

عوامل مؤثر بر خصوصیات هیدروشیمیایی آبخوان دشت مراغه- بناب

اصغر اصغری مقدم^۱، الهام فیجانی^{۲*}، امیر حسین ناظمی^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۳

۱- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Efigjani@ut.ac.ir

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی سیستم آب زیرزمینی دشت مراغه-بناب، آلودگی‌های موجود و عوامل مؤثر بر آن هست. بدین منظور از روش‌های گرافیکی و نیز شاخص کیفی آب استفاده شد. بر اساس دیاگرام پایپر، نمونه‌ها دارای سه تیپ بیکربنات کلسیم، کلرید سدیم و تیپی که در آن هیچ یونی غالب نیست، می‌باشند. بر اساس شاخص کیفی آب، منابع آبی منطقه روندی تکاملی دارند به طوری که فرآیند اختلاط بین آب‌های قرارگرفته در دسته عالی و ضعیف، باعث تنزل کیفیت آب از مناطق تغذیه به سمت مناطق انتهایی دشت شده است. با این وجود، بخش‌های کوچکی با شاخص کیفی ضعیف در جنوب دشت دیده می‌شود که تحت تأثیر پساب‌های آلوده قرار گرفته‌اند. کارخانه‌های صنعتی در شرق و بالادست این دشت واقع شده است، و در این تحقیق تأثیر پساب‌های صنعتی بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار هدایت الکتریکی در نمونه‌های پساب بسیار بالا هست و یون‌های کلرید، کلسیم و سدیم به ترتیب بیشترین مقادیر را دارا می‌باشند. غلظت این یون‌ها در چاه‌های واقع در نزدیکی پساب‌ها به طور غیرعادی افزایش یافته است. با توجه به نمودارهای استیف برای چند سال متوالی، خواص هیدروشیمیایی نمونه‌های این چاه‌ها با پساب‌ها همخوانی داشته و آلودگی‌های شدید ایجاد شده در دشت نتیجه تأثیر پساب‌های صنعتی بر آب زیرزمینی هست. همچنین با به‌کارگیری داده‌های هیدروشیمیایی و با استفاده از تحلیل آماری چند متغیره و روش تجزیه به عوامل، عوامل اصلی مؤثر بر هیدروشیمی منطقه به دست آمد. بر این اساس، مؤثرترین عامل تأثیر پساب‌های صنعتی است که اثرات سازنده‌های زمین‌شناسی یا روند کلی هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان دشت مراغه- بناب، تجزیه به عوامل، تحلیل آماری چند متغیره، شاخص کیفی آب

Effective Factors on Hydrochemical Characteristics of Maragheh-Bonab Plain Aquifer

Asghar Asghari Moghaddam¹, Elham Fijani^{2*}, Amir Hossein Nazemi³

Received: 28 April 2013

Accepted: 24 May 2015

¹- Prof., Department of Geology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²- Assist. Prof., School of Geology, University College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

³- Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: Efijani@ut.ac.ir

Abstract

The aim of this study is to assess the hydrochemical characteristics of the groundwater system of Maragheh-Bonab plain aquifer, its contamination and effective factors on it. For this purpose, graphical methods and also water quality index (WQI) are used. The study area contains three major groundwater types, namely Ca-Mg-HCO₃, Na-Cl, and non-dominant water types based on Piper diagram. Considering the water quality index, there is an evolutionary trend in the water resources in the study area, such that the mixing process of the excellent and poor classes' waters has caused degradation of water quality from recharge to discharge areas. However, there are some areas in the south of the plain with poor WQI which are affected by polluted wastewater. Industrial factories are located in the recharge area, and in this research, the effect of industrial wastewater on the quality of groundwater has been considered. The electric conductivity of wastewater is very high and based on hydrochemical analysis; the most important ions in wastewater are Cl⁻, Ca²⁺, and Na⁺, respectively. The concentration of these ions has unusually increased in samples taken from wells located near the wastewater site. Noting the stiff diagrams for several successive years, hydrochemical properties of these samples are the same as industrial wastewaters and the chemical anomalies created in the plain are resulted from wastewater recharge into groundwater resources. Furthermore, the main factors were determined that affect hydrochemistry of water resources in the study area using multivariate statistical analysis and Factor Analysis. Therefore, the most effective factor in hydrochemistry of the study area is the pollutant industrial wastewater that overshadowed the influence of geological formations and general sequence of groundwater hydrochemistry.

Keywords: Factor analysis, Maragheh-Bonab plain aquifer, Multivariate statistical analysis, Water quality index

این منابع علاوه بر آلودگی‌های مصنوعی (حاصل فعالیت‌های انسانی) می‌توانند آلودگی‌هایی با منشأ طبیعی نیز داشته باشد. آب‌های زیرزمینی از طریق فرایندهای طبیعی مانند شستشوی خاک و اختلاط با منابع آب زیرزمینی آلوده و یا از طریق فعالیت‌های

مقدمه

در سال‌های اخیر، به‌علت مواجهه جهانی با کمبود منابع آبی، مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین موضوع بسیاری از تحقیقات هیدرولوژیکی را به‌خود اختصاص داده است.

بررسی اثرات این فاجعه زیست‌محیطی در منطقه مراغه- بناب هست. با توجه به اهمیت موضوع کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی، هدف از مطالعه حاضر بررسی خصوصیات کیفی آب زیرزمینی، تعیین فرایندهای هیدروشیمیایی و تکامل آب زیرزمینی، تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر هیدروشیمی منطقه، تعیین شاخص کیفی آب جهت ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی و نهایتاً بررسی عوامل مؤثر بر هیدروشیمی منطقه با استفاده از روش تجزیه به عوامل هست.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعاتی

دشت مراغه- بناب در جنوب استان آذربایجان شرقی واقع شده است. مهم‌ترین شهرهای آن مراغه و بناب هست. وسعت کل محدوده بیش از ۱۰۰۰ کیلومترمربع است که حدود ۳۳۰ کیلومترمربع آن را دشت و پهنه‌های آبرفتی تشکیل می‌دهد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. صوفی چای، مهم‌ترین رودخانه این محدوده هست که از ارتفاعات جنوبی کوه‌های سهند سرچشمه می‌گیرد و تا بخش‌های میانی دشت جهتی شمالی- جنوبی داشته و در ادامه تا دریاچه ارومیه در امتداد شرقی- غربی هست (شکل ۱). اقلیم محدوده مطالعاتی مراغه- بناب در سیستم طبقه‌بندی آمبرژه از نوع نیمه‌خشک سرد هست. میانگین بارندگی سالانه در دشت و بخش کوهستانی مراغه- بناب به ترتیب ۲۸۱/۳ و ۳۶۸ میلی‌متر و میانگین بارندگی در محدوده مطالعاتی مراغه- بناب حدود ۳۴۶/۲ میلی‌متر در سال است.

