

Evaluation of Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Salinity Evolution in Semnan Plain

Soraya Karimi¹, Zargham Mohammadi^{*2}, Nozar Samani³

Abstract

Semnan plain with arid and semi-arid climate is situated in southern flank of Alborz range and north of great desert of Central Iran. In this study the result of analyses of major ions in 35 deep wells and qanats and oxygen-18 and deuterium stable isotopes in 5 wells and one sample of the river water have been used to access the chemical characteristics of groundwater. Hierarchical cluster analysis (HCA) has been used for classifying the water samples. The results show that the samples can be grouped into three main categories: (1) waters with highest bicarbonate content and lowest TDS, (2) waters with highest sulfate content and (3) chloride waters with maximum salt content. Checking the spatial distribution of the samples shows that the samples of each group are situated in a specific area; indicating similar affecting processes on water quality in each group. Mineral saturation index calculated with the PHREEQC software showed that the samples are super-saturated with respect to the carbonate mineral and under-saturated to saturated with respect to the gypsum and anhydrite and under-saturated with respect to the halite. Based on isotopic analysis, correlation coefficient and ion ratios, chloro-alkaline index and Gibbs plot of the chemical composition of the groundwater in Semnan plain are controlled by the intrusion of Abgram salt water and salt dissolution, groundwater residence time, silicate weathering, cation exchange, evaporation and agricultural return flow.

Keywords: Ground water, Hierarchical cluster analysis, Hydrochemical evolution, Isotopic analysis, Saturation index, Semnan Plain.

Received: 2016/06/18
Accepted: 2016/09/26

بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی و روند تکامل شوری آن در دشت سمنان

ثریا کریمی^۱، زرغام محمدی^{*۲}، نوذر سامانی^۳

چکیده

دشت سمنان واقع در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و در شمال کویر مرکزی، دارای اقلیم خشک و نیمه خشک می‌باشد. در این تحقیق جهت دستیابی به خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی در دشت سمنان از نتایج آنالیزهای یون‌های اصلی در ۳۵ حلقه چاه و قنات و مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریم در ۵ حلقه چاه و یک نمونه آب رودخانه استفاده شده است. از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) جهت تفکیک نمونه‌های آب و تقسیم‌بندی آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان نمونه‌ها را در سه گروه اصلی شامل (۱) آب‌هایی با بیشترین مقدار بی‌کربنات و کمترین مقدار جامد محلول، (۲) آب‌های با بیشترین مقدار سولفات، و (۳) آب‌های کلروره با حداکثر شوری تقسیم‌بندی نمود. بررسی موقعیت مکانی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های متعلق به هر گروه در محدوده‌ای مشخص واقع شده‌اند که نشان‌دهنده فرایندهای اثرگذار مشابه بر کیفیت آب در هر گروه می‌باشند. محاسبه اندیس اشباع کانی‌ها با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC نشان داد که نمونه‌ها نسبت به کاتی‌های کربناته فوق اشباع و نسبت به ژپس و انیدریت تحت اشباع و نزدیک به اشباع و نسبت به نمک طعام تحت اشباع می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیزهای ایزوتوپی، بررسی ضریب همبستگی و نسبت‌های یونی، محاسبه شاخص کلروآلکان و ترسیم نمودار گیبس ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در دشت سمنان به وسیله نمودار شور رودخانه آبگرم، انحلال نمک‌ها، زمان ماندگاری، هوازدگی سیلیکات‌ها، تبادل کاتیونی، تبخیر و آب برگشت کشاورزی کنترل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آنالیز ایزوتوپی، تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی، تکامل هیدروشیمیایی، دشت سمنان، شاخص اشباع.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

1- Ph.D. Student, Shiraz University, College of Sciences, Department of Earth Sciences.

2- Associate Professor, Shiraz University, College of Sciences, Department of Earth Sciences.

E-mail: zmmohammadi@shirazu.ac.ir

3- Professor, Shiraz University, College of Sciences, Department of Earth Sciences.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش علوم زمین.

۲- دانشیار، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش علوم زمین.

۳- استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش علوم زمین.

*- نویسنده مسئول

مقدمه

آب زیرزمینی تنها منبع مهم تهیه آب در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. منابع آب در این مناطق محدود می‌باشد و بیشتر آن‌ها کیفیت مناسبی ندارند. چرا که شوری به‌عنوان یک فاکتور کنترل‌کننده مهم، استخراج آب زیرزمینی را برای استفاده‌های انسانی و زیست محیطی محدود می‌نماید. علی‌رغم اهمیت آب زیرزمینی ایران اطلاعات اندکی درباره پدیده‌های طبیعی حاکم بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی یا فاکتورهای بشری که در حال حاضر روی آن‌ها اثر می‌گذارند در دسترس است. از جمله مطالعاتی که قبلاً در ایران انجام گرفته است می‌توان به (جلالی و اصغری مقدم، ۱۳۹۲؛ تیزرو و ودوریس، ۲۰۰۸؛ باغوند و همکاران، ۲۰۱۰؛ آقازاده و اصغری مقدم، ۲۰۱۱؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۲) اشاره نمود. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی توسط فاکتورهای زیادی کنترل می‌شود که شامل ترکیب شیمیایی باران و آب‌های سطحی، ساختارهای زمین‌شناسی و کانیایی آبخوان و حوضه آبریز و فرایندهای ژئوشیمیایی زیرسطحی در آبخوان و زمان ماندگاری آب می‌باشد. تغییرات زمانی در منشأ و ترکیبات آب تغذیه‌کننده، فاکتورهای انسانی و هیدرولوژیکی می‌تواند باعث تغییرات پیرویدیک در کیفیت آب زیرزمینی شود (آپلو و پوستما، ۲۰۰۶؛ تیزرو و ودوریس، ۲۰۰۸؛ آقازاده و اصغری مقدم، ۲۰۱۱). افزایش اطلاعات از تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در این مناطق خشک، منجر به شناخت بیشتر سیستم هیدروشیمیایی این مناطق و مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی می‌شود، به خصوص در زمانی که استخراج بیشتر از تغذیه سفره می‌باشد. هدف این مطالعه بررسی کیفیت آب زیرزمینی در دشت سمنان با استفاده از اطلاعات ایزوتوپی و هیدروشیمی برای شناسایی فرایندهای شورکننده و عوامل مؤثر بر افزایش املاح محلول آبخوان می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

دشت سمنان واقع در شمال‌غرب استان سمنان و بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی (دشت کویر)، با متوسط بارش و دمای سالانه به ترتیب ۱۴۰ میلی‌متر و ۱۸ درجه سانتی‌گراد در یک دوره آماری ۴۰ ساله (۱۹۶۶-۲۰۰۵) می‌باشد. در این منطقه دما بر بارش در ماه‌های اردیبهشت تا آبان غالب است و فصل بارش از آذر تا فروردین ماه می‌باشد. متوسط

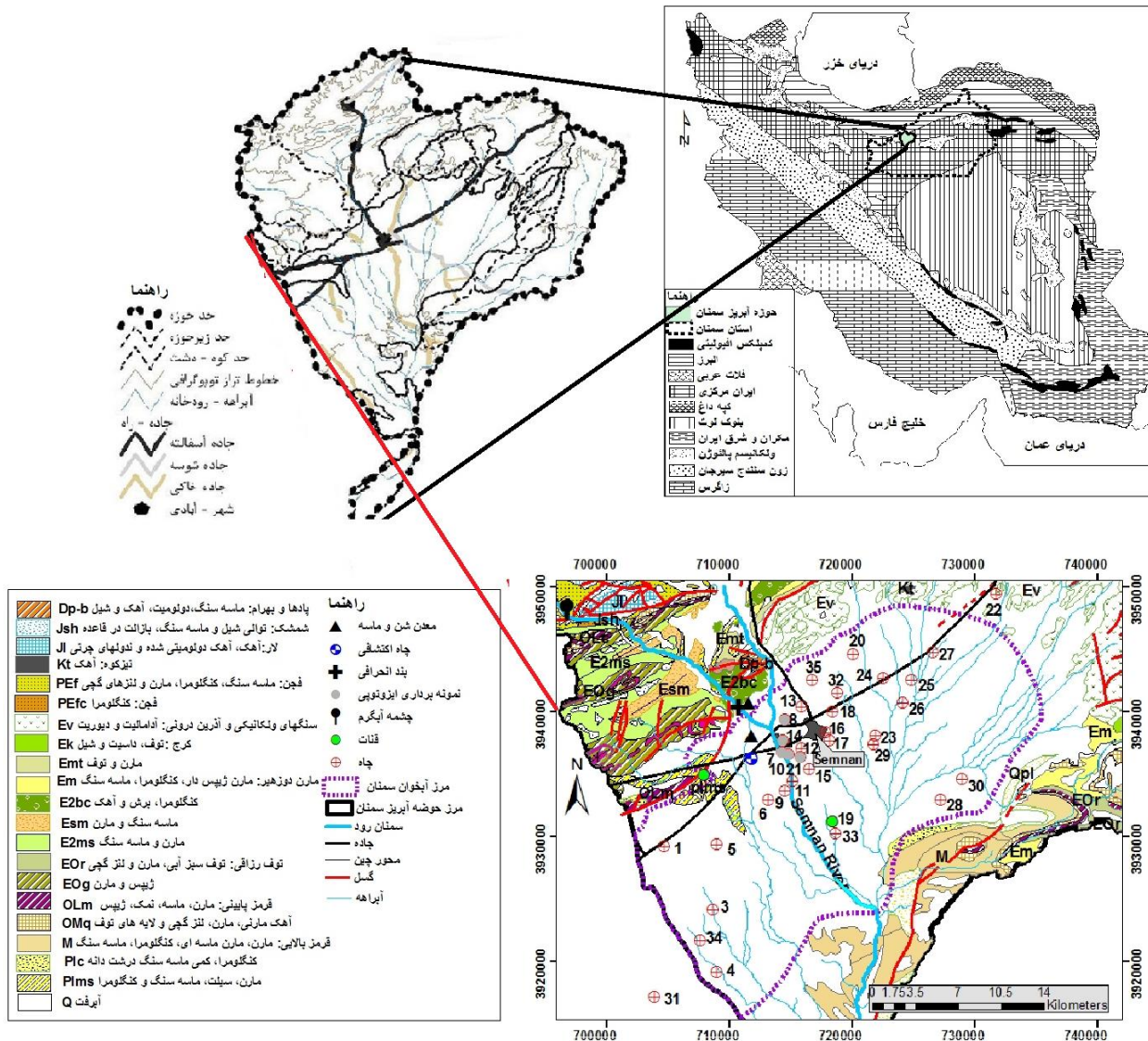
درجه حرارت در این منطقه از ۴ درجه در بهمن ماه تا ۳۱ درجه سانتیگراد در مرداد ماه تغییر می‌کند. آبخوان مورد بررسی منطقه‌ای با مساحت در حدود ۵۷۵ کیلومتر مربع را می‌پوشاند. منطقه مورد بررسی در حدفاصل طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۳ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه تا ۳۶ درجه شمالی واقع شده است. ارتفاع دشت از ۱۲۵۰ متر در شمال تا ۱۰۰۰ متر در بخش‌های جنوبی دشت تغییر می‌کند. دشت سمنان به سمت شمال و شرق توسط برون‌زدهای آتشفشانی و آذرآوری واقع در حدفاصل گسله‌های سراسری سمنان و میامی- عطاری محدود می‌گردد؛ اما به سمت غرب تا خارج از مرز حوضه گسترش یافته است.

