). متوسط رطوبت نسبی دشت مهربان ۶۲/۳ درصد و متوسط سالانه تبخیر از تشتک کلاس A ۸/۱۴۸۵ میلی‌متر گزارش شده است (جوانمرد ۱۳۹۳). رودخانه‌های مهم منطقه عبارتند از: رودخانه

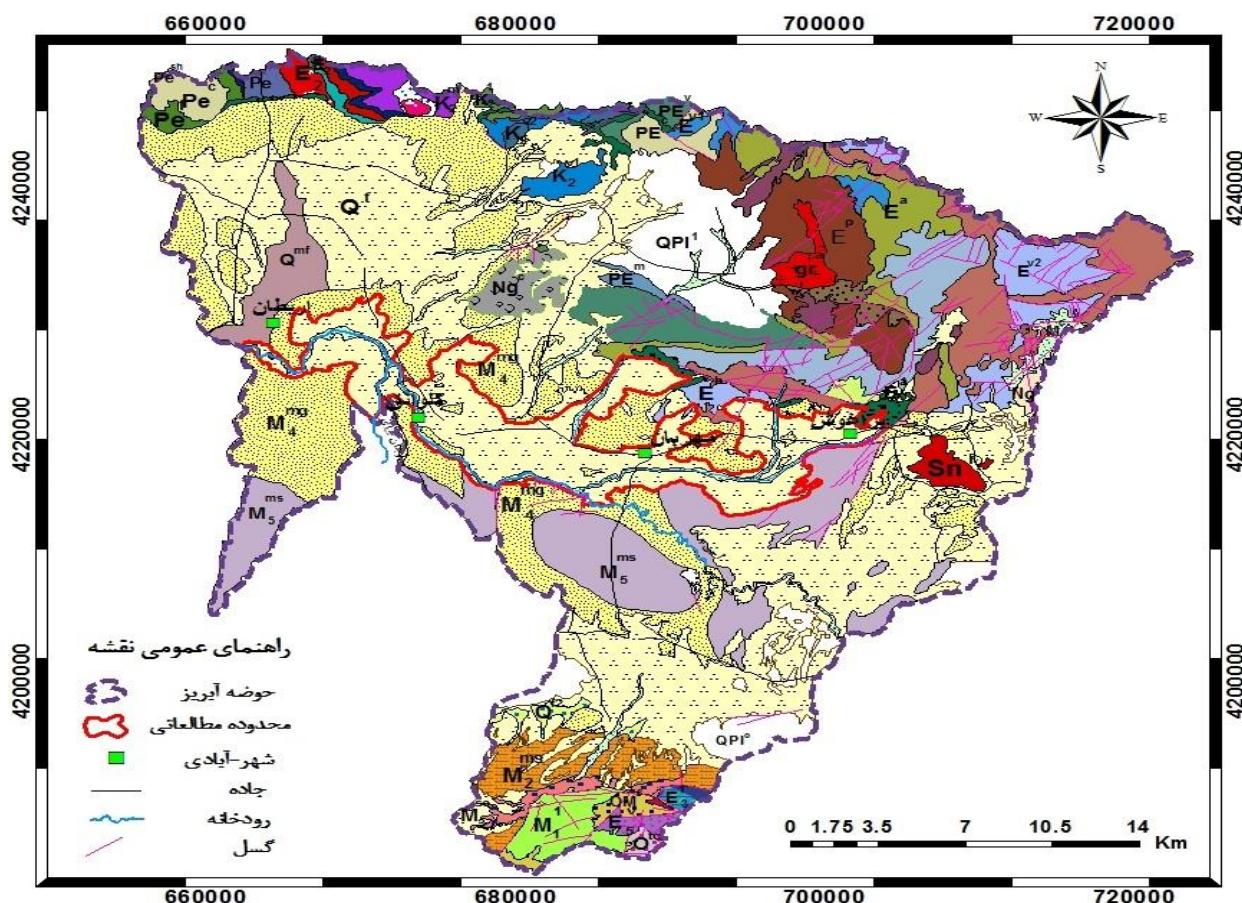


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه دشت مهربان در استان آذربایجان شرقی.

**زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی**

در حوضه آبریز بیلوردی- دوزدوزان، رسوباتی از دوره کرتاسه تا عهد حاضر دیده می‌شود ولی اصلی‌ترین سازندهای اطراف محدوده مورد مطالعه دشت مهربان، رسوبات مربوط به دوره میوسن شامل مارن‌های گچ‌دار و نمک‌دار، ماسه، سیلت- مارن، کنگلومرا و آهک می‌باشد که در نقشه زمین‌شناسی با علامت اختصاری  $M_5ms$  و  $M_4mg$  نشان داده شده‌اند (شکل ۲). در قسمت جنوبی مهربان، این نهشته‌ها را بصورت ناودیس بسیار بزرگی با محور شمال‌غربی-

جنوب‌شرقی می‌توان مشاهده نمود. هسته این ناودیس دارای تناوبی از مارن‌های سبز خاکستری و قرمز گچ‌دار و نمک‌دار و قسمت‌های بیرونی ناودیس دارای تناوبی از شیل، ماسه سنگ مارن با کنگلومرا می‌باشد. برون‌زد اصلی این واحد در کنار رودخانه آجی‌چای می‌باشد. در این واحد، لایه‌های قابل ملاحظه‌ای از گچ و نمک وجود دارد. وجود نمک در این واحد سبب شوری آب رودخانه آجی‌چای می‌شود و در مارن‌ها آثار نمک طعام به‌صورت سفیدک و به مقدار زیاد دیده می‌شود (شکل ۲).

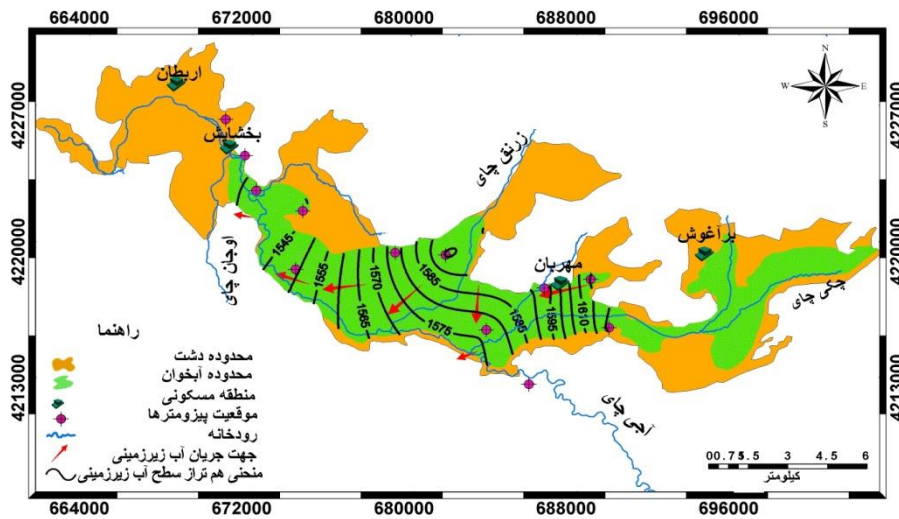




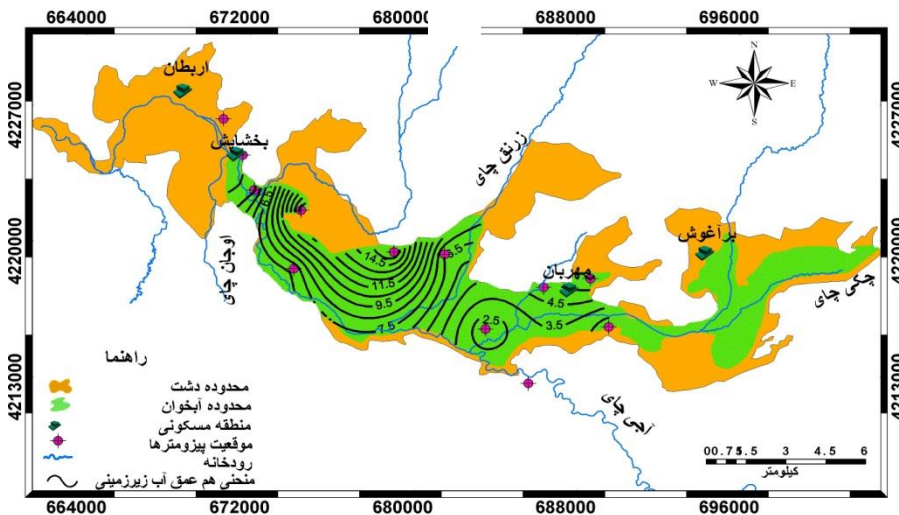
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز منطقه مورد مطالعه دشت مهربان.