بخش قابل‌توجهی از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در حوضه آبریز رودخانه صوفی چای از مخزن سد علویان تأمین می‌شود. سد علویان بر روی رودخانه صوفی چای در ۲/۵ کیلومتری شمال غربی شهر مراغه احداث شده است. سالانه معادل ۱۱۶/۷۰ میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی و ۴۱/۷۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی جهت تأمین نیازهای بخش کشاورزی تخصیص می‌یابد. همچنین مهم‌ترین منبع تأمین نیاز بخش شرب در منطقه، سد علویان

انسانی از قبیل دفع مواد زائد، استخراج معادن و فعالیت‌های کشاورزی در معرض آلودگی قرار می‌گیرند. آب‌های زیرزمینی در دشت مراغه- بناب برای مصارف مختلف شرب، کشاورزی و صنعت کاربرد داشته و از این نظر برای مردم محلی منطقه نقش حیاتی دارد. ارزیابی و مدیریت منابع آب زیرزمینی نیاز به شناخت خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی آبخوان دارد (عمر و همکاران ۲۰۰۱)، که این خصوصیات تشکیل آب زیرزمینی، کمیت و کیفیت آن را کنترل می‌کند (فریز و چری ۱۹۷۹؛ حسین و همکاران ۲۰۱۰). یکی از مهم‌ترین عواملی که سهم بسزایی در آلودگی منابع آب زیرزمینی دارد دفع پساب‌های صنعتی از طریق حوضچه‌های سطحی است (یانگ ۱۹۹۸). دفع غیراصولی پساب‌های صنعتی علاوه بر آلودگی آب‌های زیرزمینی تبعات زیست‌محیطی دیگری از جمله آلودگی آب‌های سطحی، تغییر هدایت هیدرولیکی آبخوان، فرونشست زمین، زلزله و آلودگی منابع معدنی را نیز در پی خواهد داشت (سلیمان و همکاران ۱۹۹۸). موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.

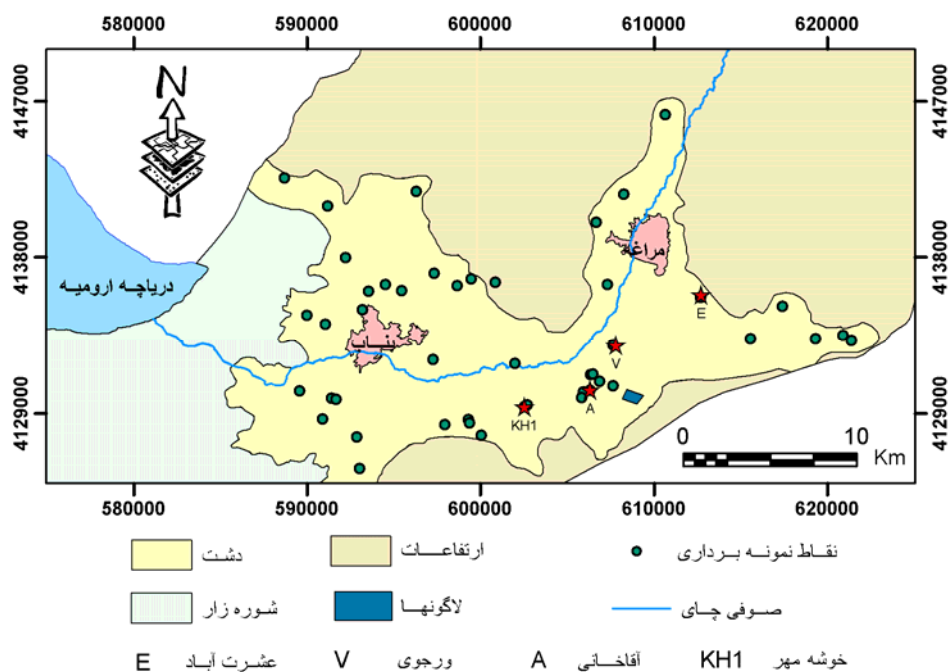
شاخص کیفی آب (WQI) ابزاری مناسب جهت تعیین کیفیت آب زیرزمینی است (تیواری و میشر ۱۹۸۵، سینگ ۱۹۹۲، سوبارائو ۱۹۹۷، میشر و پتل ۲۰۰۱). شاخص کیفی آب اولین بار در دهه ۱۹۷۰ توسط دپارتمان کیفیت محیطی ارگون در ایالات متحده جهت ارزیابی کیفی آب توسعه یافت (دانت ۱۹۷۹، راجانکار و همکاران ۲۰۱۱). جهت بررسی عوامل مؤثر در کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه، علاوه بر به‌کارگیری روش‌های نموداری، روش‌های آماری چند متغیره نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

موضوع تأثیر پساب‌های شهرک صنعتی مراغه بر آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت مراغه- بناب که باعث خشک شدن باغات کشاورزان شهرستان بناب شده است و همچنین سلامتی آنان را به خطر انداخته از سال‌های پیش مطرح بوده و یکی از اهداف این مقاله،

در سال از مخزن سد علویان برداشت می‌شود. بنابراین، در مجموع حدود ۴/۲ میلیون مترمکعب در بخش صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. پساب برخی از این کارخانه‌ها به‌طور پیوسته وارد حوضچه‌های سطحی می‌شود.

به‌منظور بررسی هیدروشیمیایی منطقه، علاوه بر داده‌های موجود، تعداد ۱۲۰ نمونه از منابع آبی منطقه در دو نوبت خرداد و شهریور ۱۳۸۹ برداشت و تحلیل شد.

هست. در محدوده مطالعاتی مراغه- بناپ بخش‌های صنعتی قابل‌توجهی وجود دارد از جمله شهرک‌های صنعتی مراغه و بناپ که شامل واحدهای صنعتی شیمیایی، غذایی، نساجی و... می‌باشند. صنایع موجود در این منطقه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی جهت تأمین نیاز آبی خود استفاده می‌نمایند و بر اساس آمار اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای مقدار برداشت آب از چاه‌هایی که مصارف صنعتی دارند حدود ۱ میلیون مترمکعب در سال هست و حدود ۳/۲ میلیون مترمکعب



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه.