مهم‌ترین رودخانه دائمی دشت، سمنان رود می‌باشد که از بهم پیوستن دو رود درجین و آبگرم حاصل می‌شود که از شمال شهرستان سمنان وارد پهنه دشت می‌شود. رودخانه آبگرم از چشمه آبگرم سمنان (شکل ۱) واقع در ۲۱ کیلومتری شمال غرب سمنان با متوسط دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه منشأ می‌گیرد. این رودخانه با داشتن شوری و EC بالا، باعث ایجاد یک باند شور و گوگردی در محل ورودش به دشت سمنان می‌شود. به‌منظور حفظ کیفیت آب دشت، با احداث بند انحرافی در سال ۱۳۹۰ آب رودخانه توسط خط لوله به پایین‌دست دشت منتقل و در شوره‌زارها تخلیه می‌شود. البته قسمتی از آب این رودخانه در محل ورودش به دشت و در محل احداث بند انحرافی توسط دو معدن به جهت ماسه‌شویی مورد استفاده قرار می‌گیرد که باعث تغذیه دشت در این نواحی می‌شود (شکل ۱). پروژه تغذیه مصنوعی نیز در همین ناحیه به‌منظور نفوذ آب سیلابی صورت گرفته است. آب رودخانه درجین که از چشمه گل رودبار با EC پایین منشأ می‌گیرد نیز به وسیله کانال انتقال آب قبل از ورود به سمنان رود، وارد سیستم آب پخش‌کن سمنان به‌منظور استفاده کشاورزان می‌شود که در نهایت باعث تغذیه دشت می‌شود.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی محدوده مورد مطالعه

استان سمنان در یال جنوبی رشته‌کوه البرز و شمال کویر بزرگ ایران مرکزی واقع شده است؛ بنابراین از نظر زمین‌شناسی به زون‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی تعلق دارد (شکل ۱). گسل سمنان واقع در شمال سمنان و گسل عطاری

واقع شده است. مهم‌ترین خصوصیات تکتونیکی این منطقه و جنوب غرب، حد جداکننده ساختاری زون مرکزی از البرز می‌باشند (درویش‌زاده، ۱۳۸۵).
منطقه مورد مطالعه در یک منطقه فعال تکتونیکی واقع در ۳۰ کیلومتری شرق سمنان با روند شمال شرق و جنوب غرب، حد جداکننده ساختاری زون مرکزی از البرز می‌باشند (درویش‌زاده، ۱۳۸۵).
مهم‌ترین گسل‌ها: گسل دیکتاش، عطاری، انزاب، پیغمبران، و گسل تراستی بشم می‌باشند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (نپوی، ۱۳۵۳) و موقعیت نقاط نمونه‌برداری.

و مخروط‌افکنه‌های کهن، آبرفت‌های عهد حاضر، رسوبات منفصل بستر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها و واریزه‌ها و خاک‌های برجا می‌باشند که پهنه دشت و سطح اغلب دره‌ها و دامنه‌ها را می‌پوشانند. در بین این دو واحد، توالی ضخیمی از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی و آذرآواری همراه با دایک‌ها و توده‌های

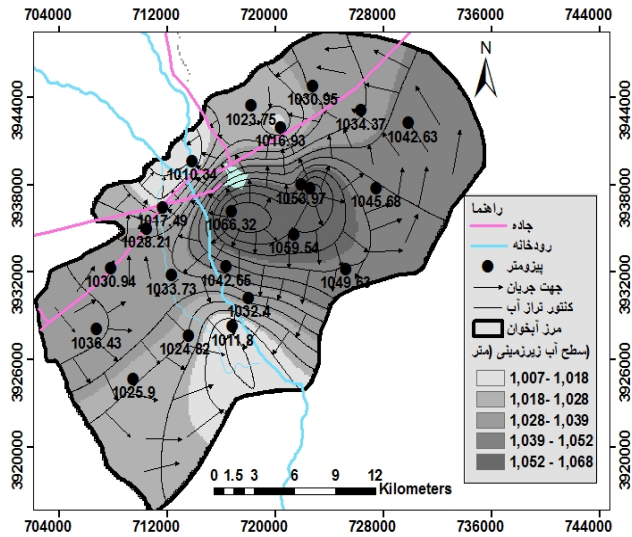
شکل حوضه نتیجه عملکرد این گسل‌ها با روند کلی شمال شرق - جنوب غرب می‌باشد. قدیمی‌ترین سنگ‌های این ناحیه شیل و لای سنگ‌های سازند کهر می‌باشند که تنها در رخمون بسیار کوچکی از کوه هلیچال واقع در شمال باختری حوضه برنزد داشته و جوان‌ترین واحدهای رسوبی نیز پادگان‌ها

مشابه لیتولوژی سازند مجاور آن می‌باشند. سنگ کف در سمت شمال از سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و ریولیتی و توف‌های کرج می‌باشد و در سمت غرب به وسیله تهنشستهای کنگلومرای ائوسن جایگزین می‌شوند (شرکت مهندس مشاور پنگان‌آوران، ۱۳۸۸).

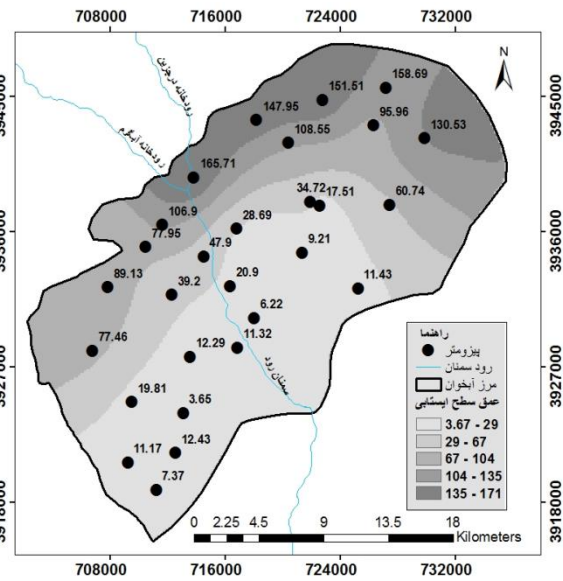
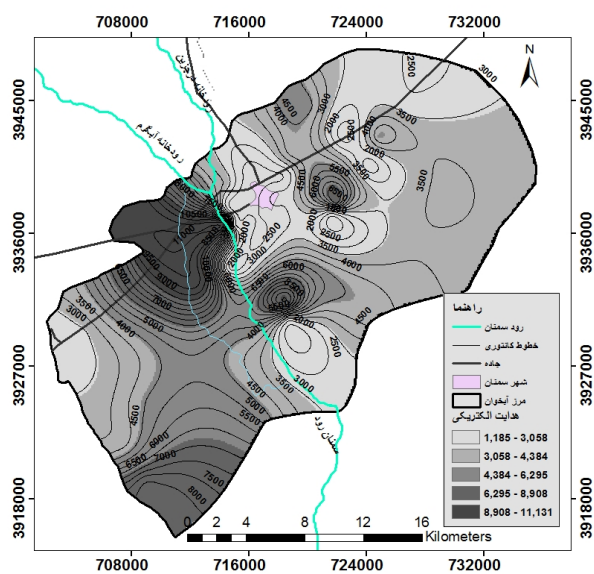
نقشه تراز سطح آب زیرزمینی دشت سمنان بر اساس اطلاعات عمق سطح آب زیرزمینی این ناحیه (شکل ۳) در اسفند ماه سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ و ارتفاع دهانه ۳۵ چاه مشاهده‌ای در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت جریان آب زیرزمینی از مرکز به سمت جنوب، شمال و شمال غربی دشت می‌باشد؛ هرچند جریاناتی نیز از سمت غرب وارد دشت می‌شود. با توجه به این نقشه روند منحنی‌های هم‌پتانسیل غیر طبیعی می‌باشد؛ چرا که جهت حرکت آب زیرزمینی برخلاف شیب توپوگرافی منطقه به سمت ارتفاعات شمال و شمال غربی دشت تغییر کرده است. علت این پدیده حذف دبی پایه رودخانه آبگرم در این منطقه و برداشت بی‌رویه از چاه‌های شمالی و شمال غربی دشت و افت زیاد سطح آب زیرزمینی در محل این چاه‌ها و تغییر جهت شیب هیدرولیکی به سمت این چاه‌ها می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد که سنگ کف در ناحیه شرقی و مرکزی آبخوان دارای گسل خوردگی است و تغذیه از طریق سنگ کف صورت می‌گیرد. محاسبه بیلان در سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷ مقدار ۵ میلیون مترمکعب تغذیه از سنگ کف آبخوان را تخمین زده است (شرکت مهندس مشاور پنگان‌آوران، ۱۳۸۸).

نفوذی اسیدی تا بازیک وجود دارد. در این توالی چندین نبود چینه‌ای وجود دارد که نشان‌دهنده فعالیت‌های تکتونیکی می‌باشد.