بیشینه تراز آب زیرزمینی ۱۶۲۲/۱ متر در ورودی و کمینه آن ۱۵۳۵ متر در خروجی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مقدار ضریب قابلیت انتقال با توجه به لاگ چاه-ها و براساس دانه‌بندی رسوبات، از ۳۵ تا ۶۱۳ مترمربع در روز برآورد گردیده است و میزان ضریب ذخیره محاسبه شده به روش بیلان جزء به جزء برابر ۲/۸ درصد می‌باشد (علیزاده ۱۳۸۷). جهت جریان آب زیرزمینی از حاشیه شمالی و شرقی به طرف بخش مرکزی و جنوب غربی و رودخانه آجی‌چای است (شکل ۳). براساس منحنی‌های هم‌عمق، بیشترین عمق سطح آب زیرزمینی در حواشی شمالی آبخوان و کمترین عمق سطح آب زیرزمینی در بخش جنوبی و در اطراف رودخانه آجی-چای دیده می‌شود (شکل ۴).

براساس اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیک، لوگ حفاری چاه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی، آبخوان اصلی منطقه مورد مطالعه از نوع آزاد می‌باشد سفره آزاد در بیشتر موارد از پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جدید، مخروط افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل یافته و مواد اصلی تشکیل دهنده رسوبات شن، ماسه، سیلت و رس است. آبخوان از رسوبات آبرفتی ناشی از ته‌نشست‌های رودخانه آجی‌چای می‌باشد. سنگ کف آبخوان نیز از رسوبات گچی و نمکی مربوط به میوسن می‌باشد. آب زیرزمینی در بخش قابل توجهی از آبخوان این دشت در عمق کمتر از ۵ متری سطح زمین واقع شده است و بنابراین انتظار می‌رود بخش قابل توجهی از آب زیرزمینی این آبخوان از طریق تبخیر به هدر رود.



شکل ۳- نقشه جهت جریان آب زیرزمینی دشت مهربان در شهریور ۹۲.

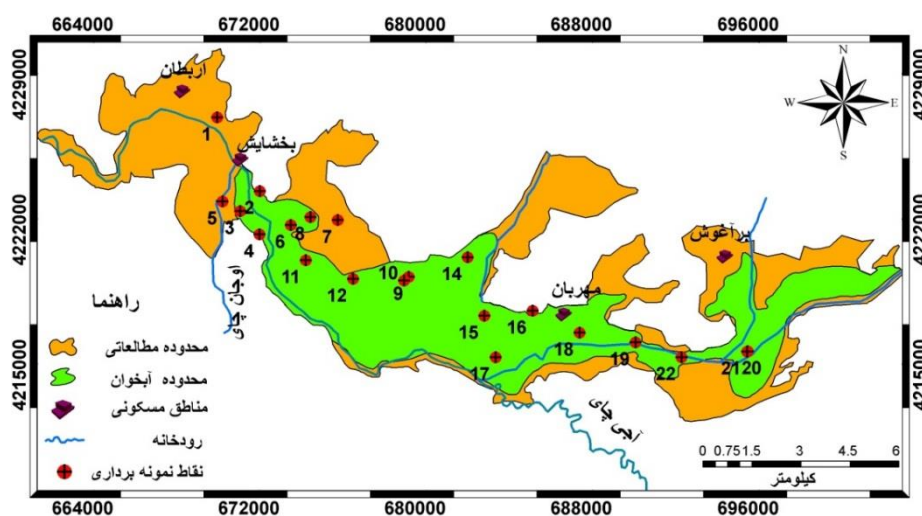


شکل ۴- نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی دشت مهربان در شهریور ماه ۹۲.

داده‌های مورد استفاده

در این بررسی علاوه بر جمع‌آوری اطلاعات قبلی منابع آب و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایران)، برای تکمیل مطالعات فیزیکوشیمیایی آب‌ها، ۲۲ نمونه از منابع آب منطقه با توزیع مناسب در مهر ۱۳۹۲ برداشت گردید که موقعیت آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. پارامترهای محیطی از قبیل هدایت الکتریکی (EC) و (pH)، علاوه بر محل نمونه‌برداری در آزمایشگاه نیز در ۲۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. سپس یون‌های اصلی این نمونه‌ها طبق روش‌های استاندارد در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز مورد تجزیه قرار گرفت.

برای کلیه نمونه‌ها تعادل یونی انجام گرفته و در نمونه‌هایی که خطای تعادل یونی بیش از ۵ درصد تجزیه شیمیایی نمونه بود تکرار گردید. بخش عمده آبخوان منطقه مورد مطالعه به‌علت توزیع وسیع سازندهای گچی و نمکی میوسن، از لحاظ کیفیت آب زیرزمینی دارای شوری بسیار بالایی است به‌طوری‌که در موقع نمونه‌برداری مشاهده گردید آب آشامیدنی بعضی از روستاها (روستاها اربطان و بخشایش) به‌روش ممبرانس شیرین می‌گردد. جدول ۱ ویژگی‌های آماری داده‌های حاصل از این تجزیه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- موقعیت نقاط نمونه‌برداری دشت مهربان در مهرماه ۹۲.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری داده‌های هیدروشیمیایی دشت مهربان در مهرماه ۱۳۹۲ (یونها به  $\text{meq L}^{-1}$ ) و هدایت الکتریکی به  $(\mu\text{mhos cm}^{-1})$  بیان شده است.

Ca	Mg	Na	K	$\text{HCO}_3$	Cl	$\text{SO}_4$	EC	pH	پارامترها
۷۲/۰۳	۱۹/۹۹	۴۷/۷	۳/۷۴	۸/۶۰	۶۳/۹۴	۴۲/۲۶	۹۸۰۰	۸	بیشینه
۷/۶۸	۰	۲/۵۲	۰/۰۷	۲/۶۰	۱/۸۰	۷/۲۰	۱۲۳۰	۷/۰۹	کمینه
۲۰/۳۷	۹/۱۵	۱۸/۲۰	۰/۳۸	۵/۴۹	۱۹/۹۲	۲۳/۳۱	۳۹۵۵/۴	۷/۴۶	میانگین
۲۸/۱۶	۷/۹۹	۱۲/۱۴	۰/۱۵	۵/۲۸	۱۱/۲۸	۲۳/۸۸	۳۳۳۰	۷/۵۲	میانه
۱۴/۵۱	۵/۳۶	۱۶/۰۳	۰/۷۷	۱/۴۳	۱۹/۸۸	۱۰/۹	۲۳۹۳/۱۶	۰/۲۷	انحراف معیار
۶۴/۳۵	۱۹/۹۹	۴۵/۱۸	۳/۶۸	۶/۰۰	۶۲/۱۳	۳۵/۰۵	۸۵۷۰	۰/۹۱	دامنه تغییرات

## روش‌شناسی

### تحلیل عاملی

مشاهده‌ای است که بر حسب چند کمیت اصلی تصادفی اما غیرمشاهده‌ای که عامل نامیده می‌شود، بیان می‌شود. تعدادی از متغیرها که بیشترین همبستگی را با یکدیگر دارند، عامل اصلی نامیده می‌شوند (سوک و لی ۱۹۹۹). در بررسی‌های هیدروژئوشیمی، نتایج تجزیه شیمیایی آب و داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی که تحت فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی موجود در سفره آبدار تغییر می‌کنند، به‌عنوان متغیرهای مشاهده‌ای در نظر گرفته شده‌اند. اولین گام در این روش تهیه یک ماتریس همبستگی از تمام متغیرهای بررسی شده است. اساس ماتریس همبستگی، ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد (رابطه ۱).

فرآیندهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی معمولاً پیچیده هستند و این پیچیدگی با توزیع‌های غیریکنواخت در بسیاری از اندازه‌گیری‌ها نمایان‌تر می‌شود. اندازه‌گیری‌های زمانی و مکانی فرآیندهای فیزیکی یا شیمیایی معمولاً نمی‌توانند به‌وضوح فرآیندهای اصلی حاکم را با کاهش داده‌ها و طبقه‌بندی، تفسیر یا آشکار کنند. تحلیل عاملی روش آماری چند متغیره‌ای است که هدف آن ساده کردن مجموعه‌های پیچیده و مختلفی است که بین متغیرهای مشاهده‌ای وجود دارد. تحلیل عاملی ارتباط بین واریانس-کوواریانس یک تعداد از متغیرهای کمی



$$r = \frac{\sum(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{(n-1)S_1S_2} \quad [1]$$

$X$  و  $Y$  مقادیر مربوط به هریک از متغیرها،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین ریاضی این متغیرها،  $n$  تعداد داده‌ها،  $S_1$  و  $S_2$  انحراف از معیار هریک از متغیرها می‌باشد. جدول ۲ همبستگی بین پارامترها را نشان می‌دهد. در مرحله بعد عوامل را از میان پارامترها پیدا کرده، از میان عوامل حاصل اولین عامل بیشترین واریانس را شامل می‌شود و به ترتیب عوامل بعدی

مقادیر کمتری از واریانس را نشان می‌دهند. ضرایب بالای (۱) تا (-۱) پارامترهای به دست آمده (مثبت یا منفی) که تشکیل دهنده هریک از عوامل هستند نشان‌دهنده تأثیر بالای آن متغیر (مثبت یا منفی) می‌باشد. همچنین می‌توان از چرخش عامل‌ها برای تفسیر ساده‌تر عوامل مؤثر ماتریس عامل‌های حاصل استفاده کرد، که به این وسیله ماتریس عامل‌ها به یک ساختار ساده ارتوگنال تبدیل می‌شوند (ندیری و همکاران ۱۳۸۹).