که آبدهی خوبی دارد. از میان سازندهای سخت اطراف دشت مراغه- بناپ که عمدتاً ارتفاعات را تشکیل می‌دهند سازندهای آهکی پریمین در شمال منطقه آبدهی خوبی دارد. سازندهای متعلق به ژوراسیک پایینی و بالایی از آبدهی متوسطی برخوردارند. سازند مراغه که وسعت زیادی از محدوده مورد مطالعه را در بر گرفته است از نفوذپذیری کمی برخوردار است و منابع آبی ذخیره‌شده در آن به آبخوان آبرفتی تغذیه می‌شود. سایر سازندها که از وسعت زیادی نیز برخوردار نمی‌باشند، آبدهی ضعیفی دارند.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه

دشت مراغه- بناپ از نظر ساختمانی جزء زون البرز-آذربایجان محسوب می‌شود. در محدوده مطالعاتی، سازندهای پرکامبرین تا کواترنری همراه با تعدادی وقفه چینه‌شناسی رخنمون دارند و زمین‌شناسی منطقه عمدتاً شامل سازندهای ژوراسیک، کرتاسه و سنوزوئیک است (بی‌نام ۱۳۵۷). از نقطه‌نظر هیدروژئولوژیکی، سازندهای آبدار منطقه شامل رسوبات کواترنری که بیشتر دشت مراغه- بناپ را دربر گرفته‌اند و آبخوان آبرفتی و آزاد تشکیل داده‌اند

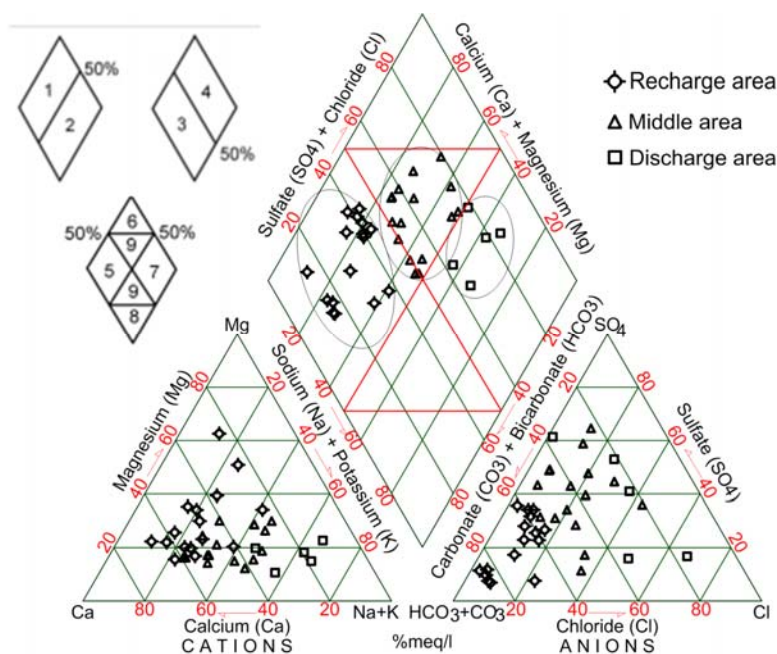
دشت حدود ۹۰۰ مترمربع بر روز و کمترین مقدار آن مربوط به حاشیه دشت و برابر ۲۵ مترمربع بر روز هست (بی‌نام ۱۳۸۱).

نتایج و بحث

تیپ آب زیرزمینی

جهت تعیین تیپ آب زیرزمینی از دیاگرام پایپر استفاده شده است. شکل ۲ دیاگرام پایپر را برای نمونه-های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، آب آبخوان در نمونه‌های مربوط به منطقه تغذیه از نوع بی‌کربنات کلسیم است که در زون ۵ دیاگرام پایپر قرار می‌گیرند. تیپ کلرید سدیم در بخش‌های غربی آبخوان و کناره‌های دریاچه ارومیه علاوه بر اینکه به دلیل وجود شوره‌زارهای دریاچه هست، نشانگر محل‌های خروجی آب زیرزمینی نیز هست (زون ۷). ترکیب شیمیایی آب در این زون به ترکیب آب دریا متمایل می‌شود. نمونه‌های قرار گرفته در قسمت‌های میانی دشت در زون ۹ دیاگرام پایپر قرار می‌گیرند در این ناحیه هیچ آنیون و کاتیونی غالب نیست و اختلاط آب‌ها صورت گرفته است.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد آبخوان دشت مراغه- بناب در رسوبات کواترنری تشکیل شده است. این آبخوان از شهر مراغه شروع شده و تا شوره-زارهای حاشیه دریاچه ارومیه (غرب شهر بناب) ادامه دارد. حد غربی آبخوان رسوبات ریزدانه دریاچه‌ای هست. ته‌نشست‌های ریزدانه به وجود آمده که تراوایی بسیار کمی دارند را می‌توان به صورت مانعی در برابر ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان و دریاچه دانست. بر اساس اطلاعات موجود از نتایج بررسی‌های ژئوفیزیک، نتایج حفاری چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای، این آبخوان از نوع آزاد و تک لایه است. در مناطق عمیق دشت تشکیلات اصلی مقاوم (آتشفشانی) معرف سنگ کف هستند که بر روی آن رسوبات آبرفتی با ضخامت متغیر ۳۰ تا ۷۰ متر انباشته است (بی‌نام ۱۳۸۷). جهت کلی جریان آب زیرزمینی در این دشت از شمال شرق به سمت جنوب غرب و غرب به سمت دریاچه ارومیه هست. بر اساس آزمایش پمپاژ انجام گرفته در دشت، بیشترین مقدار قابلیت انتقال با میزان ۲۵۰۰ مترمربع در روز در ناحیه مرکزی دشت و منطبق بر امتداد صوفی چای است. مقدار قابلیت انتقال در ناحیه جنوب غربی



شکل ۲. دیاگرام پایپر نمونه‌های آب منطقه مطالعاتی.

آلودگی‌های ناشی از پساب‌های صنعتی در دشت

در محدوده مطالعاتی مراغه- بناب بخش‌های صنعتی قابل‌توجهی وجود دارد از جمله شهرک‌های صنعتی مراغه و بناب که شامل واحدهای صنعتی شیمیایی، غذایی، نساجی و... می‌باشند. صنایع موجود در این منطقه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی جهت تأمین نیاز آبی خود استفاده می‌نمایند. پساب برخی از این کارخانه‌ها به‌طور پیوسته وارد حوضچه‌های سطحی می‌شود. بخش عمده‌ای از پساب‌های ذخیره‌شده در حوضچه‌های واقع در شرق دشت مربوط به کارخانه کاوه سودا هست (محمودی ۱۳۸۶). شرکت کاوه سودا یکی از واحدهای گروه صنعتی شیشه کاوه واقع در شهرستان مراغه، تولیدکننده کربنات سدیم سبک و سنگین، بزرگ‌ترین تولیدکننده کربنات سدیم در ایران هست. مخزن فاضلاب این واحد صنعتی در مراحل احداث، بهره‌برداری و نگهداری فاقد استانداردهای زیست‌محیطی است، ضمن اینکه تأسیسات کارخانه نیز از استحکام کافی برخوردار نیست و با ادامه فعالیت آن خطرات مختلف بهداشتی

مردم و اراضی زراعی منطقه را تهدید می‌کند. این حوضچه‌ها خاکی بوده و هیچ‌گونه عایقی جهت جلوگیری از نفوذ آب آلوده به داخل زمین به‌کار نرفته است. سرریز حوضچه‌ها به یک زهکش منتقل می‌شود که در طول مسیر در دشت تخلیه می‌شود. پساب ناشی از فرایند تولید کربنات سدیم که به‌صورت مایع هست و شوری بسیار بالایی دارد، با نیت تبخیر در حوضچه‌هایی جمع‌آوری گردید، اما به‌دلیل پایین بودن درجه حرارت و وجود سرما در منطقه و محدودیت روزهای زیاد از لحاظ تابش نور خورشید عملاً بحث تبخیر با شکست مواجه شد.