آبخوان دشت سمنان از نوع آزاد می‌باشد که در یک دشت آبرفتی واقع شده است. طبق مطالعات ژئوفیزیک سال ۱۳۵۳، رسوبات آبرفتی به سه افق مشخص قابل تفکیک می‌باشند. بخش سطحی آبرفت شامل حدود ۳۰ تا ۱۰۰ متر رسوبات دانه‌درشت تا دانه‌ریز خشک می‌باشد. بخش میانی آبرفت شامل حدود ۲۰ تا ۱۰۰ متر رسوبات دانه متوسط حاوی آب شیرین می‌باشد، که از نواحی شمال غرب بطرف جنوب شرق کم مقاومت (دانه‌ریز یا لب‌شور) می‌شوند. بخش تحتانی آبرفت نیز شامل حداکثر ۳۰ متر رسوبات دانه‌ریز حاوی آب لب‌شور می‌باشد، که در تمام نقاط دشت گسترش نداشته و در برخی نقاط تا حدی تحت فشار می‌باشند. حداکثر ضخامت رسوبات آبرفتی به میزان بالغ بر ۲۸۰ متر در نواحی شمال شهرستان سمنان و حداقل آن در پهنه کویری واقع در حاشیه ارتفاعات جنوب غرب دشت مشاهده شده است. جنس و دانه بندی رسوبات در نقاط مختلف و بسته به نوع و شدت فرسایش پذیری واحدهای سنگی ارتفاعات بوده و اغلب از جنس کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری متعلق به دوره ائوسن و عمدتاً دانه متوسط تا دانه‌ریز و در حد رس، سیلت و ماسه همراه با شن و ندرتاً ریگ می‌باشد. بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که سنگ کف دشت از مارن‌های میوسن می‌باشند به استثنای نواحی مجاور کوه‌ها که



شکل ۲- نقشه ارتفاع سطح ایستابی و محل پیزومترها در سطح دشت سمنان.



شکل ۳- نقشه منحنی‌های هم عمق بر حسب متر.

شکل ۴- منحنی توزیع هدایت الکتریکی بر حسب $\mu\text{S/cm}$.

غلظت سولفات با استفاده از اسپکتروفوتومتر و غلظت کلر با استفاده از روش آرژانتومتری و مقدار بی‌کربنات با روش تیتراسیون با استفاده از اسید سولفوریک ۰/۰۲ نرمال در آزمایشگاه هیدروشیمی شرکت آب منطقه‌ای سمنان اندازه‌گیری شده است.

یک نمونه از رودخانه آبگرم در پایین‌دست محل احداث بند انحرافی و ۵ نمونه از چاه‌های مجاور آن (شکل ۱)

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده‌ها

نمونه‌برداری توسط شرکت آب منطقه‌ای سمنان از ۳۳ چاه عمیق و ۲ رشته قنات در اردیبهشت ۱۳۹۳ انجام شده است (شکل ۱). غلظت کلسیم و منیزیم با استفاده از روش EDTA، غلظت سدیم و پتاسیم با کمک روش نشر شعله‌ای،

متغیرهای آب زیرزمینی مورد آنالیز شامل pH، EC، HCO_3^- ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Ca، Mg و Na می‌باشند. روش آماری شاپیرو ویلک و ارزیابی مقادیر چولگی و کشیدگی و رسم نمودارهای جعبه‌ای، نقطه‌ای و ستونی به همراه منحنی توزیع نرمال داده‌ها نشان داد که نیاز به تبدیل داده‌ها برای رسیدن به توزیع نرمال می‌باشد. از آنجایی که داده‌ها چولگی مثبت داشتند، روش تبدیل لگاریتمی متغیرها (به جز متغیر pH)، برای دستیابی به توزیع نرمال داده‌ها انجام شد. در ضمن از آنجایی که متغیرها واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی دارند و مقادیر زیادتر در محاسبه مقدار فاصله اقلیدوسی^۴ تأثیر می‌گذارد، برای اینکه ماتریکس واحد و داده‌های بدون واحدی داشته باشیم، داده‌ها با انتخاب گزینه zscore استاندارد شدند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ صحرایی‌پاریزی و سامانی، ۲۰۱۳) داده‌های استاندارد شده دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشند.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad [2]$$

z_i = مقدار استاندارد نمونه x_i ؛ x_i = نمونه اولیه؛ \bar{x} = میانگین؛ s = انحراف معیار

بحث و نتایج

خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

نتایج آنالیز هیدروشیمیایی دشت سمنان در جدول ۱ ارائه شده است. درصد خطای تعادل یونی نمونه‌ها کمتر از ۷٪ درصد می‌باشد. در جدول ۲ نتایج مینیمم، ماکزیمم، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی آورده شده است. یون بی‌کربنات کمترین مقدار انحراف معیار و ضریب تغییرات را دارد و مابقی ضرایب تغییر، تقریباً بالا و مشابه می‌باشند.

در تیر ماه ۱۳۹۴ به منظور ارزیابی ایزوتوپی برداشت شده است و در آزمایشگاه اراک وابسته به آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ایران اندازه‌گیری شدند (جدول ۵). خط آب جوی محلی که قبلاً توسط کاظمی (۲۰۱۳) برای شاهرود تهیه شده بود به منظور مقایسه نتایج استفاده شده است.

از نرم‌افزارهای Excel، GIS، PHREEQC، SPSS، AquaChem به منظور طبقه‌بندی گروه‌های مختلف آبی، ترسیم نمودارها، محاسبه اندیس اشباع و دیگر نتایج استفاده شده‌اند.

آماده‌سازی داده‌ها و آنالیزهای آماری

تکنیک‌های آنالیز آماری توسط محققین مختلفی برای مطالعه و تفسیر خصوصیات کیفی آب زیرزمینی به کار برده شده‌اند (داوینس، ۲۰۰۲). روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی^۱ به منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها در گروه‌های نسبتاً همگن و به منظور بررسی رابطه بین نمونه‌های آبی و پارامترهای محیطی، مانند لیتولوژی، منطقه تغذیه، زمان ماندگاری و مسیر جریان (درور، ۱۹۹۷؛ گولر و همکاران، ۲۰۰۲) به کار گرفته شد. روش تحلیل خوشه‌ای، داده‌ها را به شکل ساده و مستقیمی گروه‌بندی می‌کند و نتایج را به صورت یک نمودار درختی و قابل فهم ارائه می‌نماید (داوینس، ۲۰۰۲؛ کلوتیر و همکاران، ۲۰۰۸)

با بررسی مطالعات صورت گرفته پیشین (از جمله گولر و تین، ۲۰۰۴؛ کومار و همکاران، ۲۰۰۹؛ ایدانا، ۲۰۱۰؛ همزئی آزا و همکاران، ۲۰۱۱؛ نصرتی و اخهوت، ۲۰۱۲) روش وارد^۲ و روش مربع فاصله اقلیدوسی^۳ به منظور تعیین فاصله بین گروه‌ها استفاده شده است. مربع فاصله اقلیدوسی به صورت مجذور مجموع اختلاف نمونه‌ها برای هر متغیر، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2} \quad [1]$$

در این فرمول x_k مقدار متغیر k برای نمونه‌های i و j می‌باشد.

4- Euclidean distance

1- Q mode hierarchical cluster analyses
2- Ward's method
3- Squared Euclidean distance

جدول ۱- آنالیز هیدروشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

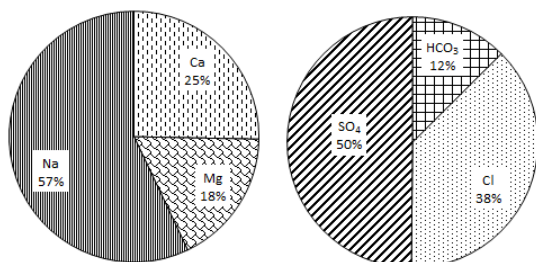
Sampling point	Anions(meq/l)			Cations(meq/l)			Sum Anions	Sum Cations	EC (μS/cm)	TDS (mg/l)	pH
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺					
1	2.1	6.16	26.19	17	6.4	10.27	34.45	33.67	2850	1892	7.49
2	1.7	7.7	24.81	23.2	6.4	6.96	34.21	36.56	3070	2050	7.61
3	2	22.12	27.43	19	10.8	23.77	51.55	53.57	4420	2940	7.49
4	3	44.62	58.68	30	33.8	46.6	106.3	110.4	7960	5290	7.18
5	2.75	19.28	32.92	8.8	16.4	30.61	54.95	55.81	4920	3270	7.36
6	2.05	62.4	23.98	24	42.5	34.8	88.43	101.3	9150	6090	7.11
7	2.05	74.5	20.01	28	37.5	39.01	96.56	104.51	10170	6780	7.2
8	3	22.25	8.78	8	13.52	13.66	34.03	35.18	3280	2190	7.4
9	3.35	15.05	3.49	4.9	8	9.23	21.89	22.13	2270	1518	7.47
10	3	22.15	7.1	11	11.9	8.91	32.25	31.81	3270	2180	7.35
11	3.3	11	8.37	4.8	6.9	12.28	22.67	23.98	2070	1372	7.55
12	4.25	12.9	4.31	4.6	8.9	9.99	21.46	23.49	2340	1564	7.31
13	3.3	7.75	8.97	4	6.32	10.51	20.02	20.83	1849	1231	7.34
14	3.9	12.08	15.49	6.6	10.4	16.04	31.47	33.04	2790	1865	7.45
15	3	9.25	6.11	2.8	5.92	10.72	18.36	19.44	1852	1231	7.78
16	4.4	11.72	11.06	6.5	10.4	11.6	27.18	28.5	2780	1853	7.44
17	3.9	9.28	10.55	5.8	8.5	9.05	23.73	23.35	2360	1572	7.43
18	3.9	9.35	7.48	5.6	6.4	9.13	20.73	21.13	2060	1375	7.4
19	5.35	43	53.61	15	34.5	63.3	101.96	112.8	8810	5840	7.39
20	2	18.25	31.15	17	12.5	23.88	51.4	53.38	4650	3100	7.52
21	3.75	6.72	9.95	5	6.8	9.34	20.42	21.14	2070	1383	7.49
22	4.7	33.75	28.47	11	25.5	36.67	66.92	73.17	6050	4030	7.45
23	3.6	9	6.88	4.2	6.1	8.66	19.48	18.96	1960	1305	7.28
24	3.3	7.65	4.56	6	1.5	6.89	15.51	14.39	1641	1089	7.62
25	2.2	19.15	24.08	13.6	17.3	15.72	45.43	46.62	4420	2950	7.68
26	3.25	7.85	5.51	3	4.5	8.26	16.61	15.76	1650	1094	7.54
27	3	16.32	8.46	4.8	9.2	16.16	27.78	30.16	2710	1806	7.59
28	2.8	18.4	15.17	7.6	8.4	20.86	36.37	36.86	3660	2430	7.59
29	2	39.62	33.46	14	23.8	42.28	75.08	80.08	6450	4300	7.47
30	3	18.75	12.91	12	5.52	18.43	34.66	35.95	3410	2270	7.45
31	1.7	43.12	38.05	34	13.98	38.84	82.87	86.82	7060	4700	7.09
32	3.1	18.12	32.31	12	16.8	21.59	53.53	50.39	4120	2730	7.34
33	3.3	15.5	9.51	4.8	9.2	15.53	28.31	29.53	2950	1960	7.55
34	2.05	15.25	35.31	23.2	8.9	18.33	52.61	50.43	3930	2620	7.03
35	2	11.85	18.31	5.6	10.32	17.4	32.16	33.32	3040	2020	7.55
SW	1.9	117.5	53.47	38.5	20	126.15	172.877	184.65	14870	9900	7.43

در جنوب دشت و پایین‌دست جریان به دلیل مسیر طولانی حرکت آب در زمین و ریزدانه شدن رسوبات آبرفتی و همچنین در شمال غربی دشت در محل ورود رودخانه آبگرم به دشت سمنان را نشان می‌دهد. رودخانه دارای تیپ کلروره و سولفات

مقادیر pH و EC چاه‌های مورد مطالعه از ۷/۰۳ تا ۷/۷۸ و ۱۶۴۱ تا ۱۰۱۷۰ میکروزیمنس برسانتیمتر با مقادیر میانگین ۷/۴۲ و ۳۹۴۴/۰۵ میکروزیمنس بر سانتیمتر تغییر می‌کنند. توزیع مکانی مقدار EC (شکل ۴)، افزایش مقدار EC

۲۶۴۱/۲۳ و غلظت سولفات بین ۱۶۷/۵۲ تا ۲۸۱۶/۶۴ تغییر می‌کند.