جدول ۲-ماتریس ضرایب همبستگی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه دشت مهربان.

	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	TDS	pH
Ca	۱								
Mg	۰/۴۸	۱							
Na	-۰/۰۱۳	۰/۱۴	۱						
K	-۰/۰۰۶	۰/۱۷	۰/۰۷۱	۱					
HCO <sub>3</sub>	-۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۱۷	۰/۵۶	۱				
Cl	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۷۰	-۰/۱۰	-۰/۱۸	۱			
SO <sub>4</sub>	۰/۷۴	۰/۶۲	۰/۲۰	۰/۰۷۲	۰/۰۶	۰/۳۹	۱		
TDS	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۶۴	-۰/۰۱۸	-۰/۰۹	۰/۹۵	۰/۶۱	۱	
pH	-۰/۳۸	-۰/۵۴	۰/۲۱	-۰/۴۰	-۰/۴۳	-۰/۰۳	-۰/۴۷	-۰/۱۴	۱

### تحلیل خوشه‌ای

روش تحلیل خوشه‌ای شامل چندین الگوریتم طبقه‌بندی شده متفاوت می‌باشد که هدف این الگوریتم‌ها اتصال متغیرها در داخل خوشه‌های بزرگتر می‌باشد. یک نمونه از این خوشه، مجموعه سه‌تایی است که نتایج را در داخل سه خوشه به هم متصل می‌کند. رابطه بین پارامترها در داخل شاخه‌های سه‌تایی ظاهر می‌شود. شباهت بین پارامتر نسبت عکس با فاصله بین آنها در روی نمودار دارد (گونزالز و ازکوئز و همکاران ۲۰۰۵). با توجه به اهمیت استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره و قابلیت‌های بالای آنها نسبت به روش‌های گرافیکی در حل پیچیدگی‌های مربوط به فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی، نیاز به استفاده از این روش‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود.

### نسبت‌های یونی

نسبت‌های یونی، معرف‌های مناسبی برای بررسی شیمی منابع آب زیرزمینی هستند و استفاده از

آنها روش مناسبی برای تعیین منشأ املاح است. در پیدایش ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، این نسبت‌ها متأثر از ترکیب شیمیایی کانی‌های محلول در آب بوده و مقدار کانی انحلال یافته در درجه بعدی اهمیت دارد (هاوارد و همکاران ۱۹۹۶). ریشتر و کرتلر (۱۹۸۶) نشان دادند که نسبت‌های Na/Cl و Br/Cl برای تفکیک شوری طبیعی ناشی از انحلال طبیعی هالیت، از آب‌های شور ژرف مفید هستند. گوگل (۱۹۸۱) در یک بررسی به این نتیجه رسید که در شوری حاصل از انحلال هالیت، نسبت Na/Cl بین ۰/۶۵ تا ۰/۶۷ متغیر است.

### نمودارهای ترکیبی

یکی از روش‌های تفسیر فرآیندهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، تعیین رابطه بین پارامترهای حاصل از تجزیه نمونه‌های آب از طریق رسم آنها بر روی نمودارهای دو متغیره‌ای است که به نمودارهای ترکیبی معروفند. با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرآیندهای مؤثر بر

جدول ۳- مقدار بار عامل‌ها بعد از چرخش Varimax.

متغیرها	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳
Ca	-۰/۲۴	۰/۸۸	-۰/۲۶
Mg	-۰/۲۵	۰/۷۰	۰/۳۳
Na	۰/۹۳	-۰/۱۸	۰/۱۳
K	-۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۷۶
Hco3	۰/۰۳	-۰/۰۵	۰/۹۳
Cl	۰/۸۹	۰/۳۳	-۰/۱۸
So4	-۰/۲۶	۰/۸۲	۰/۰۷
pH	-۰/۲۲	۰/۶۸	-۰/۵۲
EC	۰/۸۳	۰/۵۳۶	-۰/۰۸
درصد واریانس	۲۳/۰۸	۳۱/۷۰	۲۰/۰۶
درصد واریانس تجمعی	۲۳/۰۸	۶۴/۷۸	۸۴/۸۵

### نتایج و بحث

در بعضی از بخش‌های دشت مهربان، هدایت الکتریکی آب به ۹۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر رسیده است. شوری بالا می‌تواند به دلیل انحلال رسوبات گچی و نمکی میوسن، واکنش‌های آب و رسوب مانند پدیده تبادل کاتیونی، تبخیر از آب‌های زیرزمینی و آب‌های برگشتی کشاورزی باشد. در آبخوان دشت مهربان علاوه بر سنگ‌شناسی سازندهای اطراف آبخوان، تبخیر از آب زیرزمینی به دلیل بالا بودن سطح ایستابی در بخش قابل توجهی از آبخوان و اختلاط آب زیرزمینی با آب نفوذی از آبراهه‌ها نقش مهمی در شوری منابع آب زیرزمینی این دشت ایفا می‌کنند. البته با توجه به وجود کانی‌های رسی در ترکیب آبخوان، فرآیند تبادل کاتیونی نیز می‌تواند از جمله عوامل مؤثر در کیفیت آبخوان این دشت باشد. در این بررسی سعی بر آن شده که کیفیت آب زیرزمینی آبخوان موجود در دشت مهربان را، با استفاده از روش‌های آماری مانند تجزیه خوشه‌ای، تحلیل عاملی و ضرایب همبستگی و روش‌های هیدروشیمیایی مانند نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی و اندیس‌های اشباع، از لحاظ املاح محلول مورد ارزیابی قرار داده و عوامل مؤثر و کنترل‌کننده در

کیفیت آب زیرزمینی را تعیین کرد. کاربرد تکنیک‌های آماری چند متغیره به ما این امکان را می‌دهد تا منابعی را که ممکن است سیستم‌های آبی را تحت تأثیر قرار دهد شناسایی کرده، و ابزاری مناسب برای مدیریت صحیح منابع آب پیشنهاد کنیم (لن ونگ و همکاران ۲۰۱۰).

### شاخص اشباع

محاسبات تعادلی کانی‌ها برای آب زیرزمینی، در پیش‌بینی حضور کانی‌های واکنشی و برآورد میزان واکنش این کانی‌ها دارای اهمیت هستند (دئوچ ۱۹۹۷). چنانچه شاخص اشباع (SI) برای یک کانی بیشتر از صفر باشد، آب از این کانی فوق اشباع بوده و ممکن است در آن رسوب کند ولی اگر شاخص اشباع کمتر از صفر باشد، آب نسبت به این کانی تحت اشباع بوده و می‌تواند بیشتر از آن نیز انحلال یابد و چنانچه شاخص اشباع صفر باشد به این معنی است که محلول نسبت به کانی اشباع، و واکنش در حالت تعادل می‌باشد (راج موهان و الانگو ۲۰۰۴). از این رو شاخص اشباع کانی‌ها از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$SI = \text{Log}(IAP/k_s) \quad [2]$$

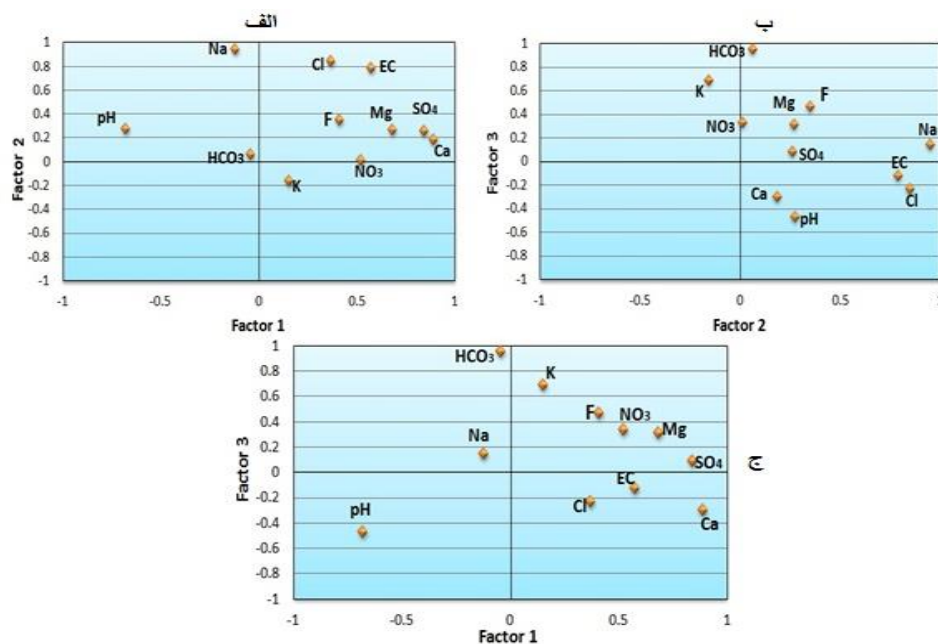
در این رابطه IAP، محصل فعالیت یونی و  $K_s$  ثابت انحلال‌پذیری کانی مورد نظر در حالت تعادل است. مقدار  $K_s$  از منابع مربوطه اخذ، و IAP با توجه به فعالیت شیمیایی کانی تجزیه شده محاسبه می‌شود و از نسبت این دو، اشباعیت کانی در آب زیرزمینی از رابطه ۲ به دست می‌آید. میزان شاخص اشباع کانی‌ها بسته به نوع مواد محلول، اسیدیته، دما و کل مواد جامد محلول متغیر است. در این مطالعه برای تعیین تعادل شیمیایی بین کانی‌های اصلی موجود در سازندهای زمین‌شناسی و آب زیرزمینی، از جمله، کلسیت، دولومیت، ژیپس، هالیت شاخص اشباع این کانی‌ها برای نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه شده است.