علاوه بر نفوذ زیرزمینی پساب‌های صنعتی، شکسته شدن لاگون‌های کارخانه کاوه سودا چندین مرتبه باعث جاری شدن سیل مهیبی شده که ضمن از بین بردن بسیاری از باغ‌ها، زمین‌های زراعی و چاه‌های کشاورزی، حجم زیادی پساب وارد سفره‌های آب زیرزمینی شده و منابع آبی پائین‌دست منطقه تحت تأثیر این سیل قرار گرفته است (شکل ۳).



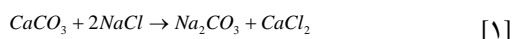
شکل ۳. تصاویر مربوط به سیل ناشی از پساب‌های آلوده.

پساب از نظر ترکیب شیمیایی همانند دریاچه هست، و خطری متوجه آن نمی‌شود. متداول‌ترین روش تولید کربنات سدیم، از طریق فرایند سلوی (Solvay) انجام می‌گیرد که طی آن نمک معمولی (کلرید سدیم) و سنگ آهک به‌عنوان مواد اولیه به‌کاربرده می‌شود (سوادل،

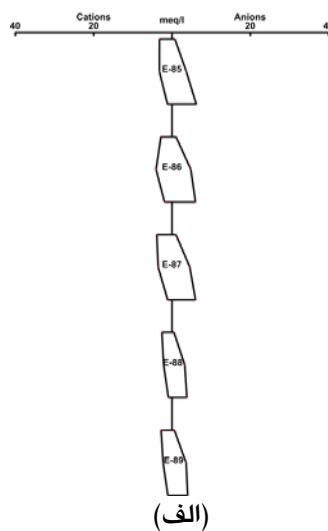
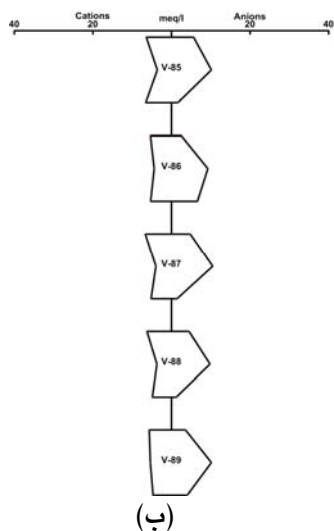
مقرر شده است پساب این کارخانه از طریق لوله‌گذاری به دریاچه ارومیه تخلیه شود. اعتراضاتی برای ریختن پساب این کارخانه به دریاچه ارومیه وارد شده است، درحالی‌که هدایت الکتریکی آب دریاچه ارومیه (۳۰۰ گرم بر لیتر) دو برابر پساب بوده و این

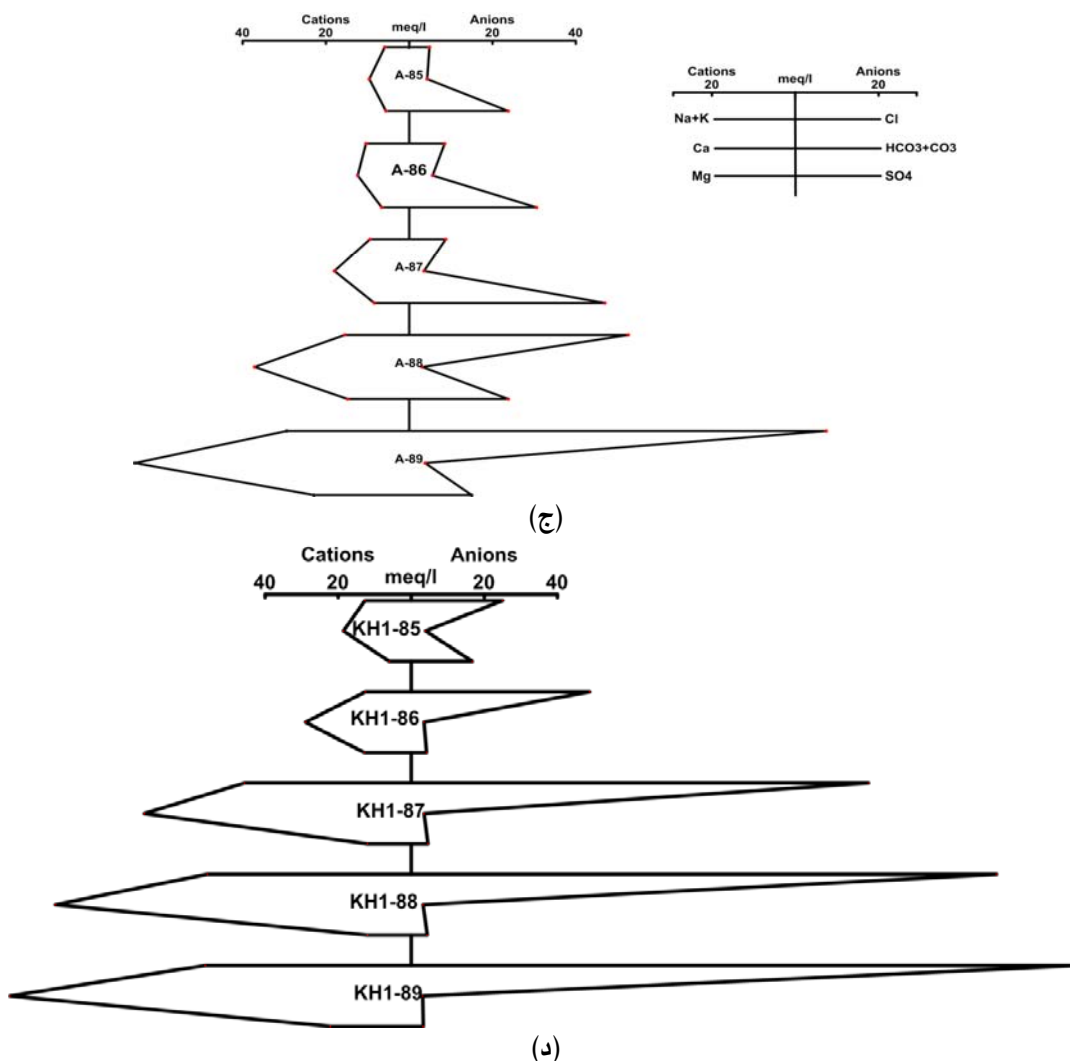
و سدیم به ترتیب بیشترین مقادیر را دارا می‌باشند. به منظور بررسی تأثیر پساب بر پائین دست دشت از نمودار استیف استفاده شده است. جهت نیل به این هدف، دو نمونه از بالادست حوضچه‌های حاوی پساب (چاه روستاهای عشرت‌آباد و ورجوی) و دو نمونه که در نزدیکی پائین دست کارخانه قرار گرفته‌اند (چاه شرب شماره ۱ خوشه مهر و چاه آقای آقاخانی در روستای خانقاه) انتخاب شده (محل نمونه‌های انتخابی در شکل ۱ مشخص شده است) و نمودار استیف برای سال‌های متوالی از ۸۵ تا ۸۹ رسم شده است (شکل ۴). با توجه به نمودار استیف نمونه‌های چاه روستاهای عشرت‌آباد و ورجوی، شکل کلی و ترکیب شیمیایی آن‌ها نشان می‌دهد که آب زیرزمینی در این بخش‌ها از کیفیت خوبی برخوردار است و در طول چند سال متوالی روندی متعارف دارد. نمودار استیف نمونه‌های ۳ و ۴ که از نزدیکی کارخانه و پساب‌های صنعتی در شرق دشت برداشت شده، یون‌های کلر، کلسیم، و نیز سدیم در این نمونه‌ها مشابه نمونه پساب بسیار بالاست و افزایش غیرعادی این یون‌ها بر اختلاط حجم بسیار زیادی پساب با آب زیرزمینی دلالت می‌نماید.