شکل ۵ بر اساس مقادیر میان یون‌های اصلی برحسب میلی‌اکی‌والانت بر لیتر ترسیم شده است و نشان می‌دهد که یون‌های SO_4 و Na به ترتیب آنیون و کاتیون غالب در منطقه هستند. فراوانی یون‌های اصلی در آب زیرزمینی به ترتیب زیر است: $SO_4 > Cl > HCO_3$ و $Na > Ca > Mg$.



شکل ۵- نمودار دایره‌ای مقادیر میان یون‌های اصلی.

سدیک و کلسیک می‌باشد و مقدار EC و TDS آن به ترتیب ۱۴۸۷۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر و ۹۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین افزایش EC در سمت شمال شرقی و غرب دشت در مسیر عبور جریان‌ات سیلابی مشاهده می‌شود. مقادیر TDS با الگوی مشابه بین ۱۰۸۹ تا ۶۷۸۰ میلی‌گرم بر لیتر با مقدار میانگین ۲۶۲۵/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. آب زیرزمینی در این منطقه جزء آب‌های لب‌شور ($1000 < TDS < 10000$) طبقه‌بندی می‌شود (فریز و چری، ۱۹۷۹). سختی کل بین ۳۷۵ تا ۳۳۲۵ متغیر است. در منطقه مورد مطالعه غلظت Na در آب زیرزمینی بین ۱۵۸/۴ تا ۱۴۵۵/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت Ca بین ۵۶/۱۱ تا ۶۸۱/۳۳ و غلظت Mg بین ۱۸/۲۳ تا ۵۱۶/۴۸ تغییر می‌کند. غلظت‌ها و نسبت‌های کاتیونی را می‌توان برای شناخت فرایندهای واکنشی بین سنگ و آب مانند هوازدگی کانی‌ها و تبادل کاتیونی به کار برد. بی‌کربنات در منطقه مورد مطالعه بین ۱۰۳/۷۳ تا ۳۲۶/۴۴، غلظت کلرید بین ۲۱۸/۳۹ تا

جدول ۲- خلاصه آمار پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های آب زیرزمینی.

پارامترها	واحد	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	درصد ضریب تغییرات
pH		7.03	7.78	7.43	0.17	2.24
EC	$\mu S/cm$	1641.00	10170.00	3944.06	2294.45	58.17
TDS	mg/l	1089.00	6780.00	2625.43	1526.15	58.13
Na	mg/l	158.40	1455.25	456.70	311.89	68.29
Ca	mg/l	56.11	681.33	233.25	169.50	72.67
Mg	mg/l	18.23	516.48	161.73	122.34	75.65
Cl	mg/l	218.39	2641.23	731.20	572.58	78.31
SO_4	mg/l	167.52	2816.64	923.56	671.75	72.73
HCO_3	mg/l	103.73	326.44	184.88	54.83	29.65
TH	mg/l	375.00	3325.00	1247.40	826.44	66.25
Na%	meq/l	19.04	56.59	44.56	8.71	19.56
SAR	meq/l	1.81	12.72	5.52	2.25	40.74
CAI-1	meq/l	-0.67	0.60	-0.05	0.30	-650.86
CAI-2	meq/l	-0.34	1.61	0.10	0.45	440.70

ترکیب آب مشاهده شده را ایجاد کرده است. از آنجایی که داده‌ها توزیع نرمال نداشتند از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. طبق جدول همبستگی بین آنیون‌ها و کاتیون‌ها (جدول ۳) می‌توان مشاهده نمود که کلسیم با سولفات همبستگی خوبی نشان می‌دهد و این یعنی انحلال ژپس و انیدریت کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در منطقه

آنالیز آماری آنالیز همبستگی

به‌منظور بررسی رابطه بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب از ضریب همبستگی استفاده می‌شود؛ که می‌تواند نشان‌دهنده منشأ مواد محلول و فرایندهایی که

می‌باشد. منشأ سولفات احتمالاً سازندهای زمین‌شناسی مربوط به زمان‌های ائوسن و الیگوسن در کوه‌های مجاور آبخوان با لایه‌های مشخصی از ژئوپس و انیدریت می‌باشد. همچنین بین غلظت سدیم و کلر همبستگی معنی‌دار بالایی وجود دارد که افزایش سدیم و کلر در ارتباط با انحلال نمک‌ها می‌باشد. هدایت الکتریکی با اکثر متغیرها ارتباط قوی و مثبت دارد. تنها بی‌کربنات و pH رابطه منفی نشان می‌دهند و بین منیزیم، کلسیم و کلر نیز ارتباط مثبت و متوسطی وجود دارد. این موارد نشان‌دهنده این است که اکثر یون‌ها در واکنش‌های فیزیکوشیمیایی و تکامل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شرکت می‌کنند. یون‌های Ca و Cl، Mg و Ca رابطه منفی با pH را نشان می‌دهد و این بدان معنی است که افزایش غلظت اکثر یون‌ها با کاهش pH نمونه‌های آبی همراه است یا به بیان دیگر، انحلال کانی‌ها در محیط اسیدی بیشتر از محیط بازی است.

آنالیز تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی

HCA Q-mode بر روی داده‌های نرمال شده و استاندارد شده برای شناسایی گروه‌های موجود در بین نمونه‌ها صورت گرفت. نتایج این آنالیز به صورت نمودار درختی^۵ در شکل ۶ نشان داده شده است، نمونه‌ها در سه گروه اصلی قابل تقسیم‌بندی هستند. میانگین خصوصیات شیمیایی این سه گروه در جدول ۴ ارائه شده است. گروه A کمترین مقدار هدایت الکتریکی و کل جامد محلول در آب را دارد (۱۶۴۱ $EC > 3660$) و بیشترین مقدار بی‌کربنات و کمترین مقدار

میانگین کلر و سولفات را داراست. با انتخاب نمونه‌هایی که در هر گروه قرار می‌گیرند و تفکیک مناطق مرتبط با این نمونه‌ها با کمک نرم‌افزار ArcGIS می‌توان بهتر به تفسیر این مقادیر پرداخت. بر طبق نقشه شکل ۷ مشاهده می‌شود که گروه A با ۲۰ عضو در بالادست و جایی که بیشترین مقدار تغذیه جوی را دریافت می‌کند، قرار گرفته‌اند. لذا با توجه به نحوه تکامل آب زیرزمینی از تیپ بی‌کربنات به تیپ سولفات و کلروره می‌توان تیپ بی‌کربنات را برای آن‌ها در نظر گرفت.

گروه B، با ۹ عضو نسبت به دو گروه دیگر مقدار کل جامد محلول و EC و مابقی متغیرها (به استثنای بی‌کربنات که کمتر می‌باشد) حالت متوسط دارد ($EC > 2850 > 6450$). این گروه نسبت به گروه قبل مقدار سولفات افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد و با توجه به نقشه موقعیت مکانی این نقاط در سمت غرب و شمال دشت واقع شده‌اند. این نقاط معمولاً تحت تأثیر جریان‌های سیلابی سازندهای گچی بالادست قرار دارند؛ در نتیجه افزایش سولفات در آن‌ها بسیار زیاد می‌باشد.

گروه C، دارای ۶ عضو و حداکثر مقدار TDS و EC و کمترین مقدار pH می‌باشد ($EC > 6050 > 10170$). مقادیر سایر متغیرها (به جز بی‌کربنات) نیز بیشتر از مابقی گروه‌ها است. این نقاط بیشتر در مسیر جریان آب رودخانه آبگرم (محل خروجی آب انتقال داده شده توسط بند انحرافی) و در خروجی دشت در محل شوره‌زارها قرار دارند.

جدول ۳- ضرایب همبستگی ناپارامتریک (همبستگی اسپیرمن).

	EC	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na
EC	1	-.374(*)	-.473(**)	.877(**)	.831(**)	.851(**)	.867(**)	.866(**)
pH		1		-.422(*)		-.349(*)	-.406(*)	
HCO ₃			1		-.453(**)	-.578(**)		
Cl				1	.538(**)	.620(**)	.854(**)	.819(**)
SO ₄					1	.812(**)	.656(**)	.781(**)
Ca						1	.623(**)	.612(**)
Mg							1	.782(**)
Na								1

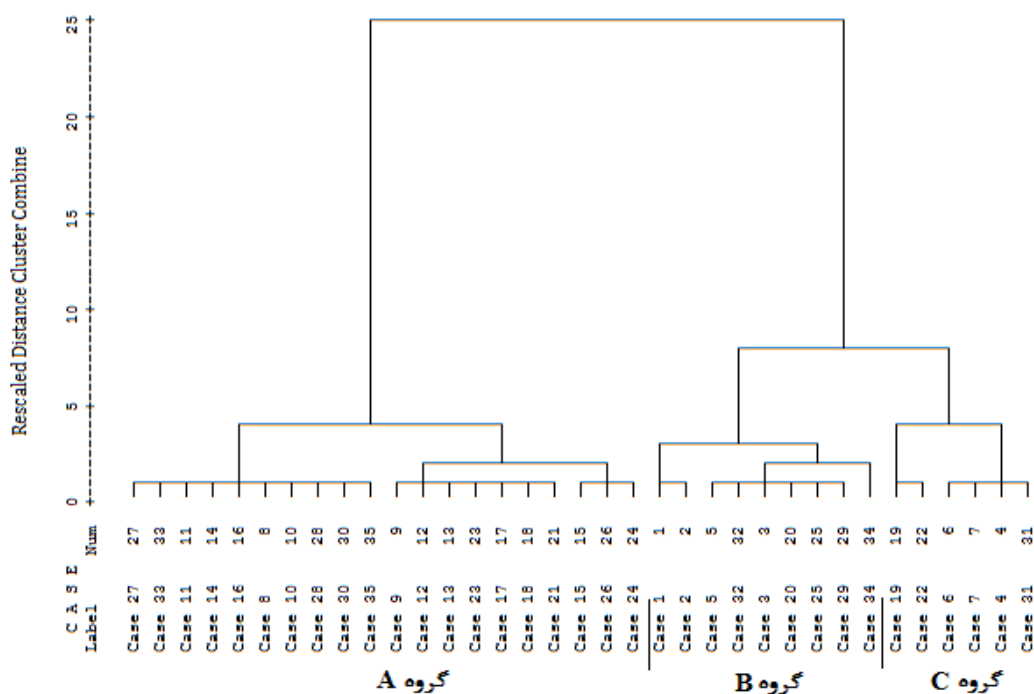
*همبستگی با سطح اطمینان ۹۵٪ **همبستگی با سطح اطمینان ۹۹٪