عبارتنداز: یون‌های سدیم، کلر و هدایت الکتریکی که مؤثرترین عامل بر تغییر کیفیت آب است و پارامترهای مؤثر در عامل دوم کلسیم، منیزیم، سولفات، اسیدیته که تأثیر آن منفی است و عامل سوم پتاسیم و بی‌کربنات می‌باشد. مشخصه‌های موجود در شاخص اول را، می‌توان به فرآیندهای شیمیایی انحلال هالیت و نفوذ آب‌های کلروره سدیک ناشی از رودخانه‌های عبوری از گنبد‌های نمکی نسبت داد. عامل دوم را می‌توان به تأثیر سازندهای تبخیری و گچی در آب زیرزمینی، انحلال سنگ‌های حاوی ترکیبات کلسیم و منیزیم‌دار و افزایش تبخیر سطحی نسبت داد، مقادیر بار عاملی منفی pH نشانگر افزایش انحلال‌پذیری عناصر به‌ویژه کاتیون‌ها با کاهش pH است. عامل سوم نشان‌دهنده تغذیه ناشی از آب‌های سطحی (رودخانه) و بارندگی در دشت می‌باشد و پتاسیم که می‌تواند در ارتباط با کانی‌های پتاسیم‌دار و همچنین فعالیت‌های کشاورزی باشد، همچنین برای نام‌گذاری و تعیین پارامترهای مؤثر در هر عامل، نمودار ضرایب عوامل دو به دو رسم گردید (شکل ۶).

افزایش مواد محلول و منشأ احتمالی آن‌ها را مورد شناسایی قرارگیرد.

### تحلیل عاملی

تحلیل عاملی بر اساس پارامترهای کیفیت، شامل غلظت یون‌های اصلی، هدایت الکتریکی و pH نشان داده شد. علاوه بر این عموماً در این روش مقادیر ویژه بالاتر از ۱ را به‌عنوان عوامل مؤثر بر سیستم در نظر می‌گیرند (اصغری مقدم و همکاران ۱۳۸۷). از میان عوامل حاصل اولین عامل بیشترین واریانس را شامل می‌شود و به‌ترتیب عوامل بعدی مقادیر کمتری از واریانس را نشان می‌دهند. از میان ضرایب هر عامل، ضرایب بالای ۰/۶ که به‌صورت پررنگ در جدول ۲ نشان داده شده‌اند، نشانگر پارامترهای مؤثر در آن عامل هستند. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که این عامل‌ها حدود ۸۴/۸۵٪ از کل میزان اشتراک را دربردارند، به طوری که از این مقدار ۳۳/۰۸٪ به وسیله عامل یک، ۳۱/۷۰٪ توسط عامل دو و ۲۰/۰۶٪ به وسیله عامل سه تبیین می‌شود (جدول ۳). مشخصه‌های مؤثر در عامل اول



شکل ۶- دیاگرام ضرایب عوامل مؤثر، الف (عامل‌های ۱ و ۲)، ب (عامل‌های ۲ و ۳)، ج (عامل‌های ۱ و ۲).

اسیدی بیشتر از محیط‌های بازی است. در عامل سوم بیکربنات بالاترین بار عاملی را نشان می‌دهد که نشان دهنده تغذیه ناشی از آب‌های سطحی (رودخانه) و بارندگی در ابتدای دشت می‌باشد (لاورنس و آپچرچ ۱۹۸۲) و پتاسیم که می‌تواند در ارتباط با کانی‌های پتاسیم‌دار و همچنین فعالیت‌های کشاورزی باشد. تجزیه خوشه‌ای

در این مطالعه از روش HCA برای گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی استفاده شده است. از ویژگی‌های مهم این روش ارائه نمودار تصویری درختی است. در روش HCA انتخاب تعداد خوشه‌ها به صورت خودکار صورت می‌گیرد، در صورتی که در روش‌های KMC و FKM تعداد خوشه‌ها باید از قبل مشخص شود. از مزایای دیگر روش HCA این است که در این روش یک نمونه به تنهایی می‌تواند تشکیل یک خوشه را بدهد. نمونه‌های آب زیرزمینی با استفاده از متد HCA و روش اتصال وارد گروه‌بندی شدند (گولر و همکاران ۲۰۰۲). پارامترهای مورد استفاده برای تقسیم‌بندی گروه‌ها، یون‌های اصلی و مجموع املاح است (کلیه پارامترها برحسب میلی‌گرم در لیتر هستند).

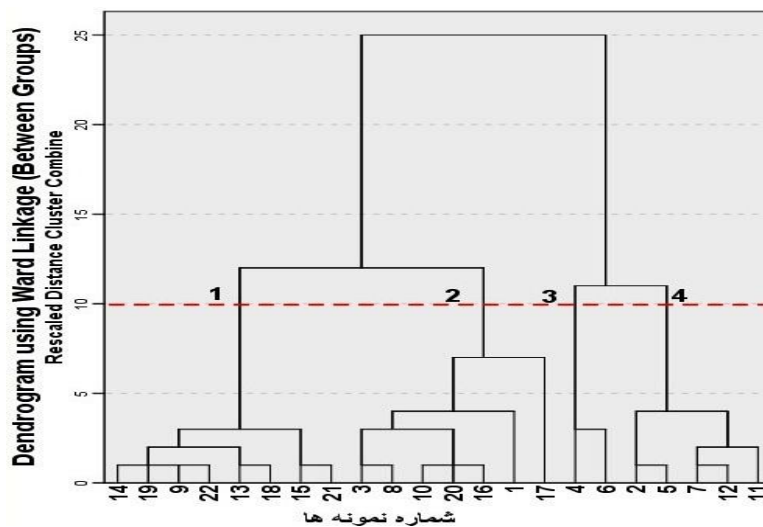
همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است مشخصه‌های مؤثر در عامل اول وجود یون‌های سدیم، کلر و هدایت الکتریکی است که مؤثرترین عامل بر تغییر کیفیت آب است و پارامترهای مؤثر عامل دوم کلسیم، منیزیم، سولفات، اسیدیت که تأثیر آن منفی است و عامل سوم پتاسیم و بی‌کربنات می‌باشد. مشخصه‌های موجود در شاخص اول را می‌توان به فرآیندهای شیمیایی انحلال‌هالیت و نفوذ آب‌های کلروره سدیک ناشی از رودخانه‌های عبوری از گنبد‌های نمکی و مجاورت منطقه با تشکیلات مارنی حاوی املاح شورکننده زیرزمینی نسبت داد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی در بخش‌های جنوبی دشت و مسیر عبوری رودخانه آجی‌چای، برون‌زد سازندهای میوسن و پلیوسن قابل مشاهده است، بنابراین عامل اول را با توجه به مشخصه‌های موجود در آن، می‌توان عامل شوری دشت خصوصاً در نیمه غربی، دانست. عامل دوم را می‌توان به تأثیر سازندهای تبخیری و گچی در آب زیرزمینی، انحلال سنگ‌های حاوی ترکیبات کلسیم و سولفات منیزیم‌دار و افزایش تبخیر سطحی نسبت داد، تأثیر منفی اسیدیت در این عامل بر این نکته اشاره دارد که سرعت هوازدگی این گونه کانی‌ها در محیط‌های

جدول ۴- میانگین ترکیب شیمیایی گروه‌های مختلف آب زیرزمینی دشت مهربان. واحدها به  $(\text{mg L}^{-1})$ .