۱۹۹۷). آمونیاک در فرایند وارد شده ولی مصرف نمی‌شود و فقط مقدار کمی از آن از بین می‌رود. به عبارت دیگر جزء مواد اولیه محسوب نمی‌شود. واکنش کلی فرایند به صورت زیر است:



این واکنش مستقیماً انجام نمی‌شود بلکه طی مراحل مختلف صورت می‌گیرد (آتمر ۱۹۷۸). حجم بسیار زیادی پساب شامل مواد جامد معلق و محلول در یک کارخانه سودا-آمونیاک تولید می‌شود. در فرایند تولید یک تن کربنات سدیم (خاکستر سودا) تقریباً ده مترمکعب پساب تولید می‌شود که شامل یک تن کلرید کلسیم، نیم تن کلرید سدیم و سایر ناخالصی‌های محلول و نامحلول هست. پس از ته‌نشین شدن مواد جامد معلق در حوضچه‌های بزرگ، پساب حاصل حاوی کلسیم و کلر بسیار بالا هست. وجود حوضچه‌های آلوده وسیع در قسمت شرقی دشت مانند یک دریاچه شور در منطقه تغذیه عمل کرده و منشأ آنومالی‌های موجود در این قسمت هست. مقدار هدایت الکتریکی در نمونه‌های پساب بسیار بالا (در حدود ۱۵۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) هست و یون‌های کلر، کلسیم،





شکل ۴. نمودار استیف نمونه‌های انتخابی برای ۵ سال متوالی از ۸۹-۱۳۸۵، الف و ب- چاه‌های روستای عشرت‌آباد و ورجوی در بالادست پساب، ج و د- چاه‌های روستای خانقاه (آقاخانی)، و شرب شماره ۱ خوشه مهر در پایین‌دست پساب.

شاخص کیفی آب

شود. سپس، وزن نسبی (W_i) با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad [2]$$

به طوری که n تعداد پارامترهاست. جدول ۱ وزن‌ها را برای هر پارامتر نشان می‌دهد.

(۲) محاسبه نرخ کیفی (q_i) برای هر پارامتر به صورت نسبتی از غلظت آن به مقدار

شاخص کیفی آب یکی از مؤثرترین ابزارهای موجود جهت به دست آوردن اطلاعات جامعی از کیفیت آب زیرزمینی است (سوبارائو ۱۹۹۷، میشرا و پتل ۲۰۰۱، نیک و پوراهیت ۲۰۰۱). محاسبه شاخص کیفی آب شامل سه مرحله زیر است (تیواری و میشرا ۱۹۸۵، سینگ ۱۹۹۲):

(۱) در مرحله اول، به هریک از پارامترها با توجه به اهمیت نسبی آن‌ها در کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب، وزنی (W_i) اختصاص داده می-

در آب شرب بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی است (سینگ ۱۹۹۲).

۳) محاسبه شاخص کیفی آب با استفاده از فرمول زیر:

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i q_i \quad [4]$$

شاخص کیفی آب به ۵ دسته تقسیم می‌شود (جدول ۲).

استاندارد بر اساس بی‌نام (۲۰۰۹) با استفاده از فرمول زیر:

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad [3]$$

به طوری که C_i غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونه آب برحسب میلی‌گرم بر لیتر و S_i مقدار استاندارد آن

جدول ۱. وزن‌های پارامترهای مختلف در محاسبه شاخص کیفی آب.

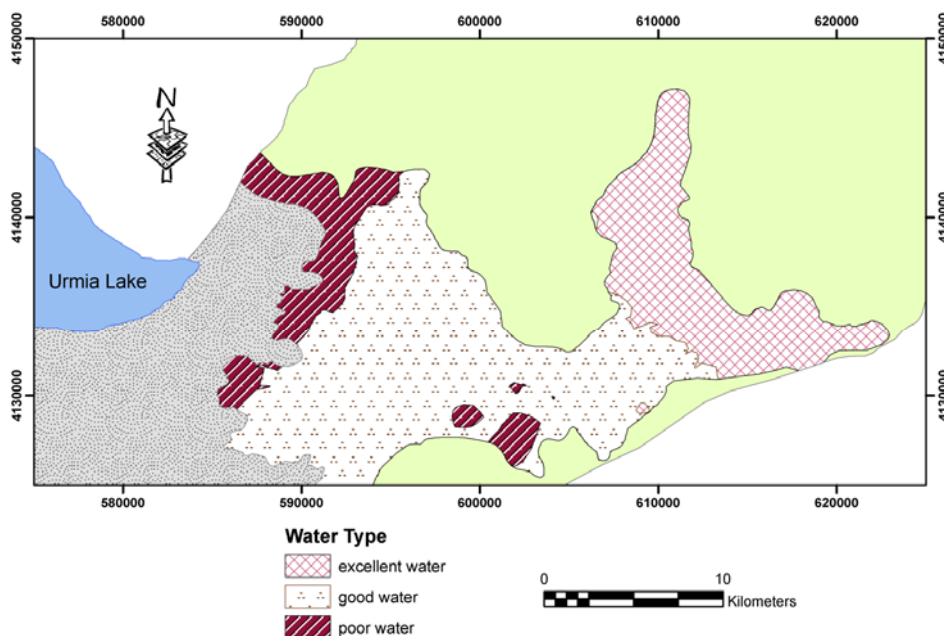
پارامتر	w_i	W_i
TDS	۴	۰/۱۳۳
pH	۴	۰/۱۳۳
سدیم	۳	۰/۱
بیکربنات	۳	۰/۱
کلرید	۳	۰/۱
سولفات	۴	۰/۱۳۳
نترات	۵	۰/۱۶۷
کلسیم	۲	۰/۰۶۷
منیزیم	۲	۰/۰۶۷
مجموع	۳۰	۱