دلایلی را نشان می‌دهد که روند تکاملی متفاوتی از آب چاه‌های گروه C را نشان می‌دهد و نمونه ۲۲ خارج از منطقه زون بندی شده قرار می‌گیرد. نمونه‌های گروه A (به جز چاه‌های ۸ و ۱۰ که در مجاورت مرز گروه‌های A و C می‌باشند و تیپ مشابه گروه C دارند) در ناحیه ۷ مربوط به آب‌های قلیایی غیرکربناته و در ناحیه ۹ نمودار پایپر نمونه‌های ۱۷، ۱۸، ۱۲، ۱۶، ۹، ۲۳، ۱۴، ۲۱ و ۲۴ مربوط به آب‌هایی که آنیون و کاتیون غالبی ندارند و اختلاط آب‌ها را نشان می‌دهند و بیشتر در مرکز دشت و مجاور مرزهای گروه‌های A با C و B واقع شده‌اند قرار گرفته‌اند.

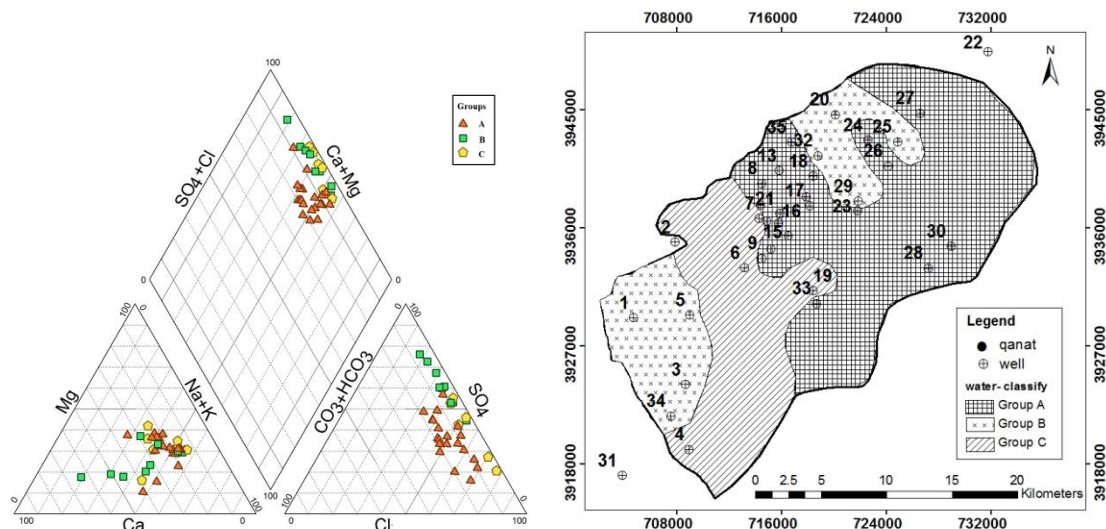
مقادیر به دست آمده از آنالیز نمونه‌های آب زیرزمینی برای هر گروه، به منظور مقایسه تیپ آب‌های مختلف بر روی نمودار پایپر ترسیم شدند. تیپ آب تابع لیتولوژی، کینتیک محلول، زمان ماندگاری و الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان می‌باشد. نمودار پایپر مشخص می‌سازد که کاتیون اصلی Na و آنیون اصلی Cl و SO₄ می‌باشند و تیپ غالب آب زیرزمینی در منطقه کلروره و سولفات سدیک و کلروره و سولفات کلسیک و منیزیک می‌باشد (شکل ۷). گروه B اکثراً در ناحیه ۶ نمودار پایپر یعنی سختی غیر کربناته قرار گرفته‌اند. گروه C به جز دو نمونه ۱۹ و ۲۲ که زیرگروهی مجزا را در نمودار شاخه درختی تشکیل داده‌اند، نیز در ناحیه ۶ واقع شده‌اند. نمونه ۱۹ قنات

جدول ۴- میانگین خصوصیات شیمیایی گروه‌های آبی.

Group	EC (μS/cm)	TDS (mg/l)	pH	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)
A	2500.6	1665.4	7.48	117.83	96.43	278.93	205.32	451.71	439.41
B	4314.44	2872.44	7.44	329.08	161.09	494.06	134.91	652.53	1428.44
C	8200	5455	7.24	474.26	380.33	993.24	191.69	1780.86	1783.55



شکل ۶- نمودار درختی منتهی از آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی.



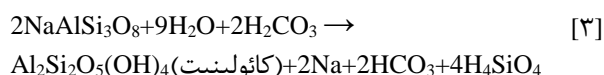
شکل ۷- موقعیت سه گروه آبی بدست آمده از روش HCA بر روی نقشه و نمودار پایپر.

رودخانه در جزین با منشأ کربناته می‌باشند بیشترین تغییرات را نشان می‌دهند.

با کمک نسبت mNa/mCl می‌توان منشأ اضافی سدیم را بررسی نمود. این نسبت در آبخوان سمنان از ۱/۶۷ تا ۰/۴ با مقدار میانگین ۱/۰۴ تغییر می‌کند و با افزایش شوری کاهش می‌یابد. نسبت‌های بیش از یک در شوری کم نشان می‌دهد که انحلال هالیت تنها منبع Na نیست و هوازدگی فلدسپات سدیم‌دار منبع دیگری از افزایش سدیم در آب زیرزمینی می‌باشد. با افزایش شوری نسبت mNa/mCl به ویژه در گروه C کاهش می‌یابد که برای این کاهش پیشنهاد فرایند تبادل کاتیونی Na در مقابل Ca و Mg پیوندی رس‌ها با افزایش نسبت $(Ca+Mg)/HCO_3$ قابل طرح می‌باشد (شکل ۹). با استفاده از نسبت مولی $Ca+Mg/SO_4$ در مقابل Na/Cl می‌توان تشخیص داد که نمونه‌هایی که در سمت شمال غرب دشت و در محدوده اطراف مرز دو گروه C و A و نزدیک ورودی رودخانه آبگرم هستند (چاه‌های شماره ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲) از مقدار نسبت مولی برابر با یک که نشان‌دهنده انحلال هالیت و ژپس می‌باشد، انحراف نشان می‌دهند. این انحراف می‌تواند نتیجه نفوذ آب شور در اثر پدیده بالآمدگی^۶ در اثر پمپاژ و پایین افتادن سطح ایستابی در این منطقه باشد (شکل ۹). با توجه به نمودار تغییرات ایزوتوپی $\delta^{18}O$ و δ^2H (شکل ۱۰)

ارزیابی هیدروشیمیایی آب زیرزمینی

نتایج آنالیزهای شیمیایی برای شناسایی فرایندهای ژئوشیمیایی و مکانیسم‌های موجود در سیستم آب زیرزمینی استفاده می‌شوند. بررسی مقادیر pH در منطقه نشان می‌دهد که در نواحی شرقی و شمال شرقی دشت مقدار pH بالاتر است و در سمت شمال غرب و محل ورود آبگرم کمترین مقدار را نشان می‌دهد. از آنجایی که سازندهای مجاور آبخوان در سمت شمال شرق و شرق دشت، اکثراً توده‌های نفوذی و آتشفشانی با مقادیر بالاتری از پلاژیوکلاز می‌باشند در نتیجه می‌توان انتظار داشت که انحلال این کانی‌ها باعث افزایش مقدار سدیم و بیکربنات و مصرف CO_2 و افزایش pH در آب زیرزمینی طبق رابطه زیر شوند.



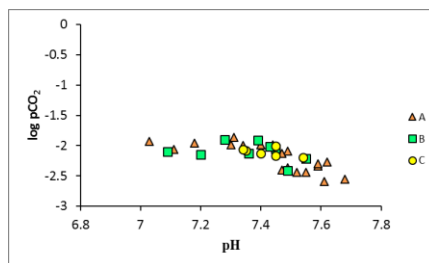
محاسبه $\log pCO_2$ با کمک نرم‌افزار PHREEQC (پورخورست و اپلو، ۱۹۹۹) و ترسیم آن در مقابل pH آب زیرزمینی (شکل ۸) همبستگی منفی و یا کاهش مقدار $\log pCO_2$ با افزایش pH را نشان می‌دهد. ضمن اینکه فشار گاز دی‌اکسید کربن نمونه‌ها بین $10^{-1/86}$ تا $10^{-2/59}$ تغییر می‌کند و بیشتر از فشار CO_2 اتمسفر ($10^{-3.5}$) می‌باشد. چاه‌های واقع در منطقه A که مجاور با سنگ‌های آذرین و در محل ورود

زمین با آب شیرین آبخوان را ترسیم نمود که از بین چاه‌هایی که قبلاً ذکر شده (چاه‌های شماره ۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۲) رد می‌شود. چاه شماره ۴ و قنات دلازیان (نمونه شماره ۱۹) اعضای انتهایی انحلال نمک می‌باشند؛ که چاه شماره ۴ در منطقه خروجی آب آبخوان واقع شده و قنات دلازیان نیز علاوه بر تبادل کاتیونی، ضمن حرکت در مسیر از محل تغذیه به محل تخلیه و افزایش تبخیر آب، از نظر انحلال نمک مقدار بالایی نشان می‌دهد (شکل ۱).