نام گروه	TDS	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	K	Na	Mg	Ca
گروه اول	۸۶۰/۶	۱۳۸/۳	۶۴۷/۶	۳۰۷/۷	۵/۶۴	۱۳۵/۵	۶۷/۵	۲۲۶/۷
گروه دوم	۱۸۱۱	۱۴۵۴/۰	۴۲۱/۲	۴۰۶/۴	۳۴/۱۱	۳۵۷/۴	۱۴۱/۲	۴۳۱/۲
گروه سوم	۴۲۵۰	۱۹۲۸/۵	۱۸۸۸/۱	۲۰۱/۳	۷/۱۵	۳۰۷/۵	۱۷۴/۹	۱۱۹۴/۹
گروه چهارم	۳۰۸۹	۱۰۸۱/۴	۱۵۴۱/۵	۳۳۳/۳	۶/۹۲	۱۰۰۱/۷	۱۱۳/۵	۳۵۱/۵

تعداد خوشه‌ها (گروه‌ها) را کم و یا زیاد کرد. در جدول ۴ میانگین هریک از متغیرها در هرگروه مشخص شده است. با توجه به این جدول، غلظت یون‌های محلول در آب زیرزمینی از گروه اول به سمت گروه چهارم از روند منظمی پیروی نمی‌کند.

در شکل ۷ دندروگرام نمونه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. با توجه به شکل دندروگرام، تراکم گروه‌ها و ترکیب شیمیایی، نمونه‌های آب زیرزمینی به ۴ گروه تقسیم شده‌اند. البته لازم به یادآوری است که تعیین تعداد گروه‌ها به صورت قراردادی است و با توجه به مقیاس مطالعات می‌توان با جابه‌جا کردن خط تقسیم



شکل ۷- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای (HCA) نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه دشت مهربان.

نسبت‌های یونی و نمودار ترکیبی

برای بررسی منشأ مواد محلول در آب زیرزمینی و واکنش‌های موجود در آبخوان، از نسبت‌های یونی استفاده شده و این نسبت‌ها براساس منابعی مانند (هانسلو ۱۹۹۵) تفسیر شده‌اند. نسبت‌های یونی مختلفی برای نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه شده است. در جدول ۵ نتایج اولیه حاصل از تحلیل این نسبت‌های یونی ارائه شده است.

براساس این جداول عوامل مؤثر بر وضعیت

کیفی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه عبارتند از:

الف) انحلال کانی‌های سولفاتی

با توجه به نسبت یونی  $HCO_3/Sum\ Anions$ ، فرآیند انحلال ژپس یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی در گروه‌های اول تا چهارم می‌باشد. از طرفی میزان همبستگی معنی‌دار ( $R^2 = 0.7$ ) بین یون‌های کلسیم و سولفات نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲).

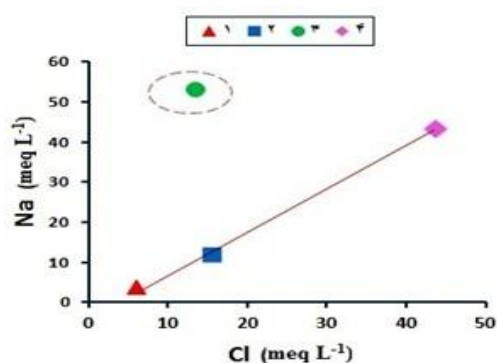
جدول ۵- تعیین سنگ منشأ از نسبت‌های یونی منطقه مورد مطالعه دشت مهربان.

نسبت‌های یونی	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴	منشأ سنگ
Na/Na + Cl	۰/۶	۰/۵۶	۰/۵	۰/۲	- تأمین سدیم از منبع دیگری غیر از هالیت - آلبیت، تبادل یونی - انحلال هالیت - تبادل یونی معکوس
Mg/Ca + Mg	۰/۳۴	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۳۲	- هوازگی سنگ آهک
Ca/Ca + SO <sub>4</sub>	۰/۴۳	۰/۵۹	۰/۴۱	۰/۴۵	- حذف کلسیم - تبادل یونی یا رسوب کلسیم - تأمین کلسیم از منبعی غیر از ژپس - کربنات‌ها یا سیلیکات‌ها در گروه ۲
Cl/Sum Anion	۰/۶	۰/۵۵	۰/۲۴	۰/۱۷	- هوازگی سنگ، یعنی کلراز سنگ‌های تبخیری منشأ نگرفته
HCO <sub>3</sub> /Sum Anion	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۲۲	- انحلال ژپس

## ج) انحلال هالیت

انحلال هالیت در آب، غلظتی مساوی از کلر و سدیم آزاد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود غلظت یون‌های کلر و سدیم برابری نشان نمی‌دهند و با توجه به شکل ۹ نسبت یک به یک غلظت کلر در مقابل سدیم که از انحلال هالیت پیش بینی می‌شود، دیده نمی‌شود و این نشان‌دهنده آن است که مقداری از یون سدیم با آنیون‌های دیگر جدا از کلر همبسته است. سدیم اضافی مستقل از سدیم کل است و بیان‌گر این است که در منطقه تغذیه مقداری از سدیم از تبادل کاتیونی در

کانی‌های رسی موجود در زمینه رسوبات منشأ می‌گیرد. منبع اصلی کلر در آب‌های زیرزمینی به‌طور عمده از سنگ‌های تبخیری، آب فسیل شور و خاک‌شویی لایه‌های فوقانی خاک در نواحی خشک است (باور ۱۹۷۸). منبع اصلی سدیم علاوه بر هالیت شامل؛ چشمه‌های داغ، شورابه‌ها، بعضی سیلیکات‌ها و کانی‌های کمیاب مثل  $\text{NaHCO}_3$  می‌باشند. سیلیکات‌های سدیک معمول شامل پلاژیوکلاز (آلبیت) و نفلین هستند. بیشتر سدیم از تبادل یونی نرمال حاصل می‌شود.



شکل ۹- نمودار سدیم در برابر کلر.

طی مسافتی طولانی از میان سازندهای نمکی و تبخیری کیفیت آن در بخشهای خروجی دشت بدتر شده است. (۲) تبادل یونی معکوس در اثر وجود کانی‌های رسی در منطقه. تقریباً تغییرات این دو یون از روند عمومی جریان آب زیرزمینی که در امتداد رودخانه آجی‌چای است تبعیت می‌کند. با توجه به نقشه هم ارزش کلر و سدیم (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، کمینه مقدار دو یون کلر و سدیم در منطقه تغذیه است. بیشترین مقدار این دو یون در غرب دشت و اطراف روستای بخشایش مشاهده می‌شود.

## د) تبادل یونی و تبادل یونی معکوس

این فرآیند در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونت موریلونیت براساس رابطه ۳ با کلسیم و منیزیم واکنش داده و سبب ورود سدیم به آب زیرزمینی می‌شوند (درور ۱۹۸۸):



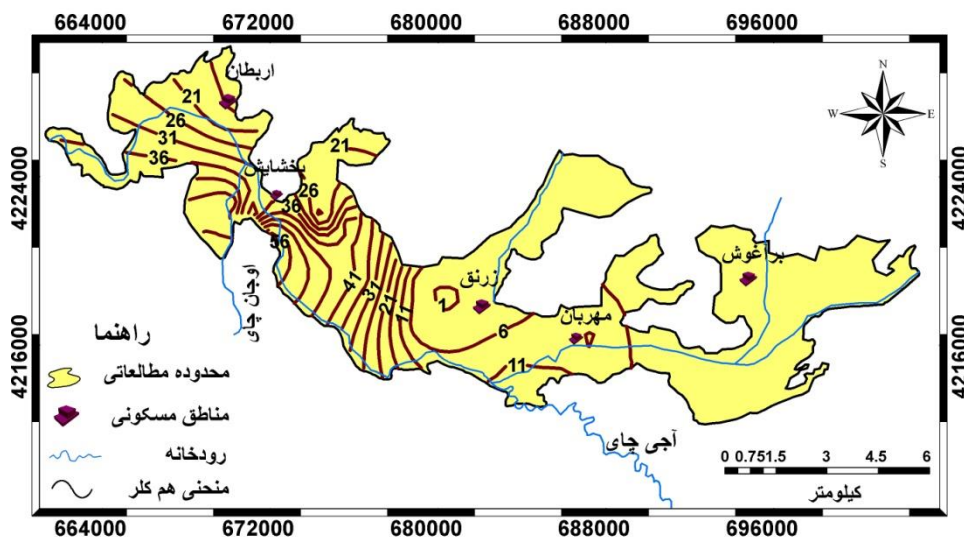
شکل ۸- مقایسه غلظت سدیم و کلر گروه‌ها.

بنابراین بر طبق شکل ۹، اگر  $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^- = 0)$  نشان‌دهنده هالیت،  $\text{Na}^+ < \text{Cl}^-$  (منفی)  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ، نشان‌دهنده کم‌شدگی معکوس، یا اشکال در تجزیه شیمیایی نمونه‌ها و اگر  $\text{Na}^+ > \text{Cl}^-$  (مثبت)  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ، نشان‌دهنده یک منشأ سدیم دیگر به غیر از هالیت، مثل آلبیت (پلاژیوکلازها) یا تبادل یونی طبیعی می‌باشد (هانسلو ۱۹۹۵).