جدول ۲. تقسیم‌بندی آب‌ها بر اساس شاخص کیفی (سینگ ۱۹۹۲).

دسته	WQI
آب عالی	<۵۰
آب خوب	۵۰-۱۰۰
آب ضعیف	۱۰۰-۲۰۰
آب خیلی ضعیف	۲۰۰-۳۰۰
نامناسب برای آشامیدن	>۳۰۰

های قرار گرفته در دسته عالی و ضعیف در بخش‌های میانی باعث تنزل کیفیت آب از مناطق تغذیه (با شاخص کیفی عالی) به سمت مناطق انتهایی دشت (با شاخص کیفی ضعیف) شده است. با این وجود، بخش‌های کوچکی با شاخص کیفی ضعیف در جنوب دشت دیده می‌شود که این بخش‌ها تحت تأثیر پساب‌های آلوده قرار گرفته‌اند.

در منطقه مورد مطالعه، مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص کیفی آب از ۲۵/۵۴ تا ۱۹۴/۳۵ هست. ۲۲ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی در دسته عالی (۸۶ کیلومتر مربع)، حدود ۵۸ درصد در دسته خوب (۲۰۰ کیلومتر مربع) و ۲۰ درصد آن‌ها در دسته ضعیف (۴۵ کیلومتر مربع) قرار گرفته‌اند. توزیع مکانی این دسته‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ روند تکاملی آب را نشان می‌دهد به طوری که فرآیند اختلاط بین آب-



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی انواع آب بر اساس شاخص کیفی در منطقه مطالعاتی.

تجزیه به عوامل

به منظور بررسی هیدروژئوشیمی دشت مراغه و عوامل مؤثر بر آن، نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی ۲۸۷ نمونه از منابع آب، شامل ۸ یون و مقادیر اسیدیته، هدایت الکتریکی، درصد سدیم، نسبت جذب سدیم، سختی کل استفاده شده است (جدول ۳). اولین مرحله در این روش استاندارد کردن پارامترها است که برای تمام پارامترها صورت گرفت. این کار به منظور غلبه بر مشکل متفاوت بودن واحدهای متغیرها هست. مرحله بعدی، به دست آوردن عوامل از پارامترهای مورد استفاده است. این عوامل ترکیب خطی ساده از پارامترها می‌باشند. سپس برای انجام تجزیه از میان روش‌های مختلف روش اجزای اصلی مورد استفاده قرار گرفت. به‌طور کلی می‌توان مراحل مختلف این روش را در مراحل زیر خلاصه نمود:

۱- محاسبه خصوصیات آماری داده‌ها و به دنبال آن محاسبه ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی: هدف از این مرحله بررسی چگونگی همبستگی متغیرها و خصوصیات آماری داده‌هاست به طوری که روش تجزیه به عامل فقط برای متغیرهایی که بین آن‌ها ارتباط وجود داشته

باشد، قابل تعریف است. جدول ۴ ماتریس همبستگی متغیرها را نشان می‌دهد.

۲- محاسبه مقادیر ویژه، واریانس، درصد واریانس و واریانس تجمعی: این مقادیر به منظور بررسی دقیق متغیرها برای انتخاب مناسب عوامل مؤثر بر سیستم صورت می‌گیرد. بر اساس جدول ۵، سه عامل اول ۸۰ درصد از تغییرات کل را شامل می‌شود. علاوه بر این عموماً در این روش مقادیر ویژه بالاتر از ۱ را به عنوان عوامل مؤثر بر سیستم در نظر می‌گیرند. بنابراین سه عامل اول به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر سیستم انتخاب می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ماتریس عوامل را به صورت جدول ۶ تنظیم نمود. از میان عوامل حاصله اولین فاکتور 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 هر یک از عوامل هستند نشان دهنده تأثیر بالای آن متغیر (مثبت یا منفی) هست.

جدول ۳. خصوصیات آماری داده‌های هیدروشیمیایی.

پارامتر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار
SO ₄ ²⁻	meq L ⁻¹	۰/۱	۳۰/۵	۳/۶۷	۴/۲۷
Cl ⁻	meq L ⁻¹	۰/۱	۱۶۲/۵	۸/۲۱	۲۰/۴
HCO ₃ ⁻	meq L ⁻¹	۲	۱۱/۵	۶/۱۲	۲/۰۳
CO ₃ ²⁻	meq L ⁻¹	۰	۰/۴	۰/۰۲	۰/۰۸
pH	-	۶/۷	۸/۵	۷/۴۵	۰/۳۸
TH	-	۵۸۰	۱۵۹۲۰	۱۷۵۷/۱۶	۲۱۷۲/۱۱
SAR	meq L ⁻¹	۰/۰۱	۰/۹۲	۰/۱۷	۰/۱۳
EC	meq L ⁻¹	۰/۵۶	۲۱/۵۸	۳/۸۳	۳/۶۱
%Na	meq L ⁻¹	۱/۲۲	۲۷/۶	۵/۳۶	۳/۳
K ⁺	-	۱۱۴	۱۶۳۳/۵	۴۵۹/۴۴	۳۱۱/۳۳
Na ⁺	-	۰/۲۹	۴۳/۴۸	۳/۴۳	۵/۳۸
Mg ²⁺	-	۱۰/۶۳	۸۷/۴۶	۳۶/۹۹	۱۵/۱۱
Ca ²⁺	meq L ⁻¹	۰/۳۱	۱۵۵	۸/۶۳	۱۹/۰۱

جدول ۴. ماتریس همبستگی متغیرها.