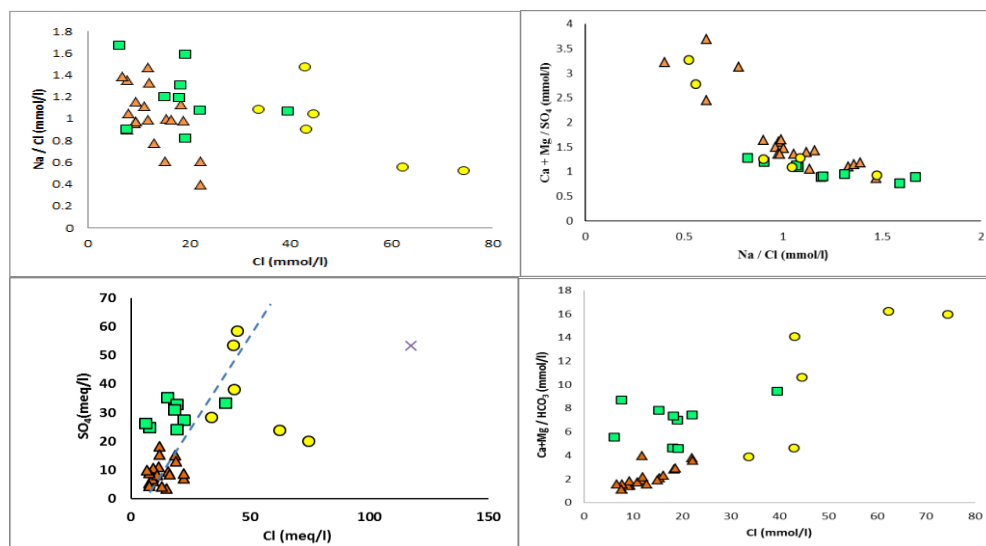
مشاهده می‌شود که چاه شماره ۷ که از نظر مکانی به محل ورود آب رودخانه آبگرم به دشت نزدیک‌تر می‌باشد از نظر ایزوتوپی روی خط اختلاط آب جوی و آب رودخانه قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده تأثیر آب رودخانه بر روی آبخوان می‌باشد. با توجه به عمق زیاد آب زیرزمینی در شمال غربی دشت رودخانه نقش تغذیه‌کننده و یا زهرسان را خواهد داشت. با توجه به نمودار SO_4 و Cl که برحسب میلی‌گرم بر لیتر ترسیم شده، می‌توان خط اختلاط بین آب شور اعماق

جدول ۵- نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های انتخابی.

نام ایستگاه	$^{18}O/^{16}O$	D/H
رودخانه آبگرم (SW)	-5.22	-39.2
چاه کشتارگاه قدیم (۷)	-7.98	-50.74
چاه تعاونی ۱۸ (۱۲)	-10.25	-58.59
چاه نظری (۸)	-9.45	-56.59
چاه زمزم (۱۴)	-8.62	-54.58
چاه امام زمان (۱۰)	-9.94	-58.26



شکل ۸- رابطه بین pH و لگاریتم فشار گاز دی‌اکسید کربن.

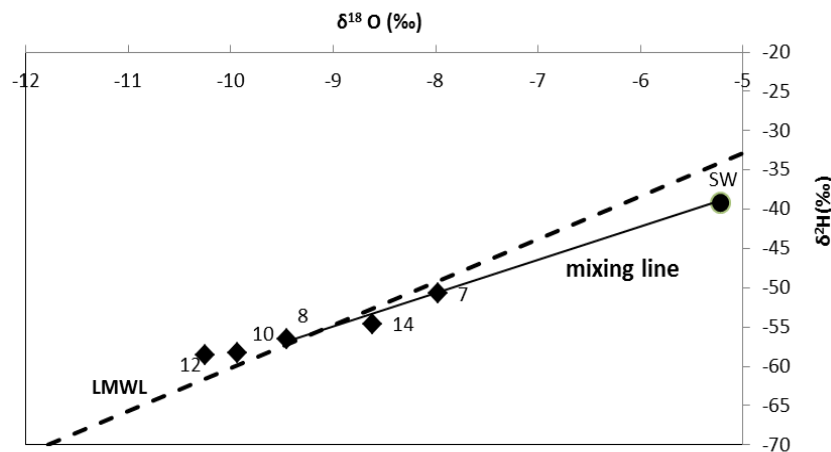


شکل ۹- رابطه بین پارامترهای شیمیایی نمونه‌های آب اندازه‌گیری شده (راهنما مانند شکل ۸ می‌باشد).

طبق نظر شولر (۱۹۷۷) برای فهم بهتر فرایند تبادل یونی در آب زیرزمینی و محیط میزبان می‌توان شاخص‌های کلروالکالین را به کار برد. شاخص‌های کلروالکالین با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند (غلظت‌ها برحسب میلی‌اکی والانت بر لیتر است):

CAI-1=[Cl-(Na+k)]/C [۴]

CAI-2=[Cl-(Na+K)]/(SO₄+HCO₃+CO₃+NO₃) [۵]



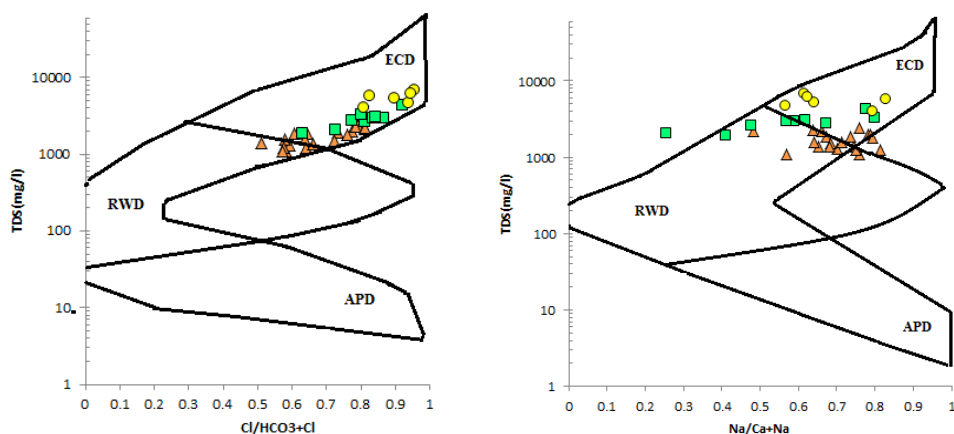
شکل ۱۰- نمودار δ¹⁸O در مقابل δ²H برای چاه‌های انتخابی و یک نمونه آب سطحی.

مقادیر نسبت وزنی Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺) در یک مقدار مشخص TDS در رنجی از اعداد کم تا زیاد تغییر می‌کنند، می‌توان نتیجه گرفت که تبادل کاتیونی بین یون سدیم و کلسیم صورت پذیرفته است؛ چرا که در طی تبادل کاتیونی مقدار TDS چندان تغییر نمی‌کند. زیرا دو مول سدیم با یک مول کلسیم جایگزین می‌شود و مقدار وزنی یک مول کلسیم (۴۰ میلی‌گرم برلیتر) برابر با مقدار وزنی دو مول سدیم (۴۶ میلی‌گرم برلیتر) می‌باشد (لو و همکاران، ۲۰۱۵).

میانگین درازمدت میزان بارندگی در استان سمنان سالانه ۱۲۰ میلی‌متر، متوسط تبخیر واقعی سالانه ۱۰۷ میلی‌متر و میانگین دمای هوای استان در سال ۱۷ درجه سانتیگراد می‌باشد. نرخ بالای تبخیر همراه با آب برگشت کشاورزی منجر به تجمع نمک در منطقه غیراشباع می‌شود، که می‌تواند به وسیله آب‌های نفوذی بعد از یک واقعه بارش قابل توجه حل شده و وارد آب زیرزمینی شود.

CAI_{1,2} برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آورده شده است. از معادلات ۱ و ۲ حدود ۵۴ درصد (تا ۱۹) مثل: چاه‌های ۵، ۱، ۲۱، ۲۰ و قنات ۱۹ شاخص کلروالکالین منفی دارند. در این موارد Ca و Mg از آب خارج شده و Na و K وارد آب زیرزمینی می‌شوند و حدود ۴۶ درصد (تا ۱۶) مانند: چاه‌های ۶، ۷، ۸، ۱۰ شاخص مثبت دارند و نشان‌دهنده اهمیت واکنش‌های تبادل کاتیونی در منطقه است.

نمودارهای گیبس را می‌توان برای بررسی ژنز شیمیایی آب زیرزمینی به کار برد. طبق نظر گیبس (۱۹۷۰) مواد محلول در آب‌های طبیعی یا در اثر واکنش سنگ و آب و یا در اثر ورودی از اتمسفر و یا در اثر تبخیر آب در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشند (سو و همکاران، ۲۰۰۹؛ زینگ و همکاران، ۲۰۱۳). نمودارها، نسبت وزنی Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺) و Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻) در مقابل TDS را نشان می‌دهند (شکل ۱۱). طبق این نمودار تبخیر و تبلور و هوازدگی سنگ‌ها کنترل کننده ترکیب آب زیرزمینی در منطقه می‌باشند. از آنجایی که