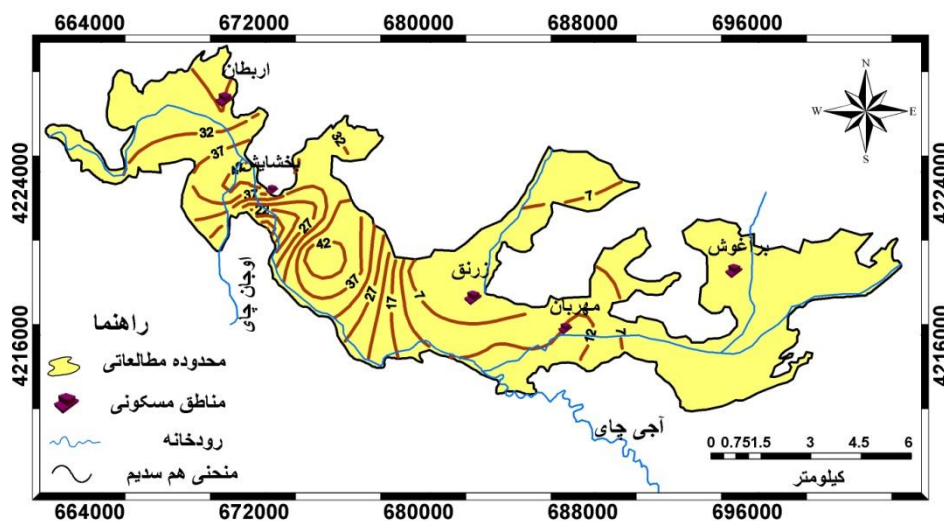
در دشت مورد مطالعه میزان سدیم در تمام گروه‌ها برابر یا بیش از کلر می‌باشد و تنها در گروه سوم میزان کلر به مقدار زیادی از سدیم بالاتر می‌باشد. همچنین در این گروه میزان سدیم نسبت به بقیه گروه‌ها کاهش نشان می‌دهد و منبع برای افزایش کلر و کاهش سدیم می‌توان معرفی کرد: (۱) افزایش کلر به علت مجاورت نمونه‌های گروه سوم با رودخانه شور آجی-چای و خصوصاً قسمت‌های انتهایی آجی‌چای که پس از

برای این دو یون است. نسبت یونی بزرگتر  $Na/Cl$  (نیز نشان‌دهنده منشأ دیگری افزون بر انحلال  $Ca^{2+} + Na_2 - Clay \leftrightarrow Ca - Clay + 2Na$  [۳] در رابطه بالا سدیم از روی رس به آب آزاد شده و کلسیم به جای سدیم روی رس قرار می‌گیرد. نبود غلظت‌های برابر کلر و سدیم در گروه سوم، نشان‌دهنده وجود تعویض یونی معکوس و یا منشأهای متفاوت

برای این دو یون است. نسبت یونی بزرگتر  $Na/Cl$  (نیز نشان‌دهنده منشأ دیگری افزون بر انحلال  $Ca^{2+} + Na_2 - Clay \leftrightarrow Ca - Clay + 2Na$  [۳] در رابطه بالا سدیم از روی رس به آب آزاد شده و کلسیم به جای سدیم روی رس قرار می‌گیرد. نبود غلظت‌های برابر کلر و سدیم در گروه سوم، نشان‌دهنده وجود تعویض یونی معکوس و یا منشأهای متفاوت



شکل ۱۰- تغییرات یون کلر دشت مهربان در مهرماه ۹۲.



شکل ۱۱- تغییرات یون سدیم دشت مهربان در مهرماه ۹۲.

آب زیرزمینی دشت مهربان نشان‌دهنده است. نمونه‌هایی که در بالای خط  $Na/Cl=1$  واقع شده‌اند، منشأ دوگانه دارند یعنی علاوه بر انحلال هالیت، ترکیب شیمیایی آنها، می‌توانند تحت تأثیر تبادل کاتیونی قرار گرفته باشند. لذا با توجه به این شکل، در بیشتر نمونه‌ها

جهت نمایش فرآیندهای تبادل یونی و تبادل یونی معکوس در آبخوان دشت مهربان، سه نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین متشکله‌های شیمیایی متأثر از فرآیند تبادل یونی تهیه گردیده‌اند. در شکل ۱۲-الف، نمودار  $Na/Cl$  در مقابل  $EC$  برای نمونه‌های

گرفته اند، در طول خط شیب ۱- قرار می‌گیرند (جانکووسکی و همکاران ۱۹۹۸). فقط در دو نمونه فرآیند تعویض یونی معکوس مشاهده می‌گردد.

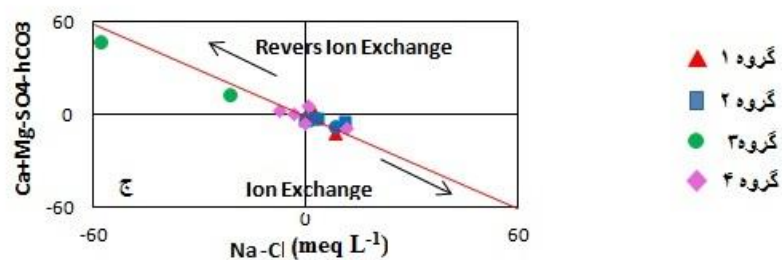
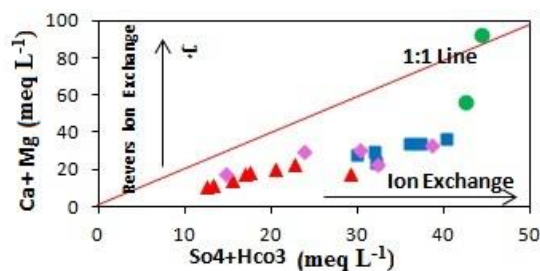
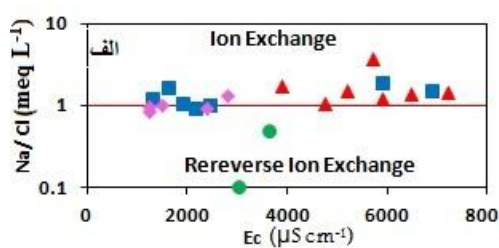
#### ه) دیگر فرآیندها

بر اساس نسبت یونی  $Cl/ \text{Sum Anions}$  همه نمونه‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر هوازدگی سنگ قرار گرفته‌اند، به عبارت دیگر واکنش متقابل بین آب زیرزمینی و مواد تشکیل‌دهنده آبخوان بیشترین تأثیر را بر کیفیت آب زیرزمینی گذاشته‌است.

#### نمودارهای ترکیبی

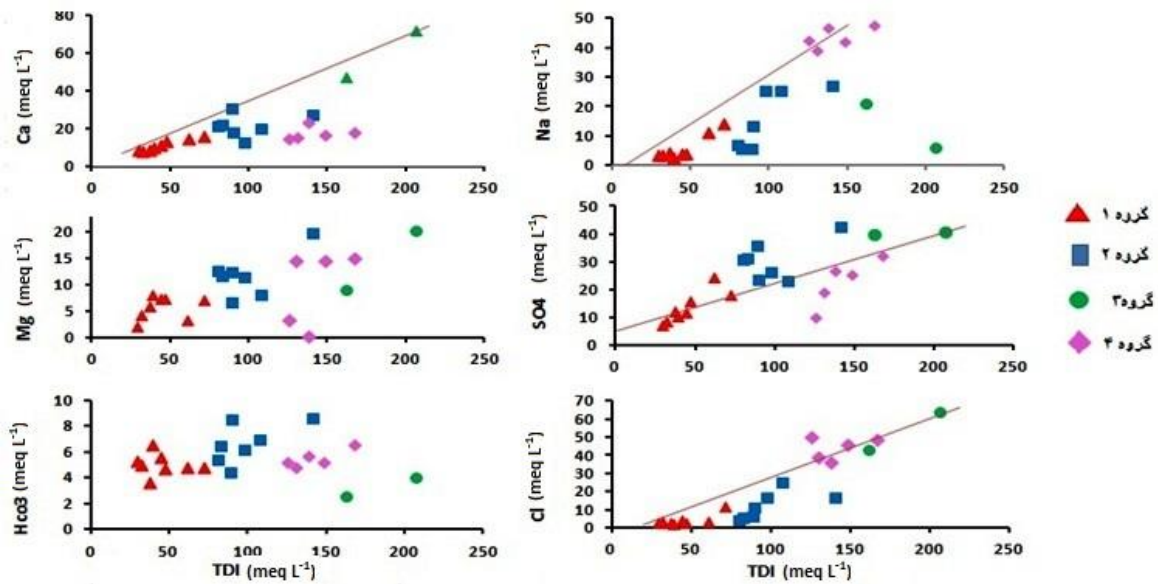
ترکیب شیمیایی منابع آب دشت مهربان در نمودارهای ترکیبی مختلفی رسم گردیده است. شکل ۱۳ نمودار دومتغیره کل یون‌های محلول (TDI) را در مقابل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، بیکربنات، سولفات را نشان می‌دهد. نتایج کلی که از نمودارهای شکل ۱۳ به دست آمده است عبارتند از: غلظت بی‌کربنات با افزایش TDI نسبتاً ثابت باقی مانده و تغییرات کمی دارد و این امر نشان‌دهنده آن است که به خاطر قابلیت انحلال بالای نمک، دیگر فرصتی برای انحلال بی‌کربنات نمی‌ماند. غلظت کلر و سدیم با افزایش TDI به صورت خطی افزایش می‌یابد شوری نمونه‌های آب می‌باشد.