	So ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	pH	TH	SAR	EC	Na%	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
So ₄ ²⁻	۱/۰۰												
Cl ⁻	۰/۵۴	۱/۰۰											
HCO ₃ ⁻	۰/۰۳	۰/۲۷	۱/۰۰										
CO ₃ ²⁻	-۰/۱۰	-۰/۰۳	-۰/۳۹	۱/۰۰									
pH	-۰/۰۶	۰/۰۶	-۰/۳۶	۰/۶۲	۱/۰۰								
TH	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۳۳	-۰/۱۹	-۰/۲۰	۱/۰۰							
SAR	۰/۵۰	۰/۹۵	۰/۳۱	-۰/۰۴	۰/۰۹	-۰/۵۶	۱/۰۰						
EC	۰/۶۶	۰/۹۸	۰/۳۳	-۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۹۳	۱/۰۰					
Na%	۰/۴۴	۰/۵۷	۰/۳۵	-۰/۱۱	۰/۰۵	-۰/۳۴	۰/۷۳	۰/۶۱	۱/۰۰				
K ⁺	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۲۵	-۰/۱۹	-۰/۲۲	۰/۵۱	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۱۹	۱/۰۰			
Na ⁺	۰/۵۳	۰/۹۹	۰/۲۹	-۰/۰۴	۰/۰۸	-۰/۶۳	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۶۴	۰/۳۳	۱/۰۰		
Mg ²⁺	۰/۶۹	۰/۷۸	۰/۳۷	-۰/۱۳	-۰/۰۶	۰/۹۱	۰/۶۷	۰/۸۵	۰/۴۸	۰/۳۸	۰/۷۳	۱/۰۰	
Ca ²⁺	۰/۷۷	۰/۴۶	۰/۲۲	-۰/۲۱	-۰/۳۲	۰/۸۹	۰/۳۱	۰/۵۸	۰/۱۲	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۶۲	۱/۰۰

جدول ۵. مقادیر واریانس عوامل اولیه.

Factor	Initial Eigenvalues(a)			Rotation Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
۱	۴/۹۷۴	۴۹/۷۲۶	۴۹/۷۲۶	۴/۹۷۴	۴۹/۷۲۶	۴۹/۷۲۶	۳/۷۰۱	۳۷	۳۷
۲	۱/۹۷	۱۹/۶۹۱	۶۹/۴۱۷	۱/۹۷	۱۹/۶۹۱	۶۹/۴۱۷	۲/۴۱۶	۲۴/۱۵۴	۶۱/۱۵۵
۳	۱/۱۴۶	۱۱/۴۶	۸۰/۸۷۷	۱/۱۴۶	۱۱/۴۶	۸۰/۸۷۷	۱/۹۷۳	۱۹/۷۲۳	۸۰/۸۷۷
۴	۰/۶۶۱	۶/۶۰۷	۸۷/۴۸۴						
۵	۰/۵۰۶	۵/۰۵۸	۹۲/۵۴۲						
۶	۰/۳۸۲	۳/۸۲۳	۹۶/۳۶۵						
۷	۰/۱۹۹	۱/۹۹۱	۹۸/۳۵۷						
۸	۰/۱۶۱	۱/۶۰۵	۹۹/۹۶۲						
۹	۰/۰۰۴	۰/۰۳۸	۱۰۰						
۱۰۰	.	.	۱۰۰						

پارامتر	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳
So ₄ ²⁻	۰/۷۶	-۰/۱۱	-۰/۴۵
Cl ⁻	۰/۹۱	-۰/۲۸	-۰/۱۰
HCO ₃ ⁻	۰/۴۰	-۰/۳۶	-۰/۵۹
CO ₃ ²⁻	-۰/۱۸	۰/۷۰	-۰/۴۳
pH	-۰/۱۰	۰/۸۲	-۰/۲۵
TH	۰/۸۸	-۰/۲۵	-۰/۳۰
SAR	۰/۸۶	۰/۳۵	-۰/۲۶
EC	۰/۹۷	۰/۱۷	-۰/۰۵
Na%	۰/۶۳	۰/۲۶	-۰/۴۱
K ⁺	۰/۵۲	-۰/۳۵	۰/۲۱
Na ⁺	۰/۸۹	۰/۳۲	-۰/۱۷
Mg ⁺⁺	۰/۸۹	-۰/۰۲۶	-۰/۰۹۸
Ca ⁺⁺	۰/۶۹	-۰/۴۵	-۰/۴۷

جدول ۳- ۶. ماتریس عامل‌ها.

پارامترهایی شامل یون‌های کربنات، بی‌کربنات و pH هست. بر اساس پارامترهای مؤثر در هر عامل و منشأ این پارامترها، عامل اول نشان دهنده تأثیر پساب رودخانه کاوه سودا است (Anthropogenetic factor)، عامل دوم تأثیر سازندهای زمین‌شناسی است (Genetic factor)، عامل سوم تأثیر یا روند کلی آب‌های زیرزمینی (Hydrogeologic factor) را نشان می‌دهند. بر این اساس اصلی‌ترین عامل در منطقه آلاینده‌های حاصل از پساب کارخانه کاوه سوداست که در آب‌های زیرزمینی منطقه باعث افزایش مقادیر یون‌های کلراید، کلسیم، سدیم و هدایت الکتریکی شده است و مؤثرترین عامل در هیدروشیمی منطقه مطالعاتی هست و اثرات سازندهای زمین‌شناسی یا روند کلی هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است.

چرخش عامل‌ها: این مرحله برای تفسیر ساده‌تر عوامل مؤثر ماتریس عامل‌های حاصله صورت می‌گیرد. از میان چرخش‌های مختلف چرخش واریماکس (Varimax) انتخاب شد و به این وسیله ماتریس عامل‌ها به یک ساختار ساده اورتوگنال تبدیل شدند. حاصل این کار سه عامل اصلی بود که در جدول ۷ ارائه شده است. از میان ضرایب هر عامل، ضرایب بالای ۰/۵۵ که به صورت پر رنگ در جدول ۷ نشان داده شده‌اند، نشانگر پارامترهای مؤثر در هر عامل هستند. همان‌طور که در جدول ۷ مشخص است، در اصلی‌ترین عامل مؤثر پارامترها شامل یون‌های کلسیم، سدیم، کلراید، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم و هدایت الکتریکی هست. پارامترهای مؤثر در دومین عامل عبارت بودند از سختی کل (TH)، یون‌های سولفات، کلسیم و منیزیم. سومین عامل با کمترین تأثیر در منطقه دارای

پارامتر	فاکتور ۳	فاکتور ۲	فاکتور ۱
SO ₄ ²⁻	۰/۰۷	۰/۸۳	۰/۳۲
Cl ⁻	۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۸۸
HCO ₃ ⁻	۰/۷	۰/۰۱	۰/۳۹
CO ₃ ²⁻	۰/۸۴	-۰/۱۱	۰
pH	۰/۸۲	-۰/۲۳	۰/۲
TH	-۰/۱۴	۰/۸۶	۰/۴۲
SAR	۰	۰/۲۳	۰/۹۵
EC	-۰/۰۳	۰/۵۱	۰/۸۴
Na%	-۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۷۹
K ⁺	-۰/۲۳	۰/۶۳	۰/۱۳
Na ⁺	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۹۲
Mg ²⁺	-۰/۰۹	۰/۹۳	۰/۱۲
Ca ²⁺	-۰/۱۷	۰/۶۳	۰/۶۳

جدول ۷. نتایج تجزیه به عوامل (بعد از چرخش واریماکس).