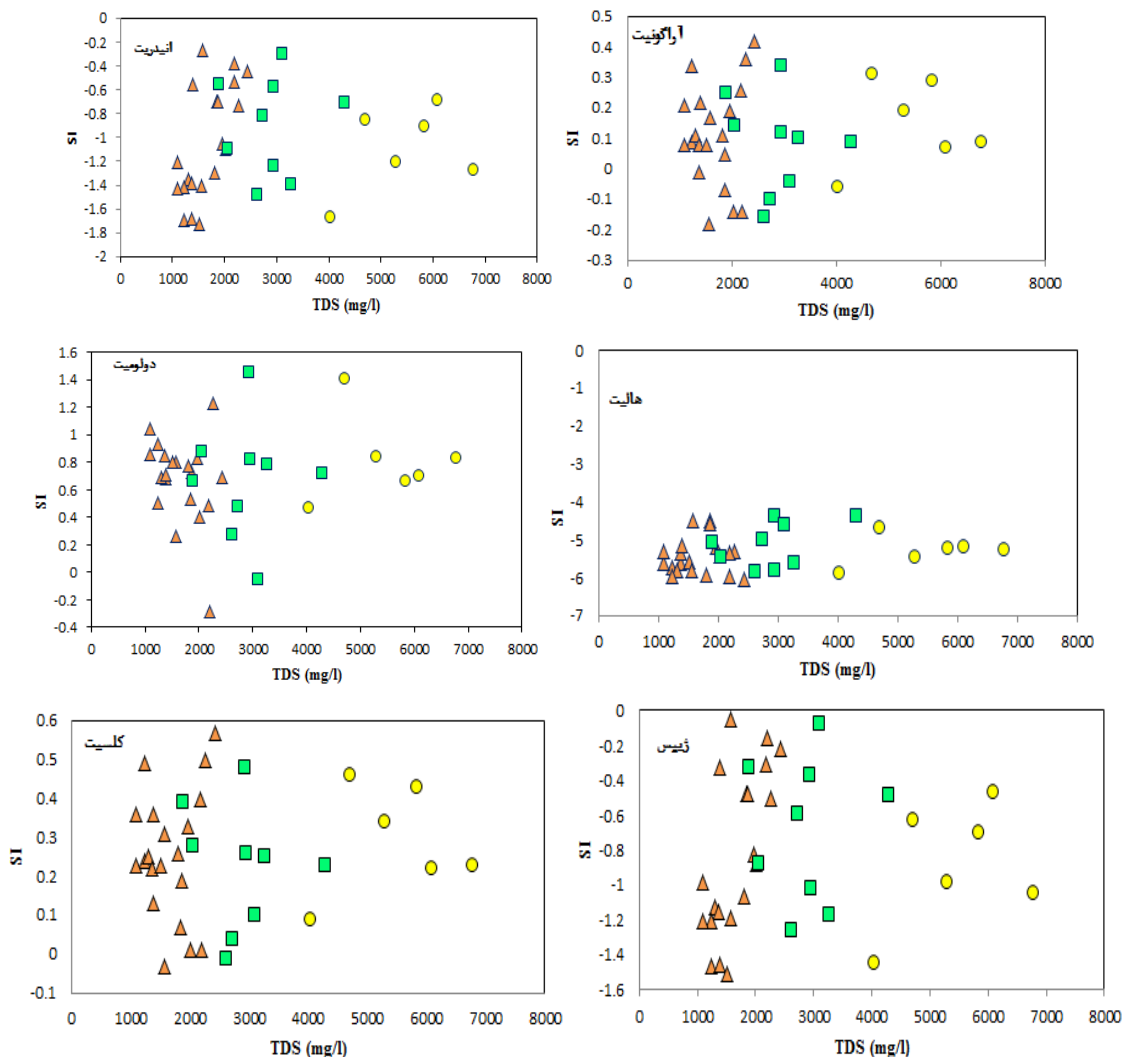


شکل ۱۱- نمودار گیبس برای نمونه‌های مورد بررسی (راهنما مانند شکل ۷).

شاخص اشباع

شاخص اشباع برای ارزیابی درجه تعادل بین کانی و آب استفاده می‌شود. تغییر در حالت اشباع کانی‌ها برای تشخیص مراحل مختلف تکامل هیدروشیمیایی مفید هستند و به تشخیص اینکه چه واکنش‌های شیمیایی برای کنترل شیمی آب مهم هستند کمک می‌کند. یک شاخص اشباع کمتر از صفر نشان می‌دهد که نمونه نسبت به آن کانی خاص غیراشباع می‌باشد. این مقدار می‌تواند منعکس کننده مشخصات آبی از یک سازند با مقادیر ناکافی از کانی برای انحلال و یا زمان ماندگاری کوتاه مدت باشد و شاخص اشباع بیشتر از صفر نشان‌دهنده این است که آب زیرزمینی نسبت به آن فاز کانی فوق اشباع می‌باشد و توانایی انحلال بیشتر از آن کانی را ندارد. چنین شاخص‌های اشباعی نشان‌دهنده خروج آب زیرزمینی از یک آبخوان با مقدار فراوانی از آن کانی با زمان ماندگاری کافی برای رسیدن به تعادل می‌باشد. با این وجود حالت فوق اشباع می‌تواند به وسیله فاکتورهای دیگری مانند انحلال نامتجانس، تاثیر یون معمول، تبخیر، افزایش سریع درجه حرارت، خروج CO_2 ایجاد شود.

شاخص اشباع برای کانی‌های ژیپس، انیدریت، کلسیت، آراگونیت، هالیت و دولومیت با استفاده از مدل تعادل هیدروژئوشیمیایی *PHREEQC* تعیین شد. شکل ۱۲ نشان دهنده مقادیر اندیس اشباع کانی‌های مختلف در مقابل TDS می‌باشد. مقدار شاخص اشباع برای کانی انیدریت در محدوده ۰/۲۷- تا ۱/۷۳- با مقدار میانگین ۱/۰۲- و ژیپس در محدوده ۰/۰۵- تا ۱/۵۱- و مقدار میانگین ۰/۸- و هالیت در محدوده ۴/۳۶- تا ۶/۰۳- با مقدار میانگین ۵/۳۳- تغییر می‌کند. اما مقادیر شاخص اشباع برای کانی‌های دولومیت از ۰/۲۵- تا ۱/۴۵ برای کلسیت از ۰/۰۳- تا ۰/۵۷ و برای آراگونیت از ۰/۱۸- تا ۰/۴۲ با مقادیر میانگین ۰/۷، ۰/۲۵ و ۰/۱۱ تغییر می‌کنند. تقریباً تمامی نمونه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت و آراگونیت اشباع و نسبت به ژیپس و هالیت و انیدریت تحت اشباع بودند. به بیان دیگر فاز کانی‌های کربناته ترکیب شیمیایی محدوده مورد مطالعه را تحت تاثیر خود قرار داده‌اند و سایر کانی‌ها در حال انحلال هستند. با بالا رفتن مقدار TDS برای نمونه‌های واقع در گروه C اندیس اشباع کانی‌ها کاهش نشان می‌دهد که این موضوع می‌تواند ناشی از مجاورت این نمونه‌ها با محل ورودی رودخانه آبگرم و احتمالاً اثر رقیق‌سازی رودخانه باشند.



شکل ۱۲- نمودار TDS در مقابل اندیس اشباع کانی‌های مختلف.

بحث و نتیجه‌گیری

غلظت بی‌کربنات را دارند. (۲) گروه B: در محدوده‌ای از آبخوان واقع شده‌اند که تحت تأثیر جریان‌ات ورودی حاوی سولفات به علت وجود سازندهای مجاور با لیتولوژی غالب گچی می‌باشند. در واقع تغذیه سفره علاوه بر بارش مستقیم بر آبخوان از طریق مخروط افکنه‌های دامنه ارتفاعات غربی و شمال شرقی نیز صورت می‌گیرد. البته وجود سنگ کف مارنی با میان لایه‌های گچی نیز در بروز تیپ سولفات بی‌تأثیر نیست. همچنین بررسی لوگ حفاری چاه اکتشافی سه‌راه مؤمن آباد، نزدیک‌ترین چاه اکتشافی به این منطقه، (شکل ۱) نشان‌دهنده وجود گچ در رسوبات آبرفتی از سطح تا عمق ۱۲۳ متر و در عمق ۱۸۲ تا ۱۹۲ متری از سطح زمین می‌باشد. (۳) گروه C: در منطقه

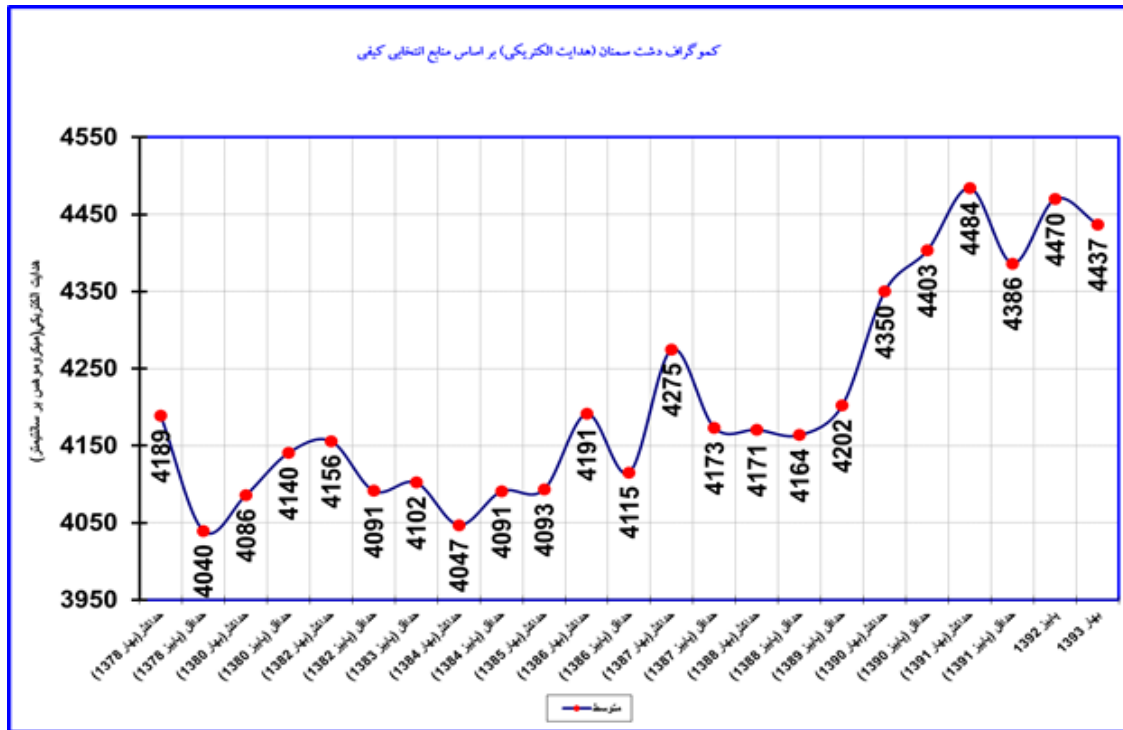
دشت سمنان واقع در شمال‌غرب استان سمنان و دارای شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک می‌باشد. آبخوان دشت به صورت آزاد و در رسوبات آبرفتی کواترنری توسعه یافته است. آب زیرزمینی این منطقه جزء آب‌های لب‌شور با سختی بالا و تیپ کلروره و سولفات می‌باشند. استخراج بیش از اندازه آب زیرزمینی باعث پایین افتادن سطح آب زیرزمینی و تغییر جهت جریان آب از جنوب به سمت شمال دشت شده است.