پدیده تبادل کاتیونی دیده می‌شود. به جز گروه سوم که تعویض یونی معکوس را به وضوح نشان می‌دهد. در شکل ۱۲-ب نمودار دو متغیره  $Ca+Mg$  در مقابل  $HCO_3 + SO_4$  نشان‌دهنده فرآیندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس می‌باشد. نمونه‌هایی که در امتداد خط در مقادیر کمتر از  $5 \text{ meq L}^{-1}$  واقع شده باشند، نشان‌دهنده انحلال کلسیت و دولومیت می‌باشند و اگر بیشتر از این مقدار باشند انحلال ژپس و انیدریت فرایند غالب در ایجاد ترکیب شیمیایی می‌باشد. بیشتر نمونه‌های دشت مهربان زیر خط ۱:۱ و در بیشتر از  $10 \text{ meq L}^{-1}$  واقع شده‌اند که با توجه به زمین‌شناسی منطقه نشان‌دهنده تأثیر انحلال ژپس همزمان با پدیده تبادل کاتیونی در ترکیب شیمیایی آب دشت می‌باشد. شکل ۱۲-ج نمودار  $Na - Cl$  در مقابل  $Ca + Mg - HCO_3 - SO_4$  و رخداد فرآیند تبادل یونی را نشان داده‌است. در این نمودار نمونه‌هایی که نزدیک به مقدار صفر و روی محور افقی قرار دارند، تحت تأثیر تبادل یونی واقع نشده‌اند. علاوه بر آن اگر انحلال کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس به طور سازگار روی دهد و تبادل یونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار  $Ca+Mg - HCO_3 - SO_4$  نیز نزدیک به صفر خواهد شد. نمونه‌هایی که تحت تأثیر تبادل یونی قرار



شکل ۱۲- نمودارهای مرتبط با تبادل یونی در منطقه مورد مطالعه دشت مهربان.

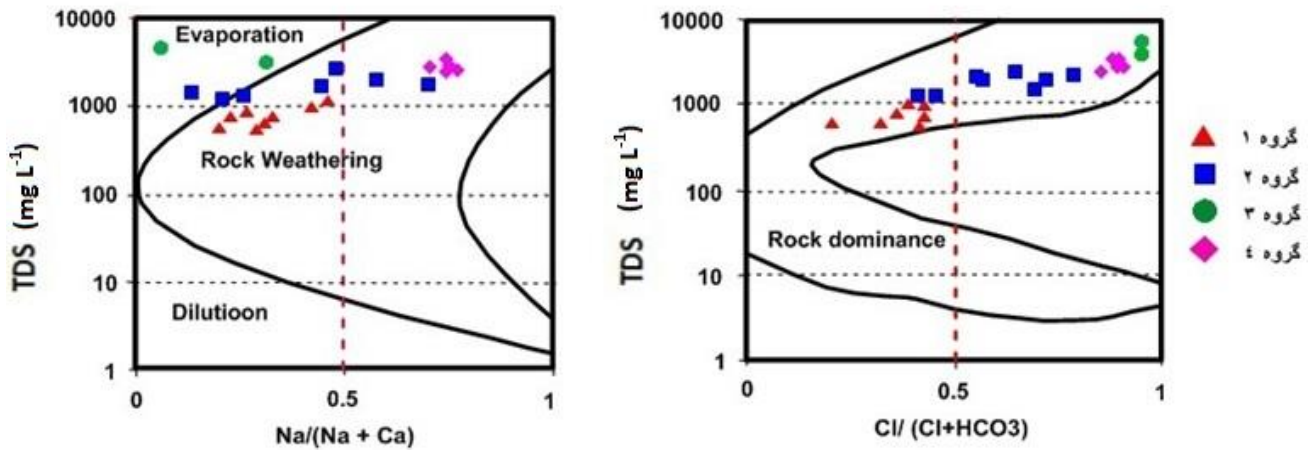




شکل ۱۳- نمودارهای ترکیبی نمونه‌های آب زیرزمینی (غلظت‌ها برحسب میلی‌اکی‌والان در لیتر).

فرآیند عمده کنترل کننده کیفیت شیمیایی، واکنش متقابل آب و سنگ می‌باشد و فقط نمونه‌های گروه ۳ تحت تأثیر فرآیند تبخیر بوده‌اند (شکل ۱۴).

جهت بررسی سازوکارهای کنترل کننده شیمی آب‌های زیرزمینی دشت مهربان و شناخت روند تکاملی آنها، نمودار گیبس برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تهیه شده‌است. بر اساس نمودار گیبس



شکل ۱۴- نمودار گیبس نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مهربان.

نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مهربان بوسیله کد کامپیوتری PHREEQC (پارخورس و اپلو ۱۹۹۹) محاسبه و در جدول ۶ ارائه گردیده است.

شاخص اشباع

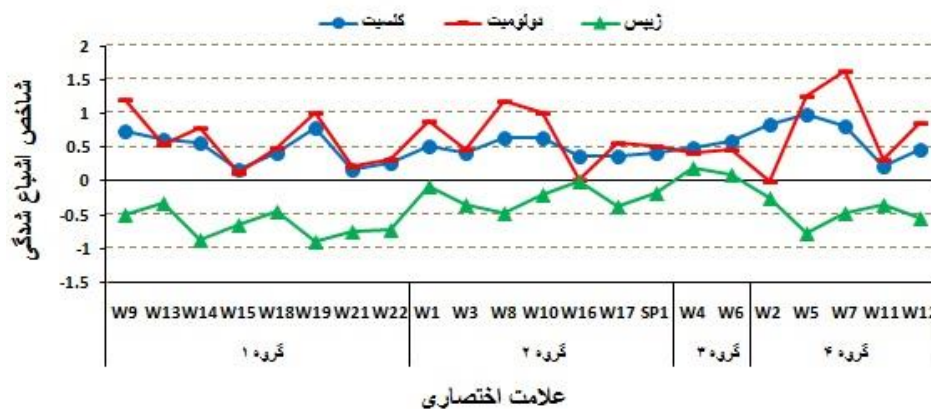
جهت بررسی تأثیر انحلال کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی منطقه، نمایه‌های اشباع این سه کانی بر اساس

جدول ۶- اندیس اشباع گروه‌ها نسبت به کلسیت، دولومیت و ژیپس در دشت مهربان.

گروه‌ها	شاخص اشباع ژیپس	شاخص اشباع دولومیت	شاخص اشباع کلسیت
گروه اول	-۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۴۷
گروه دوم	-۰/۲۳	۰/۶۶	۰/۴۷
گروه سوم	۰/۱۴	۰/۴۴	۰/۵۷
گروه چهارم	-۰/۴۷	۰/۸۱	۰/۶۶

نتایج نشان داد که به غیر از گروه سوم، تمام گروه‌ها نسبت به ژیپس، تحت اشباع می‌باشند و می‌توانند بیشتر از این هم در آب انحلال یابند. تمامی گروه‌ها نسبت به کلسیت فوق‌اشباع بوده و به جز دو نمونه که نسبت به دولومیت حالت اشباع دارند، مابقی نسبت به دولومیت فوق‌اشباع می‌باشند. شاخص اشباع برای دولومیت بیشتر از بقیه کانیها است. این عامل به دلیل حضور منیزیم و کلسیم در محیطی با

شرایط pH پایین است. بالا بودن اندیس اشباع دولومیت نسبت به کلسیت در بیشتر نمونه‌ها نشان از انحلال بیشتر کانی‌های دولومیتی نسبت به کلسیتی در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی دارد. در نتیجه، فرآیند مذکور را می‌توان به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر ترکیب آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه ذکر نمود (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- متوسط شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژیپس گروه‌های مختلف آب زیرزمینی در دشت مهربان.

تحقیقات رضایی (۱۳۹۰)، نشان داد که عوامل مؤثر در شوری آبخوان آبرفتی دشت مند در استان بوشهر، هدایت الکتریکی چاههای بهره‌برداری منطقه می‌باشد که بین ۱۷۲۷ تا بیشتر از ۶۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در تغییر است. همچنین عوامل دیگری مانند، سازندهای انحلال‌پذیر در اطراف دشت، وجود گنبد نمکی، نفوذ آب شور دریا، برگشت آب‌های مصرفی از جمله عوامل دیگری هستند که می‌توانند منجر به کاهش

کیفیت آب در این دشت شوند. در این مطالعه از روش‌های آماری چند متغیره در ارزیابی مشخصه‌های کیفی استفاده شد. نتایج نشان داد که رخساره هیدروشیمیایی غالب (Ca, Mg, SO<sub>4</sub>) در ۸۴ درصد از نمونه‌ها مشاهده شد. تحلیل خوشه‌ای منابع آب را در دو گروه مجزا قرار داد که منطبق بر زون‌های بهره‌برداری در آبخوان می‌باشد. همچنین در مطالعه دیگری به منظور شناسایی منشأ شوری آب‌های زیرزمینی، ۶۱ نمونه از چاه‌های

زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، واکنش بین آب و مواد تشکیل‌دهنده سفره آبدار، انحلال کانی‌های سولفات‌ها، ژیپس و کانی هالیت است. منشأ یون سدیم در آب زیرزمینی را افزون بر انحلال هالیت، می‌توان به فرآیندهای دیگری مانند تعویض یونی و هوازدهی پلاژیوکلازهای غنی از سدیم مانند آلپیت نسبت داد. با محاسبه شاخص‌های اشباع کانی‌های اصلی و تأثیرگذار، میزان انحلال کانیهای موجود در سازندهای زمین‌شناسی دشت مشخص شد. به‌غیر نمونه‌های W4 و W6 (گروه سوم) تمام گروه‌ها نسبت به ژیپس، تحت اشباع می‌باشند و می‌توانند بیشتر از این هم ژیپس در خود حل کنند. تمامی گروه‌ها نسبت به کلسیت فوق اشباع بوده و بجز دو نمونه که نسبت به دولومیت حالت اشباع دارند، مابقی نسبت به دولومیت فوق اشباع می‌باشند. شاخص اشباع برای دولومیت بیشتر از بقیه کانی‌ها است. این عامل به دلیل حضور منیزیم و کلسیم در محیطی با شرایط pH پایین است. در نتیجه، فرآیند مذکور را می‌توان به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر ترکیب آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه ذکر نمود. نتایج این تحقیق نشان داد، سازندهای زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را در هیدروژئوشیمی منطقه دارند.

منطقه سنجش شیمیایی شد. از نمودارهای ترکیبی، تحلیل آماری تحلیل عاملی و بررسی نمایه‌های اشباع، برای شناسایی منشأ شوری و تعیین فرآیندهای کنترل‌کننده هیدروژئوشیمیایی سفره آبدار استفاده شد. آب-های این دشت نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع و نسبت به ژیپس اشباع و در برخی موارد تحت اشباع هستند. این پژوهش‌ها نشان داد که انحلال ژیپس و انیدریت به صورت ناحیه‌ای و انحلال نمک به صورت محلی مهمترین عوامل شوری آب‌های زیرزمینی منطقه هستند (کلانتری و همکاران ۱۳۸۶).

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عاملی، تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت مهربان توسط ۳ عامل شامل: ۱- یون‌های سدیم، کلر و هدایت الکتریکی، ۲- کلسیم، منیزیم، سولفات و اسیدیت و ۳- سوم پتاسیم و بی‌کربنات کنترل می‌گردد. به‌طوری که از این مقدار ۲۳/۰۸٪ به‌وسیله عامل یک، ۳۱/۷۰٪ توسط عامل دو و ۲۰/۰۶٪ به‌وسیله عامل سه تبیین می‌شود. با توجه به روش‌های هیدروژئوشیمیایی مورد استفاده در این مقاله، مهم‌ترین عامل مؤثر بر کیفیت آب

### منابع مورد استفاده

- اصغری مقدم، ا.، ندیری ع و فیجانی، ا.، ۱۳۸۷. بررسی عوامل مؤثر بر هیدروژئوشیمی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره. صفحه‌های ۱ تا ۹، دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اهواز.
- جوانمرد ز، ۱۳۹۳. بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت مهربان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.
- دولتی ج، لشکری پورغ و حافظی مقدس ن، ۱۳۹۳. بررسی عوامل مؤثر بر هیدروژئوشیمی آبخوان زاهدان با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی، نمایه‌های اشباع و نمودارهای ترکیبی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۴، صفحه‌های ۶۹۴ تا ۶۷۹.
- رضایی م، ۱۳۹۰. مطالعه عوامل کنترل‌کننده شوری در آبخوان آبرفتی دشت مند، استان بوشهر. نشریه محیط‌شناسی، سال ۳۷، شماره ۵۸، صفحه‌های ۱۰۵ تا ۱۱۶.
- علیزاده ز، ۱۳۸۷. بررسی هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های دشت‌های بیلوردی دوزدوزان، پایان‌نامه کارشناسی دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.

کلانتری ن، رحیمی م.ح و چرچی ع، ۱۳۸۶. استفاده از نمودارهای ترکیبی، تحلیل عاملی و نمایه‌های اشیاع در ارزیابی کیفی آب زیرزمینی زویرچری و خران. مجله زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران، جلد ۲، شماره ۱، صفحه‌های ۳۳۹ تا ۳۵۶.

ندیری ع و اصغری مقدم، ۱۳۸۹. استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در مطالعه فرآیندهای هیدروشیمیایی آبخوان‌ها، مطالعه موردی: دشت تسوج. چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی، ۲۵ تا ۲۷ شهریور، دانشگاه ارومیه.

Bouwer H, 1978. Groundwater Hydrology. MC Graw-Hill Pub USA.

Bu H, Tan X, Li S and Zhang Q, 2010. Water quality assessment of the Jinshui River (China) using multivariate statistical techniques. Environmental Earth Sciences 60: 1631–1639.

Edet TN, Nganje AJ, ukpong A and Ekwere AS, 2012. Groundwater chemistry and quality of Nigeria: A status review. African Journal of Environmental Science and Technology 5(13): 1152-1169.

Deutsch WJ, 1997. Groundwater Geochemistry: Fundamental and Application to Contamination. CRC Lewis Publisher, New York 221p.

Derever JI, 1988. Geochemistry of Natural Waters. 3rd edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Company.

Gogel T, 1981. Discharge of salt water from Permian rocks to major stream-aquifer system in Central Kansas. Water Resources Investigation 81: 43-45.

Guler C, Thyne GD, McCray JE and Tumer AK, 2002. Evaluation of graphical and multivariate ststistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal 10: 455-474.

Gonzalez Vazquez JC, Grande JA, Barragan FJ, Ocana JA and De La Torre ML, 2005. Nitrate accumulation and other components of the groundwater in relation to cropping system in and aquifer in southwestern Spain. Water Resources Management 19: 1-22.

Howard FW Ken and Mullings E, 1996. Hydrochemical analysis of groundwater flow and saline intrusion in the Clarendon basin. Jamaica. GroundWater 34: 801-810.

Hounslow AW, 1995. Water Quality Data, Analysis and Interpretation, CRC Lewis Publisher, New York 397p.

Lawrence FW and Upchurch SB, 1982. Identification of water recharge areas using geochemical factor analysis, Groundwater 20(6): 680-687.

Lazhar B and Lotfi M, 2012. Hydrochemical analysis and evaluation of groundwater quality in EI Eulma area, Algeria, Applied Water Science 2: 127-133.

Wang L, Wang Y, Xu C, An Z and Wang S, 2010. Analysis and evaluation of the source of heavy metals in water of the River Changjiang. Environmental Monitoring and Assessment. DOI 10.1007/s 10661-010-1388-5.

Parkhurst DL and Appelo CAJ, 1999. User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water-Resources Investigations Report 99-4259.

Rajmohan N and Elango L, 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical process in the groundwater environment in an area of the PLe and Cheryyar River Basin, Southern India. Environmental Geology 46: 47-61.

Suk H and Lee K, 1999. Characterization of Groundwater Hydrochemical System Through Multivariate Analysis: Clustering into Groundwater Zones. GroundWater 37(3): 358-366.

Stossel RK, 1997. Delineating the chemical compositions of the salinity source for saline groundwater: An example from east-central Canadian Parish, Luisiana. GroundWater 35: 409-417.

Tlili-Zrelli B, Azaza FH, Gueddari M and Bouhlila R, 2012. Geochemistry and quality assessment of groundwater using graphical and multivariate statistical methods. A case study: Grombalia phreatic aquifer (Northeastern Tunisia). Arabian Journal of Geosciences 6: 3545-3561.

Zhang B, Song X, Zhang Y, Han D, Tang CH, Yu Y and Ma Y, 2012. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China. Water Research 46: 2737-2748.