نتیجه‌گیری کلی

به منظور بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی منطقه مطالعاتی، از روش‌های گرافیکی و نیز شاخص کیفی آب استفاده شد. بر اساس دیاگرام پایپر، نمونه‌ها در سه زون مختلف قرار می‌گیرند، تشابهی بین نتایج به دست آمده از دیاگرام پایپر و نقشه پهنه‌بندی نمونه‌ها بر اساس شاخص کیفی آب وجود دارد. به طوری که نمونه‌های مربوط به منطقه تغذیه که در دیاگرام پایپر با تیپ بیکربنات کلسیم مشخص شده‌اند، بر اساس شاخص کیفی در دسته عالی قرار می‌گیرند، این نمونه‌ها از بالادست آبخوان برداشت شده‌اند و دارای کیفیت مطلوب می‌باشند و نمونه‌های مربوط به منطقه تخلیه با تیپ کلرید سدیم، جزء دسته ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند، و نشانگر محل‌های خروجی آب زیرزمینی در منطقه هستند. تعدادی از نمونه‌ها که در زون ۹ دیاگرام پایپر قرار می‌گیرند (که هیچ یونی غالب نیست)، در دسته متوسط قرار گرفته‌اند. بخش‌های کوچکی با شاخص کیفی ضعیف در جنوب دشت دیده می‌شود که تحت تأثیر پساب‌های آلوده قرار گرفته‌اند. با توجه به بررسی‌های گرافیکی با استفاده از نمودار استیف نیز

تأثیر پساب‌های صنعتی بر نمونه‌های پائین دست دشت و آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت مراغه- بناب کاملاً مشهود است. همچنین با به کارگیری داده‌های هیدروشیمیایی موجود و با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره و تجزیه به عوامل سه عامل اصلی مؤثر بر هیدروشیمی منابع آب منطقه به دست آمد. بر این اساس اصلی‌ترین عامل در منطقه آلودگی‌های حاصل از پساب کارخانه کاوه سوداست که در آب‌های زیرزمینی منطقه باعث افزایش مقادیر یون‌های کلرید، کلسیم، سدیم و در نتیجه هدایت الکتریکی شده است و فاکتور اول که مؤثرترین عامل در هیدروشیمی منطقه مطالعاتی هست؛ اثرات سازندهای زمین‌شناسی یا روند کلی هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که در زمین‌هایی که پساب این واحد صنعتی جاری شده، امکان کشت و کشاورزی از بین رفته و در آینده نزدیک به بیابان تبدیل خواهد شد. مرز این‌گونه خسارات نامحدود و حتی در آینده دور هم غیرقابل تصفیه و بازیافت خواهد بود.

منابع مورد استفاده

- اصغری مقدم ا، محمودی ن، ۱۳۸۷. تأثیر پساب‌های شهرک صنعتی مراغه بر آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت مراغه- بناب. مجله محیط‌شناسی دانشگاه تهران، سال ۳۴، شماره ۴۵، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۲.
- بی‌نام، ۱۳۵۷. نقشه زمین‌شناسی مراغه، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.
- بی‌نام، ۱۳۸۱. گزارش حفاری‌های پی‌زومتری انجام‌یافته در دشت مراغه- بناب، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل.
- بی‌نام، ۱۳۸۷. مطالعات نیمه تفصیلی آب‌های زیرزمینی دشت مراغه- بناب. مهندسین مشاور یکم، تهران.
- محمودی ن، ۱۳۸۶. بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت مراغه- بناب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

- Anonymous, 2009. Guideline for drinking water quality. World Health Organization.
- Dunnette DA, 1979. A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal of Water Pollution Control Federation* 51(1): 53- 61.
- Freeze R, Cherry J, 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Hossain G, Howladar MF, Nessa L, Ahmed SS, Quamruzzaman C, 2010. Hydrochemistry and classification of groundwater resources of Ishwardi municipal area, Pabna District, Bangladesh. *Geotechnical and Geological Engineering* 28(5): 671-679.
- Litaor MI, Briemann H, Reichmann O, Shenker M, 2010. Hydrochemical analysis of groundwater using a tree-based model. *Journal of Hydrology* 38(7): 273-282.
- Mishra PC, Patel RK, 2001. Study of the pollution load in the drinking water of Rairangpur, a small tribal dominated town of North Orissa. *Indian Journal of Environmental Ecoplant* 5(2): 293-298.
- Naik S, Purohit KM, 2001. Studies on water quality of river Brahmani in Sundargarh district, Orissa. *Indian Journal of Environmental Ecoplant* 5(2): 397-402.
- Noori R, Sabahi MS, Karbassi AR, Baghvand A, Taati Zadeh H, 2010. Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set. *Desalination* 260: 129-136.
- Othmer K, 1978. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Third Edition. Volume 1, John Wiley & Sons publications.
- Rajankar PN, Tambekar DH, Wate SR, 2011. Groundwater quality and water quality index at Bhandara District. *Environmental Monitoring and Assessment* 179: 619- 625.
- Swaddle TW, 1997. *Inorganic Chemistry: An Industrial and Environmental Perspective*. Academic Press. 482 p.
- Singh DF, 1992. Studies on the water quality index of some major rivers of Pune, Maharashtra. *Proceedings of the Academy of Environmental Biology* 1(1): 61-66.
- Soliman M, Lamoreaux E, Memon A, Assaad A, La Moreaux W, 1998. *Environmental Hydrogeology*, CRC Press LLC, Taylor & Francis Group, London, England.
- Subba Rao N, 1997. Studies on water quality index in hard rock terrain of Guntur district, Andhra Pradesh, India. *National Seminar on Hydrology of Precambrian Terrains and Hard Rock Areas*: 129-134.
- Tiwari TN, Mishra MA, 1985. A preliminary assignment of water quality index of major Indian rivers. *Indian Journal of Environmental Protection* 5: 276-279.
- Umar A, Umar R, Ahmad MS, 2001. Hydrogeological and hydrochemical framework of regional aquifer system in Kali- Ganga sub-basin, India. *Environmental Geology* 40 (4-5): 602- 611.
- Yong S, Hamidi A, 1998. *Groundwater and Surface Water Pollution*. Shiliy Press, India. 150 p.