بر اساس آنالیز خوشه‌ای سه گروه اصلی در بین نمونه های آب زیرزمینی قابل تشخیص می‌باشد: (۱) گروه A: در منطقه تغذیه واقع شده‌اند و حداقل جامد محلول و بیشترین

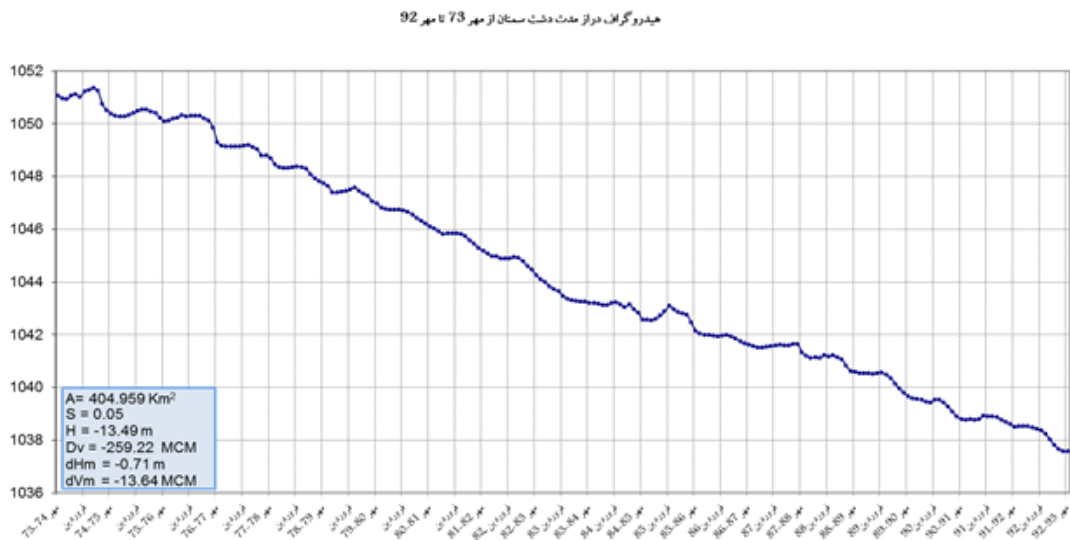
کموگراف دشت در دوره ده ساله (۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳) افزایش مقدار EC از حدود ۴۰۴۷ تا ۴۴۳۷ میکروزیمنس بر سانتیمتر را نشان می‌دهد (شکل ۱۳) که با توجه به هیدروگراف واحد دشت این افزایش همزمان با کاهش سطح ایستابی در حدود ۶ متر از حدود ۱۰۴۳ تا ۱۰۳۷ متر در مدت مشابه می‌باشد (شکل ۱۴) تغییرات زیاد EC از سال ۱۳۹۰ همزمان با انتقال آب شور رودخانه آبگرم قابل توجه است. با توجه به بالا بودن مقدار شوری در آب‌های منطقه مورد مطالعه به‌منظور مدیریت بهتر منابع آب، کاهش مقدار پمپاژ آب چاه‌های مورد بهره‌برداری به خصوص در قسمت شمال غربی دشت توصیه می‌شود. اگر چه یکی از راه کارهای جلوگیری از ورود آب شور رودخانه آبگرم در دشت سمنان انتقال آب و تخلیه آب در کویر مرکزی بوده است و همچنین پمپاژ چاه‌های نزدیک به محل ورودی رودخانه به دشت، باعث تغییر جهت جریان آب زیرزمینی شده است و تا حدودی اثر آن را کاهش می‌دهد؛ اما این راهکار تنها وقتی بازده مناسب را دارد که با استخراج در حد مجاز مانع نفوذ زبانه آب شور در چاه‌های مجاور بشود. لذا توصیه می‌شود که با تهیه مدل جریان آب زیرزمینی دشت و اندازه‌گیری زبانه آب شور رودخانه آبگرم دبی ایتیم به‌منظور بهره‌برداری از چاه‌های محدوده دشت مشخص شود. بررسی‌های دقیق‌تر آب زیرزمینی به لحاظ کیفی به اندازه‌گیری عناصر فرعی و کمیاب و اندازه‌گیری میزان نیترات و آلودگی آب دارد. همچنین کاشت گیاهان و درختانی که مقاوم به شوری می‌باشند و راهکارهای دیگری مانند آبیاری قطره‌ای و بارانی به‌منظور آبیاری بهینه با نظر کارشناس توصیه می‌شود.

تخلیه دشت و در مسیر عبور رودخانه آبگرم در دشت سمنان واقع شده و حداکثر جامد محلول و تیپ کلروره و سولفات‌ها دارند.

با کمک نمودار گیبس مشخص شد که کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر واکنش آب و سنگ و انحلال کانی‌ها و فرایند تبخیر می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص اشباعیت کانی‌ها نشان داد که نمونه‌ها نسبت به دولومیت، کلسیت و آراگونیت فوق اشباع و نسبت به هالیت، ژپس و انیدریت تحت اشباع می‌باشند و انحلال این کانی‌ها مقدار Ca، Na، Mg، SO₄ و Cl را در آب زیرزمینی تعیین می‌کند. با توجه به بالاتر بودن اندیس اشباع برای کانی دولومیت و کلسیت انحلال سنگ‌های حاوی کربنات و هوازدگی نامتجانس کانی‌های سیلیکاته بر تکامل آب زیرزمینی مشخص می‌شود. اثر سازندهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی آذرین با انحراف از نسبت یک به یک سدیم به کلر، افزایش pH و کاهش pCO₂ مشخص می‌شود. همچنین حالت نزدیک اشباع برای بعضی نمونه‌ها نسبت به ژپس و انیدریت نیز اثر سازندهای گچی ائوسن و انحلال لنزهای گچی فجن و... را مشخص می‌سازد. بر طبق نمودارهای ترسیم شده و مطالعات ایزوتوپی، نفوذ آب شور به علت وجود رودخانه آبگرم و برداشت زیاد از چاه‌های واقع در شمال غربی دشت، باعث افزایش شوری آب زیرزمینی شده است. همچنین فرایندهای تبادل کاتیونی مستقیم و معکوس نیز منجر به افزایش و یا کاهش سدیم در آب زیرزمینی شده است.



شکل ۱۳- کموگراف دشت در دوره آماری ۱۵ ساله (۱۳۷۸-۱۳۹۳) (شرکت آب منطقه‌ای سمنان).



شکل ۱۴- هیدروگراف واحد دشت در دوره آماری بیست ساله (۱۳۷۳-۱۳۹۳) (شرکت آب منطقه‌ای سمنان، ۱۳۹۳)

قدردانی می‌نماییم. همچنین مراتب تشکر خود را از کارشناسان مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای سمنان به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات و آمار ضروری و همکاری

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای سمنان و معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز به جهت تامین مالی و حمایت از این پژوهش تشکر و

- statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology journal*, 10(4), 455-474.
- Güler, C., Thyne, G.D., 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*, 285(1), 177-198.
- Hamzaoui-Azaza, F., Ketata, M., Bouhlila, R., Gueddari, M., Riberio, L., 2011. Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in Zeuss-Koutine aquifer, southeastern Tunisia. *Environmental monitoring and assessment*, 174(1-4), 283-298.
- Kazemi, G.A., 2013. Isotope composition (18O and 2H) in precipitations of Shahrood area. *Proceedings of the 1st National Conference on Application of Stable Isotopes, Mashhad, May*, 54-60.
- Kumar, M., Ramanathan, A.L., Keshari, A.K., 2009. Understanding the extent of interactions between groundwater and surface water through major ion chemistry and multivariate statistical techniques. *Hydrological Processes*, 23(2), 297.
- Liu, F., Song, X., Yang, L., Zhang, Y., Han, D., Ma, Y., Bu, H., 2015. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Hydrology and Earth System Science*, 19, 551-565.
- Mohammadi, Z., Zare, M., Sharifzade, B., 2012. Delineation of groundwater salinization in a coastal aquifer, Bousheher, South of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 67(5), 1473-1484.
- Nosrati, K., Van Den Eeckhaut, M., 2012. Assessment of groundwater quality using multivariate statistical techniques in Hashtgerd Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 65(1), 331-344.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version2): a computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. *Water Resources Investigations, report 99-4259, US Geological Survey, Denver, Colorado*.
- Sahraei Parizi, H., Samani, N., 2013. Geochemical evolution and quality assessment of water resources in the Sarcheshmeh copper mine area (Iran) using multivariate statistical techniques. *Environmental earth sciences*, 69(5), 1699-1718.
- Schoeller, H., 1977. *Geochemistry of groundwater. In: Groundwater studies- An International guide for research and practice. Paris: UNESCO, Ch. 15, 1-18*.
- Singh, C.K., Shashtri, S., Mukherjee, S., 2011. Integrating multivariate statistical analysis with GIS for geochemical assessment of groundwater quality in Shiwaliks of Punjab, India. *Environmental Earth Science* 62, 1387-1405.
- Su, Y. H., Zhu, G. F., Feng, Q., Li, Z. Z., Zhang, F. P., 2009. Environmental isotopic and hydrochemical study of groundwater in the Ejina Basin, صمیمانه ایشان ابراز می‌نماییم. نویسندگان همچنین بر خود لازم می‌دانند از داوران مقاله به جهت نظرات مفید و ارزنده‌شان تشکر و قدردانی نمایند.
- منابع
جلالی، ل.، اصغری مقدم، ا.، ۲۰۱۳. تشخیص وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری در سفره آب زیرزمینی دشت خوی به روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. *محیط‌شناسی*, ۳۹(۲)، ۱۱۳-۱۲۲.
درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی ایران: تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم، انتشارات سپهر، تهران، ۴۳۴ ص.
شرکت آب منطقه‌ای سمنان، ۱۳۹۳، مطالعات پایه منابع آب، سمنان، ایران.
شرکت مهندسی مشاور پنگان آوران، ۱۳۸۸، مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی سمنان، فصل دوم هیدروژئولوژی، ۱۲۵ ص.
نبوی، م.ح.، ۱۳۵۳، نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ی سمنان، چهارگوش شماره ۶۶۶۱ سری ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.
Aghazadeh, N., Mogaddam, A. A., 2011. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1-4), 183-195.
Appelo, C.A.J., Postama, D., 2006. *Geochemistry, groundwater and pollution. CRC press, Amsterdam*, 649 p.
Baghvand, A., Nasrabadi, T., Bidhendi, G. N., Vosoogh, A., Karbassi, A., Mehrdadi, N., 2010. Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert. *Desalination*, 260(1), 264-275.
Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3), 294-313.
Davis, J. C., 2002. *Statistics and data analysis in geology, 3rd edn. Wiley, New York*, 656 p.
Drever, J.I., 1997. *The geochemistry of natural waters, 3rd edn., New Jersey: Prentice-Hall*, 436 p.
Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice-Hall*, 604 p.
Gibbs, R. J., *Mechanism Controlling World Water Chemistry, Science*, 1970, 170: 1088- 1090.
Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, K.A., 2002. *Evaluation of graphical and multivariate*

- along flow paths in the North China Plain, Journal of Asian Earth Sciences, 70-71, 250-264.*
- Yidana, S.M., 2010. Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. Journal of African Earth Sciences, 57(5), 455-469.*
- northwest China. Environmental geology, 58(3), 601-614.*
- Tizro, A. T., Voudouris, K. S., 2008. Groundwater quality in the semi-arid region of the Chahardouly basin, West Iran. Hydrological processes, 22(16), 3066-3078.*
- Xing, L., Guo, H., Zhan, Y., 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes*